



# วิทยานิพนธ์

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์  
จาก ไม้ตง และ ไม้หมาจู้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF  
ACTIVAED CARBON FROM  
*DENDROCALAMUS ASPER BACKER*  
AND *DENDROCALAMUS LATIFLORUS*

นาย ปรีนทร เต็มญารศิลป์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี)

### ปริญญา

เคมีอนินทรีย์	เคมี
สาขา	ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู้

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

นามผู้วิจัย นาย ปรีนทร เต็มญารศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( รองศาสตราจารย์อภิสิทธิ์ สุงสะเสน, Ph.D. )

กรรมการ

( อาจารย์พรพรรณ พรศิลป์, Ph.D. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์วีระศักดิ์ อุดมโชค, D.Tech. Sc. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุจรี ประสิทธิ์พันธ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ \_\_\_\_\_ เดือน \_\_\_\_\_ พ.ศ. \_\_\_\_\_

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู้

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

โดย

นาย ปรินทร์ เต็มญารศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี)

พ.ศ. 2551

ปริณิทร เต็มญารศิตปี 2551: การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง และ ไม้หน่าจู้ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี ประชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์อภิสิทธิ์ สุงสะเสน, Ph.D. 277 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม และ วิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง และ ไม้หน่าจู้ อายุ 1-3 ปี จากบริเวณ จังหวัด กาญจนบุรี โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี ซึ่งสารที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ กรด ฟอสฟอริก โพลแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ และ กรดไนตริก ผลของการศึกษาพบว่า สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ องค์ประกอบแบบประมาณ และความสามารถในการดูดซับ ขึ้นกับ พันธุ์และชนิดของไม้ไผ่ ชนิดของสาร กระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารกระตุ้น และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น นอกจากนี้ได้ ทำการศึกษาการดูดซับ แคลเซียม (II) สีย้อมเมทิลีนบลู ฟีนอล และ ไอโอดีนจากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัม มันต์และถ่านไม้ไผ่ที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า และยังได้ทำการศึกษา องค์ประกอบแบบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย และ คาร์บอนคงตัว รวมถึง ได้อาศัยเทคนิคฟลูออรีร์ ทรานซฟอรัมอินฟราเรด และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ผิวและ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนั้น จะทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ 2 แบบ คือ แบบ แลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า ไอโซเทอร์มในการดูดซับสาร ทุกชนิดจะมีลักษณะเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ในการดูดซับแคลเซียม (II) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 0.19 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า สามารถดูดซับได้ 0.12 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในการดูดซับเมทิลีนบลู ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หน่าจู้ อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 14.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า สามารถ ดูดซับได้ 333.33 และ 15.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในการดูดซับฟีนอล ถ่านไม้ไผ่ตงอายุ 3 ปี ที่ไม่ผ่าน การกระตุ้น สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 2.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทาง การค้า สามารถดูดซับได้ 2.59 และ 2.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ ในการดูดซับไอโอดีน ถ่านกัมมันต์ จากไม้ไผ่หน่าจู้ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 4.20 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า สามารถดูดซับได้ 9.69 และ 6.86 มิลลิกรัมต่อ กรัม ตามลำดับ

Parinthorn Temyarasilp 2008: Preparation and Characterization of Activated Carbon from *Dendrocalamus asper Backer* and *Dendrocalamus Latiflorus*. Master of Science (Chemistry), Major Field: Inorganic Chemistry, Department of Chemistry. Thesis Advisor: Associate Professor Apisit Songsasen, Ph.D. 277 pages

The preparation and characterization of activated carbon from *Dendrocalamus asper Backer* (DB) and *Dendrocalamus Latiflorus* (DL), 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 including proximate analysis, adsorption capacities depended on the type of precursors (breeds and ages of bamboos), chemical agents and activation conditions such as chemical concentrations, time of activation. In addition, the adsorption of cadmium, methyleneblue, phenol and iodine from aqueous solutions were also studied and compared with commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal. Finally, the functional groups and structures of activated carbon were studied by fourier transform infrared spectrometer (FTIR) and scanning electron microscope (SEM).

The adsorption capacities of cadmium (II), methyleneblue, phenol and iodine were fitted with Langmuir isotherm more than Frundlish isotherm as considered from the correlation coefficient. For the adsorption of cadmium (II), the activated carbon from 2 years of DB that activated by KOH, had the highest adsorption capacity, 0.19 mg/g, while commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal were 0.12 and 0.08 mg/g respectively. For the adsorption of methyleneblue, the activated carbon from 3 years of DL that activated by KOH, had highest adsorption capacity, 14.75 mg/g, while commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal were 333.33 and 15.29 mg/g respectively. For the adsorption of phenol, the charcoal from 3 years of DB had highest adsorption capacity, 2.66 mg/g, while commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal were 2.59 and 2.51 mg/g respectively. Finally, for the adsorption of iodine, the activated carbon from 2 years of DL that activated by KOH, had highest adsorption capacity, 4.20 mg/g, while commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal were 9.69 and 6.89 mg/g respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อภิสิทธิ์ สุงสะเสน ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ ดร.พรพรรณ พรศิลป์ และ รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมโชค กรรมการที่ปรึกษาสาขา  
วิชาเอก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่ง  
เสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วัลลภ อารีรบ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณา  
ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน (โรงเรียนสมาคมสตรีไทย  
โรงเรียนหอวัง และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็น  
ประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้เป็นประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่าน  
ของภาควิชาเคมี และ สำนักงานเลขานุการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความ  
ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่บิดา มารดา และ  
ญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และ ให้กำลังใจด้วยความรัก ความอบอุ่น และส่งเสริม  
ด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปริญทร เต็มฉัตรศิลป์

กุมภาพันธ์ 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
สารคัดตีดผิว	2
ถ่านกัมมันต์	3
การดูดซับ	31
ไม้ไผ่	49
โลหะหนัก	56
ฟีนอล	62
เมทิลลีนบลู	65
น้ำส้มควันไม้	67
วัตถุประสงค์	75
การตรวจเอกสาร	76
อุปกรณ์และวิธีการ	82
เครื่องมือ และ อุปกรณ์	82
สารเคมี	83
วิธีการ	85
ผลและวิจารณ์	129
สรุปและข้อเสนอแนะ	271
เอกสารอ้างอิง	278

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	7
2	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด	7
3	สารเคมี ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ในการเตรียมถ่านกัมมันต์	17
4	คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	24
5	สมบัติต่างๆของแคะเมียม	57
6	สมบัติต่างๆของฟินอล	62
7	สมบัติต่างๆของเมทิลลินบลู	65
8	แสดงสารอินทรีย์ชนิดต่างๆในน้ำส้มควันไม้	70
9	แสดงสมบัติของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ	71
10	ประโยชน์ของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ	74
11	น้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างการเผาให้เป็นถ่าน	129
12	แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าการดูดซับฟินอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ	137
13	ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบประมาณ	138
14	แสดงค่าเลขคลื่นของแถบต่างๆที่เกิดขึ้นในอินฟราเรดสเปกตรัม พร้อมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	141
15	ลักษณะสเปกตรัมจากเทคนิคฟลูออริสเซนส์ของอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	152
16	แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และ ถ่าน ไม้ไฟแต่ละชนิด ที่เหมาะสมในการดูดซับแคะเมียม	167
17	แสดงความเป็นกรดต่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคะเมียมของถ่านกัมมันต์ และ ถ่าน ไม้ไฟ แต่ละชนิด	172
18	แสดงเวลาสัมผัส ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคะเมียม ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่าน ไม้ไฟ แต่ละชนิด	177
19	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์ม การดูดซับแคะเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช	191



### สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
20	ค่าคงที่การดูดซับแคคเคเมียมของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	194
21	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลีนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	198
22	แสดงเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลีนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	203
23	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับเมทิลลีนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	208
24	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์ม การดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช	216
25	ค่าคงที่การดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	219
26	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	223
27	แสดงเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	227
28	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	232
29	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์ม การดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช	240
30	ค่าคงที่การดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	243
31	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	247

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
32	แสดงเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	251
33	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	256
34	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์ม การดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช	264
35	ค่าคงที่การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	267
36	แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไผ่ตง และ ไผ่หมาจู้	270

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	8
2	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล	10
3	การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	13
4	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี	16
5	ปฏิกิริยาระหว่าง เซลลูโลส กับ กรดฟอสฟอริก	18
6	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	20
7	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	22
8	แผนภาพอธิบายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์	23
9	เปรียบเทียบการกระจายรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบและวิธีที่ใช้ผลิต	27
10	กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์	36
11	ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นที่อยู่กับขนาด	36
12	ภาพแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์	37
13	ไอโซเทอร์มการดูดซับ	43
14	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ $C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	45
15	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_c}{X/m}$ และ $C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	45
16	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_c \left( \log \frac{X}{m} \right)$ และ $\log C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟลอยด์ลีช	47
17	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ และ $\left( \frac{P}{P^0} \right)$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ บรูเนาเออร์ แอมเมทท์ และ เทลเลอร์	48
18	แสดงลักษณะของไผ่ตง ( <i>Dendrocalamus Asper Backer</i> )	52
19	แสดงลักษณะของไผ่หมางู ( <i>Dendrocalamus Latiflorus</i> )	54
20	สูตร โครงสร้างฟีนอล และ ตัวอย่างอนุพันธ์ของฟีนอล	63
21	สูตร โครงสร้างเมทิลลีนบลู	65

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงการเปรียบเทียบการดูดซับไอโอดีน ของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 2 และ 3 ปี ระหว่างที่เผาที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส	130
23	แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่อ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เข้มข้น ร้อยละ 85 ที่เวลาต่างกัน	133
24	แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกใน อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน	133
25	แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	135
26	แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ ที่เวลาต่างๆกัน	135
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัว และ ความสามารถในการดูดซับ ของแลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	140
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัว และ ความสามารถในการดูดซับ แก๊สมีเทน	140
29	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka	142
30	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของไม้ไผ่ Bunton	142
31	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	143
32	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	143
33	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	144
34	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	144
35	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	145

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	145
37	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	146
38	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	146
39	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	147
40	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	147
41	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	148
42	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	148
43	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	149
44	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	149
45	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	150
46	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	150
47	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	151
48	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	151
49	สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ Fluka ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	156

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	157
51	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 3 ไมโครเมตร	157
52	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	158
53	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	158
54	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	159
55	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	159
56	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	160
57	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 3 ไมโครเมตร	160
58	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	161
59	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	161
60	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	162
61	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	162

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
62	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	164
63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่าง กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	169
64	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	174
65	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	178
66	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี	179
67	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี	181
68	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี	183
69	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี	185
70	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี	187
71	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี	189
72	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของเมทิลดีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	195
73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของเมทิลดีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	200

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	205
75	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	209
76	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี	210
77	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี	211
78	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี	212
79	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี	213
80	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี	214
81	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี	215
82	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	220
83	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	224
84	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	229
85	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	233



### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
86	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้ตง อายุ 1 ปี	234
87	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้ตง อายุ 2 ปี	235
88	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้ตง อายุ 3 ปี	236
89	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้หมาจู้ อายุ 1 ปี	237
90	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้หมาจู้ อายุ 2 ปี	238
91	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไม้หมาจู้ อายุ 3 ปี	239
92	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	244
93	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	248
94	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	253
95	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ ไม้ทางการค้า	257
96	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ ไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ตง อายุ 1 ปี	258
97	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ ไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ตง อายุ 2 ปี	259

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
98	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี	260
99	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี	261
100	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี	262
101	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี	263

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

kg	=	กิโลกรัม
m <sup>2</sup> /g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
Å	=	อังสตรอม
nm	=	นาโนเมตร
µm	=	ไมโครเมตร, ไมครอน
°C	=	องศาเซลเซียส
cm <sup>3</sup> /g	=	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
g/cm <sup>3</sup>	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
mg/g	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
lb./Cu.ft	=	ปอนด์ต่อคิวบิกฟุต
kJ/mol	=	กิโลจูลต่อโมล

## การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู้

### Preparation and Characterization of Activated Carbons from *Dendrocalamus asper* Backer and *Dendrocalamus Latiflorus*

#### คำนำ

#### 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจาก ปัจจุบันมีมลสารที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ และปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมากมาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์รวมทั้งการสะสมในแหล่งน้ำ 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 หากไม่มีการกำจัดที่ดีพอ โลหะหนักเหล่านี้ก็จะปนเปื้อนไปกับน้ำทิ้งซึ่งปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะในชั้นสุดท้าย

การใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยการดูดซับ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) เป็นวัสดุที่มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพราะแม้ประเทศไทยจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้ แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการ 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 ไม้ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Becker) และ ไม้ไผ่หมาจู้ (*Dendrocalamus Latiflorus*) เพื่อศึกษาถึงสมบัติและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและมีมากในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์

## 2. สารดูดติดผิว

สารดูดติดผิวหรือสารดูดซับ (adsorbent) คือสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก (bone char), แอคติเวทเต็ดซิลิกา (activated silica) ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ สามารถจับโมเลกุลได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2.2 ถ่านกัมมันต์ หรือแอคติเวทเต็ดคาร์บอน (activated carbon) สารดูดติดผิวชนิดนี้อาจจัดว่าเป็น สารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

2.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ชนิดพิเศษสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์) แต่อย่างไรก็ตามเรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่า คือ สามารถปรับคืนสภาพ (regenerate) ได้ง่ายกว่ามาก และสารที่ใช้ในการปรับคืนสภาพ (regenerant) มักเป็นสารที่ราคาถูก เช่น เกลือแกง

ส่วนการดูดติดผิวหรือการดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊ส ให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปฏิกิริยาเช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent ซึ่งก็คือถ่านกัมมันต์นั่นเอง

### 3. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยกระบวนการถ่านกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์ เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ แกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้น ไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า (เพียรพรรค ทศกร, 2535)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม (angstrom: Å) ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูง และ มีความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ วิธีวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะ

ของสารดูดซับ (nature of adsorbate) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) และเวลาในการสัมผัส (contact time)

### 3.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติในการดูดซับในของเหลวของถ่านเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 แต่คุณสมบัติในการดูดแก๊ส เพิ่งมีผู้บันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1785 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจในคุณสมบัติเหล่านี้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1811 มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งพบว่าถ่านที่ได้จากการเผากระดูกสัตว์สามารถดูดซับได้มากกว่าถ่านซึ่งได้มาจากถ่านไม้ จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาดบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการพัฒนาต่อมาจนกระทั่งปี ค.ศ. 1822 มีผู้พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาของผสมระหว่างเลือดสัตว์กับขี้เถ้า (potash) มีคุณสมบัติในการดูดซับมากกว่าถ่านกระดูกประมาณ 20 – 50 เท่า แต่ไม่สามารถจะผลิตได้มากเพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมาประมาณ ค.ศ. 1900 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ คิดค้นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่โดยเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอน ไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่างๆ เช่น ชื่อ เอพอนิท (Eponit) ผลิตขึ้นในยุโรปในปี ค.ศ. 1909, นอริท (Norit) ผลิตในปี ค.ศ. 1911 และ คาร์โบราฟฟิน (Carboraffin) ผลิตในปี ค.ศ. 1915 และในอเมริกาได้ผลิต ฟิลท์ชาร์ (Filtchar) ขึ้นในปี ค.ศ. 1913 และได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ๆ ไปเรื่อยๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดซับ ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ดีกว่าถ่านกระดูกมาก

คุณสมบัติในการดูดกลืนและแก๊สของถ่านกัมมันต์ เริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้าที่ป้องกันแก๊สพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในคุณสมบัติการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีต่างๆพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้าที่ป้องกันแก๊สพิษ เพราะมีลักษณะพองและเบา และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น สำหรับใช้ดูดแก๊สโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมาเมื่อสงครามสิ้นสุดลง การค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดไอของสารละลาย (solvent) ดูดไอเบนซิน (benzene) จากแก๊สอื่นๆ โดยถ่านที่ผลิตจากไม้ขี้เลื่อย พิกนิกไนท์ และกากที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากใยเซลลูโลส จะได้ถ่านที่มีลักษณะพองและเบา

เหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลาอะพรวัวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดซับแก๊สได้ดี

### 3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ

#### 3.2.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. เคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิวลาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. ฟิสิกส์ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

#### 3.2.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนบนฟิวลาร์บอน

ก. ขนาดเล็ก (micropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร (nm) มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (transitional pores or mesopores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 -100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction)

ค. ขนาดใหญ่ (macropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และผลิตยา

#### 3.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

ก. ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น



ข. ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษ หรือไอระเหย

### 3.2.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ ก๊าซ และ ไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. สำหรับดูดซับสี (colour adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้เผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และ ถ่านจากกากน้ำตาล

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

### 3.2.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

ก. ประเภทเป็นผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด

ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (AWWA) แสดงดังตารางที่ 1

ข. ประเภทเป็นเม็ด (pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

1) Pellet activated carbon มีรูปร่างขึ้นอยู่กับเครื่องอัด ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใสแล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำหน้ากากป้องกันแก๊ส และไอพิษต่างๆ

2) Granular activated carbon มีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใสแล้วบริสุทธิ์

ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (AWWA) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20 – 0.75

ที่มา: มาตรฐานอุตสาหกรรม (2547)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่น้อยกว่า	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

ที่มา: มาตรฐานอุตสาหกรรม (2547)

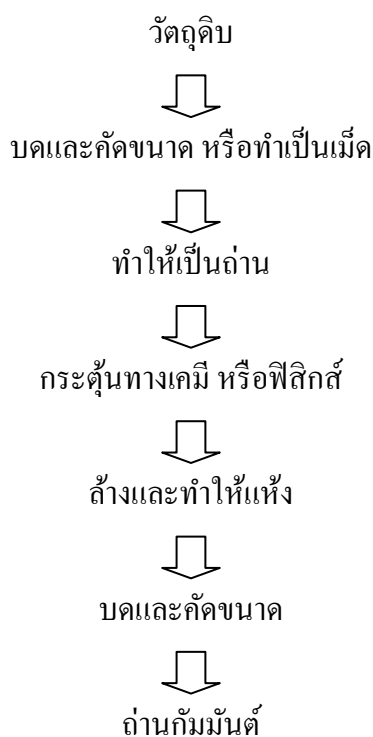
### 3.2.6 แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อละลายน้ำ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl)

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน (quinine) ฟีนอล (phenol) และ คาร์บอกซิเลท (carboxylate)

### 3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์ (processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน และ ขั้นตอนการกระตุ้น ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

### 3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น จี๊เลื้อย กะลา มะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน และพีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยากก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ (บุญชัย ตระกูลหทัย , 2536)

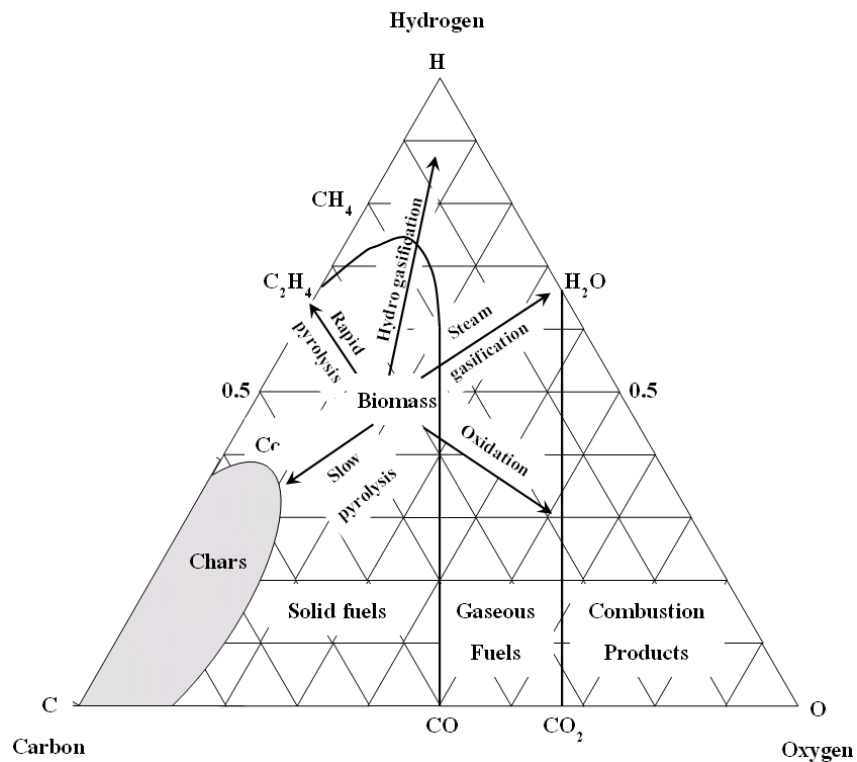
นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ซึ่ง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือฟุ้งกระจายได้ง่าย แล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นขั้นตอนต่อไป

### 3.4.2 การทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่าย โดยการเผาในที่ อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม ที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือ ในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้ เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์ และแก๊ส (Kohoan and Barkordor, 1979)

กระบวนการแปรรูปโดยความร้อน ได้แก่ ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และการเผาไหม้ โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะแสดงในภาพที่ 2



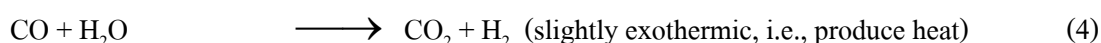
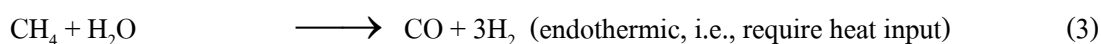
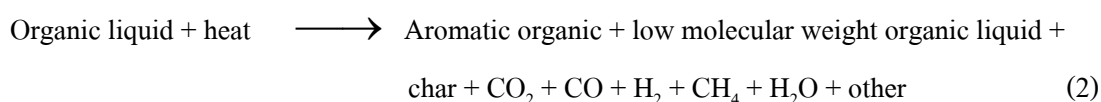
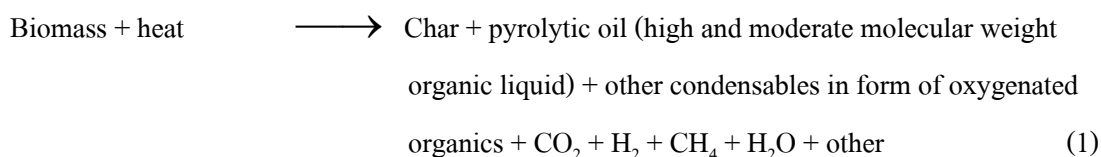
ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล

ที่มา: Probstien และ Hick (1985)

Kohoan และ Barkordor (1979) ได้ให้คำนิยามกว้างๆของกระบวนการไพโรไลซิส ว่าเป็นเทคโนโลยีที่วัตถุดิบประกอบไปด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เกิดการสลายตัวทางความร้อน โดยมีบริเวณอย่างน้อยหนึ่งบริเวณ ที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และได้อธิบายถึงความแตกต่างของวิธีการไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ว่า พื้นฐานของกระบวนการเหล่านี้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง

ไพโรไลซิสโซน เป็นส่วนที่มีออกซิเจนน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้ทางทฤษฎีเผาไหม้ อากาศระหว่างร้อยละ 25 – 50 เป็นส่วนแก๊สซิฟิเคชัน และส่วนของการเผาไหม้มีอากาศตั้งแต่ ร้อยละ 100 ขึ้นไป

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อน จะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่อะไรที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และ ชาร์ ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสพวกชีวมวลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1 ถึง 4



การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้า และแบบรวดเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ (local equilibrium) โดยอัตรา การให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

คาร์บอนไอซ์เซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไอซ์เซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนซ์เซชัน หรือ ก็คือการทำการกระตุ้นนั่นเอง

วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้น ต้องการคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

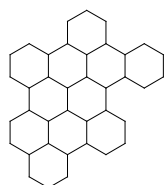
- สารระเหยต่ำ
- ค่าคาร์บอนคงตัวสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็ง ไม่เปราะ ทนต่อการขัดสี

ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นการทำการคาร์บอนไนซ์ให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์ แล้วเป็นโค้ก การคาร์บอนไนซ์เซชันให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ ทำได้โดยปรับสภาวะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ

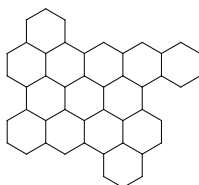
#### ก. อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุล วงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่

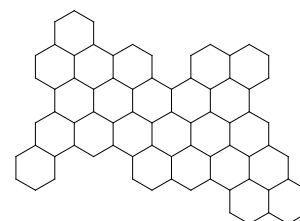
เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ดังภาพที่ 3 ส่วนโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ



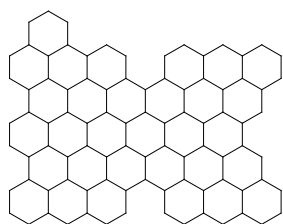
(a) 400 °C



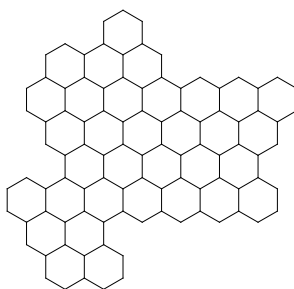
(b) 510 °C



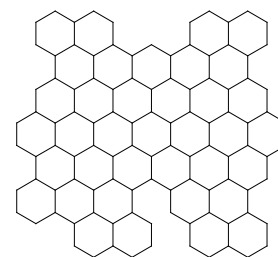
(c) 610 °C



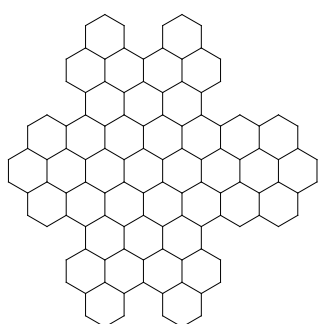
(d) 700 °C



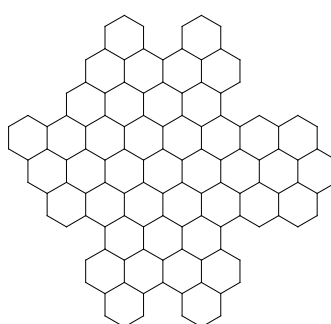
(e) 800 °C



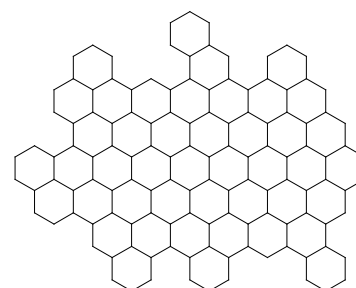
(f) 900 °C



(g) 1,000 - 1,100 °C



(h) 1,200 °C



(i) 1,300 °C

**ภาพที่ 3** การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

ที่มา: Hassle (1974)



สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอไนซ์เซชัน เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอไนซ์เซชัน เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอไนซ์ลดลง และเมื่อถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น เมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง

#### ข. อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว

ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือจะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์เซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากระตุ้น ตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

#### ค. ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอไนซ์เซชันโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดเบดจะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิด-

ไคซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันก็เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น

การคาร์บอนไนซ์เซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัว ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้เกิดหลอดออกมาจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรง (Bansal, 1988)

### 3.4.3 การกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

Mukherjee และ คณะ (1947) ได้พิจารณาความหมายของการถูกกระตุ้นไว้ 3 ความหมาย คือ

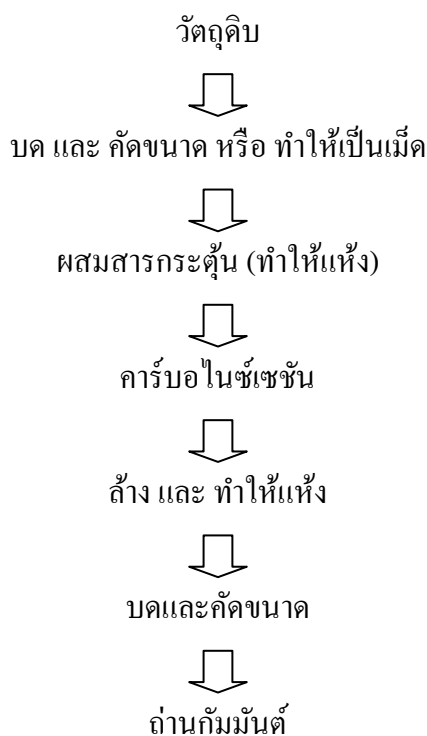
- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกระตุ้น ไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สาเหตุหนึ่งเนื่องจากว่าวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะ และชนิดของวัสดุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ

ก. วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น แสดงดังภาพที่ 4 และ ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 °C) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแสดงในตารางที่ 3 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

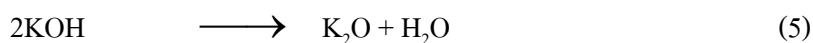
ตารางที่ 3 สารเคมี ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก ( $H_3BO_3$ )	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ )
กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaCl <sub>2</sub> )	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl <sub>2</sub> )
กรดไนตริก ( $HNO_3$ )	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ ( $K_2S$ )
กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )		โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN)
		แคลเซียมฟอสเฟต ( $Ca_3(PO_4)_2$ )
		แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl <sub>2</sub> )

ที่มา: <http://www.wikipedia.org>

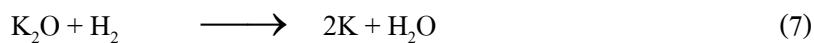
1) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ กลไกของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง แสดงดังนี้



สมการที่ 5 และ 6 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็น โพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยา

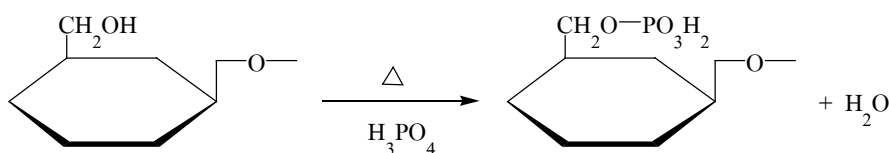
แก๊สซิเฟชันจากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa, Tanibata and Itoh, 1993)

## 2) การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )

กรดฟอสฟอริกเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุคิบได้อย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่ม พบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลนั้นทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน



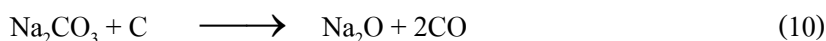
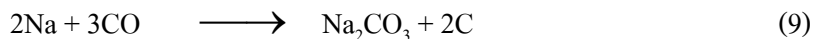
ภาพที่ 5 ปฏิกริยาระหว่าง เซลลูโลส กับ กรดฟอสฟอริก

ที่มา: ฉัฐยา พูนสุวรรณ (2545)

## 3) การกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ )

เมื่อนำเอาวัสดุคิบที่ต้องการที่เป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของฟลิกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม มีดังนี้



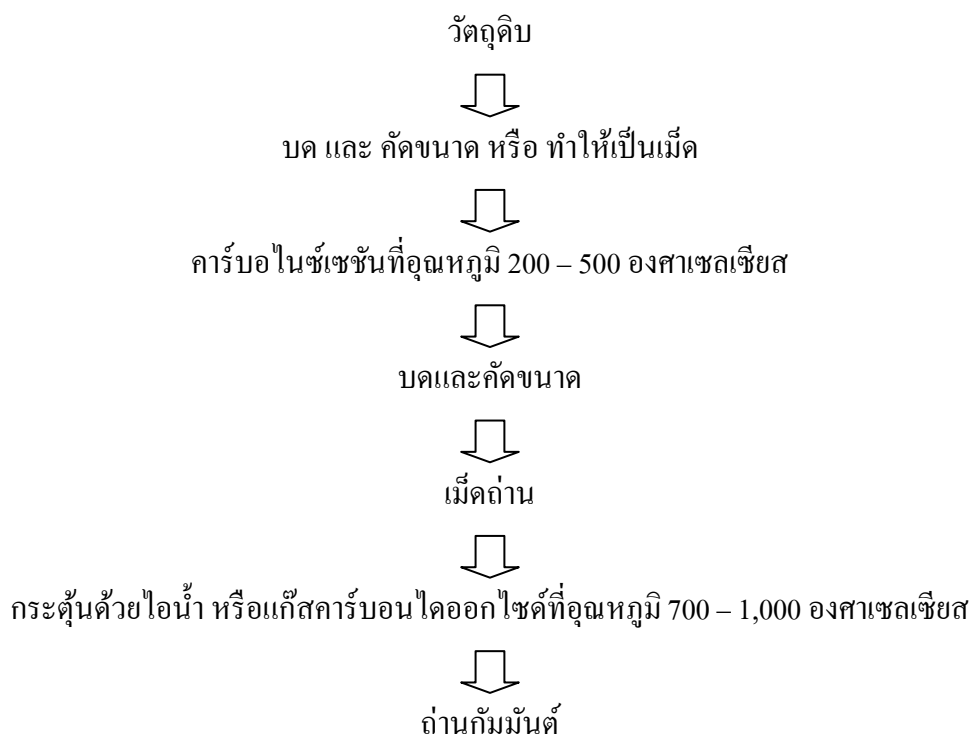
#### ข. วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ฯลฯ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และอากาศ (air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ (Hassler, 1967)

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700–1200 องศาเซลเซียส) ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

จากการกระตุ้นถ่านชาร์ พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิ 800 – 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

กระบวนการกระตุ้น คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดส์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์เซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นมาด้วย

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ตัวทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้ามาอบผิวของอนุภาคและแพร่เข้าไปในรู ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์จะต่ำเป็นผลให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอัตราการแพร่ของตัวออกซิไดซ์เข้าไปในอนุภาค ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดรูพรุน

อัตราเร็วของกระบวนการออกซิเดชัน ถูกกำหนดโดยความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของถ่านกับตัวออกซิไดซ์ ถ้าความว่องไวสูงก็จะทำให้อุณหภูมิต่ำเหมาะสมต่ำ พบว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินบิทูมินัส ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์แอนทราไซต์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอ้ไน้และออกซิเจน พบว่า ออกซิเจนจะมีความสามารถสูงที่สุด โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถต่ำที่สุด

### 3.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

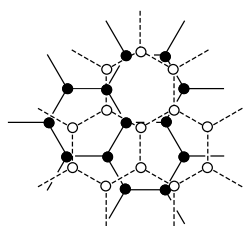
#### 3.4.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอน ที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย

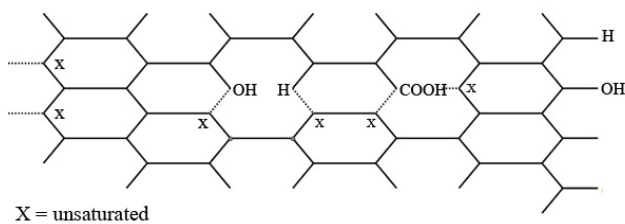


เมื่อศึกษาด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชันพบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย โครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันใน แนวราบ การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆจะมีทิศทางไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอน-ไนซ์เซชันผลึกเล็กๆนี้มักมีความสูง 9 – 12 อังสตรอม กว้าง (เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัด) ประมาณ 20 – 30 อังสตรอม ประกอบด้วยแผ่นราบของชั้นระนาบแกรไฟต์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างของอะตอมคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม (ภาพที่ 7)

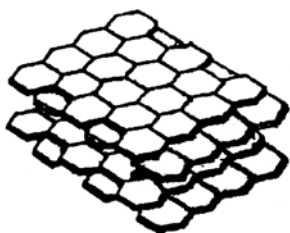
โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และ เวลาในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของ ผลึก ตัวอย่างเช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ง่ายที่อุณหภูมิสูง (easily undergoing graphitization) และ โครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เพียงเล็กน้อย (ที่สถานะเดียวกัน) (undergoing graphitization to a small degree) ดังภาพที่ 8 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันทั่วไป แสดงดังตารางที่ 4



ที่มา: Suzuki, 1990



ที่มา: Berl, 1938

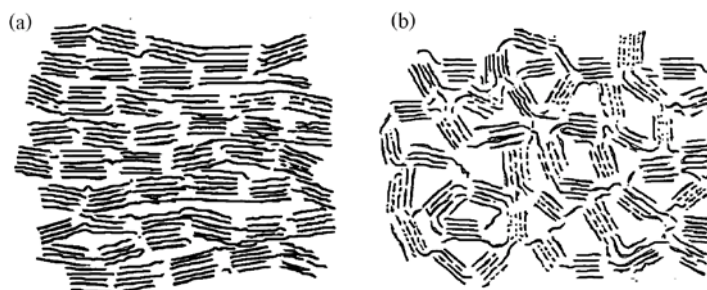


ที่มา: Tershkol, 1969



ที่มา: Mattson et al., 1971

ภาพที่ 7 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 8 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์ง่าย (a) กับ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์เล็กน้อย (b)

ที่มา: Jankowsa (1991)

### 3.4.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี

Dubin (1966) ได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกเป็น

ก. แมคโครพอร์ (macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ลักษณะสมบัติ	ชื่อการค้า			
	Darco	Calgon	Westvaco	Witco
	GAC	Filtrisorb	Nuclar	Witco
	20 - 40	300	WV-L	517
	mesh	(8 x 30)	(8 x 30)	(12 x 30)
พื้นที่ผิว, m <sup>2</sup> /g (BET)	650	950 – 1,050	1,000	1,050
ความหนาแน่นปรากฏ, g/cm <sup>3</sup>	0.40	0.48	0.48	0.48
ความหนาแน่นของการไหลย้อนกลับ, lb/Cu.ft	22.5	26	26	30
ความหนาแน่นจริง, g/cm <sup>3</sup>	*	2.1	2.1	2.1
ความหนาแน่นของอนุภาค, g/cm <sup>3</sup>	*	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
แอบราชันนัมเบอร์	*	78	70	85
เถ้า (%)	0.4	8	7.5	0.5
ความชื้นสูงสุด (%)	12	2	2	1

\* = ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

- = ไม่มีถ่านที่ผ่านตะแกรงร่อน

ที่มา: <http://www.reskem.com/pages/carbon-pdfs.php>

ข. มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชันนัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 – 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (aminosilicate catalyst)

ค. ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

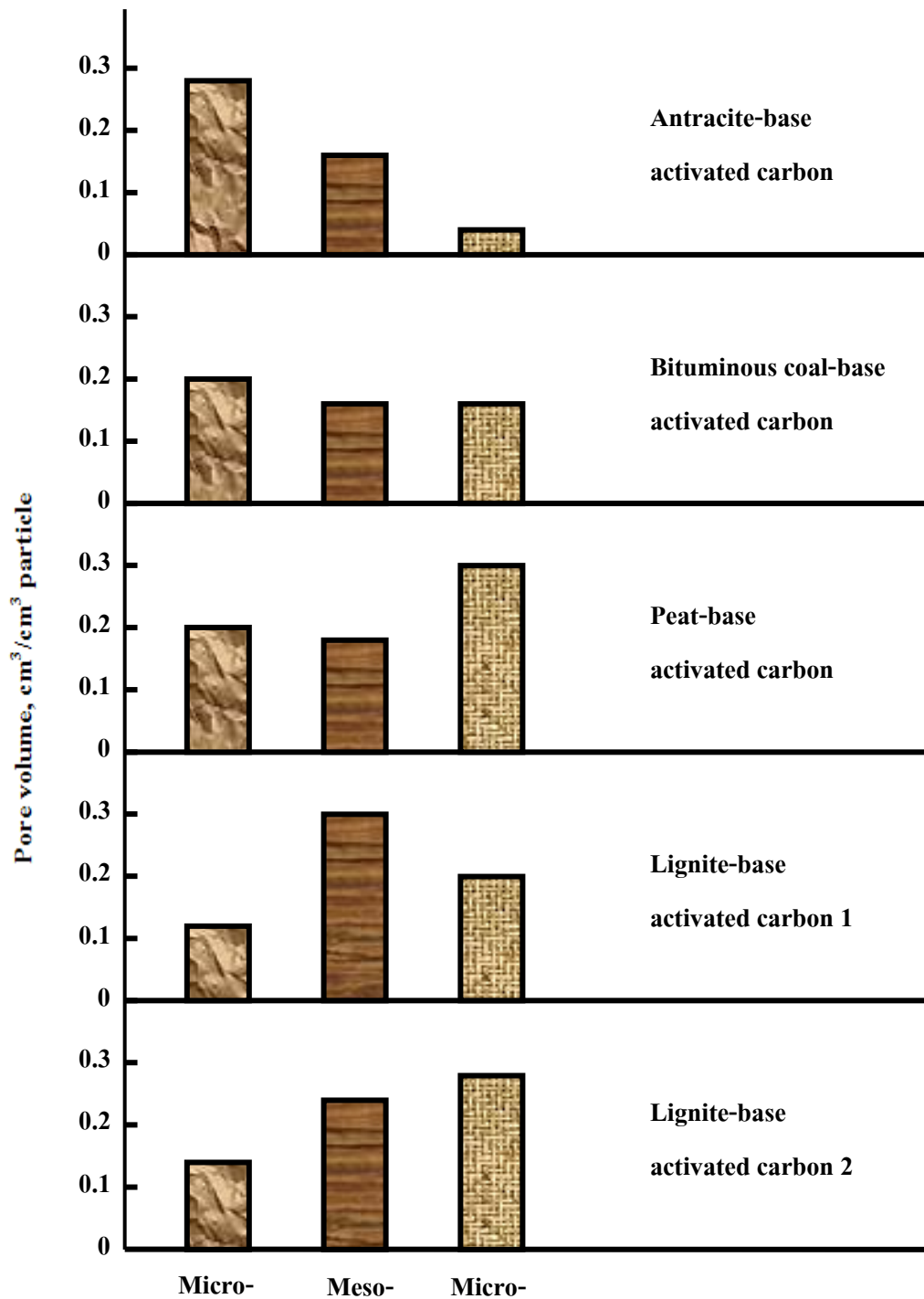
โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนการจัดกระจาย โครงสร้างที่มีแมคโครพอร์ มีโซพอร์ และไมโครพอร์ เรียกว่า โครงสร้างผสม (mixed structure type) ดังภาพที่ 9 พบว่าแมคโครพอร์เป็นเพียงทางเปิดสู่ผิวภายนอกอนุภาค มีโซพอร์เป็นกิ่งออกมาจากไมโครพอร์อีกทีหนึ่ง

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 – 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อการดูดซับ จะมีประมาณร้อยละ 90 – 95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าบริเวณผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันนัลอื่นๆ การดูดซับจะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแกร่ง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันนัลบริเวณผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 – 500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของด่าง ซึ่งพบมากในถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส

### 3.4.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยม (aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญ ออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้น จะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนหกเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบทางเคมี (chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส และกลายเป็นออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน หรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบ และวิธีผลิตที่ใช้  
ที่มา: Bansal et al (1988)

### 3.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติด

ก. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และ ส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

ข. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดของ โมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

ค. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย

ง. ลักษณะของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ เป็นต้น

จ. ระยะเวลาในการดูดซับ

### 3.4.5 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องมีการเลือก ถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและ ทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความสะดวกในการควบคุม ระบบบำบัด ฯลฯ

ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

ก. พื้นที่ผิว (surface area)

ข. ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

ค. ความหนาแน่นหลวม (bulk density)

ง. ขนาดการใช้งาน (effective size)

จ. เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (mean particle diameter)

ฉ. สัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (uniformity coefficient)

ช. ปริมาตรรูพรุน (pore volume)

ซ. การวิเคราะห์ขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อน (sieve analysis)

ฅ. ค่าความคงทนต่อการขัดสี (abrasion number)

ญ. ปริมาณร้อยละของเถ้า (% ash)

ฎ. ความชื้น (moisture)

ฎ. ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number)

ฐ. โมลาสัมเบอร์ (molass number)

ฑ. ขนาดของรูพรุน (pore size)

### 3.4.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

ก. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับแก๊สหรือไอ

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

ข. ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอสบัญ และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย



- แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม เพ็กติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเค็มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติดีขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน (caffeine) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดสีรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือพาสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) สำหรับซิงค์อะซิเตท (zinc acetate) ในโรงงานผลิตไวนิลลอคโวล (vinyl acetate)
- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮโดรซิลอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (hydroxyl aminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่กินยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีแก๊สมากในกระเพาะอาหารอีกด้วย

### 3.4.7 การปรับคืนสภาพของถ่านดูดติด (carbon regenerate)

เมื่อถ่านถูกใช้งานไปนานๆ รูพรุนของถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด จะต้องนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ (exhausted carbon) มาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานได้อีก การฟื้นฟูคุณภาพทำได้โดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่าน ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี โดยใช้สารอนินทรีย์เคมี ทำการออกซิไดซ์สิ่งสกปรก แต่วิธีนี้มีประสิทธิภาพน้อยกว่า วิธีที่ดีที่สุด ได้แก่ การนำถ่านกัมมันต์ไปเผาในเตาแบบ multiple hearth โดยควบคุมภาวะการเผาไหม้โมเลกุลของสิ่งสกปรกให้ระเหยออกมา และถูกเผาไหม้ไป ระบบการฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ (เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2514)

ก. ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมตัวกันเป็นน้ำขุ่น (slurry) ถูกสูบเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ

ข. ถ่านกัมมันต์จะถูกแยกออกจากน้ำแล้วจึงส่งเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,500 – 1,700 องศาฟาเรนไฮต์ ควบคุมการเผาไหม้ให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกในรูของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอ และถูกเผาสลายตัวไป

ค. ถ่านกัมมันต์ที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็น โดยจุ่มลงในน้ำ (quenching)

ง. ถ่านที่เย็นแล้วถูกนำกลับไปล้าง แยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงนำไปเก็บไว้ หรือนำกลับไปใช้งาน

การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,250 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ ในแต่ละขั้นตอนถ่านจะสูญหายไปประมาณ ร้อยละ 2 – 10

#### 4. การดูดซับ (adsorption)

##### 4.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำ (low surface free energy) จะถูกดูดซับ ได้ดี ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (higher surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (surface tension) และ พื้นที่ผิว (surface area) ดังนี้

$$G_{sf} = \gamma A$$

เมื่อ  $G_{sf}$  เป็นพลังงานอิสระที่ผิว  
 $\gamma$  เป็นแรงตึงผิว  
 $A$  เป็นพื้นที่ผิว

เมื่อแรงตึงผิวหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานซึ่งจะเป็น  $\Delta S_{sf}$  แรงตึงผิวของของเหลว คือ แรงตึงผิวต่อหน่วยความยาว (ตั้งฉากกับแรง) ที่ถูกแรงนี้กระทำปกติ แรงตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ  $75.6 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร และที่ 20 องศาเซลเซียส น้ำจะมีแรงตึงผิวเท่ากับ  $72.8 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร ความตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่น แรงตึงผิวของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส มีแรงตึงผิวเท่ากับ  $456 \times 10^{-3}$  ต่อนิวตันเมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็นโมเลกุลของแก๊สหรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสภาวะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือ เกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

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

Adsorbate	หมายถึง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับโดยผิวของแข็ง หรือผิวของตัวดูดซับ
Adsorbent	หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ adsorbate
Adsorption	หมายถึง การดูดซับ
Absorption	หมายถึง การดูดซึม
Solute	หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
Sorption	หมายถึง การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ adsorption และ absorption

สำหรับการดูดซับ หรือ การเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็ง เกิดขึ้นในสองลักษณะด้วยกัน คือ

ก. การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Lyophobicity of solute)

ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะพยายามแทรกตัวอยู่ระหว่างน้ำกับของแข็ง และจุดติดที่ผิวของของแข็งในที่สุด

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

- แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attraction force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุจะไปแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวกไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนวาเลนต์ (monovalent)

- แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) จะมีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) โดยตัวถูกละลายจะไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และ เคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับในอุดมคติ (ideal adsorption) การดูดซับแบบนี้ เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ

- ธรรมชาติทางเคมี (chemical nature) คือตัวถูกละลายจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้ดีในที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ว่า chemical adsorption, activated adsorption หรือ chemisorptions ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกละลายจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกละลาย โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท

4.1.1 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่าง โมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้ จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาโดยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และ วัดค่าแมกเนติกซัสเซพทิบิลิตี (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 - 70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และ การดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผ่นกลับได้ (irreversible) หรือผ่นกลับได้แต่น้อยมาก ใช้เวลาการดูดซับนาน นั่นคือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะไม่มีสารหลุดออกมา หรือ ถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และ มักมีการเปลี่ยนรูปไปจากการศึกษาถ้าจะให้เกิดการผ่นกลับทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกไปได้

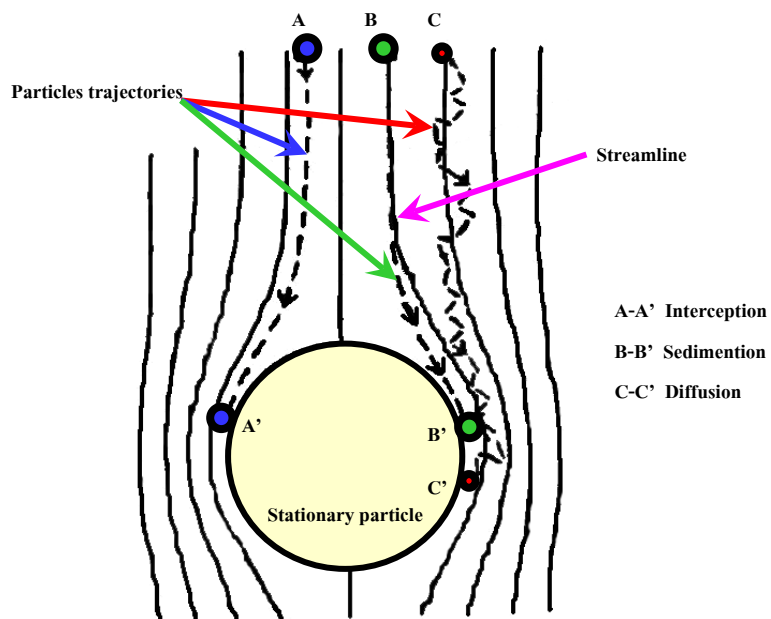
4.1.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของ ตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูง หรือ ตัวถูกดูดซับ อาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผ่นกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือ ถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ ลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อย หรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงแต่ประการใด การดูดซับจะไม่ทำให้ตำแหน่ง

เฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ

#### 4.2 ขั้นตอนของการดูดซับ

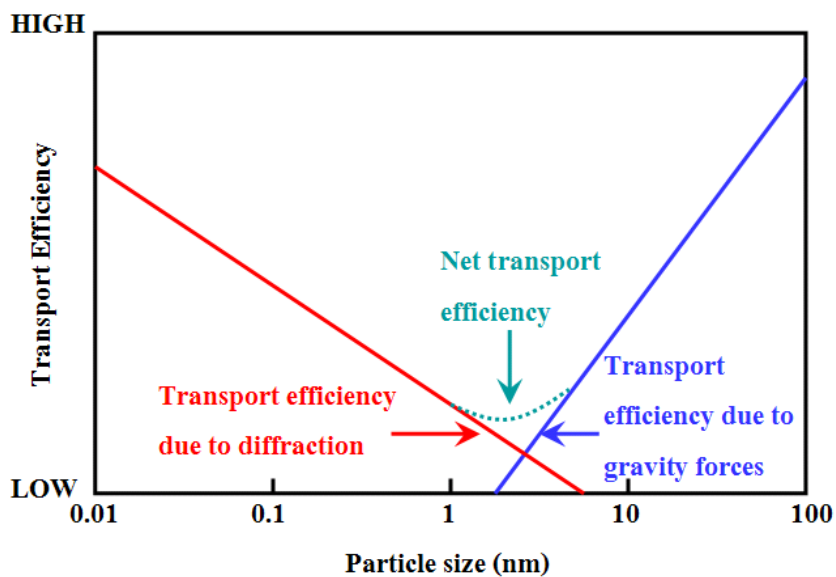
ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารแขวนลอยนี้จะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี (ตามภาพที่ 10) โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน (Brownian diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ขนาดและการกระจายขนาด (size distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก พิจารณาจากภาพที่ 11 คือ เมื่อขนาดของสารแขวนลอยเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกับขนาดซึ่งก็คือ การแพร่กระจายจะทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่าสารขนาดใหญ่ แต่เมื่อสารมีขนาดมากกว่า 1 ไมครอน จะมีการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลน้อยมาก ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง (sedimentation) ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายจึงแปรผันตรงกับขนาดของสารแขวนลอย ดังแสดงในภาพที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก และมีปริมาตรมาก จึงตกตะกอนหรือติดค้างบนถ่านกัมมันต์ได้ง่าย โดยเมื่อพิจารณาจากที่กล่าวมา และจากภาพที่ 11 ก็จะพบว่า สารแขวนลอยที่มีขนาด 1 ไมครอนจะกำจัดออกได้ยากกว่าสารขนาดอื่น ในลักษณะของการกำจัดโดยวิธีการกรอง



ภาพที่ 10 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์

ที่มา: Yao, 1971



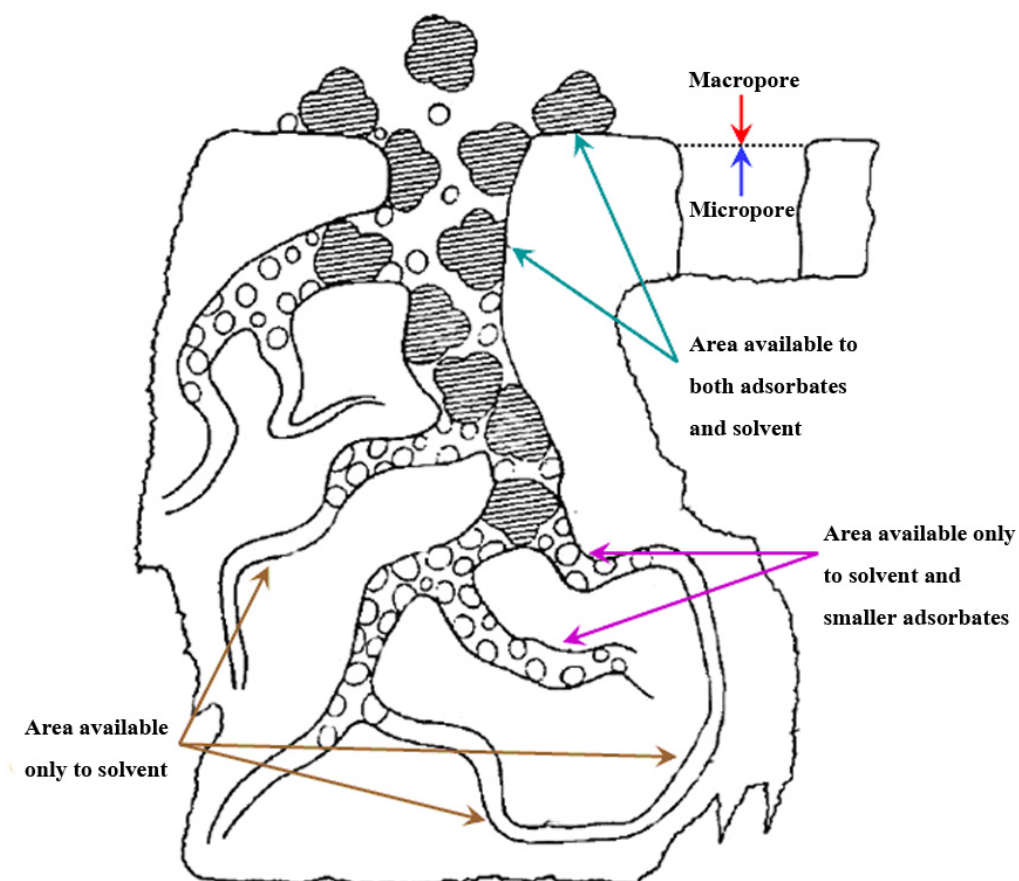
ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นอยู่กับขนาด

ที่มา: Yao, 1971

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Film diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึง  
 ถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์นี้มีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ คล้ายเยื่อบางๆ  
 โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pre diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วน  
 ใหญ่อยู่ที่โพรง หรือช่องว่างภายใน (พิจารณาภาพที่ 12) โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัว  
 เข้าไปในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ให้ได้ จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่าน  
 กัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 12 ภาพแสดงถึงโพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์

ที่มา: New Concepts in Water Purification. (1974)



### 4.3 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และ ชีตความสามารถในการดูดซับ (มันลิน ตันทุลเวสม์, 2539) มีดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ หรือ การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และ เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวถูกดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 4.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชีตความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีชีตความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

#### 4.3.3 ขนาดของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

#### 4.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำ หรือ แยกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

#### 4.3.5 อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

ก. กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ข. อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ สำหรับตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกดูดซับประเภทหลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

#### 4.3.6 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดต่าง ของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับ และ โมเลกุลของตัวถูกละลายซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของ โมเลกุลต่างๆ มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัวได้อย่างน้อย 2 ชนิด แสดงตามสมการที่ 12 และ 13



เมื่อ  $\text{S}^+$  เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นกรด  
 $\text{S}^-$  เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นเบส

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันตามปริมาณ  $\text{S}^+$  และ  $\text{S}^-$  ที่มีอยู่ โดยเมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงจะมีปริมาณ  $\text{S}^-$  มากกว่า  $\text{S}^+$  ดังนั้นจึงมีประจุลบที่ผิวตัวดูดซับ ส่วนที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำจะมีปริมาณ  $\text{S}^+$  มากกว่า  $\text{S}^-$  ดังนั้นที่ผิวตัวดูดซับจึงมีประจุเป็นบวก

#### 4.3.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

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

#### 4.3.8 ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นมาจาก

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

มีการทดลองที่แสดงว่าโมเลกุลของตัวทำละลายสามารถถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับได้ ในกรณีที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ถ้าผิวของสารดูดซับและโมเลกุลของตัวทำละลายมีความเป็นขั้วมาก เดอบัวร์ (De Boer) ได้แสดงลำดับความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก (lauric acid) บนผิวอะลูมินา เมื่อใช้ตัวทำละลายต่างๆ ดังนี้ เพนเทน > เบนซีน > ไดเอทิลอีเทอร์ (pentane > benzene > diethyl ether) จะเห็นว่าเมื่อความเป็นขั้วของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก บนผิวอะลูมินาลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับของโมเลกุลบนตัวทำละลายเหล่านั้นบนผิวอะลูมินาแทน และ จะเกิดการดูดซับได้ดี เมื่อความเป็นขั้วของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

#### 4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอร์ม (isotherm)” ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรือ อาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับ ทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of

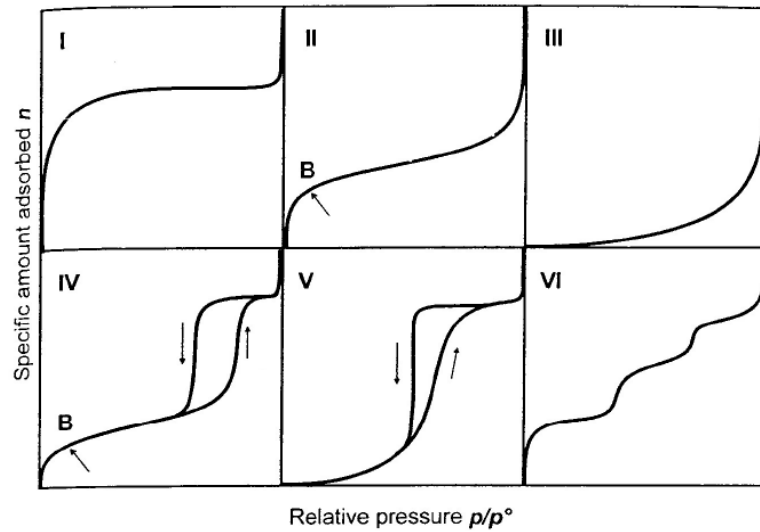
isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

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

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบบ่อยมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารี สามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

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

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบบ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิว ที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ที่มา: Department of Chemistry, Surface Analysis Facility, University of Oxford (ออนไลน์)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับ กับ ความดันของแก๊สที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ส่วนกรณีการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็ง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณที่ถูกดูดซับ กับ ความเข้มข้นของสารละลาย ที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับ ในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลาย อาจคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{(C_0 - C_1)V}{m} \quad (14)$$

- เมื่อ
- a เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับ
  - $C_0$  เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ
  - $C_1$  เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ
  - V เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
  - m เป็นมวลของตัวดูดซับ

หากพิจารณาที่สถานะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (15)$$

เมื่อ  $q_e$  เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล  
 $C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

#### 4.4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

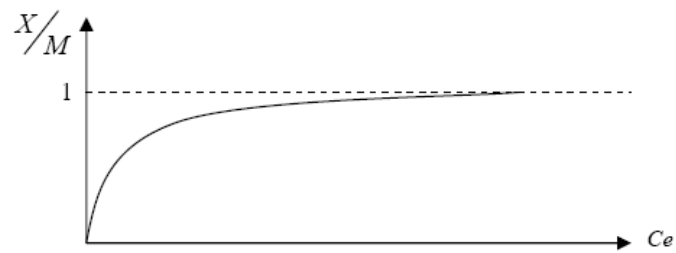
เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่ง (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับ จะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่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

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (16)$$

เมื่อ  $q_e$  เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม  
 $X$  เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ  
 $m$  เป็นปริมาณตัวดูดซับ  
 $C_e$  เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q^0$  เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว  
 $b$  เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{X}{m}$  และ  $C_e$  จะได้ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{X}{m}$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

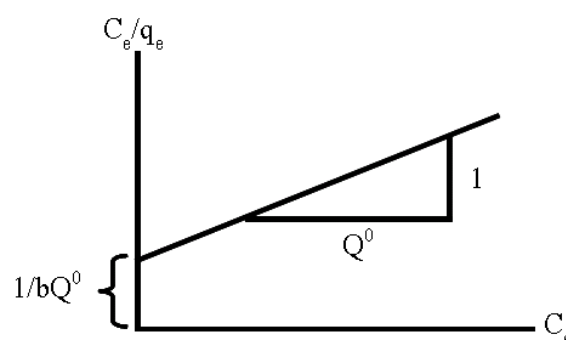
ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (17)$$

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

$\frac{1}{bQ^0}$  และมีความชัน เท่ากับ  $\frac{1}{Q^0}$  ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_e}{X/m}$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)



#### 4.4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

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

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

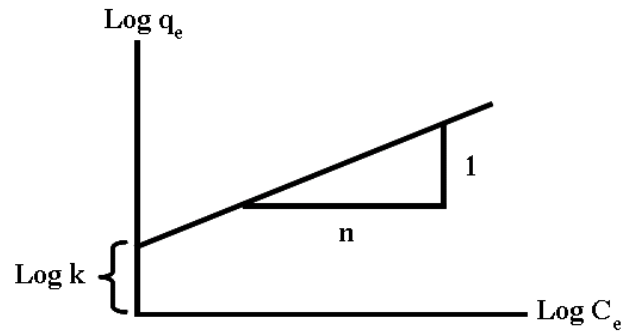
$$q_c = \frac{X}{m} = kC_c^{1/n} \quad (18)$$

- เมื่อ  $q_c$  เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม  
 $X$  เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ  
 $m$  เป็นปริมาณตัวดูดซับ  
 $C_c$  เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $k$  เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ  
 $n$  เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_c = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_c \quad (19)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_c$  ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า  $k$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  ก็สามารถหาค่า  $n$  ได้ ดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งเป็นตัวอย่างไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  ( $\log \frac{X}{m}$ ) และ  $\log C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของ

ฟลอยด์ลีช

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

#### 4.4.3 สมการการดูดซับของบรูเนาเออร์ แอมเมทท์ และ เทลเลอร์ (Brunauer-

Emlett-Teller equation: BET equation)

เป็นสมการที่เสนอโดย สตีเฟน บรูเนาเออร์, พอล ฮิวจ์ แอมเมทท์ และ เอ็ดเวิร์ด เทลเลอร์ โดยเป็นการนำไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวตัวดูดซับ

จากการศึกษาสมการของ บรูเนาเออร์ แอมเมทท์ และ เทลเลอร์ ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$\frac{P}{n(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left( \frac{P}{P^0} \right) \quad (20)$$

- เมื่อ
- P เป็นความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับ ที่สภาวะสมดุล
  - $P^0$  เป็นความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิของการดูดซับ
  - n เป็นปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
  - $n_m$  เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงตัวแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ
  - C เป็นค่าคงที่ ที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ โดย

$$C = \exp\left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT}\right] \quad (21)$$

เมื่อ  $\Delta H_A$  เป็นความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

$\Delta H_L$  ความร้อนของการควบแน่น

R ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )

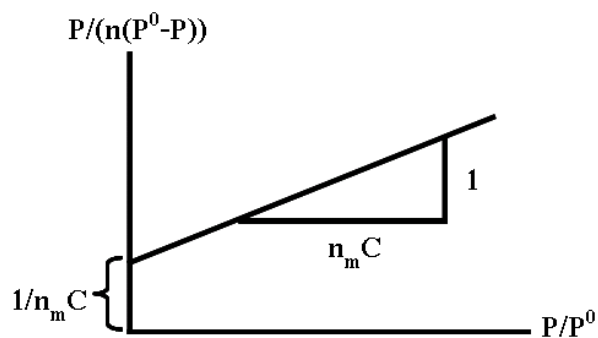
T อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ดังนั้น

$$\Delta H_A - \Delta H_L = \text{ความร้อนสุทธิของการดูดซับ} \quad (22)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{P}{n(P^0 - P)}$  กับ  $\left(\frac{P}{P^0}\right)$  จะได้กราฟเส้นตรง และ

สามารถคำนวณหาค่า C และ  $n_m$  ได้ความชัน และ จุดตัดกราฟ ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากค่า  $n_m$



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{P}{n(P^0 - P)}$  และ  $\left(\frac{P}{P^0}\right)$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของบรูนาเออร์

แอมเมทท์ และ เทลเลอร์

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

## 5. ไม้ไผ่

ไม้ไผ่ เป็นพืชชนิดหนึ่งที่รู้จักกันดีทั่วโลก มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์มาเป็นพัน ๆ ปี โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศ เอเชีย - แปซิฟิก มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เกี่ยวข้องกับความเป็นอยู่ของคนในทุก ๆ ด้าน ตั้งแต่ ที่อยู่อาศัย อาหาร เครื่องกีฬา เครื่องดนตรี เครื่องมือเกษตรกรรม ตลอดจนเป็นเครื่องศิลปกรรมของคนแต่ละชาติ และรวมถึงวัตถุดิบในการอุตสาหกรรม และ การสันถนาการหรือการใช้ประโยชน์ เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ

ในประเทศจีน โบราณ มีการศึกษาและบันทึกลักษณะของ ไม้ไผ่ชนิดต่าง ๆ มานานกว่า 1,000 ปี (ค.ศ. 317 - 412) แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกชนิดพันธุ์ไม้ไผ่ที่ค้นพบใหม่ได้ถึง 266 สายพันธุ์ และสามารถจำแนกชนิดพันธุ์ไม้ไผ่ในประเทศจีนนั้นเพิ่งจะเริ่มค้นในปี ค.ศ. 1978 องค์การอาหารและเกษตรแห่ง สหประชาชาติ (FAO) ได้รายงานไว้ว่า มีการค้นพบชนิดพันธุ์ไม้ไผ่ในโลก จำนวนมากกว่า 1,250 ชนิด (species) ซึ่งส่วนมาก กระจายพันธุ์โดยทั่วไปในเขตเอเชีย – แปซิฟิก

และจากรายงานในปี ค.ศ. 1985 ขององค์การ IDRC (International Development Research Center) แห่งรัฐบาลแคนาดา สามารถจำแนกชนิดพันธุ์ไม้ไผ่ในประเทศต่าง ๆ พอสรุปชนิดของไม้ไผ่ (species) ได้ดังนี้

1. ประเทศจีน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 300 ชนิด
2. ประเทศอินเดีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 130 ชนิด
3. ประเทศไทย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 60 ชนิด
4. ประเทศบังกลาเทศ มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 32 ชนิด
5. ประเทศฟิลิปปินส์ มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 55 ชนิด
6. ประเทศอินโดนีเซีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 31 ชนิด
7. ประเทศมาเลเซีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 12 ชนิด
8. ประเทศปาปัวนิวกินี มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 26 ชนิด
9. ประเทศไต้หวัน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 40 ชนิด
10. ประเทศภูฏาน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 30 ชนิด

**ที่มา:** Recent Research on Bamboo in China (1985) และ Bamboo 2000 (2000)

## 5.1 ความสำคัญและลักษณะเด่น

ไม้ไผ่ จัดเป็นพืชอเนกประสงค์ชนิดหนึ่ง ที่มีความสัมพันธ์กับชีวิต และความเป็นอยู่ของคนไทยมาแต่โบราณ ส่วนของไม้ไผ่ที่ให้ประโยชน์แก่มนุษย์คือ หน่อ และ ลำต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชาวชนบทที่รู้จักนำเอาลำไม้ไผ่มาใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัย หรือใช้เป็นวัสดุค้ำสำหรับอุตสาหกรรมในครัวเรือน ตลอดจนรู้จักการนำหน่อมาบริโภคในรูปแบบต่าง ๆ นอกจากนี้ไม้ไผ่ยังเป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน่อไผ่ บางชนิดมีการพุ่งตัวได้สูงถึง 90 - 120 ซม. ภายในเวลา 24 ชั่วโมง มนุษย์รู้จักไม้ไผ่และการใช้ประโยชน์จากไม้ไผ่เป็นอย่างดี ในขณะที่ยังขาดมาตรการในการอนุรักษ์ อีกทั้งการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับธรรมชาติของไม้ไผ่ และการจัดการทรัพยากรไม้ไผ่ยังเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องกระทำต่อไปในอนาคต เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งทางตรง และทางอ้อมอย่างต่อเนื่องและถาวร

## 5.2 ลักษณะทั่วไป

ไม้ไผ่ เป็นพืชยืนต้น มีลำต้นกลมและกลวงตรงกลาง มีข้อกระจายอยู่ทั่วไปเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ลำต้น เส้นใยของลำไม้ไผ่จะประสานกันแน่น มีความเหนียว และมีแรงหยุ่นตัว ทำให้สามารถโค้งงอหรือตัดได้ตามต้องการ เปลือกหรือผิวของลำไม้ไผ่จะแข็งและเรียบเป็นมัน โดยปราศจากการตกแต่ง ไม้ไผ่แต่ละชนิดมีลักษณะภายนอกแตกต่างกันไป บางชนิดมีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากชนิดอื่นอย่างชัดเจน แต่บางชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทำให้เกิดอุปสรรค ในการจำแนกพันธุ์ นอกจากนี้ยังพบว่า ไม้ไผ่เป็นพืชที่สามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม และผันแปรพันธุ์ได้ง่าย ไม้ไผ่ชนิดเดียวกันขึ้นอยู่กับที่มีสภาพทางภูมิศาสตร์ และปริมาณน้ำฝน แตกต่างกัน จะมีลักษณะแตกต่างกันไป การจำแนกพันธุ์ไม้ไผ่จึงต้องอาศัยลักษณะหลายประการประกอบกัน เช่น เหง้า (rhizome) ใบ (leaf) กาบหุ้มลำ (culms sheath) การแตกกิ่ง (branching) ตาข้าง (bud) หน่อ (shoot) ช่อดอก (inflorescence) ดอก (flower) และเมล็ด (fruit) เป็นต้น

### 5.3 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม

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

### 5.4 ชนิดพันธุ์ การกระจายพันธุ์ และการใช้ประโยชน์

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

### 5.4.1 ไม้ตง

วงศ์ : *Gramineae*

สกุล : *Dendrocalamus*

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Dendrocalamus asper Backer*

ชื่อสามัญ : Sweet bamboo

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

Manh tong (เวียดนาม)



ภาพที่ 18 : แสดงลักษณะของไม้ตง (*Dendrocalamus Asper Backer*)

ที่มา : โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์  
(ออนไลน์)

ถิ่นกำเนิดและการแพร่พันธุ์ : สำหรับถิ่นกำเนิดเริ่มต้นนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด แต่คาดว่าคงเป็นสักแห่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และ แพร่ไปทั่วทุกแห่งในเอเชีย โดยเฉพาะประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น

การใช้ประโยชน์ : ลำต้นใช้เป็นวัสดุค้ำที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ตะเกียบ และ ไม้จิ้มฟัน บางครั้งใช้เพื่อการก่อสร้าง หน่อมีรสอร่อย นิยมรับประทานสดหรือ ทำหน่อไม้กระป๋อง เพื่อส่งออกไปจำหน่ายในต่างประเทศ

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

คุณสมบัติ :

ขนาดของเส้นใย : ยาว 3.78 นาโนเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 19  
ไมโครเมตร และ หน้า 6 ไมโครเมตร

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 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 8 – 20  
เซนติเมตร ความหนา 11 – 36 เซนติเมตร ลำต้นอ่อนจะมีขนสีน้ำตาลละเอียดคลุมหน่อเรียบ  
แต่ลำต้นมีสีเขียวปล้องยาว 40-50 เซนติเมตร ข้อนูน มีรากฝอย เนื้อหนา กิ่งเล็ก มีกาบหุ้มลำ  
ใบ : มีลักษณะปลายเล็กเรียวแหลม มักจะงอกลับ ขอบหยัก ยาว  
ประมาณ 30 เซนติเมตร กว้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร

ดอก : จะออกเป็นช่อ เมื่อออกดอกแล้วต้นก็จะตาย ซึ่งเรียกว่า ไม้ตายชุก

การขยายพันธุ์ และ การเพาะปลูก :

สามารถขยายพันธุ์ได้โดย การแตกหน่อ การตอนกิ่ง และ การเพาะเลี้ยง  
เนื้อเยื่อ โดย พื้นที่ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก มักเป็นบริเวณเขตร้อน มีฝนตกชุก และมีดินที่  
อุดมสมบูรณ์ ระบายน้ำได้ดี แต่ในประเทศไทย สามารถปลูกได้ในดินทราย ที่มีความเป็นกรด  
เล็กน้อยได้



#### 5.4.2 ไม้พญาจู้

วงศ์ : *Gramineae*

สกุล : *Dendrocalamus*

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Dendrocalamus latiflorus*

ชื่อสามัญ : Golden bamboo

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

Botong (ฟิลิปปินส์) M[aj]nh t[oo]ng hoa to, tre ta[uf] (เวียดนาม)



ภาพที่ 19 : แสดงลักษณะของไม้พญาจู้ (*Dendrocalamus Latiflorus*)

ที่มา : โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์  
(ออนไลน์)

ถิ่นกำเนิดและการแพร่พันธุ์ : สำหรับถิ่นกำเนิดเริ่มต้นนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด แต่พบว่าการแพร่พันธุ์ตั้งแต่พม่าจนถึงทางตอนใต้ของจีน รวมถึง ใต้หวัน จากนั้น เริ่มแพร่ขยายเข้าสู่ไทย อินเดีย ญี่ปุ่น และ ฟิลิปปินส์

การใช้ประโยชน์ : หน่อมีรสชาดี นิยมนำมารับประทาน ลำต้นใช้ในการต่อแพ หรือทำเป็นท่อส่งน้ำ และใช้ในการก่อสร้าง ทำเฟอร์นิเจอร์ หรืองานจักสาน ใบใช้ทำหมวก และ หลังกา

ผลผลิตและการส่งออก : หน่ออ่อน ถือเป็นผลผลิตทางการค้าที่สำคัญของจีน และได้หวัน โดยในปี 1985 จีนส่งออกหน่อไม้อ่อนถึง 140,000 ตัน ส่วนไต้หวัน ประมาณ 40,000 ตัน ซึ่งลูกค้ารายใหญ่ คือ ญี่ปุ่น ซึ่งมีมูลค่าการส่งออก ปีละ ประมาณ 40 ล้านดอลลาร์ ส่วนหน่อไม้แห้ง และ หน่อไม้กระป๋อง ถูกส่งไปขายทางยุโรป อเมริกา และ แคนาดา

#### คุณสมบัติ :

ขนาดของเส้นใย : ยาว 3.01 นาโนเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.1 ไมโครเมตร และ หนา 5.6 ไมโครเมตร

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 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 - 20 เซนติเมตร ความหนา 0.5 - 3 เซนติเมตร ลำปล้องตรง และมีผิวเนียนเรียบ ลำต้นอ่อนจะมีขนสีน้ำตาลบริเวณข้อปล้อง แต่ลำต้นมีสีเขียว หรือ สีเหลือง ปล้องยาว 20 - 70 เซนติเมตร ผิวเกลี้ยงเป็นมัน ไม่มีลาย ข้อนูนเด่นชัด ภายในข้อกลวง

ใบ : เป็นใบเดี่ยว รูปแถบปลายใบเรียวแหลม ขนาดของแผ่นใบ กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร

ดอก : ออกตามปลายกิ่ง

#### การขยายพันธุ์ และการเพาะปลูก :

สามารถขยายพันธุ์ได้โดย การใช้เมล็ด การแตกหน่อ และ การตอนกิ่ง ซึ่งการใช้เมล็ดจะมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว แต่เมล็ดนั้นหาได้ยากมาก ดังนั้น วิธีการตอนกิ่งจึงเป็นวิธีที่นิยมกันโดยทั่วไป โดยพื้นที่ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก มักเป็นบริเวณเขตร้อน มีฝนตกชุก และ ดินอุดมสมบูรณ์ แต่บริเวณดินเหนียว และดินที่มีความเป็นกรดหรือด่าง มากเกินไป จะไม่เหมาะสม

## 6. 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) ได้รูปที่เสถียรกว่าโลหะหนักอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organic compound) โดยสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านทางโซ่อาหาร ซึ่งในที่นี่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะ โลหะหนักที่ได้นำมาทำการวิจัยเท่านั้น คือ

### 6.1 แคดเมียม (Cadmium)

#### 6.1.1 สมบัติของธาตุแคดเมียม

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

## ตารางที่ 5 สมบัติต่างๆของธาตุแคดเมียม

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
เลขอะตอม	48
มวลอะตอม (g/mol)	112.411
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2 8 18 18 2
สมบัติทางกายภาพ	
ลักษณะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิปกติ (g/cm <sup>3</sup> )	8.65
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว (g/cm <sup>3</sup> )	7.996
จุดหลอมเหลว (K)	594.22
จุดเดือด (K)	1040
ความร้อนของการหลอมเหลว (kJ/mol)	6.21
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (kJ/mol)	99.87
ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิปกติ (J/(mol.K))	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 : <http://www.wikipedia.org>

### 6.1.2 แคลเมียมในธรรมชาติ

แคลเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะพบอยู่ในแร่ greenockite และแร่ hawleyite ซึ่งแคลเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ (CdS) และแร่ otavite ซึ่งแคลเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต ( $\text{CdCO}_3$ )

ภายในหินแปรและหินแกรนิตจะมีปริมาณแคลเมียม 1 ไมโครกรัมต่อกรัม แต่ในชั้นหินอาจมีแคลเมียมสูงถึง 11 ไมโครกรัมต่อกรัม จึงมีผลให้ปริมาณแคลเมียมเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและการกำเนิดของหินและดิน โดยดินที่เกิดจากหินชั้น จะมีปริมาณแคลเมียมสูงกว่าดินที่เกิดจากหินอัคนีและหินแปร ส่วนในน้ำจะมีปริมาณแคลเมียมน้อย เนื่องจากแคลเมียมซัลไฟด์และแคลเมียมคาร์บอเนต มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ นอกจากนี้ แคลเมียมยังถูกดูดซับด้วยอนุภาคดินได้ด้วย

### 6.1.3 การนำแคลเมียมมาใช้ประโยชน์

แคลเมียมในธรรมชาติส่วนใหญ่ได้จากการทำเหมืองแร่แคลเมียม และบางส่วนเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี แคลเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplate coating) จะได้ผิวโลหะที่เคลือบด้วยแคลเมียมเป็นเงางาม และทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิม ซึ่งโลหะที่เคลือบด้วยแคลเมียมจะใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนของเครื่องยนต์และส่วนประกอบอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นชั้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น และอื่นๆ อีกมากมาย

นอกจากนี้ แคลเมียมยังอยู่ในรูปสารประกอบอีกมากมาย เช่น แคลเมียมซัลไฟด์ (CdS) และ แคลเมียมซัลโฟซีลีไนด์ (CdS-CdSe) ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ เช่น พลาสติก สีทา สีพ่น หมึก ยาง เสื้อผ้า และสีที่จิตรกรใช้ในการวาดภาพหรือทำชิ้นงานจิตรกรรมต่างๆ สารประกอบแคลเมียมบางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น แคลเมียมสเตริยเรท (cadmium stearate)

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

ประโยชน์ของแคดเมียมยังขยายการใช้ไปในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่เรียกว่า แคดเมียมนิเกิล แบตเตอรี่ (CdNi batteries) สำหรับการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข กล้องถ่ายรูป และวิทยุขนาดเล็ก เป็นต้น ยังมีสารประกอบแคดเมียมประเภท แคดเมียมโบรไมด์ แคดเมียมไอโอไดด์ ซึ่งใช้ในการถ่ายรูป

นอกจากนี้ยังพบว่า โลหะแคดเมียมใช้ใน photoelectric cells ผสมในสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร และปัจจุบันยังใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย

#### 6.1.4 การแพร่กระจายของแคดเมียม

จากการใช้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้สามารถพบโลหะแคดเมียมปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม บรรยากาศ และในอาหารที่คนเรากินโดยทั่วไป ดังนั้นมนุษย์จึงได้รับแคดเมียมเข้าไปในร่างกายได้หลายทาง โดยไม่รู้ตัว เช่น คนงานที่ทำงานใช้โลหะแคดเมียมจะได้รับทางการหายใจเป็นส่วนใหญ่ คนทั่วไปจะได้รับจากอาหารที่กินเข้าไปเป็นหลัก และได้รับจากอากาศเล็กน้อย ขึ้นกับความสะอาดของอากาศ แต่คนที่สูบบุหรี่จะได้รับโลหะแคดเมียมจากบุหรี่มากพอสมควร

สำหรับแคดเมียมในอาหารนั้นจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตอาหาร และการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมซึ่งเข้าไปปนอยู่ในน้ำ และในดิน บริเวณใดที่มีโลหะแคดเมียมในดินสูงและมีการปลูกพืชบริเวณนั้น จะมีปริมาณแคดเมียมในพืชนั้นสูงตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น กรณีของบางเมืองในประเทศญี่ปุ่นที่อยู่บริเวณตอนใต้ของการทำเหมืองแร่ จะมีโลหะแคดเมียมถูกชะลงมาตามน้ำและสะสมในดิน เมื่อปลูกข้าวในบริเวณนั้นจะพบว่าปริมาณของแคดเมียมในข้าวสูงมาก จนทำให้คนญี่ปุ่นที่รับประทานข้าวจากบริเวณนั้นป่วยเป็นโรคพิษจากแคดเมียมกันมากมาย เพราะฉะนั้นน้ำจึงเป็นตัวพาแคดเมียมไปสะสมในที่ต่างๆ ถ้ายิ่งน้ำฝนที่เป็นกรดด้วยก็จะเพิ่มปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน พืชจึงดูดไปสะสมได้มากขึ้น

จากการศึกษาการได้รับแคดเมียมจากอาหารของคนไทยโดย รศ.ดร.ทรงศักดิ์ ศรีอนุชาต และ คณะ (2543) ศึกษาในอาสาสมัครผู้อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานครจำนวน 30 คน และผู้ที่อาศัยอยู่ในต่างจังหวัด 40 คน ด้วยการเก็บทุกอย่างที่อาสาสมัครกินและดื่มตลอด 4 วันติดต่อกัน เก็บอาหารทุกชนิด น้ำดื่มและเครื่องดื่มที่อาสาสมัครกินและดื่มจริง แล้วนำมาตรวจหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และเฉลี่ยการได้รับแคดเมียมต่อวันจากอาหาร พบว่าทั้งผู้ที่อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานครและในต่างจังหวัดได้รับแคดเมียมจากการกินอาหารและน้ำดื่มในแต่ละวันใกล้เคียงกัน คือผู้ที่อาศัยกรุงเทพมหานคร ได้รับเฉลี่ย 0.113 มิลลิกรัมต่อสัปดาห์ ในขณะที่ผู้ที่อาศัยต่างจังหวัดได้รับเฉลี่ย 0.105 มิลลิกรัมต่อสัปดาห์ และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในประเทศต่างๆ ที่หาข้อมูลได้ ปรากฏว่าคนไทยที่ทำการศึกษาได้รับแคดเมียมจากอาหารต่อสัปดาห์ในระดับปานกลาง ซึ่งใกล้เคียงกับบางประเทศ เช่น ประเทศสวีเดน เนเธอร์แลนด์ เบลเยียม และเยอรมัน

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก ที่กำหนดไว้ว่าคนปกติไม่ควรได้รับแคดเมียมเกินสัปดาห์ละ 0.40-0.50 มิลลิกรัม สำหรับคนไทยได้รับสัปดาห์ละ 0.105-0.113 มิลลิกรัม ซึ่งยังต่ำกว่าค่าที่องค์การอนามัยโลกกำหนดแต่ถ้าหากกินอาหารที่มีอาหารทะเลประเภทหอยแมลงภู่และหอยนางรมเป็นประจำบ่อยๆ ก็จะได้รับแคดเมียมจากอาหารสูง และถ้ายังสูบบุหรี่ด้วยแล้วยิ่งทำให้ได้รับแคดเมียมเข้าในร่างกายได้มาก

#### 6.1.5 ความเป็นพิษของแคดเมียม

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

ก. โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมากโดยเฉพาะจากการหายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดลม มีพังผืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

ข. โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบแคลเซียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคลเซียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคลเซียมต่อไปแล้ว แต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้

ค. โรคกระดูก แคลเซียมทำให้เกิดการสูญเสียแคลเซียมออกมาในปัสสาวะสูง และอาจมีแคลเซียมเข้าไปสะสมในกระดูกทำให้กระดูกพรุน และมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาการปวดกระดูกสะโพก เช่นที่เกิดกับชาวญี่ปุ่นที่เมืองฟูซุ ในช่วงก่อนและระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเรียกโรคนี้ว่า อิตาอิไต (itai itai) หรือ เออช เออช (ouch ouch) ซึ่งชื่อโรคมมาจากเสียงร้องอย่างเจ็บปวดในภาษาญี่ปุ่น ซึ่งได้รับแคลเซียมมากเป็นเวลานานจากการกินข้าวที่ปนเปื้อนด้วยแคลเซียมมาก คนกลุ่มนี้จะมีกระดูกเปราะ แตกหักง่าย และอาจมีความสูงลดลงได้ เพราะการสูญเสียแคลเซียมทำให้เป็นโรคกระดูกพรุน

ง. โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ พบว่าแคลเซียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมากและมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกันกับโรคไต

จ. โรคมะเร็ง มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคลเซียม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่แห่งขนาดเล็ก พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมากด้วย

#### 6.1.6 การรักษา

ควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสและระมัดระวังการนำสารแคลเซียม เข้าสู่ร่างกาย และ รักษาโดยให้สารเอทิลีนไดเอมีน (ethylenediammine : EDTA) ในขนาด 50 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม ต่อ วัน วันละ 2 ครั้ง ติดต่อกัน 1 อาทิตย์ โดยจะให้ทางกล้ามเนื้อหรือทาง หลอดเลือดก็ได้ อย่างไรก็ตาม หากมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับ สารแคลเซียมก็ควรที่จะเพิ่มความระมัดระวัง ในการที่จะนำเข้าสู่ร่างกาย ไม่ว่าจะทางการกินหรือสูดดมเข้าไป เพื่อจะได้ไม่พบกับอาการเป็นพิษต่อไตของสารแคลเซียม



## 7. ฟีนอล

### 7.1 สมบัติของฟีนอล

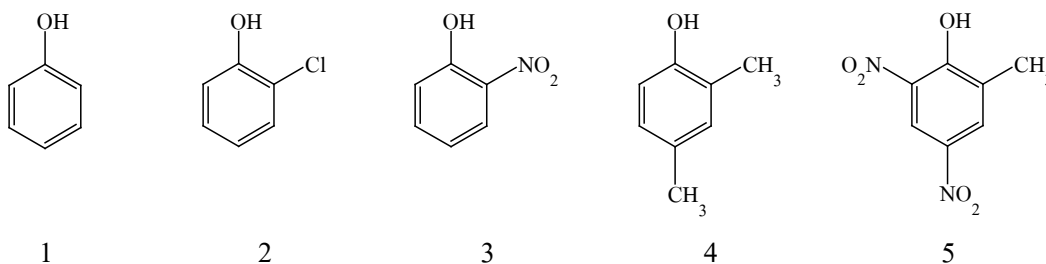
สารประกอบฟีนอล เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบอะโรมาติกที่น้อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $C_6H_5OH$  หรือสามารถเรียกชื่ออื่นได้อีก เช่น กรดคาร์บอริก (carboric acid) ไฮดรอกซีเบนซีน (hydroxybenzene) เบนซีนอล (benzenol) เป็นต้น โดยมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว หรือของเหลวสีชมพูใส และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างช้าๆ เมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยสมบัติต่างๆ ของฟีนอล แสดงดังตารางที่ 6

อนุพันธ์ต่างๆของสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ครีซอล ไชลินอล พาราอะมิโนฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบฟีนอลอีกหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสูตรโครงสร้างที่แตกต่างกัน ออกไป ตัวอย่างดังเช่นในภาพที่ 20

### ตารางที่ 7 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 : <http://www.wikipedia.org>



1. phenol
2. 2-chlorophenol
3. 2-nitrophenol
4. 2,4-dimethylphenol
5. 4,6-dinitro-2-methylphenol

**ภาพที่ 14** สูตรโครงสร้างฟีนอล และ ตัวอย่างอนุพันธ์ของฟีนอล

ที่มา: <http://en.wikipedia.org>

## 7.2 ฟีนอลในธรรมชาติ และการแพร่กระจายของฟีนอล

ฟีนอลอาจพบในน้ำทิ้งบ้านเรือน แหล่งน้ำดื่มทั่วไป และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่โดยทั่วไปพบว่าความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียชุมชน (domestic wastewaters) ค่อนข้างต่ำมาก และฟีนอลที่พบในน้ำเสียชุมชนมักจะเป็นผลมาจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (industrial effluents) เป็นส่วนใหญ่

สำหรับอุตสาหกรรมที่ผลิตน้ำเสียที่มีฟีนอล ได้แก่ โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี โรงงานถ่านหิน โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานฟอกย้อม โรงงานผลิตเรซิน โรงงานผลิตสี โรงงานเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตพลาสติก โรงงานผลิตสารเคมีอินทรีย์ เป็นต้น

### 7.3 ความเป็นพิษของฟีนอล

ในกรณีที่มีฟีนอลอยู่ในแหล่งน้ำมากเกินไป จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำนั้น โดยฟีนอลจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ และที่ความเข้มข้นต่ำมากก็สามารถฆ่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆที่อาศัยในน้ำ เช่น แพลงก์ตอน เป็นต้น โดยฟีนอลจะเป็นพิษ โดยไปลดความสามารถของเอนไซม์ และที่ค่าความเข้มข้นวิกฤตของฟีนอลที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตตายลงครึ่งหนึ่ง (lethal concentration :  $LC_{50}$ ) จะอยู่ในช่วง 9 – 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และบางครั้งที่มีความเข้มข้นเพียง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็เพียงพอที่จะสามารถฆ่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เช่น ปลาบางชนิดได้

การสะสมของสารพิษในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) เช่น ปลา และการเปลี่ยนรูปไปของฟีนอล จะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในเนื้อปลา โดยฟีนอลสามารถถูกดูดซึมผ่านทางเหงือก ผิวหนัง และผ่านทางห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต (food – chain organisms) นอกจากนี้ ฟีนอลยังเป็นอันตรายต่อเซลล์ของมนุษย์ คือ เป็นพิษต่อหน่วยพันธุกรรม (genotoxic) และอาจเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง (carcinogenic effect)

ถ้ามนุษย์ได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกายมากกว่า 240 มิลลิกรัมต่อลิตร จะก่อให้เกิดอาการคือ เกิดแผลที่ปาก (mouth sores) ท้องร่วง (diarrhea) ปัสสาวะดำ (dark urine) และปากไหม้ (burning mouth) นอกจากนี้ เมื่อฟีนอลรวมตัวกับคลอโรอินจะเกิดเป็นคลอโรฟีนอล (chlorophenols) ทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำดื่ม แม้ว่าจะมีความเข้มข้นเพียง 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร

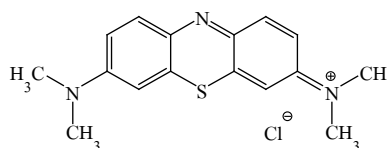
### 7.4 การกำจัดฟีนอล

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

## 8. เมทิลีนบลู (methylene blue)

### 8.1 สมบัติของเมทิลีนบลู

สารประกอบเมทิลีนบลู เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวง เฮทเทอโรไซคลิก อะโรมาติก (heterocyclic aromatic) ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $C_{16}H_{18}N_3ClS$  หรือ สามารถเรียกชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis (dimethylamino)-phenazathionium chloride หรือ tetramethylthionine chloride โดยมี โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 21 ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม และละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดย สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 7



ภาพที่ 21 สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู

ที่มา: <http://en.wikipedia.org>

ตารางที่ 8 สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู

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

ที่มา : <http://www.mrcgene.com>

## 8.2 การนำเมทิลลีนบลูมาใช้ประโยชน์

ในปัจจุบัน เมทิลลีนบลู ถูกใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ เนื่องจาก เมทิลลีนบลู เมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงิน และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการทดสอบความเป็นกรดต่างของสารละลายได้อีกด้วย

นอกจากนี้ เมทิลลีนบลู ยังถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ และ ยาฆ่าเชื้อมาเลเรียอย่างอ่อน

## 8.3 ความเป็นพิษของเมทิลลีนบลู

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

## 9. น้ำส้มควันไม้ (wood vinegar)

น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีน้ำตาลใสมีกลิ่นควันไฟ ที่ได้มาจากการควบแน่น (condensed) ควันที่เกิดจากการผลิตถ่านไม้ในช่วงที่ไม้กำลังเปลี่ยนเป็นถ่าน (carbonization) อุณหภูมิในเตาอยู่ระหว่าง 300 – 400 องศาเซลเซียส สารประกอบต่าง ๆ ในไม้พินจะถูกสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) เกิดเป็นสารประกอบใหม่มากมาย แต่ถ้าเก็บควันในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส แม้ว่า เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) จะสลายตัวแล้ว และเซลลูโลสกำลังเริ่มสลายตัว แต่ก็จะมีสารประกอบที่มีประโยชน์น้อยมากไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และถ้าเก็บควันในช่วงอุณหภูมิเกิน 425 ° C น้ำมันดินจะสลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง ได้แก่ dibenzanthracene-mentyl cholinsrene และ benzopyrene แม้ว่าสารดังกล่าวสามารถกำจัดออกไปได้ง่ายเมื่อมากขึ้นซ้ำที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส แต่การนำมากลั่นซ้ำก็จะสูญเสียสารประกอบบางอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อการเกษตร

สมาคมน้ำส้มควันไม้แห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นคนกลางในการซื้อขายน้ำส้มควันไม้ ได้ตั้งเกณฑ์มาตรฐานของการเก็บน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาอิวาเตะ (Iwate) ไว้โดยการวัดอุณหภูมิที่ปากปล่องควันระหว่าง 80 – 150 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาจะอยู่ระหว่าง 300 – 400 องศาเซลเซียส น้ำส้มควันไม้สามารถเก็บได้โดยอาศัยเครื่องมือง่าย ๆ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิสูง สู่อากาศรอบปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความชื้นในควันก็จะควบแน่นเป็นหยดน้ำ นำมารวบรวมและทำให้บริสุทธิ์ขึ้นก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จุดสำคัญของการเก็บน้ำส้มควันไม้ก็คือ ต้องให้ปล่องดักควันอยู่ห่างจากปากปล่องควันของเตาผลิตถ่าน 20 – 30 เซนติเมตร หากทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกันโดยตรงจะเท่ากับเป็นการต่อความยาวให้กับปล่องควันของเตา ซึ่งจะมีผลกระทบไปถึงการไหลเวียนของอากาศภายในเตาและส่งผลถึงคุณภาพและผลผลิตของถ่านไม้ด้วย

## 9.1 การทำน้ำส้มควันไม้ให้บริสุทธิ์

น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเก็บจากเตาผลิตถ่าน ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที เนื่องจากการเปลี่ยนเป็นถ่าน ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งเตา แต่จะเริ่มก่อนที่หน้าเตาด้านบน แล้วแผ่กระจายมายังหลังเตาด้านล่าง ดังนั้นควันที่ออกมาจากปล่องควันจึงเป็นควันที่ผสมกันระหว่างควันอุณหภูมิต่ำและสูง และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 310 องศาเซลเซียส ลิกนิน (lignin) ก็จะเริ่มสลายตัว ก็จะมีน้ำมันดิน (tar) และสารระเหยง่าย (volatile) ปนออกมาด้วย น้ำมันดินที่ละลายน้ำไม่ได้ (oil base) จะนำไปใช้ประโยชน์ในการเกษตรไม่ได้เพราะจะไปปิดปากใบของพืช 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 โดยน้ำหนักผงถ่านก็จะดูดซับทั้งน้ำมันใสและน้ำมันดิบให้ตกตะกอนลงสู่ชั้นล่างสุดในเวลาเร็วขึ้น เพียงประมาณ 45 วันเท่านั้น

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

ถึงเก็บควรมีวาล์ว 3 ระดับ คือ ระดับบนมีไว้แยกน้ำมันใส (light oil) ระดับกลางมีไว้สำหรับเก็บน้ำส้มควันไม้ และ ก้นถังสำหรับถายน้ำมันดิน

### 9.2.2 การกรอง

โดยใช้ผ้ากรองหรือถังกรองที่ใช้ผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะได้คุณสมบัติแตกต่างกันไป เพราะถ่านกัมมันต์จะลดความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ และจะใช้วิธีนี้เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบในการอุตสาหกรรม

### 9.2.3 การกลั่น

โดยกลั่นได้ทั้งใสความดันบรรยากาศ และกลั่นแบบลดความดันรวมทั้งกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อแยกเฉพาะสาร หนึ่ง สารใดในน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยา

## 9.3 คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้แตกต่างจากน้ำส้มสายชู หรือ น้ำส้มอื่นๆ ที่ได้จากการหมัก คือมีสารประกอบหลากหลายชนิดมากกว่า โดยเฉพาะฟีนอลซึ่งได้จากการสลายตัวของลิกนิน

น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไม้ต่างชนิดก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันด้วย เช่น น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส จะมีความเป็นกรดต่ำ และมีสีใส แต่มีเมทานอลสูงกว่า ไม้กระถินยักษ์ หรือ ไม้สะเดา

น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบต่างๆ มากกว่า 200 ชนิด ซึ่งได้จากการสลายตัวของไม้ด้วยความร้อน เกิดเป็นสารประกอบใหม่หลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้จากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และ เซลลูโลส ส่วนฟีนอลได้จากการสลายตัวของลิกนิน



น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบที่สำคัญ ได้แก่ น้ำ ประมาณร้อยละ 85 กรดอินทรีย์ ประมาณร้อยละ 3 และ สารอินทรีย์อื่นๆอีกประมาณร้อยละ 12 มีค่าความเป็นกรดค่า (pH) ประมาณ 3 และ ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.012 – 1.024 แตกต่างกันไปตามชนิดของไม้ โดย สารอินทรีย์ต่างๆ ที่สามารถพบได้ในน้ำส้มควันไม้ แสดงในตารางที่ 8

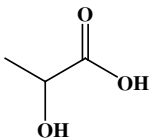
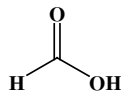
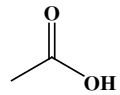
ตารางที่ 8 แสดงสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในน้ำส้มควันไม้

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, isobutylaldehyde, 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: ถ่านไม้และน้ำส้มควันไม้ ชมรมสวนป่า ผลิตภัณฑ์ และพลังงานจากไม้, 2546

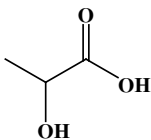
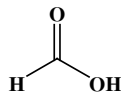
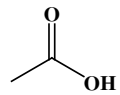
ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่พบในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากการเผาไม้ไผ่ตง และ ไม้หนามजू โดยทำการหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ 9 ชนิด ได้แก่ กรดซิตริก (citric acid), กรดทาทาริก (tartaric acid), กรดมาลิก (malic acid), กรดแลกติก (lactic acid), กรดฟอร์มิก (formic acid), กรดอะซิติก (acetic acid), กรดโพรพิโอนิก (propionic acid), กรดบิวทีริก (butyric acid) และ กรดไอโซบิวทีริก (isobutyric acid) โดยสมบัติต่างๆของกรดอินทรีย์ แสดงในตารางที่ 9 และ ประโยชน์ของกรดอินทรีย์แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 แสดงสมบัติของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ

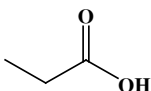
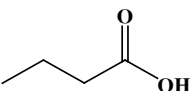
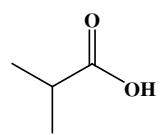
สมบัติต่างๆ	ชนิดของกรดอินทรีย์		
	กรดซิตริก (citric acid)	กรดทาทาริก (tartaric acid)	กรดมาลิก (malic acid)
สมบัติทั่วไป			
สูตรโมเลกุล	$C_3H_6O_3$	$CH_2O_2$	$C_2H_4O_2$
สูตรโครงสร้าง			
ชื่อตามระบบ IUPAC*	2-hydroxypropane- 1,2,3-tricarboxylic acid	methanoic acid	ethanoic acid
มวลโมเลกุล (g/mol)	192.123	46.025	60.05
สมบัติทางกายภาพ และ เคมี			
ลักษณะ	ผลึกสีขาว	ของเหลวใส	ของเหลวใส
จุดหลอมเหลว (K)	426.15	281.55	289.6
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm <sup>3</sup> )	133	ละลายได้	ละลายได้ดีมาก
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm <sup>3</sup> )	1.542		1.049

\* IUPAC : International Union Pure and Applied Chemistry

ตารางที่ 9 (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-hydroxypropane- 1,2,3-tricarboxylic acid	methanoic acid	ethanoic acid
มวลโมเลกุล (g/mol)	2-hydroxypropanoic acid 90.08	methanoic acid 46.025	ethanoic acid 60.05
สมบัติทางกายภาพ และ เคมี			
ลักษณะ			
จุดหลอมเหลว (K)	ผลึกสีเหลืองอ่อน	ของเหลวใส	ของเหลวใส
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm <sup>3</sup> )	395.15	281.55	289.6
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm <sup>3</sup> )	ละลายได้ดี	ละลายได้	ละลายได้ดีมาก

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สมบัติต่างๆ	ชนิดของกรดอินทรีย์		
	กรดโพรพ็อนิก (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 <sup>3</sup> )	ละลายได้ดี	ละลายได้	ละลายได้
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm <sup>3</sup> )	0.99	0.95	0.97

ตารางที่ 10 ประโยชน์ของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ

ชนิดของกรดอินทรีย์	ประโยชน์
กรดซิตริก	ในปัจจุบัน กรดซิตริกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมาย เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่ม ยา เครื่องสำอางค์ และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด
กรดทาเทอริก	ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางค์ ยา และใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิค
กรดมาลิก	ใช้เป็นสารเพิ่มกรดในอาหาร และ ใช้เป็นสารควบคุมความเป็นกรดต่าง
กรดแลคติก	ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางค์ และใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ
กรดฟอร์มิก	ใช้เป็นส่วนผสมของยากำจัดแมลง และยากำจัดเชื้อรา เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมยาง
กรดอะซิติก	ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสีย้อมผ้า
กรดโพทิโอนิก	ใช้เป็นสารเติมแต่งอาหาร และ ใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ
กรดบิวทิริก	อนุพันธ์ของกรดบิวทิริก เช่น 4-(2,4-Dichlorophenoxy) butyric acid สามารถนำไปผลิตเป็นยากำจัดวัชพืช
กรดไอโซบิวทิริก	ใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการแยกสกัดแยกสารให้บริสุทธิ์

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะและปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง (*Dendrocalamus asper Backer*) และ ไผ่หมาจู้ (*Dendrocalamus Latiflorus*) โดยวิธีทางเคมี
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
3. ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาจากการดูดซับโลหะ แคลเมียม ฟีนอล และ เมทิลลีนบลู
4. ศึกษาปริมาณของกรดอินทรีย์ที่มีในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากการเผาไผ่ตง และ ไผ่หมาจู้

## การตรวจเอกสาร

จากการตรวจเอกสารพบว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์ และการวิเคราะห์สมบัติของ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ สามารถทำได้ดังนี้

เกศรา นุतालย์ และ คณะ (2531) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากพีท (peat) ที่ได้จากจังหวัด นราธิวาส โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) ในครุชีเบิลแกรไฟต์ที่ให้ความร้อนด้วย เตาเผา (muffle furnace) และวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวแบบยิ่งยวด การกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  ทำ ได้โดยแช่พีทที่บดละเอียด และผ่านร่อน (sieve) 60 เมช (mesh) แล้ว ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้น ร้อยละ 60 อัตราส่วนของพีทต่อสารละลาย  $ZnCl_2$  คือ 1:2.5 และ 4.0 ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}C$ ) แปรเวลาดังแต่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 ชั่วโมง แล้วนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน ในเตาเผา ผลการทดลองพบว่าการใช้  $ZnCl_2$  อัตราส่วน 1:4 กระตุ้นที่ 600 องศาเซลเซียส เวลา มากกว่า 0.5 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ในทางการค้า คือ ค่าการ ดูดซับไอโอดีน 1,200 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) ค่าการดูดซับเมทิลลินบลู 200 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวอนุภาค 1,200 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ( $m^2/g$ ) และสำหรับการกระตุ้น ด้วยไอน้ำอิ่มตัวด้วยยิ่งยวดทำได้โดยนำพีทผ่านร่อนขนาด 60 เมช ผสมกับน้ำแข็งแห้งสำหรับแห้งสุด เข้มข้น 0.04 กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml) ปริมาณที่ใช้ คือ ร้อยละ 5 ของน้ำหนัก อัดให้เป็นเม็ดเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร อบให้แห้งที่ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำไปคาร์- บอนไนซ์เซชันที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปกระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศา เซลเซียส แปรเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ความดันไอน้ำ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (pound per squar inch : PSI) ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มี ความสามารถในการดูดซับสูงสุด คือ ค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 1,200 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการ ดูดซับเมทิลลินบลู ประมาณ 295 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวของอนุภาค 881 ตารางเมตรต่อกรัม

บุญชัย ตระกูลมหาชัย และคณะ (2534) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากพีทไทยที่บดผ่าน ตะแกรงขนาด 8 มิลลิเมตร และพีทญี่ปุ่นที่บดผ่านตะแกรงขนาด 5 และ 8 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการผ่านอากาศ 100 ลิตรต่อนาที (l/min) และ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 850 และ 950 องศาเซลเซียส แปรเวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่า ถ่านกัมมันต์จากพีทไทยมี พื้นที่ผิว 383.4 – 623.5 ตารางเมตรต่อกรัม, ค่าการดูดซับเมทิลลินบลู 58.2 – 227.0 มิลลิกรัมต่อกรัม

และค่าการดูดซับไอโอดีน 662.9 – 1,003.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากพีทญี่ปุ่น มีพื้นที่ผิว 243.2 – 510.4 ตารางเมตรต่อกรัม, ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 64.1 – 191.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 442.0 – 832.3 มิลลิกรัมต่อกรัม

ประกฤต เลิศจรัสอร่ามดี (2539) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เถ้า ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการทดลองพบว่า ขุยมะพร้าวที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถกำจัดไอออนของตะกั่วและปรอท ในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ถึงร้อยละ 80 และ 78 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขี้เถ้าและฟางข้าว พบว่า ขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนของโลหะได้ดีกว่าขี้เถ้าและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3 – 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ขี้เถ้า ฟางข้าว และขุยมะพร้าว สามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้ทั้งหมด

ปิยะพร บารมี (2542) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  ซึ่งมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน และการกระตุ้น จากผลการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันยาง คือ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และขั้นตอนการกระตุ้น โดยการนำยางที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้วมาแช่ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 70 พร้อมทั้งเขย่าเป็นเวลา 3 วัน นำไปอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวรูพรุน 237.17 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 351.52 มิลลิกรัมต่อกรัม

Solum M.S. และ คณะ (1995) ได้ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจาก ต้นไธสขาว โดยใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นตัวกระตุ้น โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผ่าถ่านแปรอุณหภูมิที่ 150, 250, 350 และ 450 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำไปหาปริมาณของรูพรุน และศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้  $^{13}C$ -NMR และ FTIR ซึ่งพบว่า ถ่านจะมีความเป็นอะโรมาติกเพิ่มมากขึ้น และ หมู่ฟังก์ชันของอะลิฟาติก คาร์บอกซิล และ คาร์บอนิล จะลดน้อยลง และ ปริมาตรของรูพรุนจะมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้



Toles C. และ คณะ (1996) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จาก ลิกไนต์ โดยใช้กรด  $H_3PO_4$  เป็นตัวกระตุ้น และศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา โดยแปรอุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 650 องศาเซลเซียส เมื่อนำถ่านที่ได้ไปหาหุ้ฟุ้งกั้น และศึกษาหาพื้นที่ผิว พบว่า การกระตุ้น ทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นอะโรมาติกมากขึ้น และทำให้หุ้คาร์บอนิลมีความเสถียร โดยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุด คือ 1466 ตารางเมตรต่อกรัม

Usamani T.H. และ คณะ (1996) ได้ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลิกไนต์ ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  จากนั้น ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ต่างๆ โดยนำไปหาค่าการดูดซับไอโอดีน และ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู รวมถึงการหาพื้นที่ผิว และ ปริมาตรของรูพรุน ซึ่งพบว่า สภาพะที่ดีที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ เมื่อเผาถ่านที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ่านกับ  $ZnCl_2$  เป็น 1 ต่อ 2 ซึ่งจะทำได้ค่าการดูดซับไอโอดีน และ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ 990 และ 205 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนค่าพื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุน ได้ 942 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.46 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Hu Z.H. และ คณะ (1999) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งกระตุ้นด้วย KOH แล้วทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ กับ KOH เวลา และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการกระตุ้น โดยพบว่า การเผาถ่านที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ถ่านที่มีค่าพื้นที่ผิว และ ปริมาตรของรูพรุน สูงสุด คือ 2451 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ( $cm^3/g$ ) ตามลำดับ

Hsu L.Y. และ คณะ (2000) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัส โดยใช้ตัวกระตุ้นต่างๆกัน ได้แก่  $ZnCl_2$ , กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวที่ดีที่สุด คือ 960 770 และ 3300 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Rengaraj S. และ คณะ (2000) ได้ศึกษาถึงการดูดซับอโรครีซอล (O-cresol) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์ม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์มสามารถลดปริมาณ O-cresol ได้ร้อยละ 95 และให้ค่าการดูดซับของฟรอยด์ลิซ เท่ากับ 19.58 มิลลิกรัมต่อกรัม

Yang T. และ คณะ (2003) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกถั่วพิชิโอ ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย KOH โดยทำการศึกษาผลของเวลา และ อุณหภูมิที่ใช้ พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ค่าพื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุน สูงที่สุด คือ 2259.4 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Kutahyalı C. และ คณะ (2004) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับ ยูเรเนียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  โดย ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่าน อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์กับ  $ZnCl_2$  ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เวลา อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของยูเรเนียม แล้วทำการหาค่าพลังงานเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) เอนโทรปี ( $\Delta S$ ) และ พลังงานเสรีกิ๊บส์ ( $\Delta G$ ) ของถ่านที่ได้ ซึ่งพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วน เป็น 1 ต่อ 1 แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาดูดซับยูเรเนียม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH เท่ากับ 5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะทำให้ได้ พลังงานสูงสุด คือ 33.49 กิโลจูลต่อโมล (kJ/mol) 0.17 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน (kJ/molK) และ -18.02 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

Namasivayam C. และ คณะ (2004) ได้ทำการศึกษาสมมูลของการดูดซับฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกาบมะพร้าว ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  โดยได้ศึกษาผลของ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของถ่าน เวลา อุณหภูมิ และ ปริมาตรของฟอสเฟตที่ใช้ โดยอาศัยการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3 ปริมาณของถ่านที่ใช้ 300 มิลลิกรัม ปริมาตรของฟอสเฟตที่ใช้ 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และ เวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของแลงเมียร์สูงสุด คือ 5.1 มิลลิกรัมต่อกรัม

Monhanty K. และ คณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้จากต้นเทอมีนาเลียอาจุนา ซึ่งใช้  $ZnCl_2$  เป็นตัวกระตุ้น โดย ทำการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของตัวดูดซับ เวลา อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของโครเมียมที่ใช้ จากนั้น ศึกษาหาค่าพื้นที่ผิว พบว่า ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 1 ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ กับ  $ZnCl_2$  เท่ากับ 1 ต่อ 3 อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิว สูงสุด คือ 1260 ตารางเมตรต่อกรัม

Monhanty K. และ คณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ ถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้จากขี้เถ้าของต้นเทคโทนาแกรนดิซ ซึ่งใช้  $ZnCl_2$  เป็นตัวกระตุ้น โดย ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และ เวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์เซชัน ปริมาณตัวดูดซับ และ ความ เป็นกรดต่างของสารละลาย โดยอาศัยโมเดลการดูดซับของแลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับฟีนอล เท่ากับ 2.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.5 จากนั้นนำไปหาพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ปริมาตรของรูพรุน ซึ่งพบว่า เท่ากับ 585 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.442 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Namane A. และ คณะ (2005) ได้ทำการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับของถ่าน กัมมันต์ ซึ่งเตรียมได้จากกากของเมล็ดกาแฟ โดยใช้  $ZnCl_2$  ผสมกับ  $H_3PO_4$  เป็นตัวกระตุ้น และ ทำ การดูดซับฟีนอล รวมถึง อนุพันธ์ของฟีนอล พร้อมทั้ง สิขชนิดต่างๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่มีผู้จำหน่าย โดยอาศัยการดูดซับของฟรอยด์ลิช และ แลงเมียร์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ ผลิตจากกากเมล็ดกาแฟมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Stavropoulos G.G. และ คณะ (2005) ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก เปลือกเมล็ดมะกอก ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย KOH และได้ทำการศึกษาผลของเวลา และ อุณหภูมิที่ใช้ใน การกระตุ้น โดยนำถ่านไปหาค่าพื้นที่ผิว และ ความสามารถในการดูดซับ โดยอาศัยการดูดซับของ แลงเมียร์ พบว่า การเผาถ่านที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ค่าพื้นที่ผิว สูงสุด คือ 3049 ตารางเมตรต่อกรัม แต่จะให้ค่าการดูดซับของแลงเมียร์เพียง 16.2 ลูกบาศก์เดซิเมตร ต่อมิลลิกรัม ( $dm^3/mg$ )

Qada E.N.E. และ คณะ (2006) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลูของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านบิทูมินัส ซึ่งทำการศึกษาผลของความเป็นกรดต่าง และ ขนาดของ ตัวถูกดูดซับ โดยอาศัยโมเดลการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรอยด์ลิช และ เลด์ลิชปีเตอร์สัน ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลู เท่ากับ 580 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 11

Hameed B.H. และ คณะ (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลู ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เถ้าไม้หวาย โดยอาศัยทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์ และ ฟรอยด์- ลิช ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การดูดซับเป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ และ ความสามารถในการดูด ซับ เท่ากับ 294.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

Singh K.P. และ คณะ (2007) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีระหว่าง ถ่านกะลามะพร้าว และ ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรด โดยอาศัยความสามารถในการดูดซับฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในการเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่า ถ่านกัมมันต์ซึ่งถูกกระตุ้นแล้ว จะสามารถดูดซับ โดยสามารถดูดซับได้ 0.53 มิลลิโมลต่อกรัม และ 0.31 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะดีกว่า ถ่านจากกะลามะพร้าว ซึ่งดูดซับได้ 0.36 มิลลิโมลต่อกรัม และ 0.20 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ

Kula I. และ คณะ (2008) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียม ของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากหินมะกอก ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส และความเป็นกรดต่างของสารละลาย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร เวลาสัมผัส เท่ากับ 60 นาที และ ความเป็นกรดต่างมากกว่า 6 และ จากการนำไปหาพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่า เท่ากับ 790.25 ตารางเมตรต่อกรัม

## เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และ วิธีการ

### เครื่องมือ และ อุปกรณ์

1. เตาเผา (Maywa, MES-20MC)
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Lenton Thermal)
3. ตู้อบ (Precision, 16EG)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Binder, ED 53)
5. เครื่องบดไม้
6. เครื่องเขย่า (Clifton, NE5-2BD CE)
7. เครื่องชั่งสาร (Mettler Toledo, AL 204)
8. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (Inolab level 1, 8F93)
9. เครื่องดูดสุญญากาศ (Jeio Teck, VE-11)
10. เครื่องยูวีวิซิบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Perkin Elmer, Lambda 35)
11. เครื่องอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Perkin Elmer, System 2000 FT-IR)
12. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Perkin Elmer, AAnalyst 800)
13. เครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโทกราฟี (Varian, Prostar 210 & 320)
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO, 1450VP)
15. เครื่องแก้วต่างๆที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
16. เครื่องอัดสุญญากาศ
17. โกร่งบดสาร
18. แม่พิมพ์
19. เครื่องอัลตราโซนิคส์
20. คอลัมน์ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ
21. ชุดกรองพร้อมตัวกรองเซลลูโลส
22. ตัวกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน

### 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. โซเดียมไตรโซลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ , 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
10. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ , AR. grade, Merck, Darmstadt, Germany)
11. ฟีนอล ( $C_6H_6O$ , 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. สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ( $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$  in diluted hydrochloric acid, AA. Grade, Carlo Erba, Rodano, Milan, Italy)
18. กรดบอริก ( $B(OH)_3$ , AR. grade, Fisher, Leicestershire, United Kingdom)
19. กรดซिटริก ( $C_6H_8O_7$ , AR. grade, Univar, Seven Hills, Australia)
20. เมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}N_3ClS$ , AR. grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
21. เฮกเซน ( $C_6H_{12}$ , AR. Grade, Mallinckrodt, United State of America)
22. ไดเอทิลอีเธอร์ ( $C_4H_{10}O$ , AR. grade, Merck, Darmstadt, Germany)
23. ถ่านกัมมันต์ (C, AR. grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
24. ถ่านไม้ไฟบ้านตัน (C, Lab. Grade, Charcoal home, Bangkok, Thailand)
25. กรดซिटริก ( $C_6H_8O_7$ )

26. กรดทาทาริก ( $C_4H_6O_6$ )
27. กรดมาลิก ( $C_4H_6O_5$ )
28. กรดแลกติก ( $C_3H_6O_3$ )
29. กรดฟอร์มิก ( $CH_2O_2$ )
30. กรดอะซีติก ( $C_2H_4O_2$ )
31. กรดโพรพิโอนิก ( $C_3H_6O_2$ )
32. กรดบิวทีริก ( $C_4H_8O_2$ )
33. กรดไอโซบิวทีริก ( $C_4H_8O_2$ )
34. น้ำกลั่น

## วิธีการ

### 1. การเตรียมถ่านจากไม้ไผ่

#### 1.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา

1.1.1 นำไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี มาล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของไม้ไผ่ หลังจากนั้นนำมาตากแดดให้แห้ง

1.1.2 นำไม้ไผ่มาบดให้มีขนาดเล็กพอสมควร

1.1.3 นำไม้ไผ่ที่บดแล้วเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน โดยการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

1.1.4 นำถ่านที่ได้จากการเผา บดให้ละเอียดจนสามารถผ่านร่อนตะแกรงขนาด 150 ไมครอน

1.1.5 นำถ่านกัมมันต์ที่บดละเอียดไปอบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น

1.1.6 ทำซ้ำข้อ 1.1.3 ถึง 1.1.5 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 550 องศาเซลเซียส

1.1.7 ทำซ้ำข้อ 1.1.1 ถึง 1.1.6 โดยเปลี่ยนเป็น ไม้ไผ่ตง อายุ 2 และ 3 ปี

นำถ่านทั้งหมด ที่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้ว ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการคาร์บอนไนซ์ และเลือกอุณหภูมินั้นมาใช้เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาครั้งต่อไป

1.2 ทำการเผาไม้ไผ่หามัจจุ อายุ 1, 2 และ 3 ปี โดยอาศัยอุณหภูมิที่เหมาะสม จากการศึกษาทดลองข้อ 1.1

### 2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

2.1 นำถ่านไม้ที่ผ่านการคัดขนาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.2 ทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นต่างๆ คือ



### 2.2.1 กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### ก. การหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

- 1) นำถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2) ผสมถ่าน กับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 85 โดยให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1 ต่อ 4
- 3) ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำที่ใช้ล้าง ได้ประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น
- 5) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนไม้ไฟตง อายุ 2 และ 3 ปี และ ไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1, 2 และ 3 ปี
- 6) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 5) โดยเปลี่ยนระยะเวลาเป็น 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
- 7) อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น
- 8) นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับ ไอ โอดีน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และเลือกเวลานั้นมาใช้เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลองต่อไป

#### ข. การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

- 1) ทำซ้ำข้อ ก. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก โดยนำกรดฟอสฟอริกมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วนน้ำต่อกรดเข้มข้น เท่ากับ 1 ต่อ 3, 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 ตามลำดับ
- 2) ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) โดยเลือกเวลาที่ เหมาะสม จากการทดลอง ในข้อ 2.2.1 ก.
- 3) ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ใช้ล้าง ได้ประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น

- 4) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 3) โดยเปลี่ยนไม้ไผ่ตง อายุ 2 และ 3 ปี และ ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1, 2 และ 3 ปี
- 5) อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น
- 6) นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน เพื่อหาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น และเลือกความเข้มข้นนั้นมาใช้เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองต่อไป

## 2.2.2 โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งมีวิธีการ ดังนี้

ก. การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์

- 1) นำถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2) ผสมถ่าน กับโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น เท่ากับ 1 ต่อ 4
- 3) ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 4) ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ใช้ล้าง ได้ประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น
- 5) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนไม้ไผ่ตง อายุ 2 และ 3 ปี และ ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1, 2 และ 3 ปี
- 6) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเป็นร้อยละ 40, 60 และ 80 ตามลำดับ
- 7) อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น
- 8) นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเลือกความเข้มข้นนั้นมาใช้เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองต่อไป

ข. การหาความเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์

- 1) ทำซ้ำข้อ 2.2.2 ก. โดยเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม จากการทดลองในข้อ 2.2.2 ก.
- 2) ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเป็น 8 และ 12 ชั่วโมง
- 3) ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ใช้ล้าง ได้ประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น
- 4) ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 3) โดยเปลี่ยนไม้ไฟตง อายุ 2 และ 3 ปี และ ไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1, 2 และ 3 ปี
- 5) อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น
- 6) นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอ โอดีน เพื่อหาความเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น และเลือกความเวลานั้นมาใช้เป็น เวลาที่ใช้ในการทดลองต่อไป

### 2.2.3 กรดไนตริก ซึ่งมีวิธีการ ดังนี้

- ก. นำถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ข. ผสมถ่าน กรดไนตริก ความเข้มข้น โดยให้อัตราส่วน โดยน้ำหนักของ วัตถุติดต่อกันสารกระตุ้น เท่ากับ 1 ต่อ 4
  - ค. ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
  - ง. ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ใช้ล้าง ได้ประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น
  - จ. ทำซ้ำข้อ 1) ถึง 4) โดยเปลี่ยนไม้ไฟตง อายุ 2 และ 3 ปี และ ไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1, 2 และ 3 ปี
  - ฉ. อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น

### 3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ในส่วนของ การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น

- 3.1 วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 ซึ่งมีรายละเอียดของการวิเคราะห์

ดังนี้

#### 3.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยปริมาตร

1) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นความร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 70.0 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปริมาตร 550.0 มิลลิลิตร

ข. สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1) ชั่งไอโอดีนประมาณ 12.70 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ ประมาณ 19.10 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง

2) เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป คนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร

3) คนสารละลายด้วยแท่งแก้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไอโอดีนละลายหมด

4) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

5) เทสารละลายลงในขวดสีชา

ค. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต หนักประมาณ 24.82 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร คนให้ละลาย
- 2) เติมโซเดียมคาร์บอเนตประมาณ 0.10 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรีย
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
- 4) เทสารละลายลงในขวดสีชา และเก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 4 วันก่อนนำมาใช้

ง. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
- 2) ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
- 4) เก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

จ. สารละลายน้ำแป้ง

- 1) ชั่งแป้งหนักประมาณ 0.1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร
- 2) นำไปต้มจนได้สารละลายใส (น้ำแป้งควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำ การทดลอง)

### 3.1.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

#### ก. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

- 1) ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ หนัก  $2.0 \pm 0.0001$  กรัม ลงไป เขย่าให้ละลาย
- 3) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 37.0 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร
- 4) ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต
- 5) คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไซโอซัลเฟต โดย

$$N_1 = (P_1 \times R)/S$$

- เมื่อ
- $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต
  - $P_1$  = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต
  - $R$  = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต
  - $S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

#### ข. ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

- 1) ปิเปตสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนได้สารละลายที่มีสีเหลืองอ่อน
- 3) หยดสารละลายน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์
- 4) ไทเทรตต่อ จนได้สารละลายสีไม่มีสี
- 5) คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน โดย

$$N_2 = (S \times N_1)/I$$

- เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน  
 $S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต  
 $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต  
 $I$  = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน

### 3.1.3 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน

ก. อบถ่านที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

ข. ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านตัวอย่างใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีฝาปิด โดยชั่งน้ำหนักถ่านตัวอย่าง 3 ค่าตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไอโอดีน หลังจากการดูดซับ น้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่า 0.02 นอร์มอล

ค. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10.0 มิลลิลิตร แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอ์ ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ง. เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ปิดฝาและเขย่าแรงๆ 30 วินาที

จ. กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวดกรวย ขนาด 100 มิลลิลิตร

ฉ. ปล่อยให้สารละลาย 50.0 มิลลิลิตร ไส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร

ช. ไทเทรตด้วยสารละลาย โซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลือง

ซ. เติมน้ำแข็ง 2 – 3 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน

ฅ. ไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี

ญ. บันทึกปริมาตร โซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้

ฎ. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ โดย

$$C = N_1 / (50 \times S)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ

$N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

ฎ. กำหนดค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน จาก

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

เมื่อ A =  $12693N_2$

B =  $126.93N_1$

DF = ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (dilution factor)

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

S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

M = น้ำหนักถ่าน

ฐ. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน กับ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ จะได้กราฟป็นเส้นตรง

ฑ. กำหนดค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ตรงตำแหน่งที่ ค่าความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเหลือ เท่ากับ 0.02 นอร์มอล



### 3.2 วิเคราะห์ค่าการดูดซับฟีนอล โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AWWA B600-96

#### 3.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.73 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.50

- 1) ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 69.32 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร
- 2) ปรับ ความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จนได้ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.50
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร

ข. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.73 โมลาร์ ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร
- 2) เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร

ค. สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

- 1) ชั่งฟีนอล หนักประมาณ 0.50 กรัม
- 2) เติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ เพียงเล็กน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ลงไป คนตลอดเวลา จนได้ ปริมาตร 75±25 มิลลิลิตร
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ จนถึงขีดบอกริมาตร

- มิลลิลิตร
- ง. สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร
  - 2) เติมน้ำฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ จนถึงขีดบอกริมาตร
- จ. สารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1000 นอร์มอล
- 1) เตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 ก.
- ฉ. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ความเข้มข้น 0.1000 นอร์มอล
- 1) เตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 ง.
- ช. สารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร
- 1) ชั่งโพแทสเซียมโบรเมต 2.784 กรัม และชั่งโพแทสเซียมโบรไมด์ 10.00 กรัม
  - 2) เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อยแล้วกวนให้เข้ากันจากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป กวนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร 75±25 มิลลิลิตร
  - 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร
- ซ. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 12.5 % ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร
- 1) ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ หนักประมาณ 6.25 กรัม
  - 2) ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร
  - 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร
- ฅ. สารละลายน้ำแป้ง
- 1) เตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 จ.

ญ. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

- 1) ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หนักประมาณ 5.60 กรัม
- 2) ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

### 3.1.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

ก. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

- 1) ทำเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 ก.

ข. ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร
  - 2) เติมสารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ ความเข้มข้น 0.10 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้สารละลายเท่ากัน
  - 3) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5.0 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 3 นาที
  - 4) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 12.5% ปริมาตร 8.0 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 3 นาที
  - 5) นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลือง
  - 6) เติมน้ำแข็ง 2 – 3 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน
  - 7) ไทเทรตต่อ จนกระทั่งได้สารละลายใสไม่มีสี
  - 8) บันทึกปริมาตรโซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้
  - 9) คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล โดย

$$M_p \text{ (g/l)} = \frac{(V_1 \times N_1) - (V_2 \times N_2)}{V_p} \times 15.685$$

เมื่อ	$M_p$	= ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (กรัมต่อลิตร)
	$V_p$	= ปริมาตรของสารละลายฟีนอล (มิลลิลิตร)
	$V_1$	= ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ (มิลลิลิตร)
	$N_1$	= ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมโบรเมต-โบรไมด์ (นอร์มอล)
	$V_2$	= ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
	$N_2$	= ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (นอร์มอล)

### 3.1.3 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับฟีนอล

- ก. ชั่งถ่านกัมมันต์หนักประมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 50 มิลลิลิตร 4 ขวด
- ข. เปิดสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกรดต่าง เท่ากับ 6.50 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 ขวดแรก
- ค. เปิดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ ความเข้มข้นกรดต่างเท่ากับ 6.50 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารรีดิวซ์
- ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมมิดีด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
- ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอล
- ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.2.3 ก. ถึง 3.2.3 ข. โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.05 กรัม จนกระทั่งความเข้มข้นที่สามารถดูดซับได้ มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ของความเข้มข้นเริ่มต้น

ณ. กำหนดค่าการดูดซับฟีนอล (phenol value) โดย

1) กำหนดหาเปอร์เซ็นต์ของสารละลายฟีนอลที่เหลืออยู่ (% residual filtrate phenol) จาก

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

2) กำหนดหาร้อยละของฟีนอลที่ถูกดูดซับ (% adsorbed phenol) จาก

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นฟีนอลที่ถูกดูดซับ} = 100 - \text{ร้อยละความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือ}$$

3) กำหนดหาปริมาณถ่านที่ใช้ (กรัมต่อลิตร) จาก

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

4) กำหนดหาค่า X/M ในแต่ละปริมาณถ่านที่ใช้

5) เขียนกราฟระหว่าง ร้อยละของสารละลายฟีนอลที่เหลือ กับค่า X/M โดยใช้เป็นลอการิทึม จะได้กราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดต่างๆ

6) หาค่า X/M ที่ เปอร์เซ็นต์ของสารละลายฟีนอลที่เหลือเท่ากับ 10 จากไอโซเทอมที่ได้เพื่อใช้กำหนดค่าฟีนอล (phenol value) โดยสามารถคำนวณได้จาก

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

### 3.3 วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) โดยวิเคราะห์

#### 3.3.1 ปริมาณความชื้น (moisture)

วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของถ่านตัวอย่าง โดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3173 – 95 มีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

- ก. อุ่นเตาเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
  - ข. อบอุ่นด้วยกระบือพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้วางไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
  - ค. ชั่งถ่านหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระบือ
  - ง. อบอุ่นจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นในถ่านตัวอย่าง
- โดย

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

#### 3.3.2 ปริมาณสารระเหย (volatile matter)

วิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในถ่านตัวอย่าง โดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 – 95 มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- ก. เผาถ้วยกระบือพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้วางไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- ข. ชั่งถ่านตัวอย่างหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระบือ หรือ ใช้ถ่านตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้ว
- ค. เผาถ่านตัวอย่างที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาให้ปิดฝาด้วยกระบือ) แล้วนำออกจากเตาเผาทันที ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- ง. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำกระทั่งถ่านตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

จ. กำหนดปริมาณสารระเหยในตัวอย่าง โดย

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}}$$

### 3.3.3 ปริมาณเถ้า (Ash)

วิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 – 95 มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

ก. เเผ่ด้วยกระบะเบืองพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

ข. ชั่งถ่านตัวอย่างหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระบะเบือง หรือ ใช้สารตัวอย่างที่ผ่านการหาความชื้นแล้ว

ค. เผ่ถ่านตัวอย่างที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (เปิดฝาด้วยกระบะเบืองขณะเผา) กำหนดปริมาณเถ้าในสารตัวอย่างโดย

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักถ่านตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

### 3.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยอาศัยผลต่าง

ปริมาณคาร์บอนคงตัวในสารตัวอย่างคำนวณจาก

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

3.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านไม้ไฟ และ ถ่านกัมมันต์ โดยอาศัยเทคนิคฟลูอิดรีทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

มีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

- ก. นำถ่านไม้ไฟ หรือ ถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ศึกษา และ โปแทสเซียมโบรไมด์ อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น
- ข. ตักถ่านปริมาณเล็กน้อย ผสมกับ โปแทสเซียมโบรไมด์ ในโถรง จากนั้นบดให้ละเอียด
- ค. ตักส่วนผสมของถ่านใส่ลงในแม่พิมพ์ (Die) แล้วนำไปเพิ่มความดันจนถึงประมาณ 3500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และคงความดันไว้ประมาณ 1 นาที จะได้แผ่นบางและโปร่งใส เรียกว่า KBr disc
- ง. นำ KBr disc ที่เตรียมได้ ไปวัดหาสเปกตรัม

3.5 การศึกษาโครงสร้างของถ่านไม้ไฟ และ ถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

มีวิธีการศึกษา ดังนี้

- ก. นำถ่านไม้ไฟ หรือ ถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ศึกษา อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น
- ข. นำแถบกาบคาร์บอนรูปวงกลม ติดลงบนแท่งอะลูมิเนียมที่ใช้ติดตัวอย่าง
- ค. โรยตัวอย่างถ่านไม้ไฟ หรือ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ลงไป
- ง. นำตัวอย่างที่เตรียมไปเคลือบผิวด้วยโลหะทองในเครื่องเคลือบโลหะสุญญากาศ เพื่อให้ถ่านไม้ไฟ หรือ ถ่านกัมมันต์ มีสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) สูงและเกิดการกระจายอิเล็กตรอนมากขึ้น
- จ. นำตัวอย่างที่เคลือบผิวแล้ว มาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



#### 4. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม

##### 4.1 การหาปริมาณค่าที่เหมาะสมในการดูดซับ

###### 4.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเตรียมจาก กรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 357.0 มิลลิลิตร และ โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 643.0 มิลลิลิตร

ข. เตรียมสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเปิดสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.40, 0.80, 1.20, 1.60 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยเปิดสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

###### 4.1.2 การทดลองหาปริมาณค่าที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.1 กรัม ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ค. เปิดสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวด

ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
- ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ฟชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
- ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะแคดเมียม
- ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.1.2 ก. ถึง 4.1.2 ข. โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.1 กรัม จนกระทั่งความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่
- ฅ. สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (กรัมต่อลิตร) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียม เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม
- ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.1.2 ก. ถึง 4.1.2 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 4.2 การหาความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

### 4.2.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเตรียมจาก กรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 982.3, 945.6, 846.0, 643.7, 357.0, 148.1, 52.6 และ 17.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ และ โซเดียมอะซิเตท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 17.7, 54.4, 154.0, 365.3, 643.0, 851.9, 947.4 และ 983.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ข. เตรียมสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยปีเปตสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปีเปตสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.4, 0.8, 1.2,

1.6 และ 2.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ง. ทำซ้ำข้อ 4.2.1 ข. และ 4.2.1 ค. โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างเป็น 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ตามลำดับ

#### 4.2.2 การทดลองหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 4.2.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ค. ปิเปิดสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวด

ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ฟชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะแคดเมียม

ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.2.2 ก. ถึง 4.2.2 ช. โดยเปลี่ยนสารละลายแคดเมียม ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 เป็น สารละลายแคดเมียม ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ตามลำดับ

ฅ. สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียม เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.2.2 ก. ถึง 4.2.2 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

### 4.3 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 4.3.1 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

- ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 4.2.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด
  - ค. ปิเปตสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวด
  - ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
  - จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
  - ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ฟชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
  - ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะแคดเมียม
  - ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.3.2 ก. ถึง 4.3.2 ช. โดยเปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ 300 ตามลำดับ
  - ณ. สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียม เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
  - ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.3.1 ก. ถึง 4.3.1 ณ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

### 4.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะแคดเมียม

#### 4.4.1 การเตรียมสารละลาย

- ก. เตรียมสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลอง ข้อ 4.2 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

โดยปีเปตสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จนถึงขีดบอกปริมาตร

ข. ทำซ้ำข้อ 4.4.1 ก. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### 4.4.2 การทดลองหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 4.2.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ค. ปีเปตสารละลายแคดเมียม ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวด

ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา เท่ากับ เวลาที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 4.3

จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ฟชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะแคดเมียม

ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.4.2 ก. ถึง 4.4.2 ช. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ฌ. สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะแคดเมียม

ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.4.2 ก. ถึง 4.4.2 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 5. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลลีนบลู

### 5.1 การหาปริมาณค่าที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 5.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 1 ลิตร จาก สารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 670.0 มิลลิลิตร และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 330.0 มิลลิลิตร

ข. เตรียมสารละลายเมทิลลีนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็น กรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยชั่งเมทิลลีนบลูหนัก 0.250 กรัม ลงในขวดเชิง ปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 จนถึงขีดบอก ปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายเมทิลลีนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็น กรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยปีเปิดสารละลายเมทิลลีนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลาย บัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ง. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลลีนบลู ความเข้มข้น 4, 8, 12, 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปีเปิดสารละลายเมทิลลีนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.08, 0.16, 0.24, 0.32 และ 0.40 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรด ต่าง เท่ากับ 5.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

#### 5.1.2 การทดลองหาปริมาณค่าที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ข. ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.025 กรัม ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด
  - ค. ปิเปตสารละลายเมทิลลิ้นบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด
  - ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
  - จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก
- จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
- ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
  - ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดเมทิลลิ้นบลู
  - ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.1.2 ก. ถึง 5.1.2 ข. โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.025 กรัม จนกระทั่งความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่
  - ฅ. สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (กรัมต่อลิตร) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลลิ้นบลู เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม
  - ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.1.2 ก. ถึง 5.1.2 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 5.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

### 5.2.1 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

- ก. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 5.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด
  - ข. ปิเปตสารละลายเมทิลลิ้นบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวด
  - ค. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
  - ง. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก
- จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
- จ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
  - ฉ. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดเมทิลลิ้นบลู

ข. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.2.1 ก. ถึง 5.2.1 ฉ. โดยเปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ

ค. สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลลิโนบลู เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ง. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.2.1 ก. ถึง 5.2.1 ค. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

### 5.3 การหาความเป็นกรดค้างที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 5.3.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดค้าง เท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ปริมาตร 1 ลิตร จาก สารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 880.0, 670.0, 495.0, 345.0 และ 220.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 120.0, 330.0, 505.0, 655.0 และ 780.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ข. เตรียมสารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็น กรดค้าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยชั่งเมทิลลิโนบลูหนัก 0.125 กรัม ลงในขวดเชิง ปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดค้าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอก ปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็น กรดค้าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเปิดสารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลาย บัฟเฟอร์ ความเป็นกรดค้าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ง. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 4, 8, 12, 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดค้าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยเปิดสารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.08, 0.16, 0.24, 0.32



และ 0.40 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

จ. ทำซ้ำข้อ 5.3.1 ข. ถึง 5.3.1 ง. โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างเป็น 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

### 5.3.2 การทดลองหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 5.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ค. ปิ่บสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด

ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา เท่ากับเวลาที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.2

จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอ้อมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิชิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดเมทิลีนบลู

ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.3.2 ก. ถึง 5.3.2 ช. โดยเปลี่ยนสารละลายเมทิลีนบลู ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 เป็น สารละลายเมทิลีนบลู ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

ฅ. สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลีนบลู เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.3.2 ก. ถึง 5.3.2 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง



- ข. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.4.2 ก. ถึง 5.4.2 ข. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 50, 75, 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- ฅ. สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู
- ฉ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.4.2 ก. ถึง 5.4.2 ฅ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 6. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล

### 6.1 การหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 6.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.73 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 1 ลิตร โดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 69.32 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรดต่างด้วย 1 โมลาร์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนได้ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 แล้วเทลงในขวดเชิงปริมาตร และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ข. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเปิดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.73 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร และเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยชั่งเมทิลีนบลูหนัก 0.500 กรัม ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ง. เตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยเปิดสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.5 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้ว

ปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 จนถึงขีดบอกปริมาตร

จ. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล ความเข้มข้น 2, 5, 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.02, 0.05, 0.10, 0.50 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 จนถึงขีดบอกปริมาตร

### 6.1.2 การทดลองหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.05 กรัม ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด

ค. ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 ขวดแรก

ง. ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไว้ตัวอย่าง

จ. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

ฉ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ช. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ซ. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอล

ฌ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.1.2 ก. ถึง 6.1.2 ซ. โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.05 กรัม จนกระทั่งความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่

ญ. สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (กรัมต่อลิตร) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

ฎ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.1.2 ก. ถึง 6.1.2 ญ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 6.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

### 6.2.1 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

- ก. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 6.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด
- ข. ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 ขวดแรก
- ค. ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไร้ออกซิเจน
- ง. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- จ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมมิดีด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก
- ฉ. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
- ช. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดเมทิลดีนบลู
- ซ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.2.1 ก. ถึง 6.2.1 ช. โดยเปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ
- ฌ. สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
- ญ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.2.1 ก. ถึง 6.2.1 ฉ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 6.3 การหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

### 6.3.1 การเตรียมสารละลาย

- ก. เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.073

โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 แล้วปรับค่าความเป็นกรดต่างที่ต้องการ โดยใช้ สารละลาย 0.1 โมลาร์ กรดฟอสฟอริก และ 0.1 โมลาร์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ข. เตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยชั่งเมทิลลินบลูหนัก 0.050 กรัม ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. เตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 1 ลิตร โดยปีเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ง. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล ความเข้มข้น 2, 5, 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปีเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.2, 0.5, 1.0, 5.0 และ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร

จ. ทำซ้ำข้อ 6.3.1 ข. และ 6.3.1 ง. โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างเป็น 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

### 6.3.2 การทดลองหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 6.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด

ค. ปีเปตสารละลายเมทิลลินบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 ขวดแรก

ง. บีบอัดสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไว้ตัวอย่าง

จ. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา เท่ากับเวลา ที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 6.2

ฉ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมมัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ช. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่อง ยูวีวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ซ. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัด เมทิลดีนบลู

ณ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.3.2 ก. ถึง 6.3.2 ซ. โดยเปลี่ยนสารละลายฟีนอล ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 เป็น สารละลายฟีนอล ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

ญ. สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการ กำจัดฟีนอล เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

ฎ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.3.2 ก. ถึง 6.3.2 ญ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

#### 6.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

##### 6.4.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็น กรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลอง ข้อ 6.2 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยชั่งฟีนอล หนัก 5 มิลลิกรัม ลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัพเฟอร์ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จนถึงขีดบอกปริมาตร

ข. ทำซ้ำข้อ 6.4.1 ก. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเป็น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### 6.4.2 การทดลองหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 6.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด

ค. ปิเปตสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 6.3 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 ขวดแรก

ง. ปิเปตสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 6.3 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไรต์ตัวอย่าง

จ. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา เท่ากับ เวลาที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 6.2

ฉ. กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

ช. นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ซ. นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอล

ฅ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.4.2 ก. ถึง 6.4.2 ช. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ญ. สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

ฎ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.4.2 ก. ถึง 6.4.2 ฅ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง



## 7. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีน

### 7.1 การหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 7.1.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.0 ปริมาตร 1.0 ลิตร จากสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 495.0 มิลลิลิตร และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 505.0 มิลลิลิตร

ข. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยปริมาตร โดยเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นความร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 70.0 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปริมาตร 550.0 มิลลิลิตร

ค. สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) ชั่งไอโอดีนประมาณ 1.270 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ ประมาณ 1.910 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง
- 2) เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป คนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร
- 3) คนสารละลายด้วยแท่งแก้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไอโอดีนละลายหมด
- 4) เติมน้ำกลั่นในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร
- 5) เทสารละลายลงในขวดสีชา

ง. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต หนักประมาณ 2.482 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร คนให้ละลาย
- 2) เติมโซเดียมคาร์บอเนตประมาณ 0.01 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรีย
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
- 4) เทสารละลายลงในขวดสีชา และเก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 4 วันก่อนนำมาใช้

จ. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 0.50 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
- 2) ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 0.3567 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
- 4) เก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

ฉ. สารละลายน้ำแป้ง

- 1) ชั่งแป้งหนักประมาณ 0.1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร
- 2) นำไปต้มจนได้สารละลายใส (น้ำแป้งควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำ การทดลอง)

### 7.1.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

ทำเช่นเดียวกับการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายในหัวข้อการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ข้อ 3.1.2) โดยใช้สารละลายที่ได้จากการเตรียมในข้อ 7.1.1

### 7.1.3 การทดลองหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

- ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ข. ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.1250 กรัม ใส่ขวดรูปกรวย จำนวน 3 ขวด
- ค. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟต ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- ง. เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.0 ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 15 นาที
- จ. กรองและแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอึดตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวดรูปกรวย ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ฉ. บีบอัดสารละลาย 10.0 มิลลิลิตร ใสลงในขวดรูปกรวย ขนาด 50.0 มิลลิลิตร
- ช. ไทเทรตด้วยสารละลาย โซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลือง
- ซ. เติมน้ำแข็ง 2 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน
- ฅ. ไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี
- ฉ. บันทึกปริมาตรโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้
- ฐ. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลืออยู่ เช่นเดียวกับข้อ

### 3.1.3 ฎ.

ฎ. คำนวณปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่จาก

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

เมื่อ  $A = 12693N_2$

$B = 126.93N_1$

$DF =$  ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (dilution factor)

$$= \frac{\text{ปริมาณไอโอดีนเริ่มต้น} + \text{ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาณไอโอดีนที่ปิด}}$$

$S =$  ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต

ฐ. ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 7.1.3 ก. ถึง 7.1.3 ฎ โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.1250 กรัม จนกระทั่งปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่คงที่

ฑ. สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (กรัมต่อลิตร) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดไอโอดีน เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

ฒ. ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 7.1.3 ก. ถึง 7.1.3 ฑ. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 7.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

### 7.2.1 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ก. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 7.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ข. ทำเช่นเดียวกับข้อ 7.1.3 ค. ถึง 7.1.3 ฎ โดยเปลี่ยนเวลาในการสัมผัสเป็น 5 10 15 นาที และเพิ่มเวลาสัมผัสทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่คงที่

ค. สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดไอโอดีน เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

### 7.3 การหาความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### 7.3.1 การเตรียมสารละลาย

ก. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดค่า เท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ปริมาตร 1.0 ลิตร จากสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 880.0, 670.0, 495.0, 345.0 และ 220.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 120.0, 330.0, 505.0, 655.0 และ 780.0 มิลลิลิตร

ข. สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ความเป็นกรดค่า เท่ากับ 3.0 ปริมาตร 1 ลิตร

- 1) ชั่งไอโอดีนประมาณ 1.270 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ ประมาณ 1.910 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง
- 2) เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป คนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร
- 3) คนสารละลายด้วยแท่งแก้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไอโอดีนละลายหมด
- 4) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ความเป็นกรดค่า เท่ากับ 3.0 จนถึงขีดบอกปริมาตร
- 5) เทสารละลายลงในขวดสีชา
- 6) ในการเตรียมสารละลายไอโอดีน ที่ความเป็นกรดค่า เท่ากับ 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ให้ใช้บัฟเฟอร์ความเป็นกรดค่าตามที่ต้องการ ปรับปริมาตรสารละลาย

#### 7.3.2 การทดลองหาความเป็นกรดค่าที่เหมาะสม

ก. ชั่งถ่านกัมมันต์ โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 7.1 ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

ข. ทำเช่นเดียวกับข้อ 7.1.3 ค. ถึง 7.1.3 ฎ โดยใช้เวลาสัมผัสเท่ากับเวลาที่  
เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.2

ค. ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 7.1.3 ก. ถึง 7.1.3 ฎ โดยเปลี่ยนสารละลายไอโอดีนความ  
เป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 เป็นสารละลายไอโอดีน ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0, 5.0, 9.0 และ 9.0  
ตามลำดับ

ง. สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ ร้อยละประสิทธิภาพการ  
กำจัดไอโอดีน เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

จ. ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 7.3.2 ก. ถึง ข้อ 7.3.2 ง. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

#### 7.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน

##### 7.4.1 การเตรียมสารละลาย

ก. สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ความเป็นกรดต่าง  
เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.3 ปริมาตร 1 ลิตร

1) ชั่งไอโอดีนประมาณ 3.1750 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์  
ประมาณ 4.7750 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง

2) เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมน้ำ  
กลั่นลงไป คนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร

3) คนสารละลายด้วยแท่งแก้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้  
แน่ใจว่าไอโอดีนละลายหมด

4) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ความเป็นกรด  
ต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.3 จนถึงขีดบอกปริมาตร

5) เทสารละลายลงในขวดสีชา

ข. สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015 และ 0.020 นอร์  
มอล ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.3  
ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

1) ปิเปตสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ในข้อ 7.4.1 ก. ปริมาตร 50.0, 100.0, 150.0 และ 200.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2) เติมสารละลายบัฟเฟอร์ ความเข้มข้นเท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.3 จนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1) ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต หนักประมาณ 6.205 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร คนให้ละลาย

2) เติมโซเดียมคาร์บอเนตประมาณ 0.03 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอซัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรีย

3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

4) เทสารละลายลงในขวดสีชา และเก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาใช้

ง. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015 และ 0.020 นอร์มอล ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

1) ปิเปตสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ในข้อ 7.4.1 ก. ปริมาตร 50.0, 100.0, 150.0 และ 200.0 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2) เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

จ. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ปริมาตร 1 ลิตร

1) อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 1.0 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

มิลลิลิตร

- 2) ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 0.8918 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- 3) เทลงในขวดเชิงปริมาตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับปริมาตร
- 4) เก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

#### 7.4.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

ทำเช่นเดียวกับการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายในหัวข้อการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ข้อ 3.1.2) โดยใช้สารละลายที่ได้จากการเตรียมในข้อ 7.4.1

#### 7.4.3 การทดลองหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ อบที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ข. ชั่งถ่านกัมมันต์หนักเท่ากับถ่านที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.1 ใส่ขวดรูปกรวย จำนวน 3 ขวด

ค. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร แก้วขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟต ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ง. เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ความเป็นกรดต่างเท่ากับ ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.3 ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ปิดฝา และเขย่าเป็นเวลา เท่ากับ เวลาที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.2

จ. กรองและแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวดรูปกรวย ขนาด 50 มิลลิลิตร

ฉ. ปิเปตสารละลาย 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 50.0 มิลลิลิตร

ช. ไทเทรตด้วยสารละลาย โซเดียมไธโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลือง



- ซ. เติมน้ำแบ่ง 2 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน
- ฅ. ไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี
- ฉ. บันทึกปริมาตรโซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้
- ค. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลืออยู่ เช่นเดียวกับข้อ

## 3.1.3 ก.

- ก. คำนวณปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่จาก

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

$$\text{เมื่อ } A = 12693N_2$$

$$B = 126.93N_1$$

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

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

$$S = \text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต}$$

จ. ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 7.4.3 ก. ถึง 7.4.3 ก. โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเป็น 0.010, 0.015, 0.020 และ 0.025 นอร์มอล ตามลำดับ และสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตเป็น 0.010, 0.015, 0.020 และ 0.025 นอร์มอล ตามลำดับ เช่นกัน

ข. สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์ม การดูดซับของไอโอดีน

ฅ. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 7.4.3 ก. ถึง 7.4.3 ข. โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านตัวอย่าง

## 8. การศึกษาหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ตอง และ ไม้หมางู

### 8.1 การเตรียมสารละลาย

8.2.1 การเตรียมสารละลายวัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase) ฟอสเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 0.1

ก. บีบตรกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตรขนาด 1 ลิตร

ข. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ค. นำสารละลายที่เตรียมได้ ไปกรอง ผ่านตัวกรองเซลลูโลส

ง. นำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว ไปทำการไล่แก๊ส โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกส์เป็นเวลา 30 นาที

จ. เก็บสารละลายใส่ขวด

### 8.2.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำส้มควันไม้

ก. เตรียมตัวทำละลายผสมระหว่างเฮกเซนและไดเอทิลอีเธอร์ (ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1)

ข. นำน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ตองและหมางู มากรอง เพื่อกำจัดตะกอนออก

ค. นำน้ำส้มควันไม้ที่กรองตะกอนแล้ว มาสกัด โดยใช้กรวยแยก ด้วยตัวทำละลายผสมที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

ง. แยกสารละลายชั้นบน (ชั้นน้ำ) ออกมา แล้วทำการกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 90 – 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 – 20 นาที

จ. นำสารละลายที่กลั่นแล้วมากรอง ผ่านตัวกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน

ฉ. บีบตรสารละลายที่กรองแล้ว ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดเชิงปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และ ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

8.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์น้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์  
ลิควิด โครมาโทกราฟี

8.2.1 นำสารละลายมาตรฐานกรดอินทรีย์มาวิเคราะห์ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน  
ระหว่าง ความเข้มข้น กับ พื้นที่ใต้กราฟ

8.2.2 นำสารละลายตัวอย่างน้ำส้มควันไม้มาวิเคราะห์ จากนั้นเทียบหาความเข้มข้น  
ของกรดอินทรีย์เทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น

## ผลการทดลอง และ วิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ด้วยวิธีทางกระตุ้นทางเคมี โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาให้เป็นถ่าน ชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น ซึ่งทำการหาความเข้มข้น และ เวลา ที่เหมาะสมในการกระตุ้น รวมถึงพันธุ์ และ อายุ ไม้ไผ่ที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วย โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

### 1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่

#### 1.1 สภาพที่เหมาะสมในการทำให้เป็นถ่าน

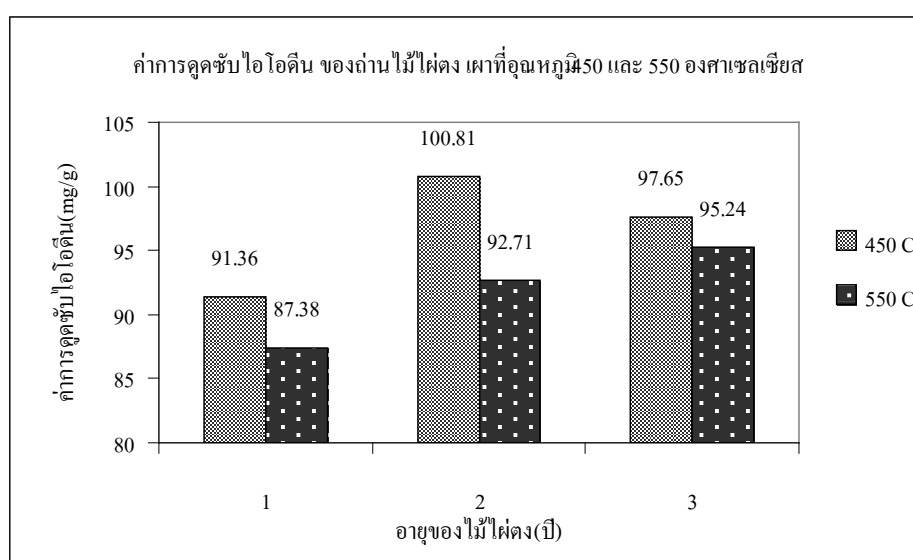
จากการทดลองหาสภาพที่เหมาะสมในการเผาไม้ไผ่ให้เป็นถ่าน ที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านที่ได้จะมีสีดำ แข็ง แต่เปราะ เมื่อหักดูพบว่าบริเวณที่หักมีความมันวาว และเมื่อนำถ่านที่ได้มาชั่งน้ำหนักที่สูญหายไปในการเผา ได้ผลแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 น้ำหนักที่สูญหายไปในระหว่างการเผาให้เป็นถ่าน

ชนิดของไม้ไผ่		น้ำหนักที่สูญหายไประหว่างการเผา (ร้อยละ)	
พันธุ์ไผ่	อายุ (ปี)	450 องศาเซลเซียส	550 องศาเซลเซียส
ตง	1	42.62	46.83
	2	51.16	55.13
	3	41.64	45.81
หมาจู้	1	41.87	-
	2	46.86	-
	3	44.03	-

จากตารางที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเผาไม้ไผ่ตงที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเล็กน้อย แสดงว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้สารอินทรีย์ที่สามารถเผาไหม้ได้ในไม้ไผ่ถูกเผาไหม้ได้มากขึ้น

และ จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (iodine number) โดยเลือกถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 2 และ 3 ปี มาทำการวิเคราะห์จะให้ผลดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับ ไอโอดีน ของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 2 และ 3 ปี ระหว่างที่เผาที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส

ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้น พบว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สามารถให้ค่าการดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่า ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการเผาให้ เป็นถ่านเพื่อนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ต่อไป คือ การเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และได้ใช้อุณหภูมินี้ในการเผาไม้ไผ่มาจู้ด้วย และ อีกเหตุผลหนึ่งที่เลือกเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาไม้ให้ เป็นถ่านนี้ จะทำการเก็บน้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) ที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งน้ำส้มควันไม้นี้จะมีสภาพที่ดีที่สุด เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ ประมาณ 425 องศาเซลเซียส (ชมรมสวนป่า ผลิตภัณฑ์ และ พลังงานจากไม้, 2546)

## 1.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

นำถ่านที่ผ่านกระบวนการเผา มาบดและคัดให้ได้ขนาด 150 ไมโครเมตร ล้างด้วยน้ำสะอาดและอบให้แห้ง และ ทำการกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก และ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และ ระยะเวลา ต่างกัน ในอัตราส่วนของสารละลายต่อถ่านเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก และกระตุ้นโดยการกลั่น ไหลกลับ จากนั้นจึงล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำประปา จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด่าง ใกล้เคียง 7 และล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำปราศจากไอออน และทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น โดยวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ จากค่าการดูดซับไอโอดีน

### 1.2.1 ค่าการดูดซับไอโอดีน

สำหรับถ่านที่ผลิตจากไม้ไผ่ พบว่าถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น มีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงว่าการกระตุ้นทำให้เกิดรูพรุนซึ่งจำเป็นต่อการดูดซับสาร ได้มากขึ้น โดยในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นก่อน และนำเวลาที่เหมาะสมนั้นมาใช้ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้นต่อไป ส่วนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อน และใช้ความเข้มข้นนั้นมาใช้เวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ก. การหาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

#### 1) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ผดง

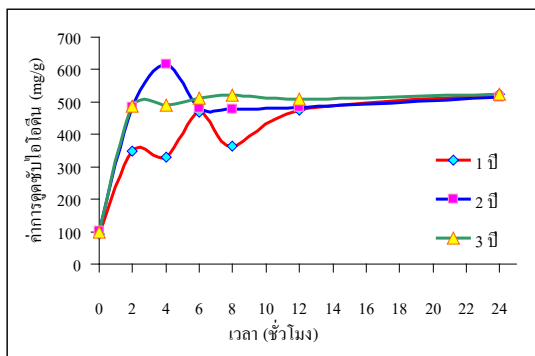
จากผลการทดลอง ในการหาเวลาที่เหมาะสมโดยทำการเปรียบเทียบเวลาที่ 2 4 6 8 12 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 (กรดเข้มข้น) พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ผดง มีค่ามากที่สุด ที่อายุไม้ 2 ปี คือ 615.84 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้เวลา 4 ชั่วโมง จึงเลือกใช้เวลานี้ มาเป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับถ่านไม้ไผ่ผดงทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหา

ความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก (น้ำ ต่อ กรดเข้มข้น) เท่ากับ 1:3 2:2 3:1 และ 4:0 โดยอาศัยเวลาที่เหมาะสม (4 ชั่วโมง) พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่ตงในทุกอายุปี มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก เท่ากับ 4:0 (คือ กรดเข้มข้น) จึงเลือกใช้กรดเข้มข้นมาเป็นความเข้มข้นที่ใช้กระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

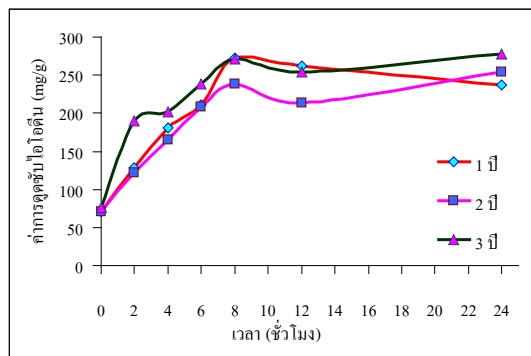
## 2) ถ่านกัมมันต์จากไผ่ไผ่หมาจู้

จากผลการทดลอง ในการหาเวลาที่เหมาะสม โดยทำการทดลอง เช่นเดียวกับไผ่ตง พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่หมาจู้ มีค่ามากที่สุด ที่อายุไผ่ 3 ปี คือ 277.24 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้เวลา 24 ชั่วโมง แต่มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้เวลา 8 ชั่วโมงมากนัก คือ 271.38 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น จึงเลือกเวลา 8 ชั่วโมง มาเป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสม และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก เท่ากับ 4:0 (คือ กรดเข้มข้น) เช่นเดียวกับถ่านไผ่ไผ่ตง

โดยคาดว่าสาเหตุที่เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นของถ่านไผ่ไผ่ทั้งสองชนิดแล้ว ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนลดลงบ้าง อาจเป็นเพราะ เมื่อถึงจุดที่เหมาะสมแล้ว ถ้าเพิ่มเวลา อาจจะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงได้

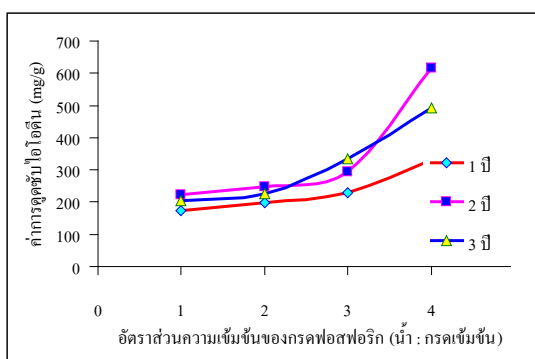


(ก)

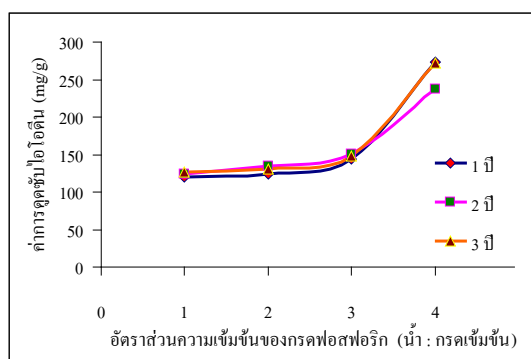


(ข)

ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 ที่เวลาต่างกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมางู



(ก)



(ข)

ภาพที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมางู เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ข. การหาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย  
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

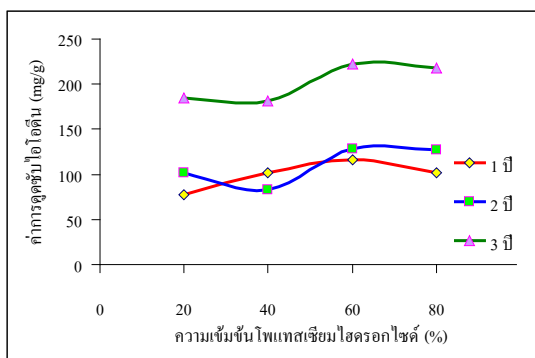
1) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง

จากผลการทดลอง ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้น ทำโดย  
การเปรียบเทียบความเข้มข้น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20 40 60 และ 80 ซึ่งพบว่าค่าการ  
ดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี จะมีค่ามากที่สุด คือ 221.86 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อ  
ใช้ความเข้มข้น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 60 จึงเลือกความเข้มข้นนี้มาใช้ในการกระตุ้น  
ถ่าน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับถ่านไม้ไผ่ตงทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหา  
เวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น ซึ่งเปรียบเทียบเวลาที่ 4 8 และ 12 ชั่วโมง โดยอาศัยความเข้มข้นที่  
เหมาะสม (ร้อยละ 60) พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี มีค่า  
มากที่สุด คือ 214.17 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้เวลากระตุ้น 4 ชั่วโมง จึงเลือกใช้เวลานี้มาเป็นเวลาที่  
ใช้ในการกระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

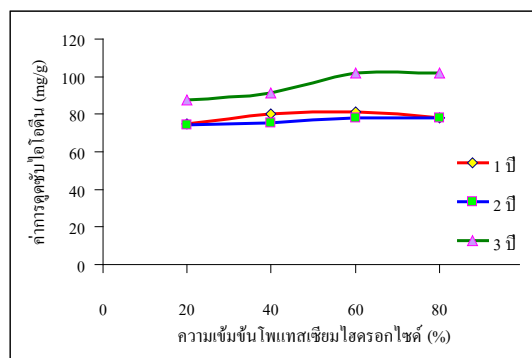
2) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู้

จากผลการทดลอง ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยทำการ  
ทดลองเช่นเดียวกับไม้ไผ่ตง พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่หมาจู้ มีค่า  
มากที่สุด ที่อายุไผ่ 3 ปี คือ 101.76 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ความเข้มข้น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์  
ร้อยละ 60 จึงเลือกความเข้มข้นนี้มาใช้ในการกระตุ้นถ่าน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับ  
ถ่าน ไม้ไผ่หมาจู้ทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น เช่นเดียวกับ  
ไม้ไผ่ตง พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี มีค่ามากที่สุด คือ  
113.94 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้เวลากระตุ้น 12 ชั่วโมง จึงเลือกใช้เวลานี้มาเป็นเวลาที่ใช้ในการ  
กระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

โดยคาดว่าสาเหตุที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ใน  
การกระตุ้นแล้ว ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนลดลงบ้าง อาจเป็นเพราะ เมื่อถึงจุดที่  
เหมาะสมแล้ว ถ้าเพิ่มความเข้มข้น อาจจะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้  
พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

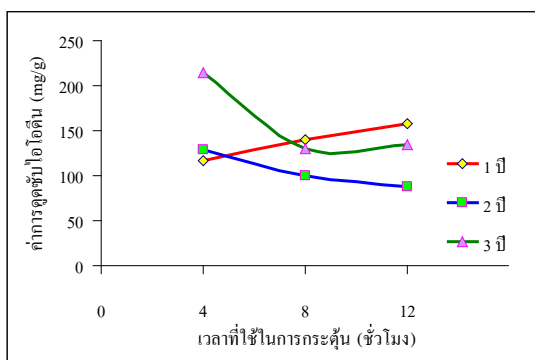


(ก)

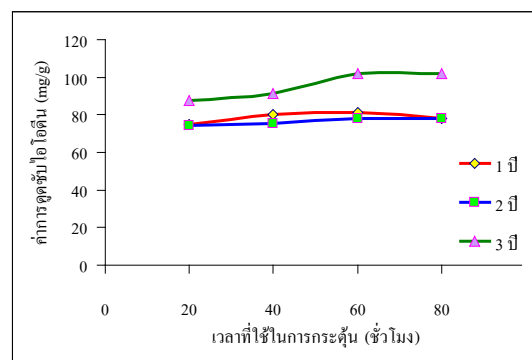


(ข)

ภาพที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมาจู้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล ที่เวลาต่างๆกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง ความเข้มข้นร้อยละ 60 และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมาจู้ ความเข้มข้นร้อยละ 60

### 1.2.2 ค่าการดูดซับฟีนอล

สำหรับถ่านที่ผลิตจากไม้ไผ่ พบว่าถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้นมีค่าการดูดซับฟีนอลต่ำกว่า (ค่าการดูดซับฟีนอลต่ำกว่า หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงกว่า) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และ โพลีเทสซีเอ็มไฮดรอกไซด์ แสดงว่าการกระตุ้นไม่ได้ช่วยทำให้การดูดซับดีขึ้น และในการหาค่าการดูดซับฟีนอลนั้นใช้วิธีมาตรฐานของ AWWA B600-96 ซึ่งค่าการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ได้แสดงในตารางที่ 12

จากการทดลองพบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ยังไม่ได้รับการกระตุ้น มีค่าการดูดซับฟีนอลต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และ ถ่านไม้ไผ่ที่ได้รับการกระตุ้น โดย กรดฟอสฟอริก หรือ โพลีเทสซีเอ็มไฮดรอกไซด์แล้ว ซึ่งหมายถึง มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ดีกว่า

โดยในการกระตุ้นนั้นจะทำให้หมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ผิวของถ่านกัมมันต์ กลายเป็นหมู่ซึ่งมีสภาพความเป็นลบเพิ่มขึ้น และ ฟีนอลอาจเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้ ฟีนอเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้น ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ต่ำกว่าถ่านไม้ไผ่ (Kaustubha Mohanty et.al., 2005)

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ค่าฟีนอล (กรัมต่อลิตร)	
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	
	ไผ่หมาจู้	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

\*\* ถ่าน ไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

## 2. สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่

### 2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ร้อยละ ความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)			
				ถ่าน	สาร ระเหย	คาร์บอน คงตัว	
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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.75	5.20	35.98	58.85	
		กระตุ้นโดย KOH	9.80	9.66	46.88	43.46	
	ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.27	9.15	54.73	36.12
			กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.98	9.01	33.96	57.03	
		กระตุ้นโดย KOH	5.83	14.35	45.09	40.56	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

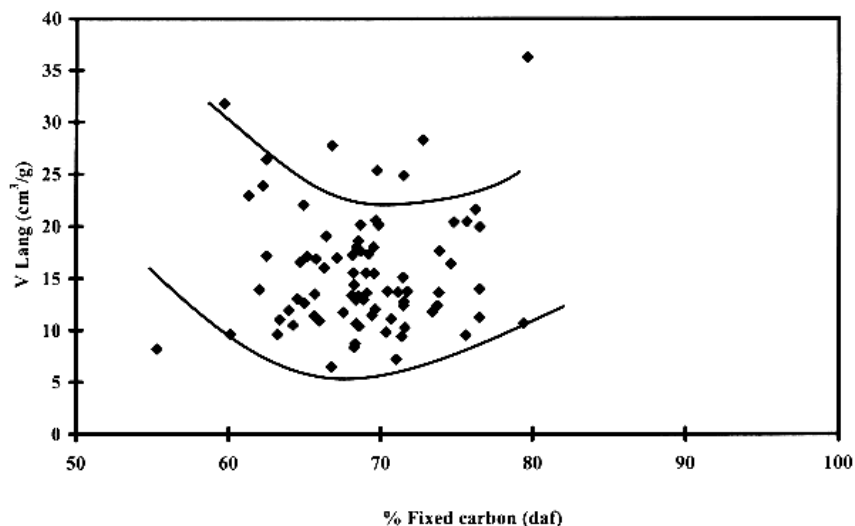
\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์ แสดงในตารางที่ 13 พบว่า ถ่านที่ได้จากการเผาไม้ไผ่ มีองค์ประกอบแบบประมาณ (ไม่รวมความชื้น) ดังนี้ คือ ปริมาณ เถ้า สารระเหย และ คาร์บอนคงตัว ไม่สูงมาก เมื่อทำให้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยใช้การกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัว สูงขึ้น จากประมาณร้อยละ 30 ถึง 50 เป็นประมาณร้อยละ 40 ถึง 60 เนื่องจากการเตรียมถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างซึ่งหลุดออกไปในรูปสารระเหย หรือ อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นกับ โครงสร้างของถ่าน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ซึ่ง การสลายตัวของโครงสร้างถ่านนั้น อาจเกิดขึ้นได้จากการแตกหักของพันธะใน โครงสร้างของถ่าน อันเนื่องมาจากความร้อน และ อาจเกิดจากการที่สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาดังน้ำออกจากถ่าน (dehydration) กับอะตอมของไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ในโครงสร้างของถ่าน

และเมื่อเปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ได้จากราย พบว่า ถ่านกัมมันต์ Fluka มีเถ้า (ash) และ สารระเหย (volatile matter) เพียงร้อยละ 2.12 และ 26.59 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึง การมี สารอนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ และ สารที่มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิสูง อยู่น้อยมาก เมื่อเทียบกับถ่านชนิดอื่น โดยอาจพิจารณาว่าถ่านกัมมันต์ Fluka ได้ทำการเผาและกระตุ้นที่ อุณหภูมิสูง จึงทำให้สามารถกำจัดสารอนินทรีย์และสารระเหย ที่อยู่ในถ่านออกได้มาก และเมื่อ เปรียบเทียบถ่านที่เตรียมจากไม้ไผ่แดง และ ไม้หมาจู้ พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก มี เถ้าและสารระเหยต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า กรดฟอสฟอริก มีส่วนช่วยในการกำจัดสารอนินทรีย์และ สารระเหยที่หลงเหลืออยู่ในถ่านได้ดี

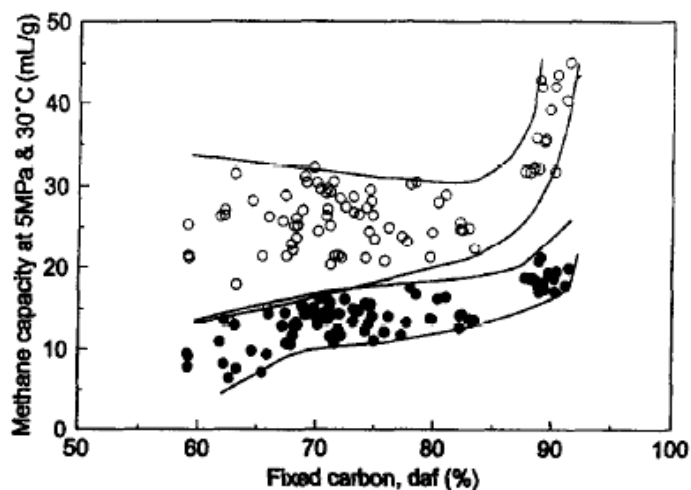
ส่วนคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) นั้น เป็นค่าที่แสดงถึงส่วนที่เหลือ ซึ่งเผาไหม้ได้ ของถ่านหลังจากที่กำจัดความชื้น เถ้า และ สารระเหย ออกแล้ว โดยปริมาณของคาร์บอนคงตัวนั้น ไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการดูดซับได้ในทุกกรณี เช่น Gürdal G. และ คณะ (2000) ได้ทำการทดลอง แล้วพิจารณาปริมาณคาร์บอนคงตัวเปรียบเทียบกับความสามารถในการ ดูดซับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อปริมาณคาร์บอน คงตัวเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณร้อยละ 70 แต่หลังจากนั้น เมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น (พิจารณาจากภาพที่ 27) ส่วนในการทดลองของ Levy H.J. และ คณะ (1997) พบว่า ความสามารถในการดูดซับแก๊สมีเทนจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้น (พิจารณาจากภาพที่ 28) เป็นต้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดของรูพรุนที่สัมพันธ์กับขนาดของ

ตัวถูกดูดซับด้วย เช่น ถ้าตัวดูดซับมีขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของรูพรุน การดูดซับก็เกิดขึ้นได้น้อยถึงแม้ถ่าน กัมมันต์ชนิดนั้น จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงก็ตาม



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัวและความสามารถในการดูดซับของ แลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Gürdal G., Yalcm M.N (2000)



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัวและความสามารถในการดูดซับของ แลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สมีเทน

ที่มา: Levy H.J., Stuart J.D., Killingly J.S (1997)

## 2.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านไม้ไฟ และ ถ่านกัมมันต์ โดยอาศัยเทคนิค ฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

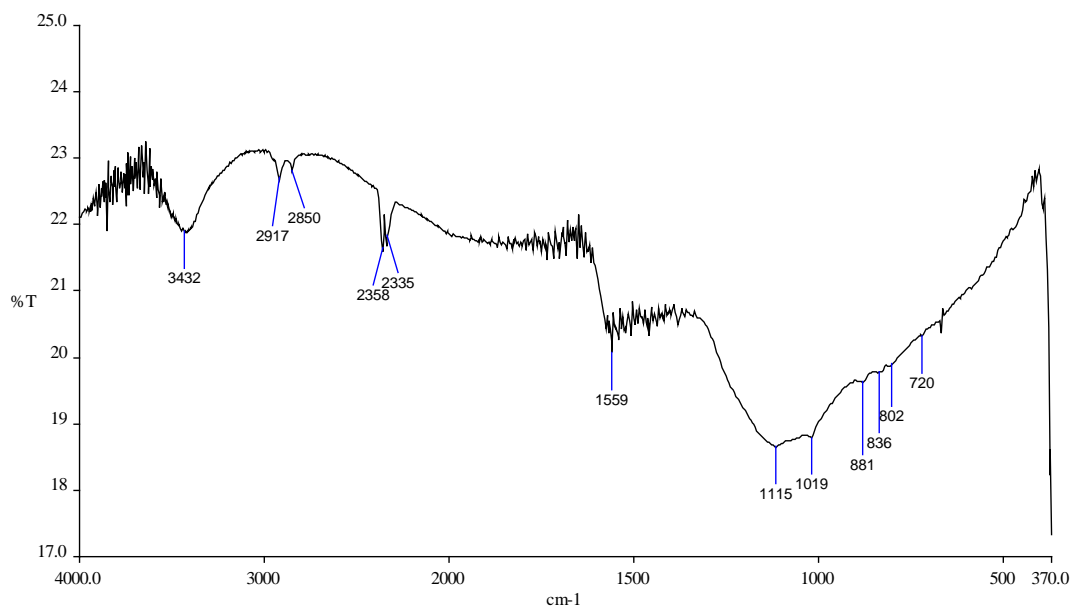
เนื่องจากการที่ถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไฟ มีความสามารถในการดูดซับต่างกัน อาจเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไฟเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค ฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ โดยเลือกทำการทดลองกับถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไฟตงและไฟหมาจู้ ทั้งที่ไม่ได้รับการกระตุ้นและ กระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลแสดงใน ภาพที่ 29 ถึง 48

การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในถ่านไม้ไฟเมื่อทำการกระตุ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแถบการสั่นในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ 14

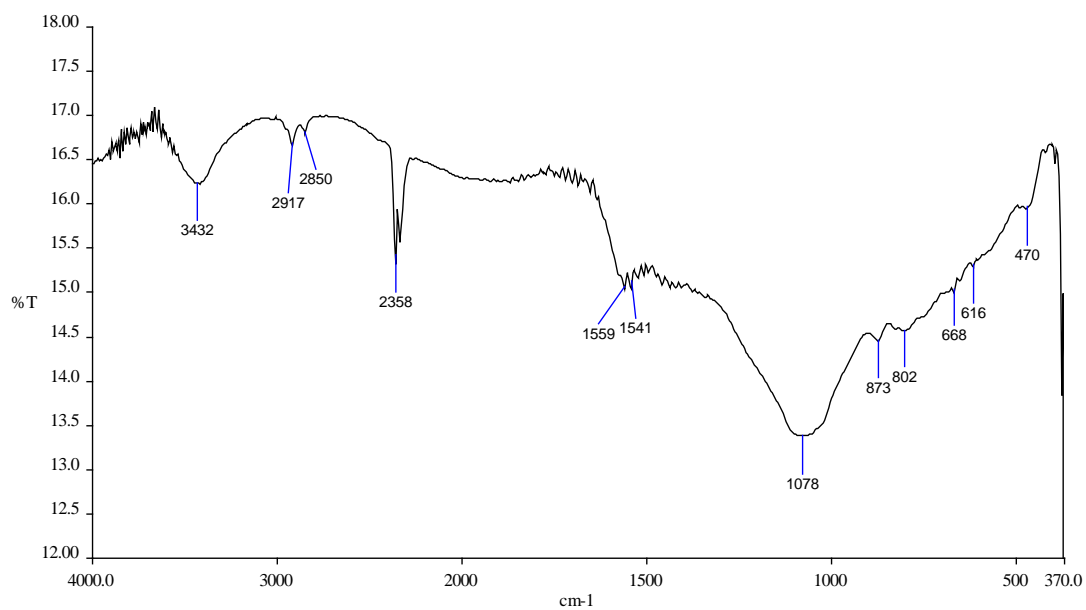
**ตารางที่ 14** แสดงค่าเลขคลื่นของแถบต่างๆที่เกิดขึ้นในอินฟราเรดสเปกตรัม พร้อมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )
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) <sub>2</sub> Streching)	1,580 – 1,540
และ Alkane (C-H Bending)	
Alcoholic (C-O Stretching)	
Ether (ROR)	1,050 – 1,200
Cyclic group	880 - 650

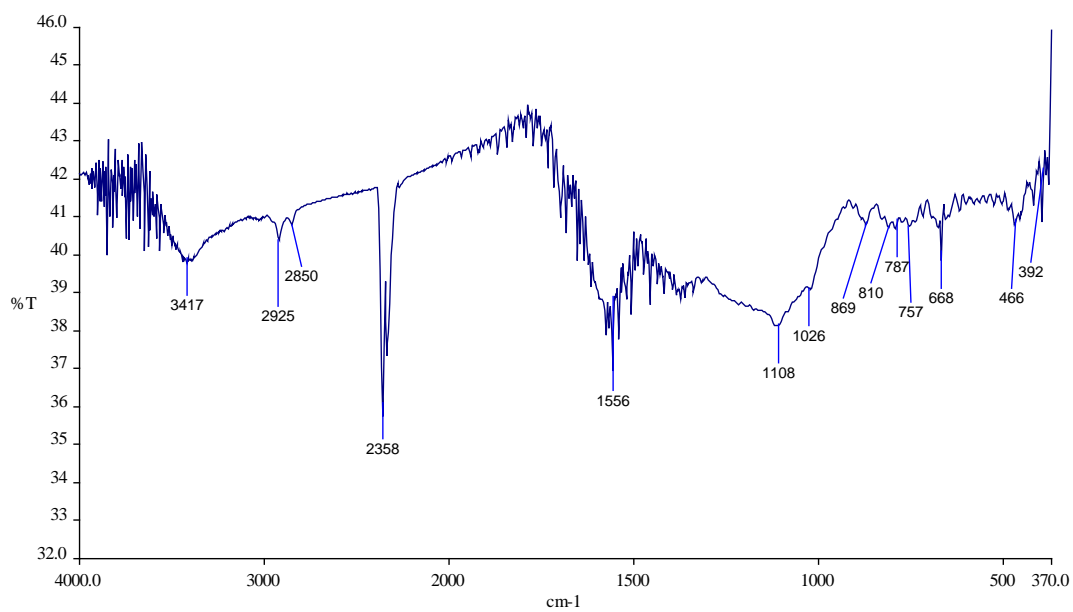




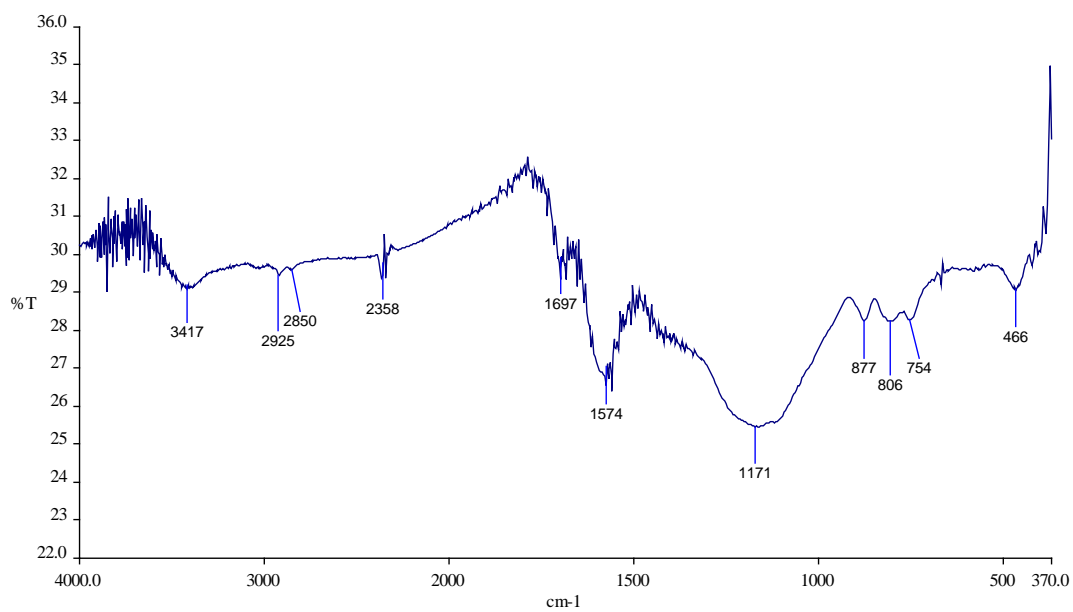
ภาพที่ 29 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka



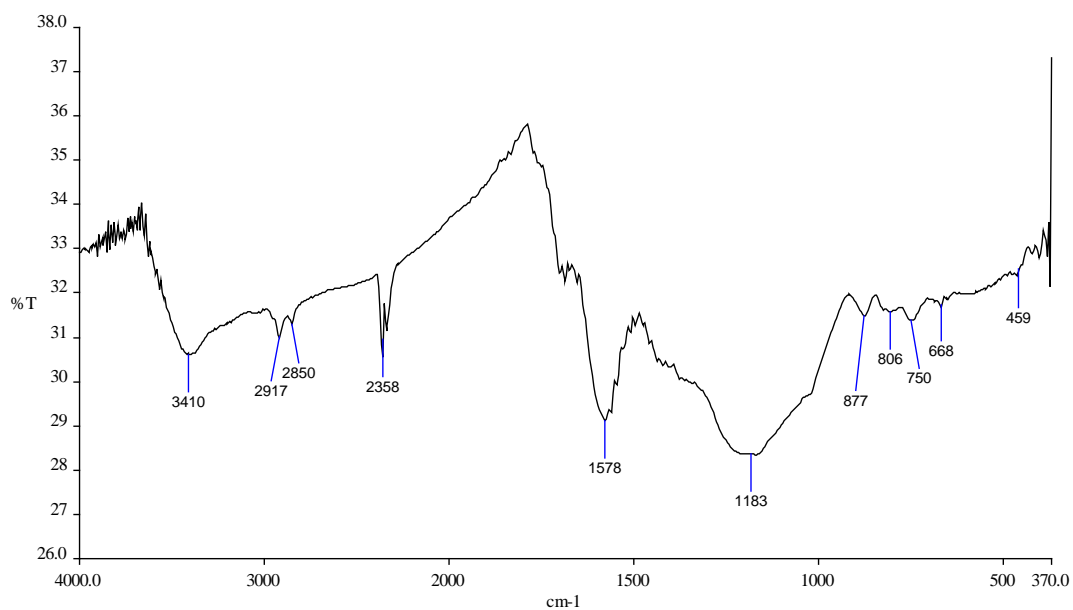
ภาพที่ 30 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไฟ Bunton



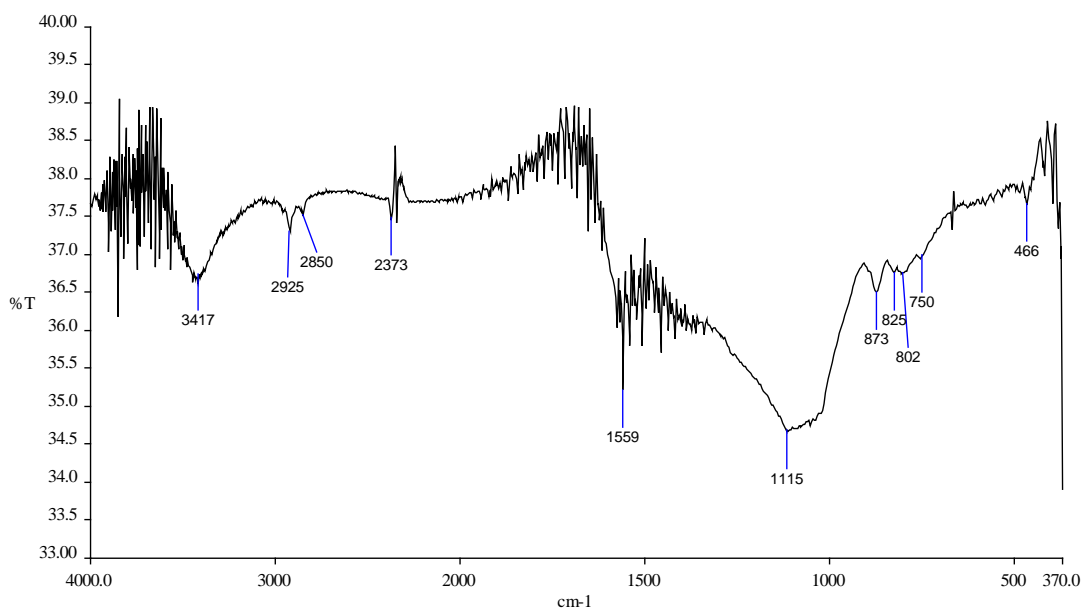
ภาพที่ 31 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นกล้วยไฟ่ต่ง อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



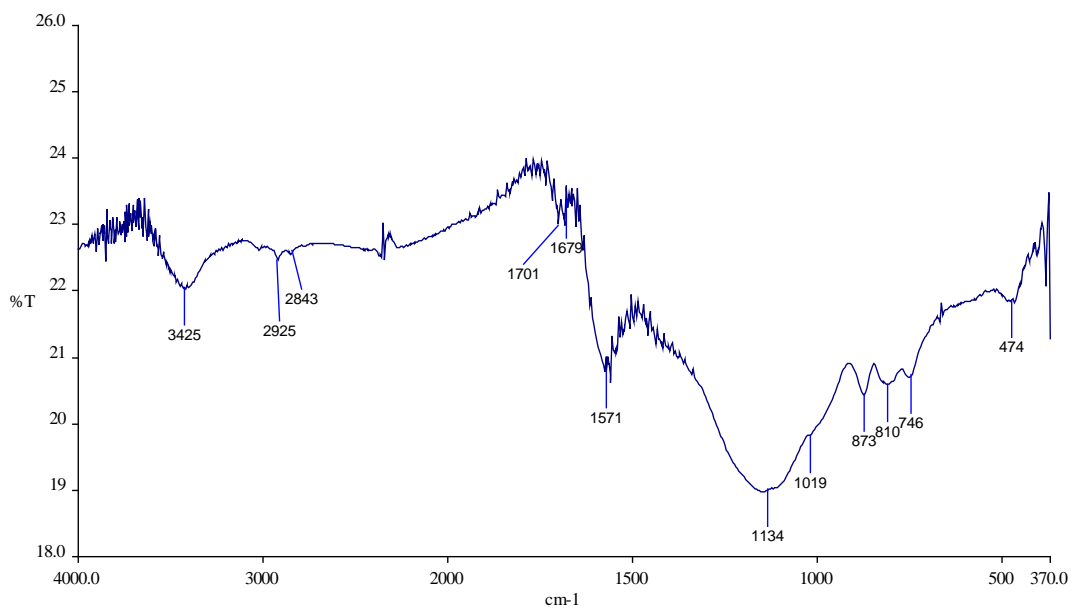
ภาพที่ 32 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นกล้วยไฟ่ต่ง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



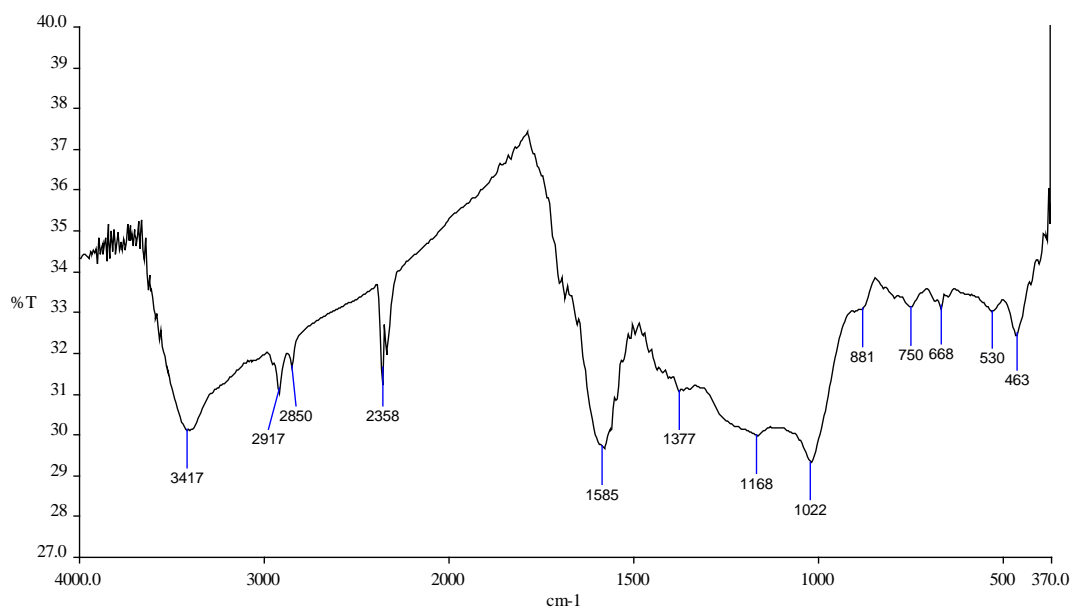
ภาพที่ 33 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



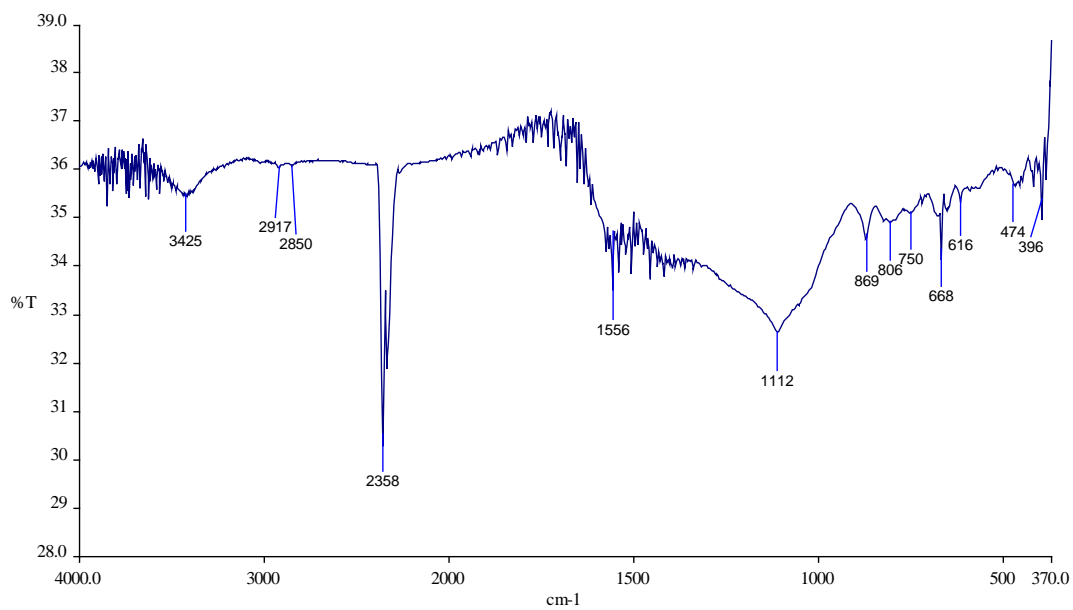
ภาพที่ 34 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



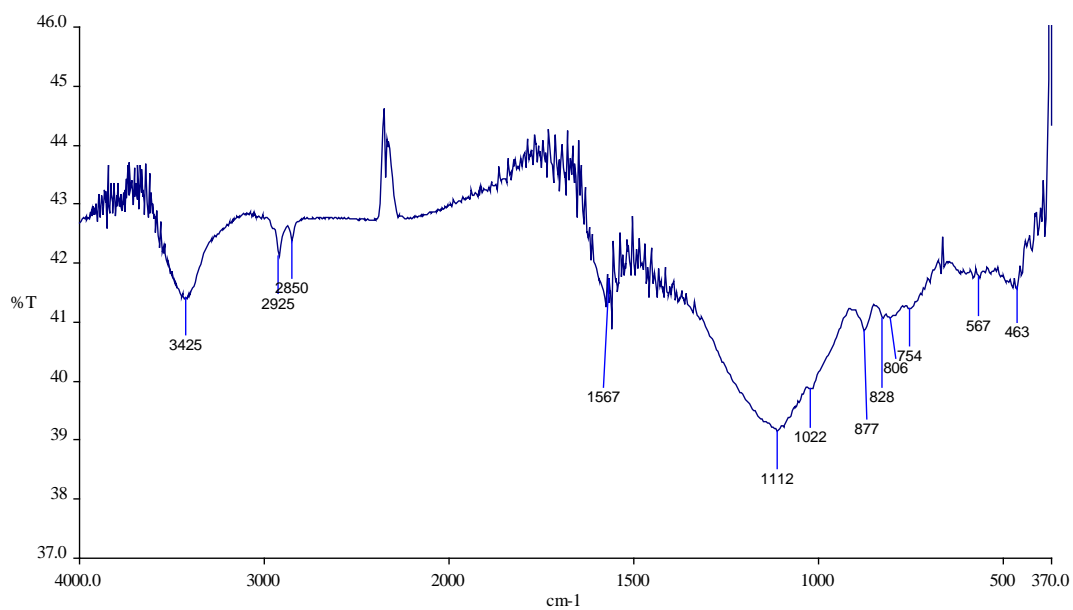
ภาพที่ 35 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



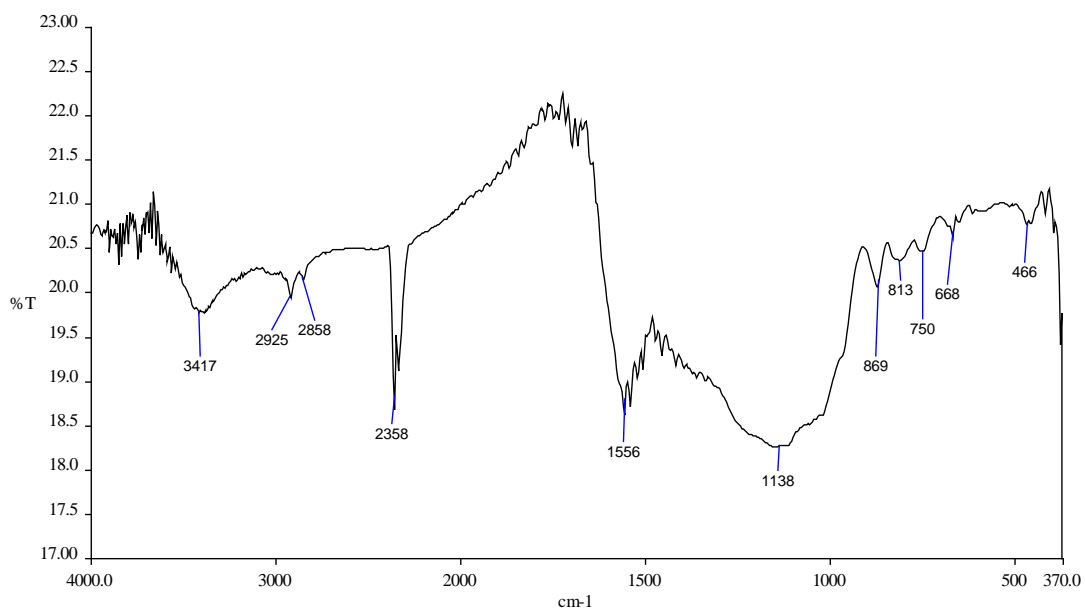
ภาพที่ 36 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



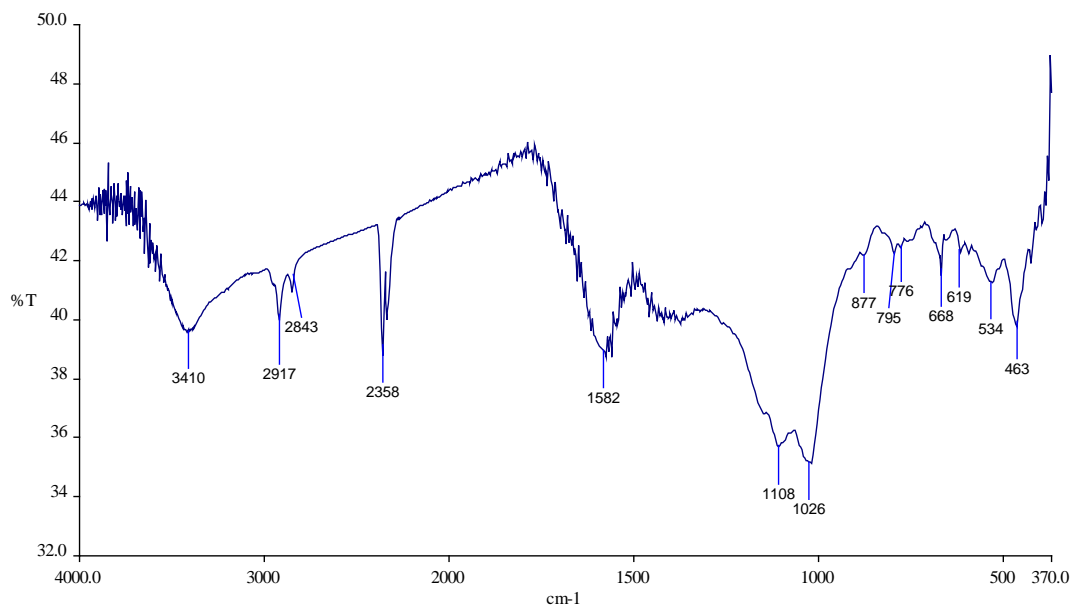
ภาพที่ 37 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นกล้วยไฟตง อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



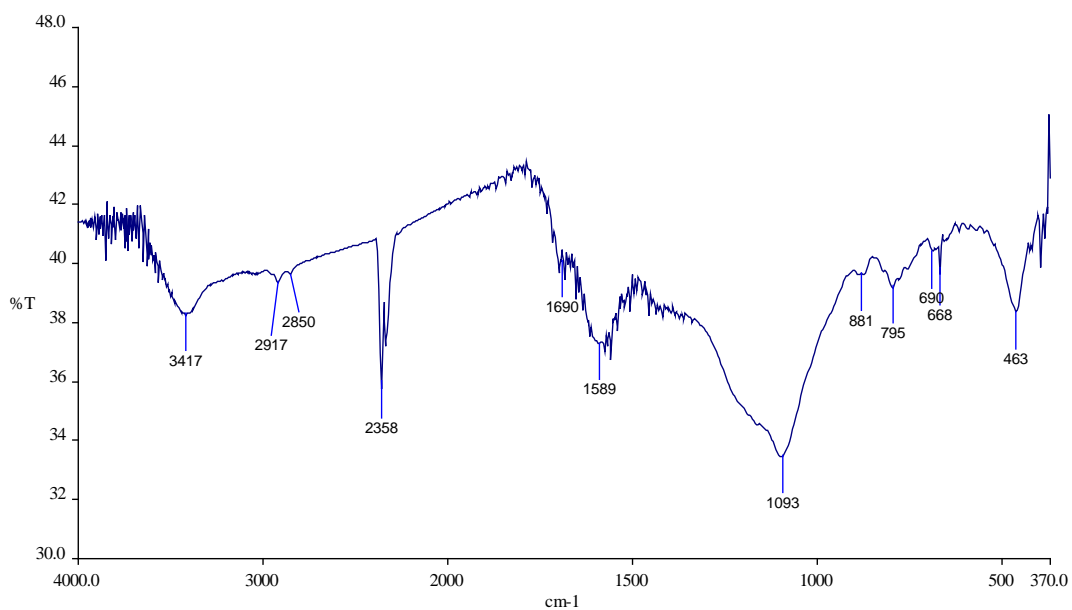
ภาพที่ 38 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นกล้วยไฟตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



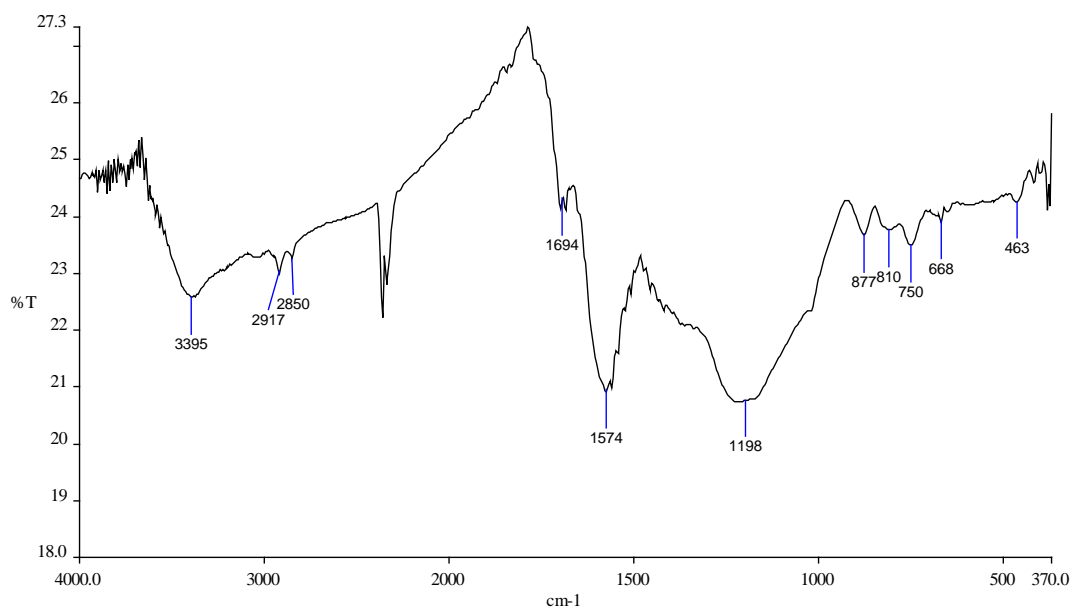
ภาพที่ 39 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



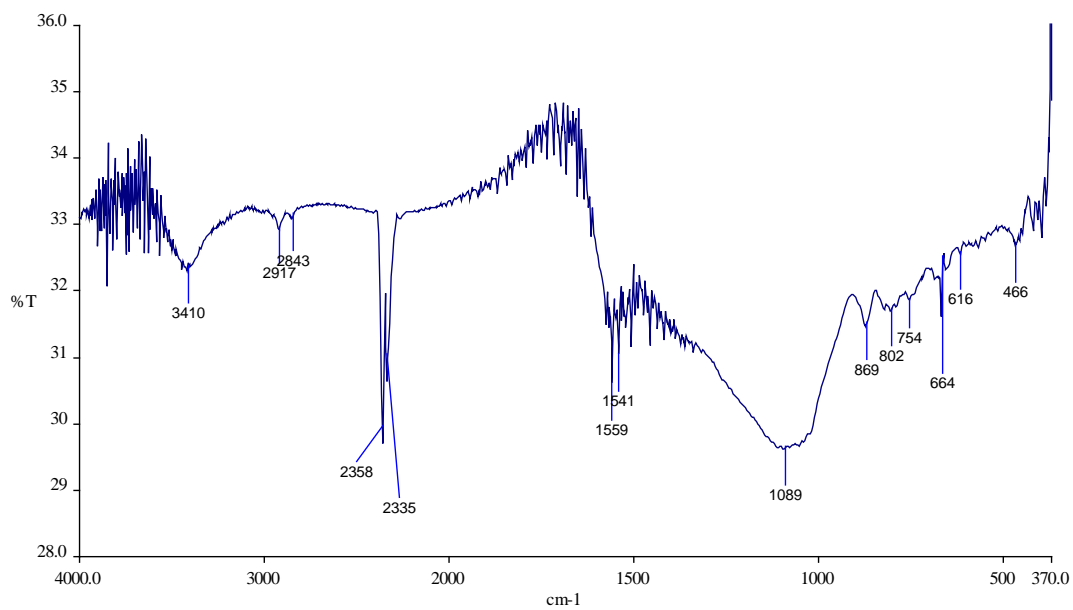
ภาพที่ 40 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



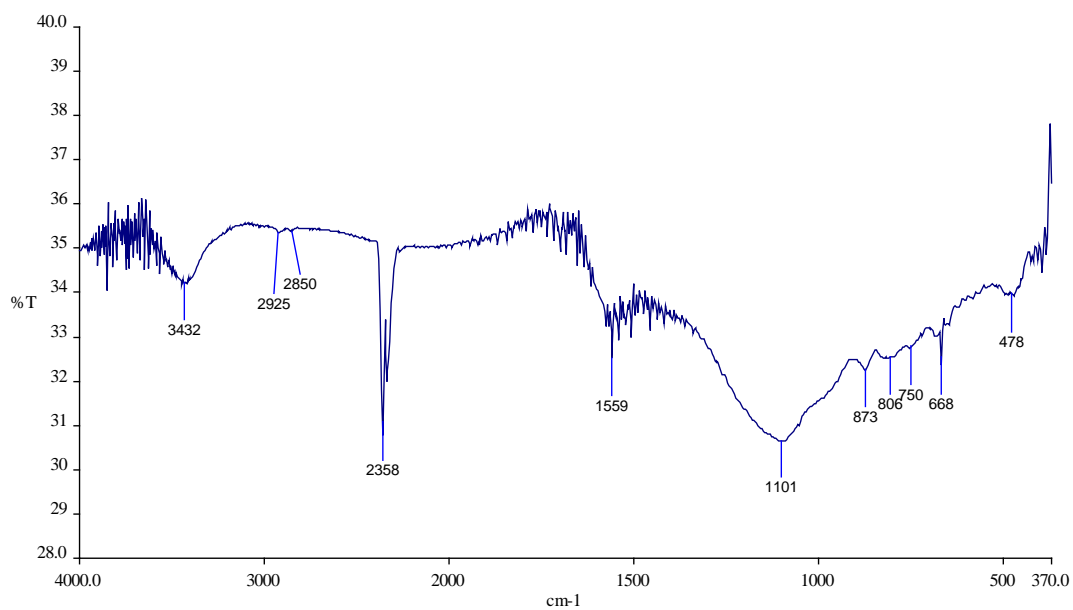
ภาพที่ 41 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หนามงู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



ภาพที่ 42 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หนามงู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์

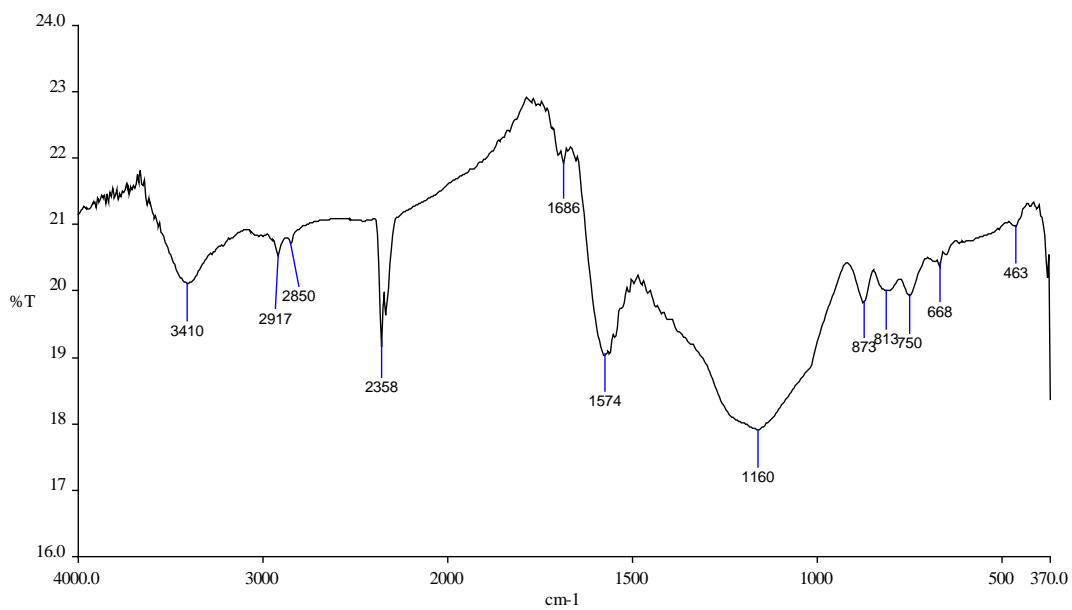


ภาพที่ 43 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หม่าจู่ อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น

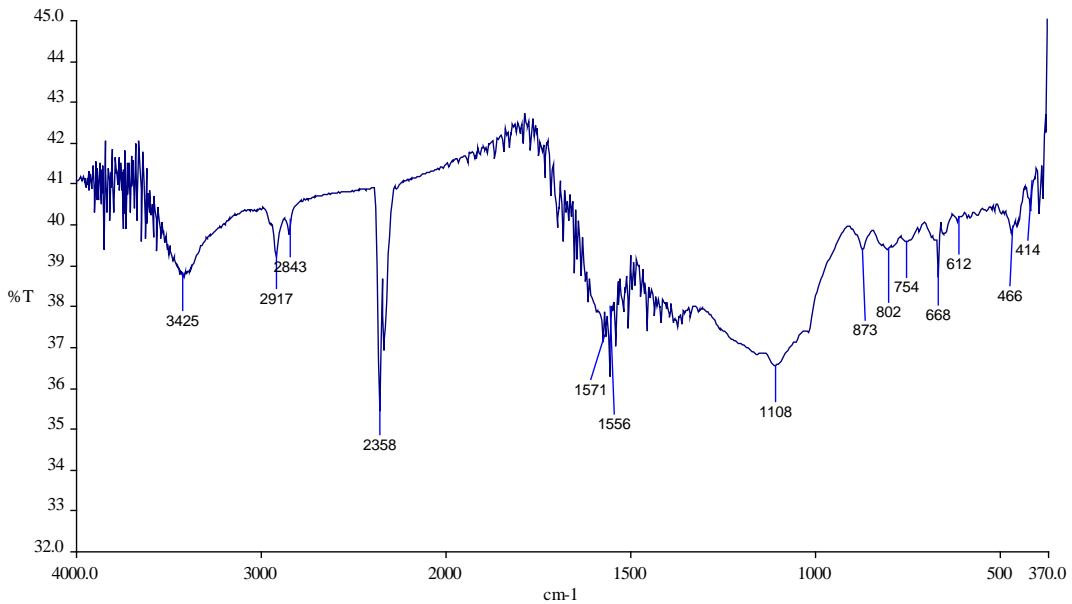


ภาพที่ 44 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หม่าจู่ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

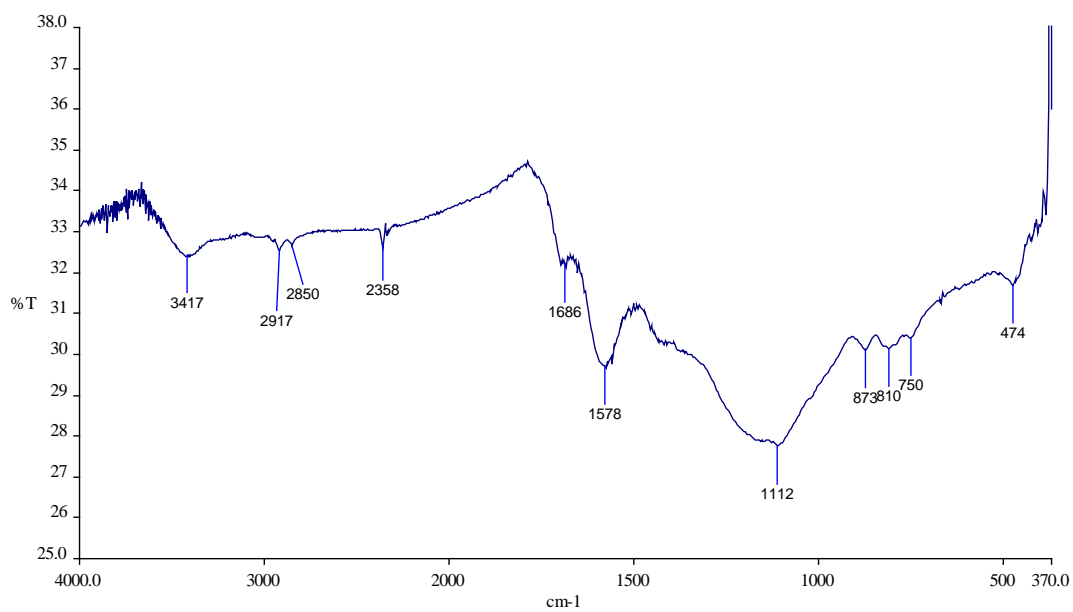




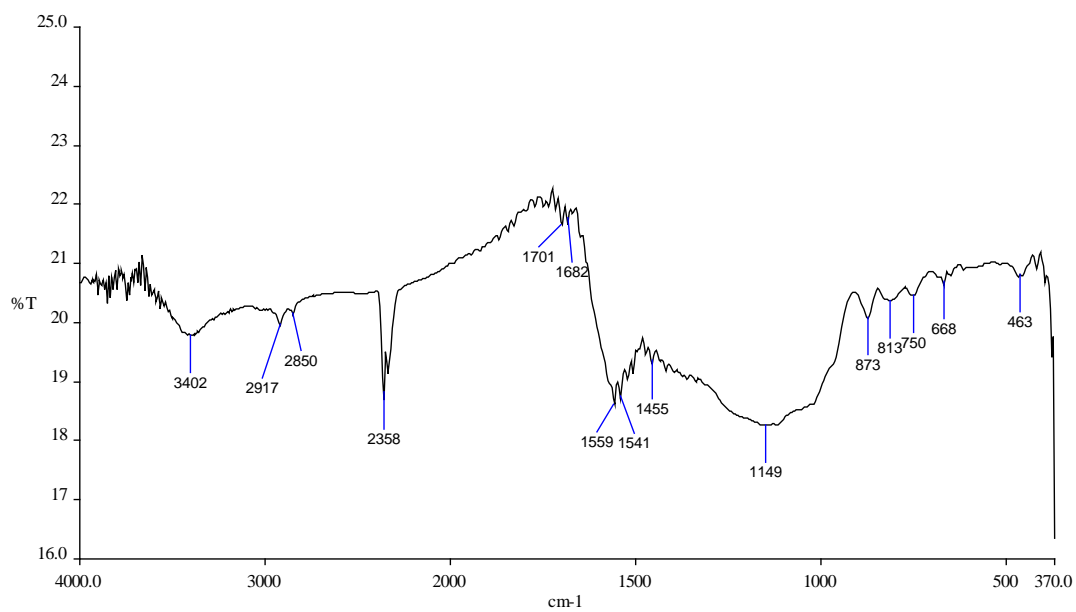
ภาพที่ 45 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 46 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



ภาพที่ 47 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หนามอายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



ภาพที่ 48 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของลำต้นไม้ไผ่หนามอายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 15 ลักษณะสเปกตรัมจากเทคนิคฟลูออรีเยอร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์

ชนิดถ่าน	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )					
	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	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

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 15 (ต่อ)

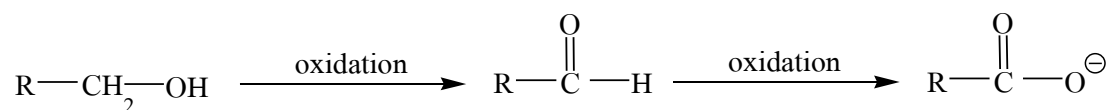
ชนิดถ่าน	เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )					
	3,450 – 3,350	2,950 - 2800	1,750 – 1,650	1,580 – 1,540	1,050 – 1,200	880 - 650
ไผ่ตง อายุ 3 ปี	board, weak 3,425	very weak 2,917 2,850	(-)	weak 1,556	board, medium 1,112	sharp 869 806 750 668
ไผ่ตง อายุ 3 ปี กระตุ้นด้วย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	board,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

ตารางที่ 15 (ต่อ)

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

จากสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Bunton พบว่า แถบการสั่น ในช่วง  $1,750 - 1,540 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  มีความเข้มข้นมาก ซึ่งคาดว่า ผู้ผลิตได้ทำการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ปริมาณสารระเหยถูกกำจัดออกไปมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Bunton มีความเข้มของแถบบ้างเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึง การเกิดการสลาย พันธะต่างๆ จนเหลือแต่ปริมาณคาร์บอนมากขึ้น แต่จะพบแถบการสั่นที่ประมาณ  $3,432 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแถบการสั่นของ  $\text{O}-\text{H}$  ซึ่งจริงๆแล้วไม่ควรที่จะพบแถบการสั่นที่บริเวณนี้ แต่เนื่องจากอาจมีความชื้นในถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ จะพบว่า ในถ่านไม้ไผ่ที่ไม่ได้รับการ กระตุ้น จะมีแถบของหมู่  $-\text{OH}$  เกิดขึ้น แต่จะมีแถบของหมู่  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  ในความเข้มที่ต่ำมาก หรืออาจไม่มีเลย แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่า แถบหมู่  $-\text{OH}$  มีความเข้มต่ำลง และ ความเข้มของแถบ  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเปลี่ยนจากหมู่  $-\text{OH}$  ไปเป็นหมู่  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  ตามสมการ

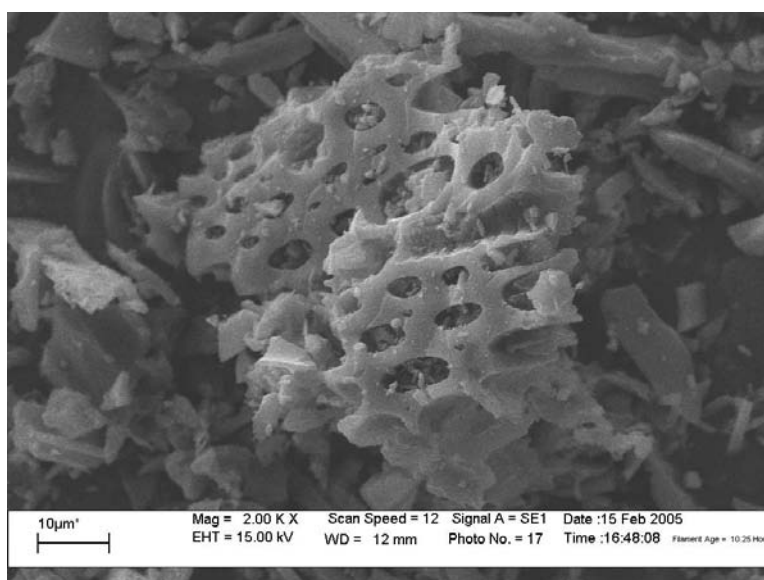


เช่น เมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ไม่ได้รับการ กระตุ้นกับ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่ามีแถบของการสั่นเพิ่มขึ้นในช่วงเลขคลื่นประมาณ  $1,700$  ซึ่งเป็นช่วงของแถบ  $\text{C}=\text{O}$  แต่ในถ่านที่ไม่ได้รับการกระตุ้น จะไม่มีแถบบ้างเลยบริเวณนี้ เพราะฉะนั้น จึงแสดงว่าการกระตุ้นมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้หมู่ฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงไป

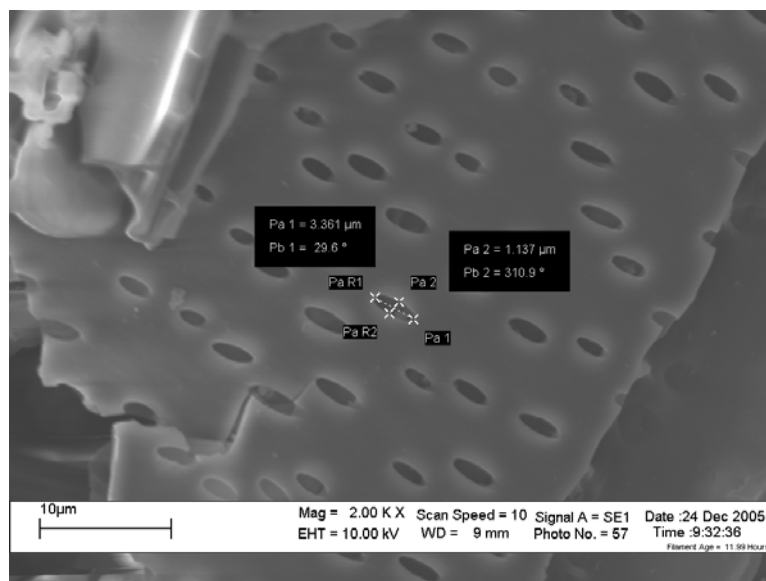
ซึ่งการที่มีหมู่ฟังก์ชัน  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการ ดูดซับสารต่างๆของถ่านกัมมันต์ต่างกันออกไป เช่น เมื่อนำไปดูดซับ ไอออนของโลหะ การดูดซับ น่าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากหมู่  $\text{C}=\text{O}$  หรือ  $\text{COO}^-$  มีความเป็นลบสูง ก็สามารถที่จะดึงดูดไอออนของโลหะ ซึ่งมีสมบัติเป็นบวก ได้มากขึ้น เป็นต้น

### 2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของถ่านไม้ไฟ และ ถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

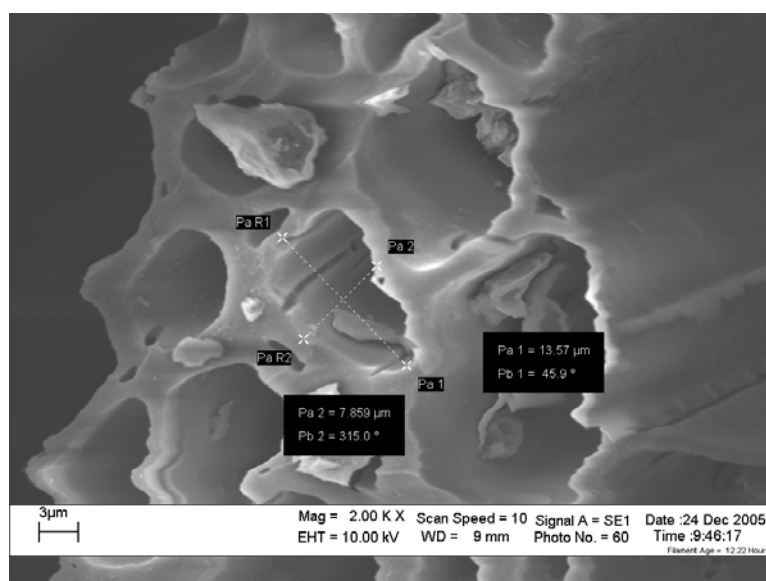
จากการศึกษาโครงสร้างของรูพรุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ โดยเลือกวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไฟตง และ ไม้ไฟหม่าจู่ ทั้งที่ยังไม่ได้รับการกระตุ้น และ กระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น เพื่อเปรียบเทียบและพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของผิวที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 49 สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ Fluka ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 10  $\mu\text{m}$

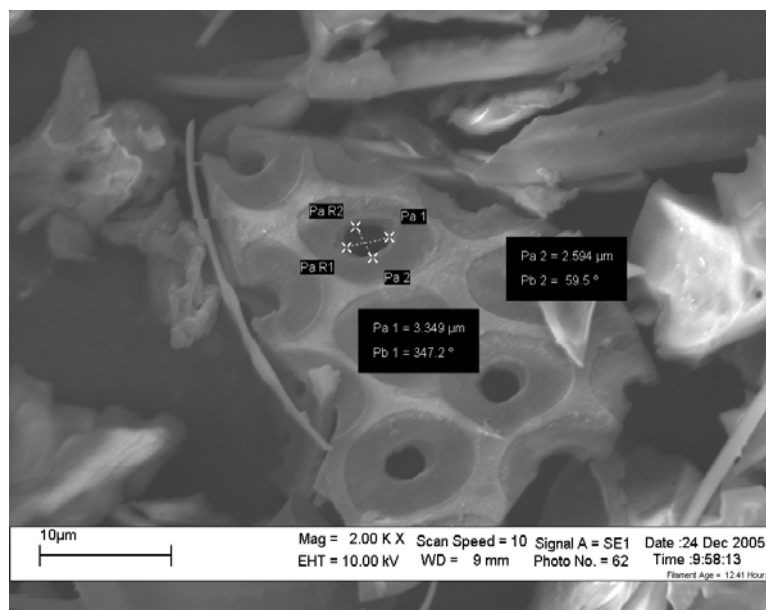


ภาพที่ 50 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร

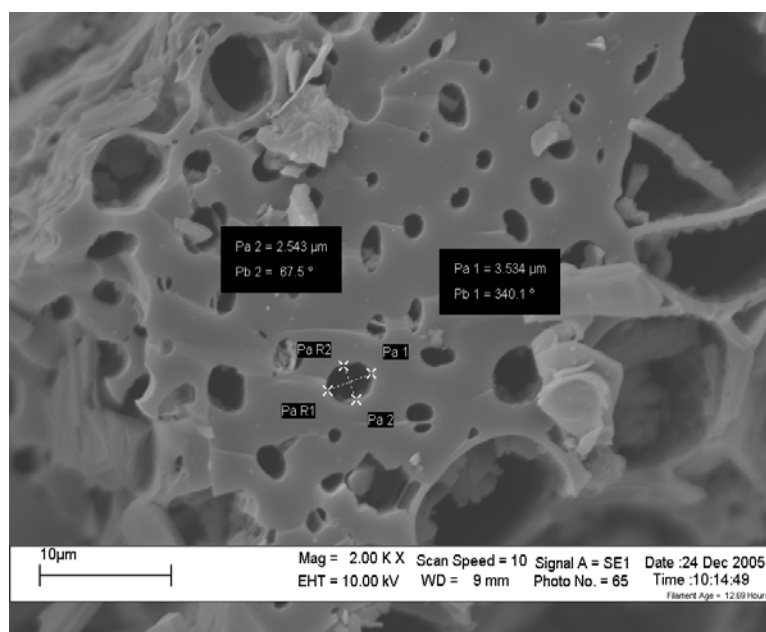


ภาพที่ 51 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น  
ระยะปรากฏในภาพ 3 ไมโครเมตร

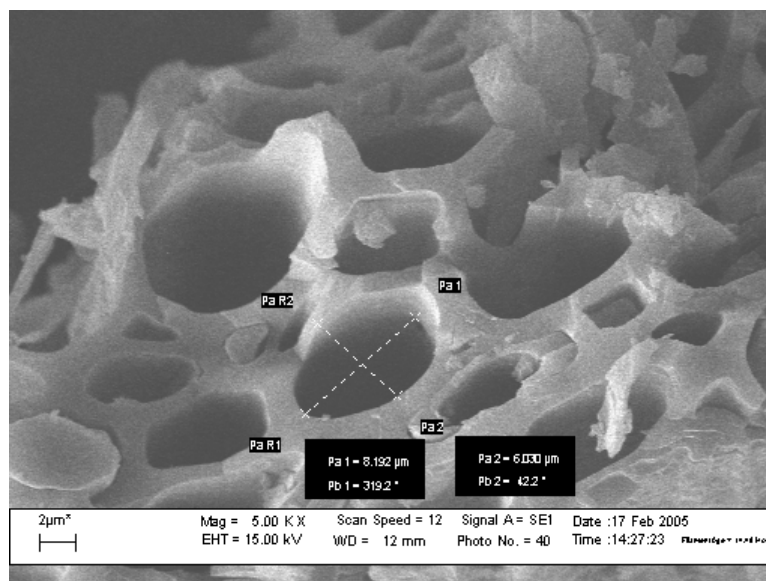




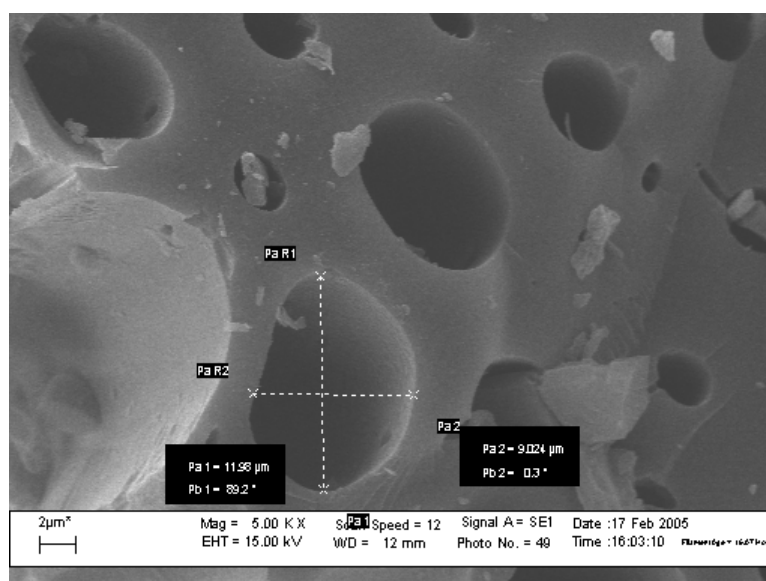
ภาพที่ 52 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



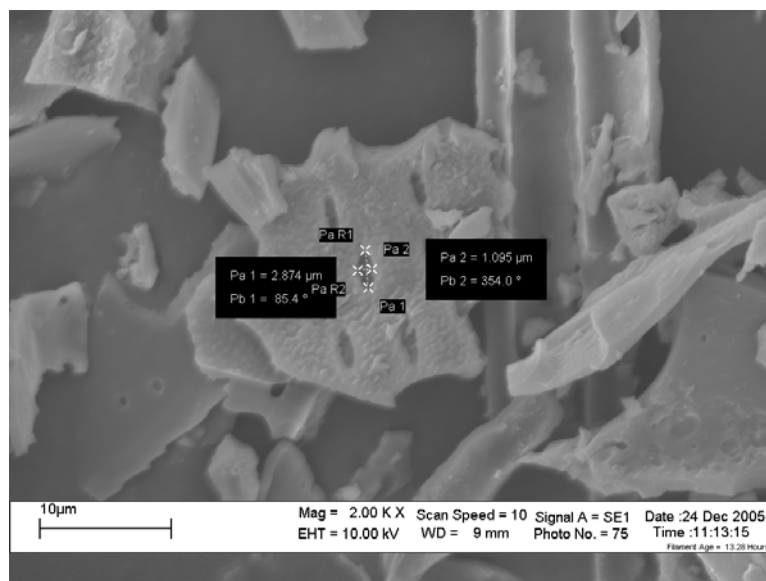
ภาพที่ 53 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น  
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



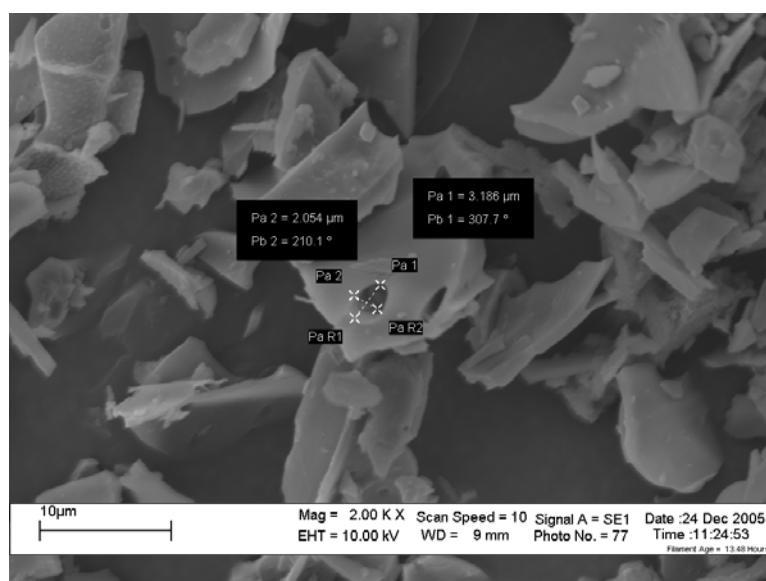
ภาพที่ 54 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปีที่กำลังขยาย 5000 เท่า  
ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร



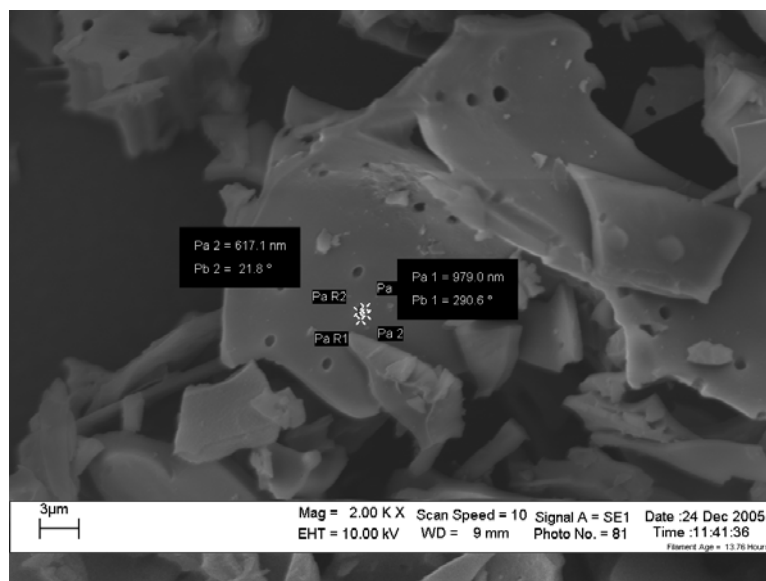
ภาพที่ 55 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น  
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร



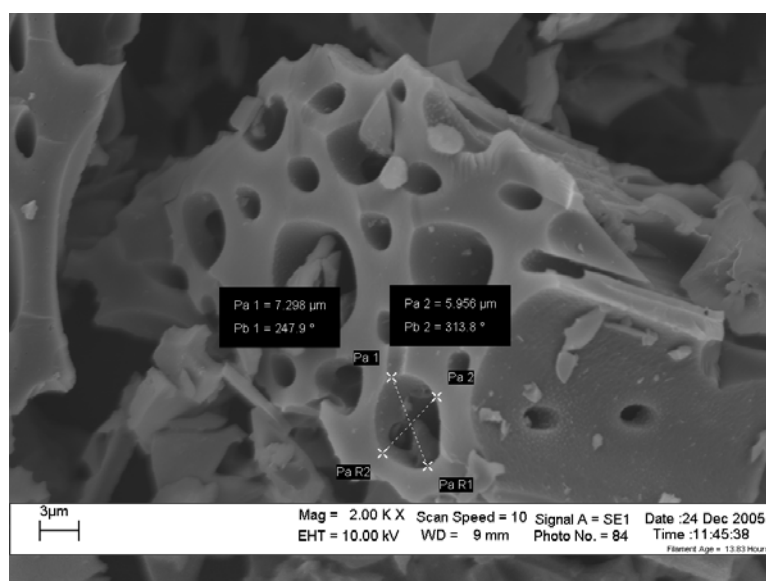
ภาพที่ 56 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



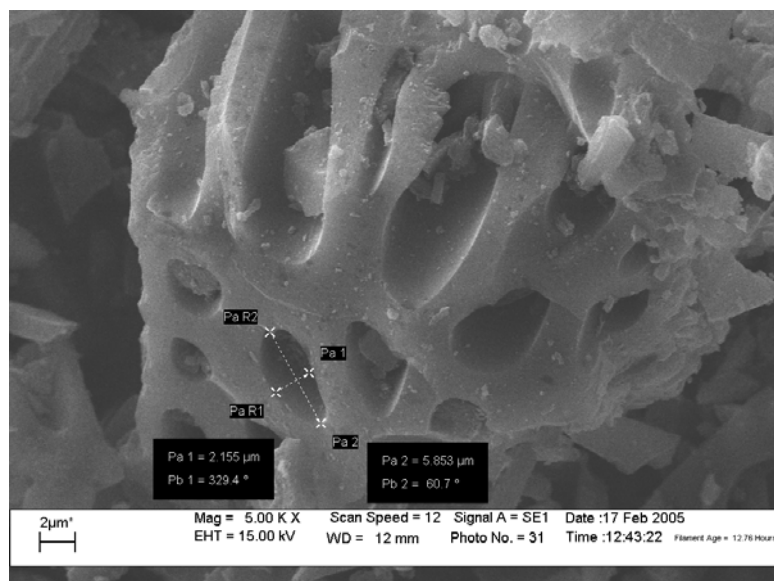
ภาพที่ 57 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น  
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



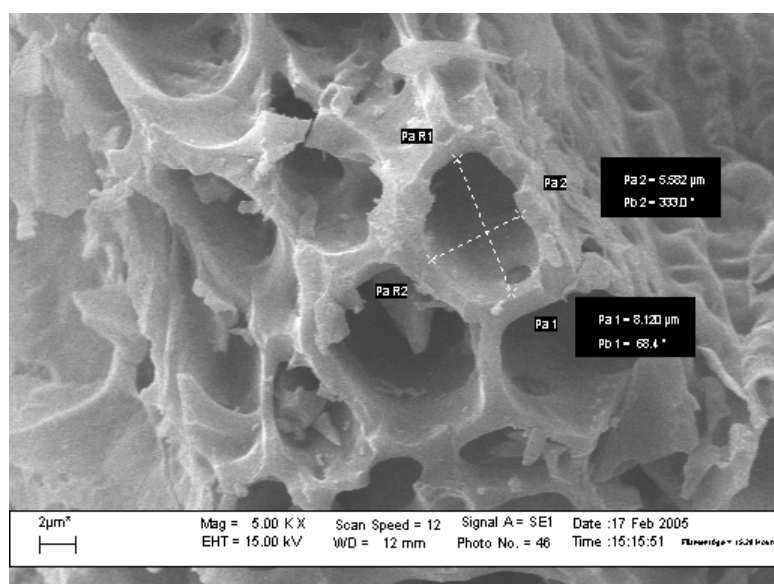
ภาพที่ 58 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



ภาพที่ 59 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น  
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร



ภาพที่ 60 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร



ภาพที่ 61 สภาพพื้นผิวของลำต้นไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร

จากการทดลอง จะเห็นว่าลักษณะของพื้นผิวถ่านไม้ไฟตง และ ไม้หมาจู เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแล้ว มีจำนวนรูพรุนมากขึ้น ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วย โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของขนาดของรูพรุนกับขนาดของตัวถูกดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็ก แต่ตัวถูกดูดซับมีขนาดใหญ่ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำ เป็นต้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Fluka พบว่า ถ่านกัมมันต์ Fluka มีจำนวนรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไฟ ซึ่งอาจทำให้ถ่านกัมมันต์ Fluka มีความสามารถในการดูดซับสารได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์จากไม้ไฟ

### 3. การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ผลิตได้ โดยทำการศึกษาดูดซับ สารละลายแคลเซียม สารละลายเมทิลลีนบลู สารละลายฟีนอล และ สารละลายไอโอดีน ซึ่งจากการทำการหาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้น โดยกรดฟอสฟอริกมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น จึงเลือกถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น โดยกรดฟอสฟอริก มาศึกษาสภาวะที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดต่าง และ เวลาสัมผัส และได้ทำการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะใช้สภาวะที่เหมาะสมจากถ่านที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมาใช้ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ และได้ทำการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายแคลเซียม กับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริก

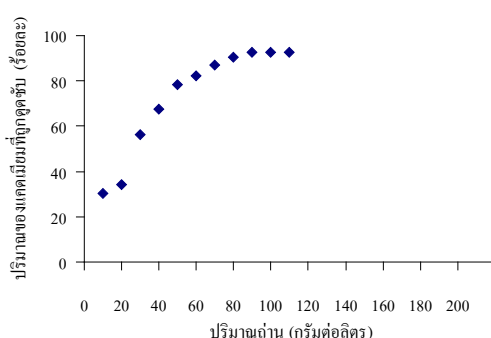
#### 3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคลเซียม

##### 3.1.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

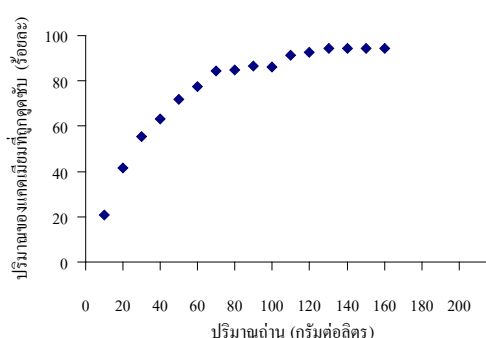
ในการทำการทดลองดูดซับ แคลเซียม (II) ด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายแคลเซียม (II) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และมีความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเพิ่มน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.10 กรัม จนกว่า ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคลเซียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป

ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมมูลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance : ANOVA) ในการเลือกปริมาณถ่านที่เหมาะสม

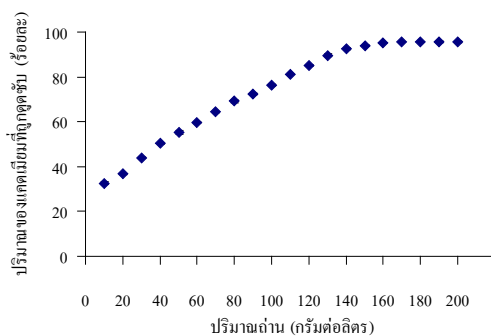
ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 16 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของแคดเมียมที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด



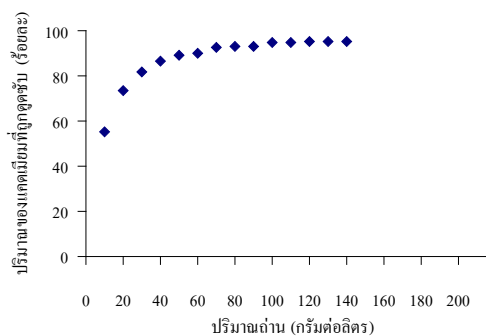
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

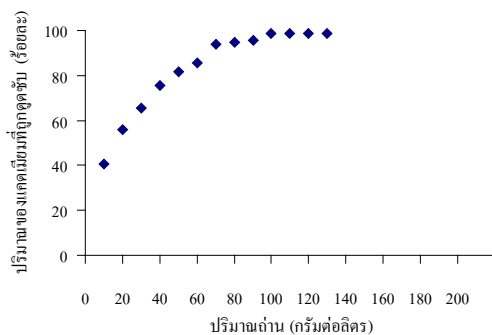


(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

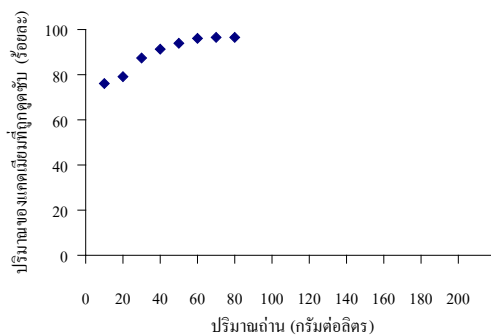


(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

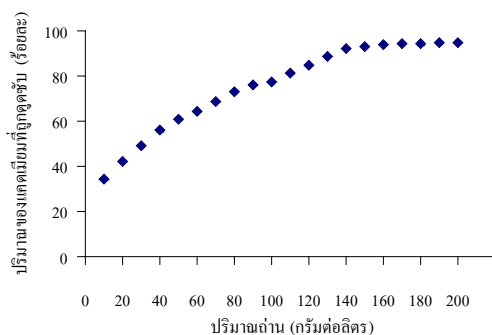
ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



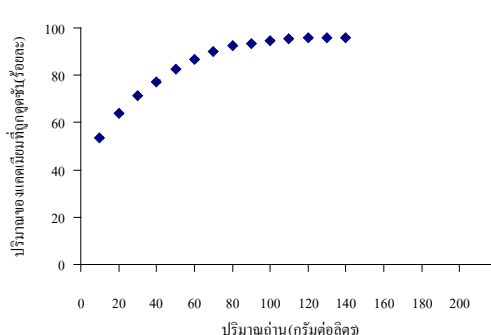
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



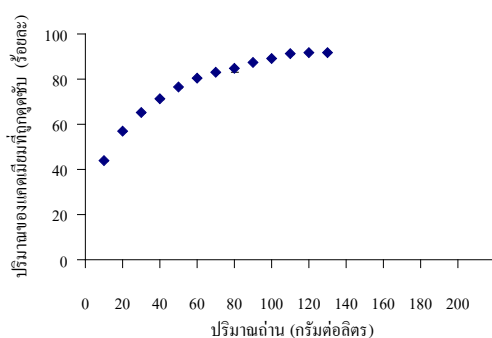
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



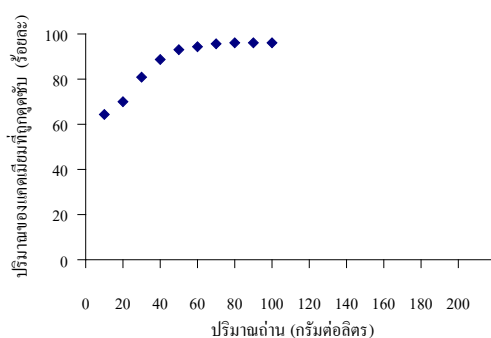
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

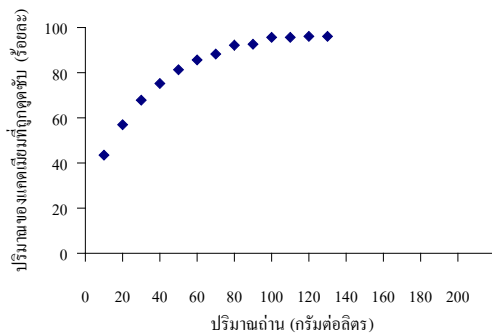


(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

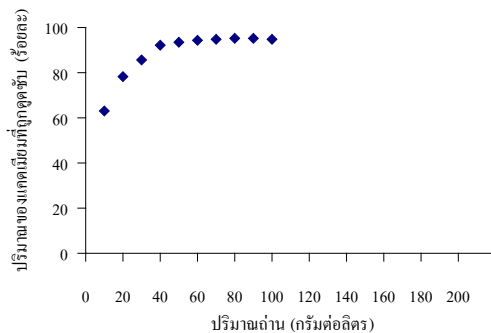


(ญ) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

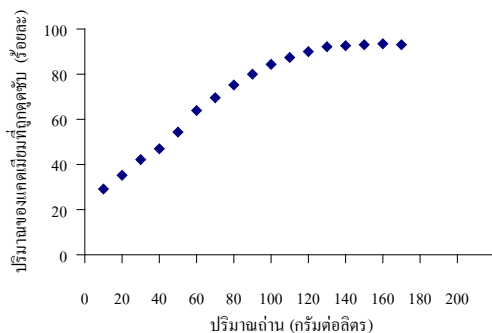




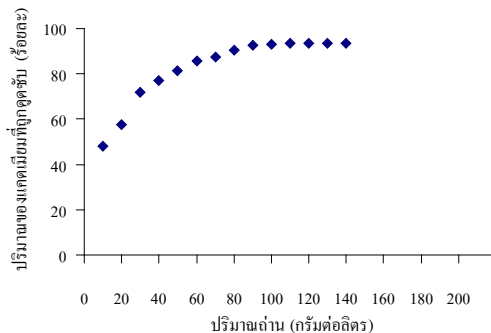
(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ด) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ภาพที่ 62 (ต่อ)

ตารางที่ 16 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคดเมียม

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)	ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.90	90.0	92.43 ± 0.09
ถ่าน Bantan**	-	-	1.30	130.0	94.46 ± 0.21
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.60	160.0	95.20 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.20	120.0	95.05 ± 0.08
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.00	100.0	98.54 ± 0.27
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.60	60.0	96.29 ± 0.14
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.70	170.0	94.31 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.10	110.0	95.27 ± 0.17
ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.10	110.0	91.36 ± 0.39
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.70	70.0	95.79 ± 0.14
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.00	100.0	95.53 ± 0.17
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.60	60.0	94.40 ± 0.19
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.50	150.0	93.12 ± 0.13
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.10	110.0	93.37 ± 0.32

\* ถ่านกัมมันต์ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ไม่ได้ถูกกระตุ้น จะใช้ปริมาณถ่านที่สูงกว่าในการดูดซับแคดเมียม เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกเข้มข้น ร้อยละ 85 ที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้น ทำให้ถ่านสามารถดูดซับแคดเมียมได้มากขึ้น

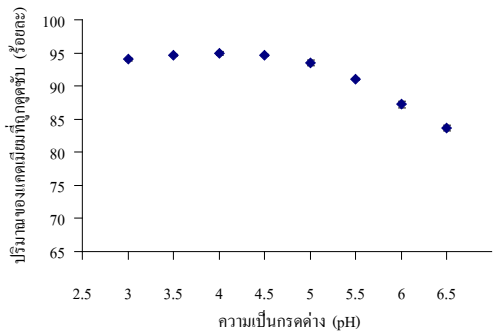
### 3.1.2 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายแคดเมียม (II) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดเบสมีค่าเท่ากับ 3.0 ถึง 6.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดเบสด้วยสารละลายกรดอะซิติก และสารละลายโซเดียมอะซิเตท และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.1.1 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

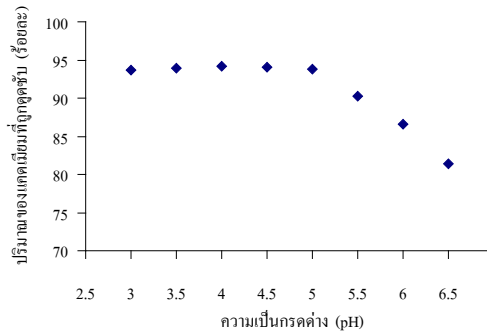
ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 17 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ปริมาณของแคดเมียมที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายเพิ่มขึ้น จากช่วง 3.0 ถึง 5.0 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมจะใกล้เคียงกัน แต่จะลดลงอย่างมากเมื่อค่าความเป็นกรดเบส มากกว่า 5.0 ขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นเพราะ เมื่อความเป็นกรดเบสเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสารเชิงซ้อนไฮดรอกซิลของแคดเมียมที่มีสภาพความเป็นลบมากขึ้น เช่น  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  เป็นต้น จึงเกิดการผลัดกับประจุลบที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ รวมถึง ขนาดของสารเชิงซ้อนแคดเมียมดังกล่าว มีขนาดใหญ่ จึงเข้าถึงผิวถ่านกัมมันต์ได้น้อยลง ซึ่งทำให้การดูดซับลดลง (Ajmal Mohammad, 2003)

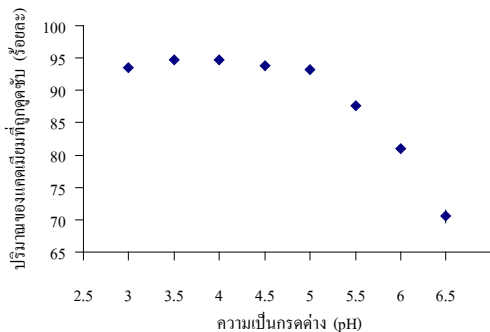
และค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมขึ้นอยู่กับชนิดถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดใช้วัตถุดิบต่างกัน หรือนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ต่างกัน จึงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่าน กัมมันต์ ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดแตกต่างกัน



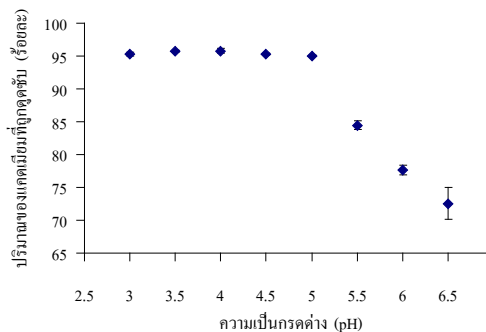
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



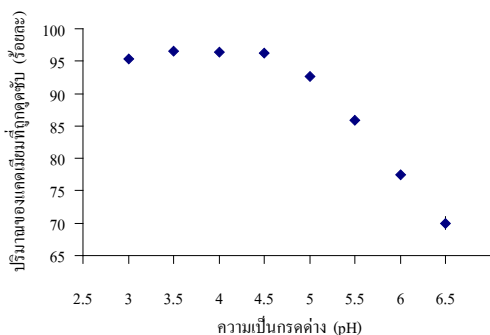
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton



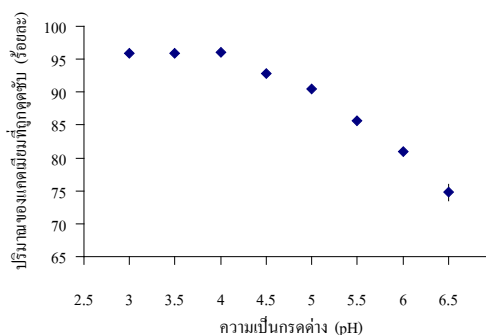
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

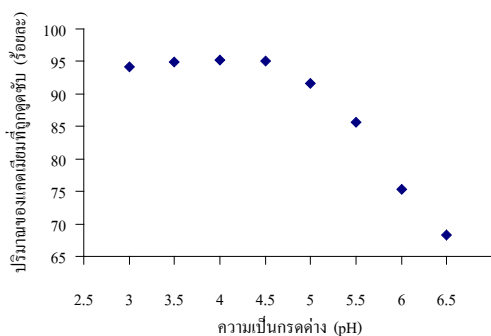


(จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

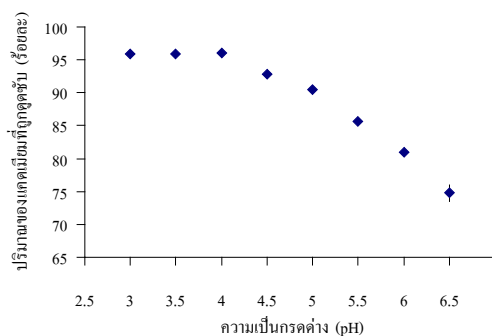


(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

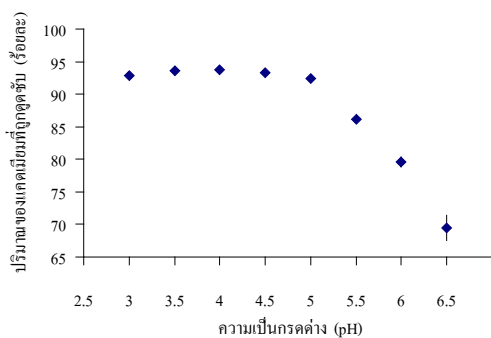
ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



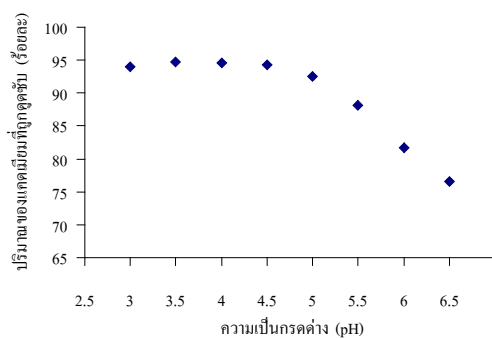
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



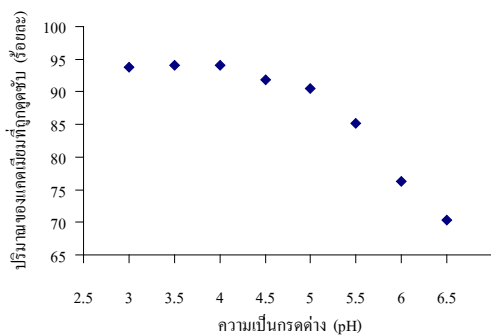
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



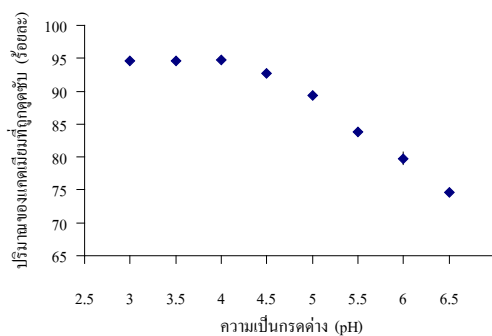
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



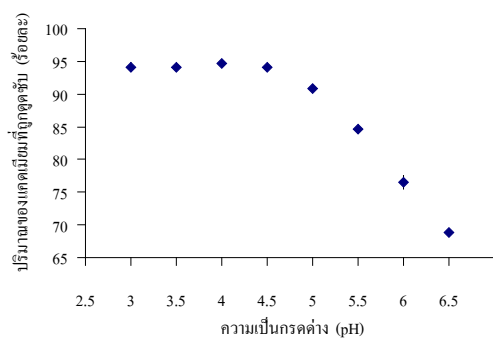
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



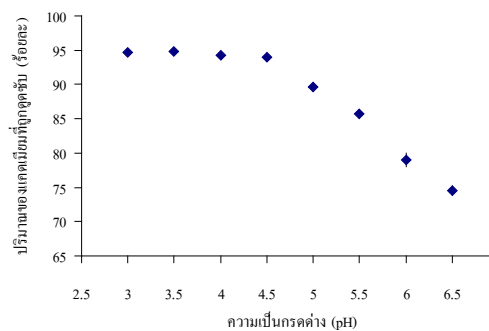
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 63 (ต่อ)

ตารางที่ 17 แสดงความเป็นกรดต่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคดเมียม ของ ถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับ (%)	
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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.50	95.30 ± 0.18	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	96.23 ± 0.33	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.00	96.01 ± 0.09	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	95.02 ± 0.15	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	5.00	95.03 ± 0.23	
	ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	93.34 ± 0.23
			กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.50	94.36 ± 0.20
2 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.00	94.02 ± 0.21	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.00	94.77 ± 0.15	
3 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	94.15 ± 0.18	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.00	94.28 ± 0.12	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

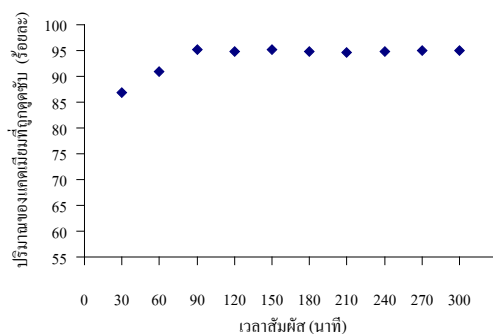
### 3.1.3 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลาย แคลเมียม (II) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสม และปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 30 นาที จนกว่า ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคลเมียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่า ร้อยละของความเข้มข้นของแคลเมียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

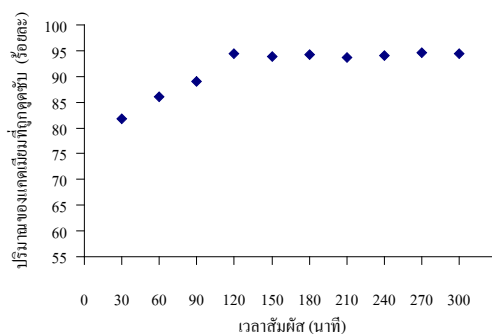
ภาพที่ 64 แสดงเวลา กับ ปริมาณของแคลเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 18 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของแคลเมียมที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่าน ไม้ไฟ แต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดย บริษัท Fluka พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที และเริ่มเข้าสู่สมดุลหลังจาก 90 นาที ส่วนถ่านกัมมันต์ Bunton และ ถ่านกัมมันต์จากไม้ไฟที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 120 ถึง 150 นาที หลังจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ไฟที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น จะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 ถึง 210 นาที ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ถ่านได้รับการกระตุ้น จะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแคลเมียม ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ได้รับการกระตุ้น

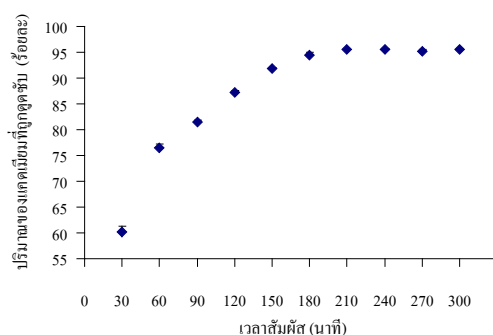
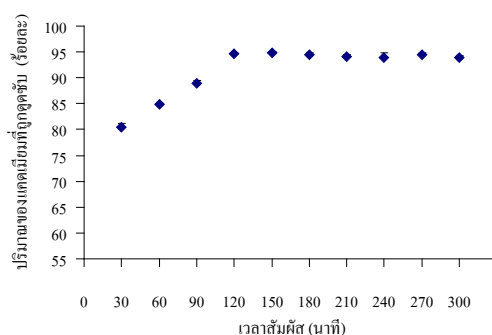
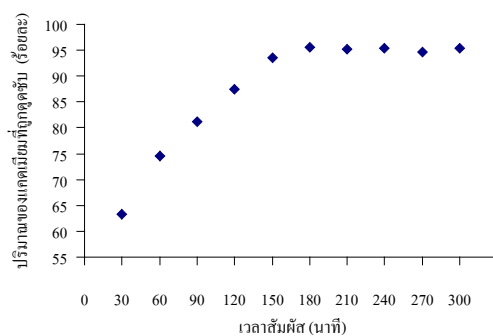
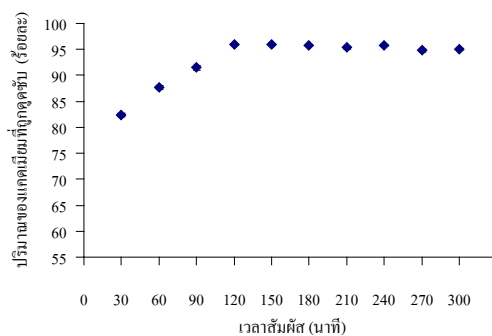




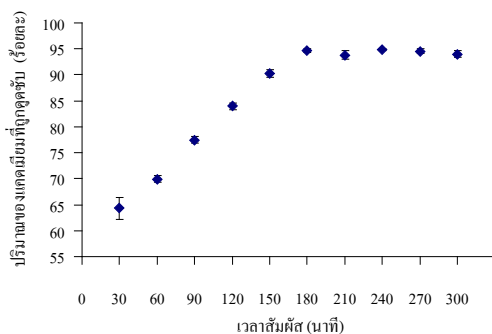
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



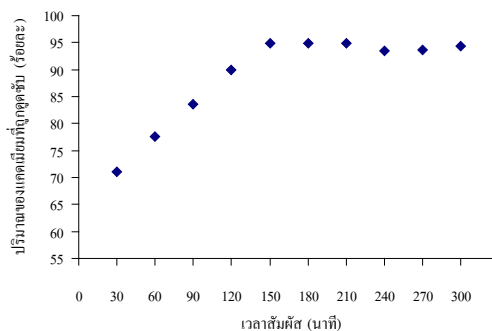
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>(จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

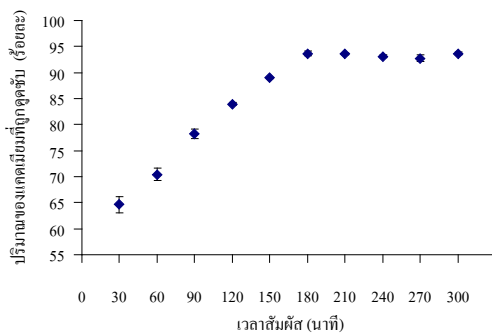
ภาพที่ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของแคดเมียม (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



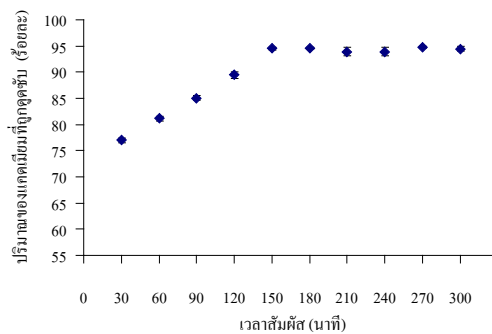
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกรด



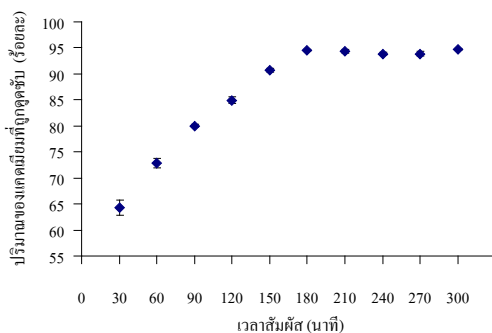
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



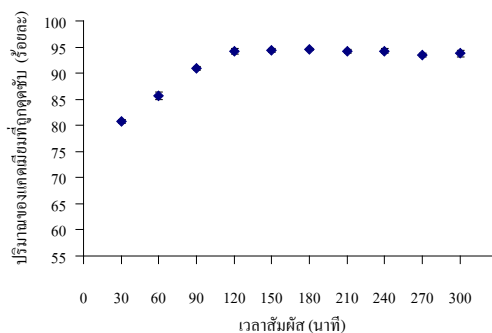
(ฅ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกรด



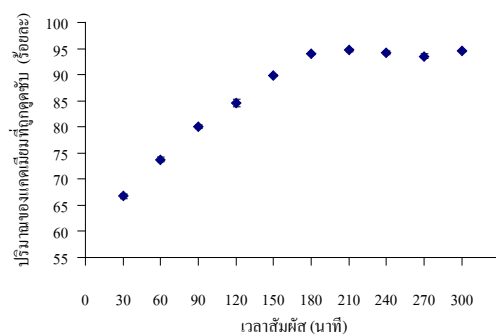
(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



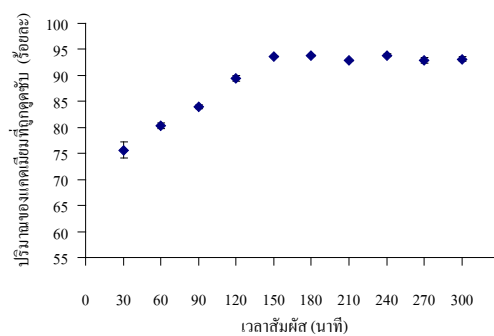
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกรด



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 64 (ต่อ)

ตารางที่ 18 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะแคดเมียม ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

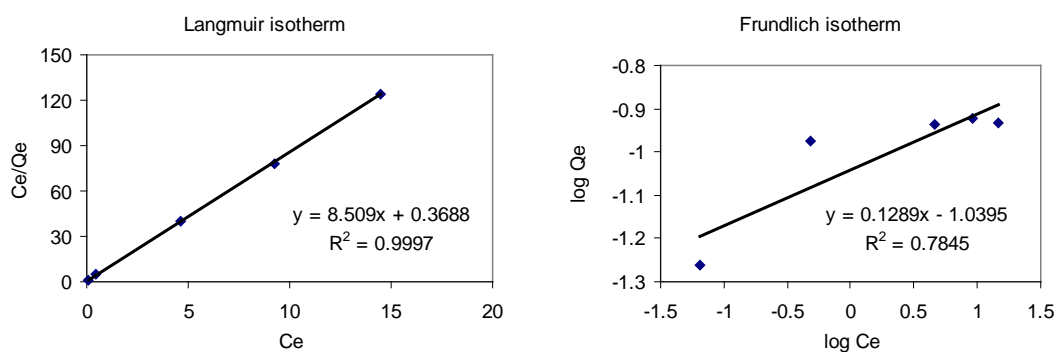
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (นาที)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับ (%)	
ถ่าน Fluka *	-	-	90	95.10 ± 0.13	
ถ่าน Bunton **	-	-	120	94.34 ± 0.36	
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	210	95.47 ± 0.12	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	94.64 ± 0.17	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	95.57 ± 0.18	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	95.92 ± 0.22	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	94.62 ± 0.33	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	150	94.40 ± 0.30	
	ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	93.69 ± 0.41
			กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	150	94.52 ± 0.27
2 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	94.57 ± 0.23	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	95.92 ± 0.22	
3 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	210	94.65 ± 0.36	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	150	93.81 ± 0.26	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

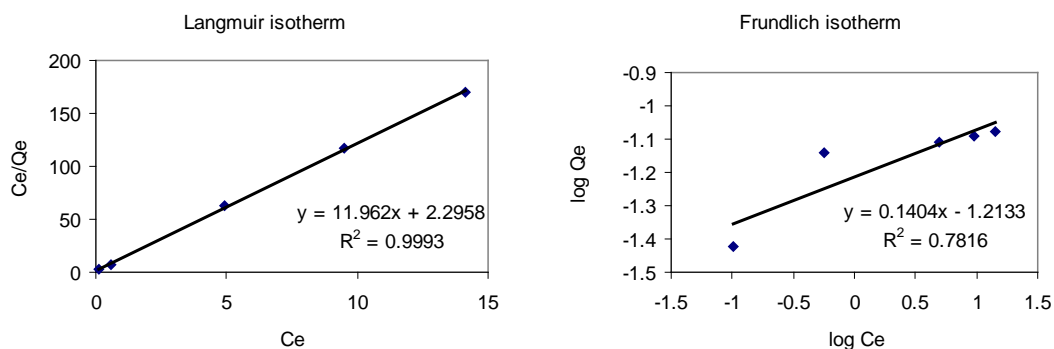
\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.1.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับแคดเมียมความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิตร โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเป็นกรดต่าง และเวลา สัมผัส ที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.1.1, 3.1.2 และ 3.1.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 65 ถึง 71 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ กระตุ้นด้วยกรดไนตริก มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแคดเมียม

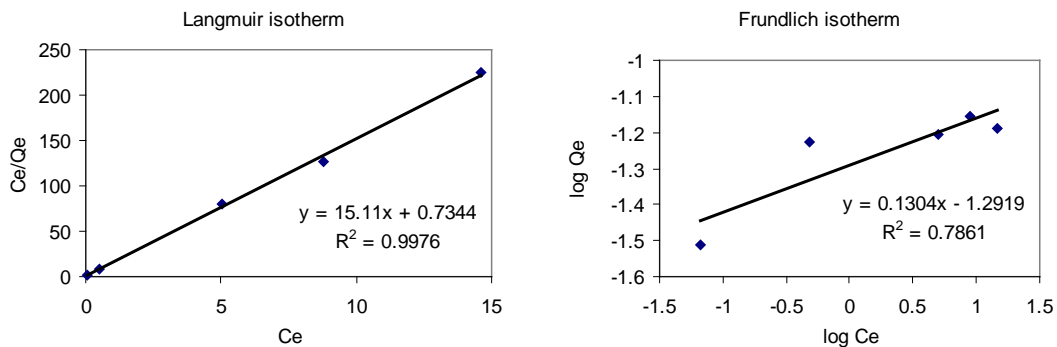


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

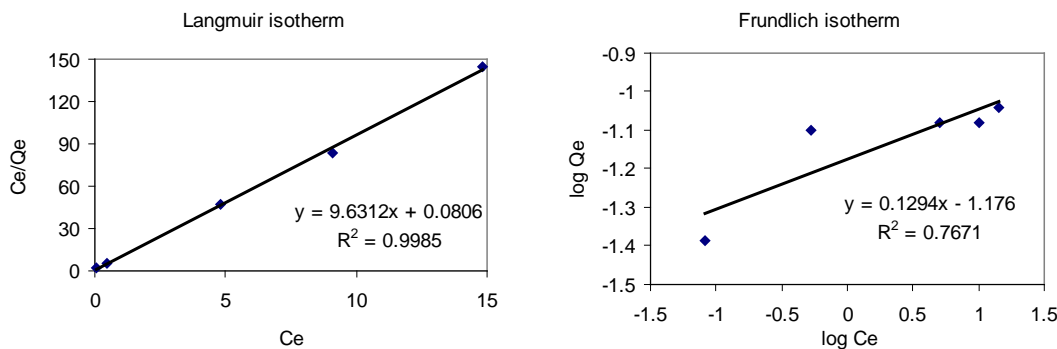


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

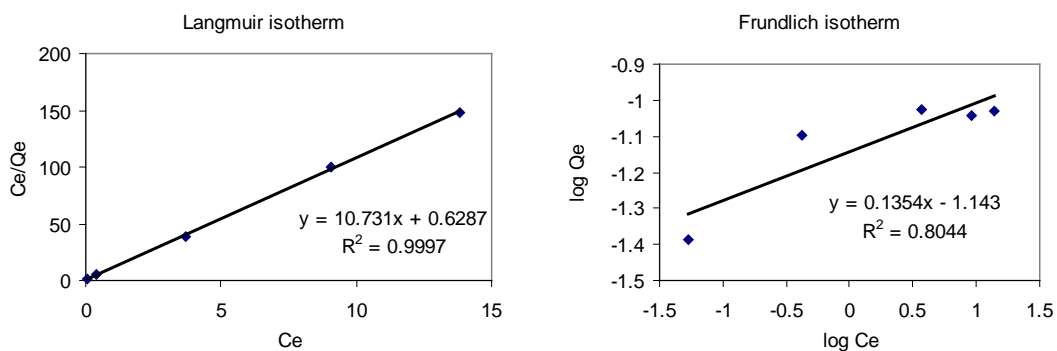
ภาพที่ 65 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

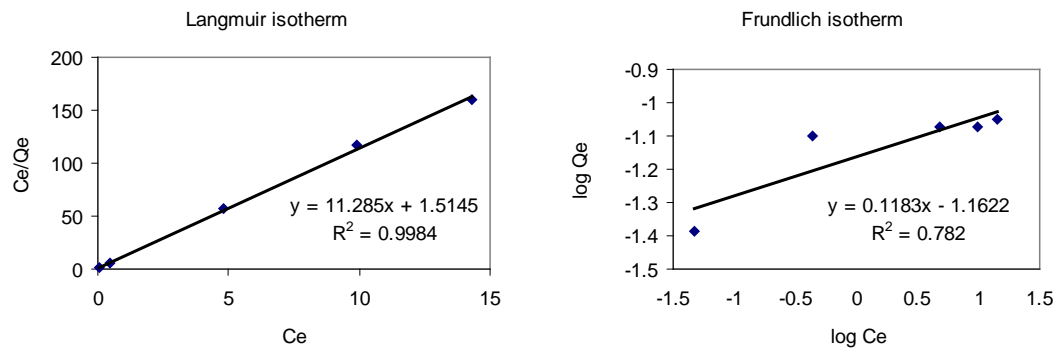


(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

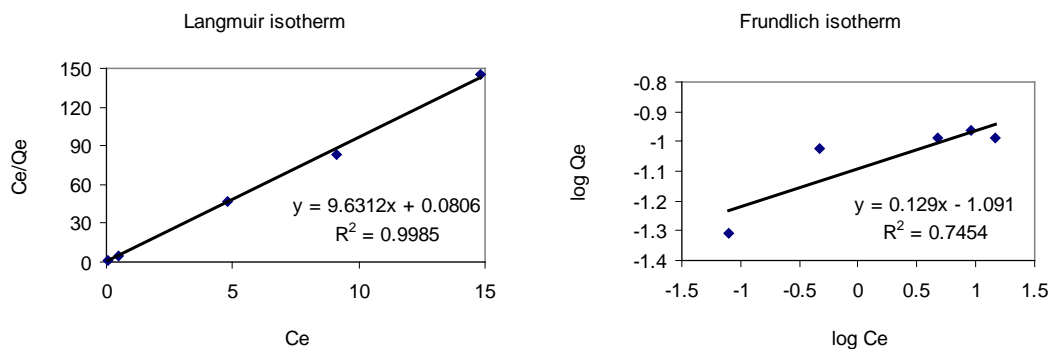
ภาพที่ 66 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี



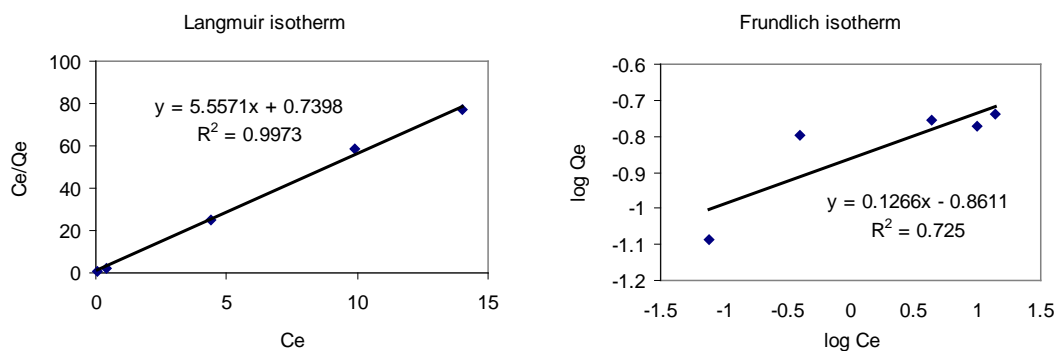
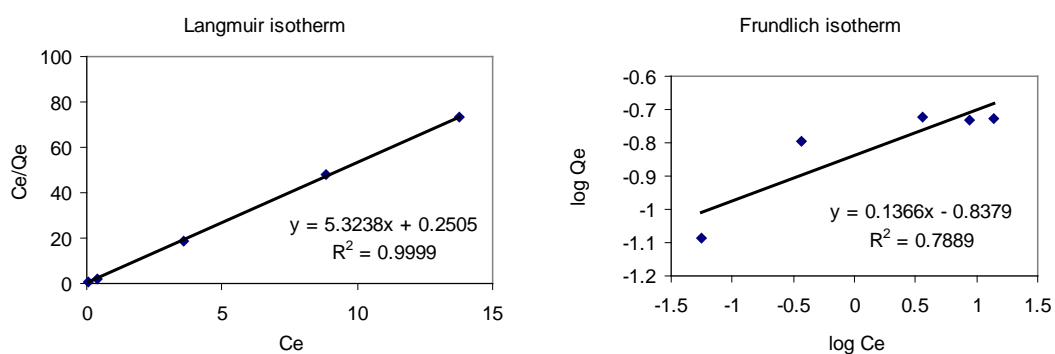
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 66 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



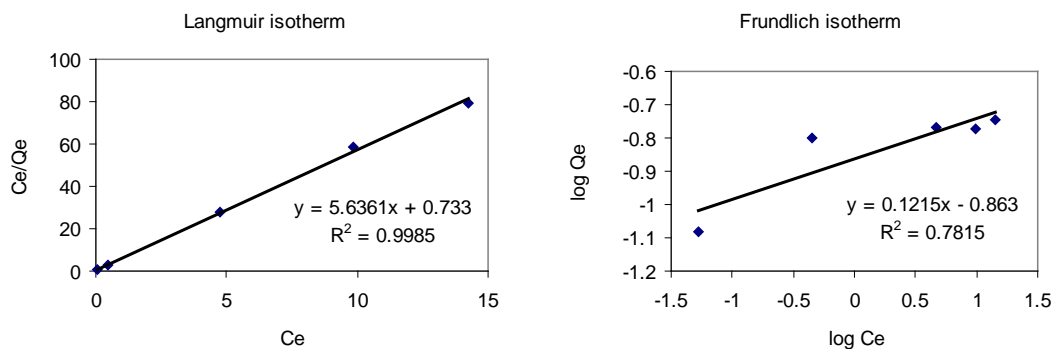
(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 67 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี

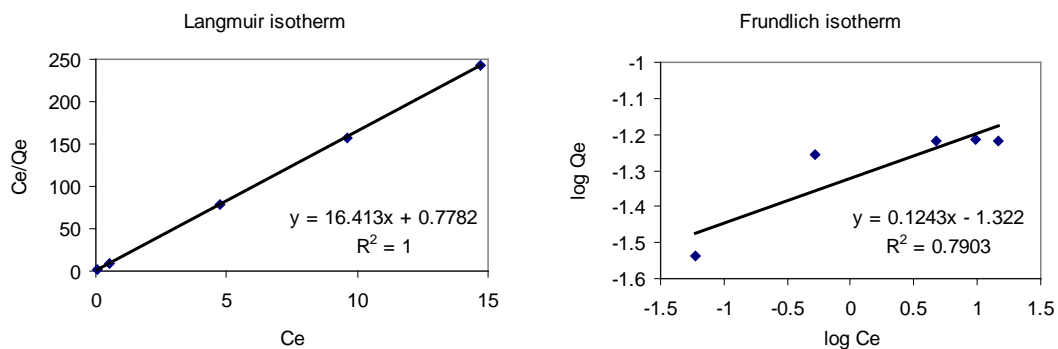




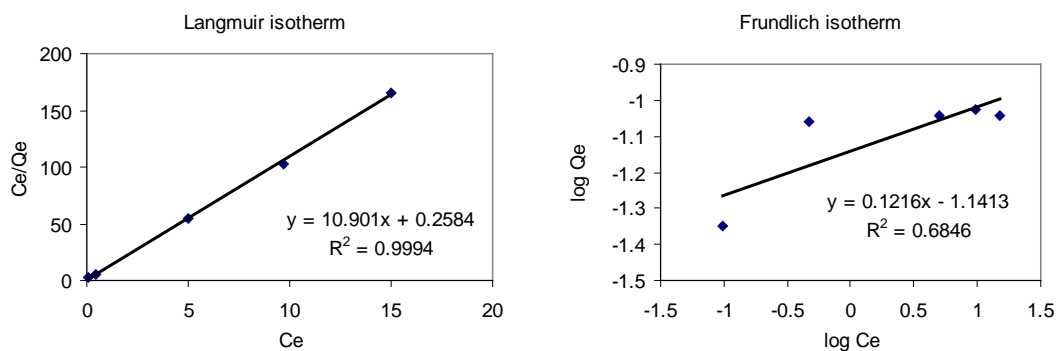
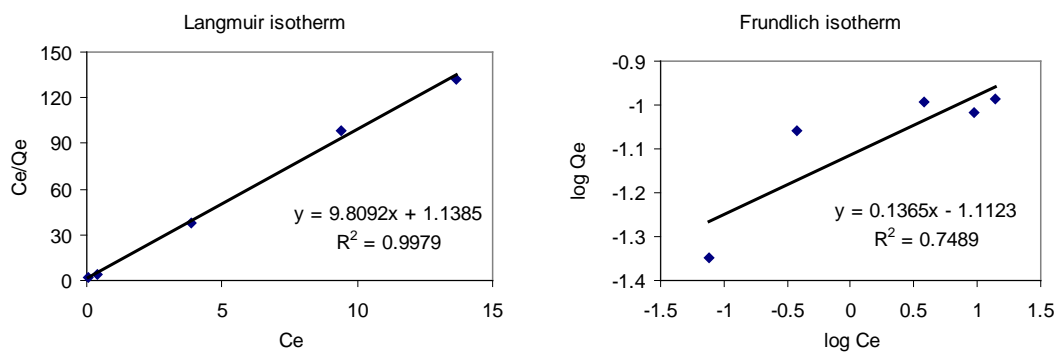
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 67 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

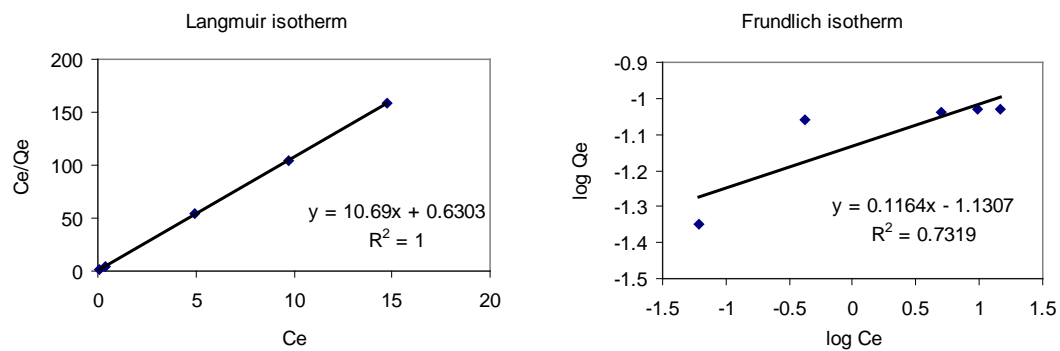


(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

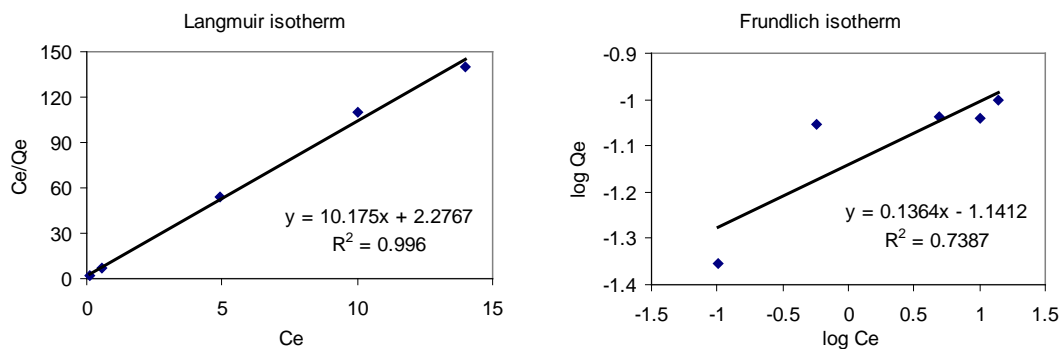
ภาพที่ 68 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี



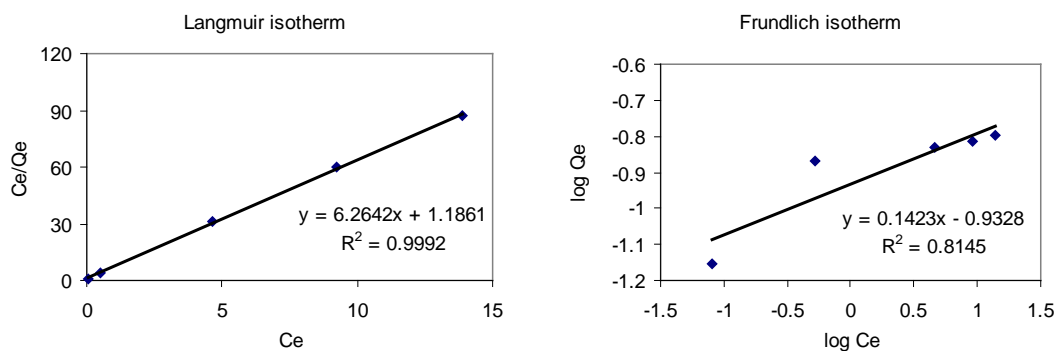
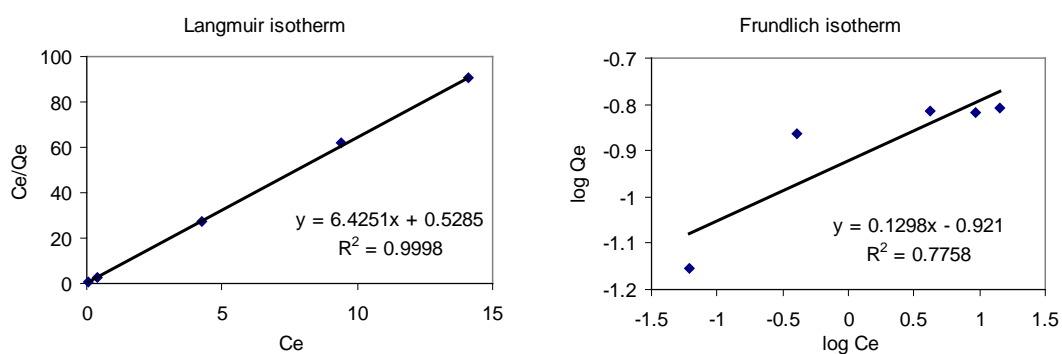
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 68 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

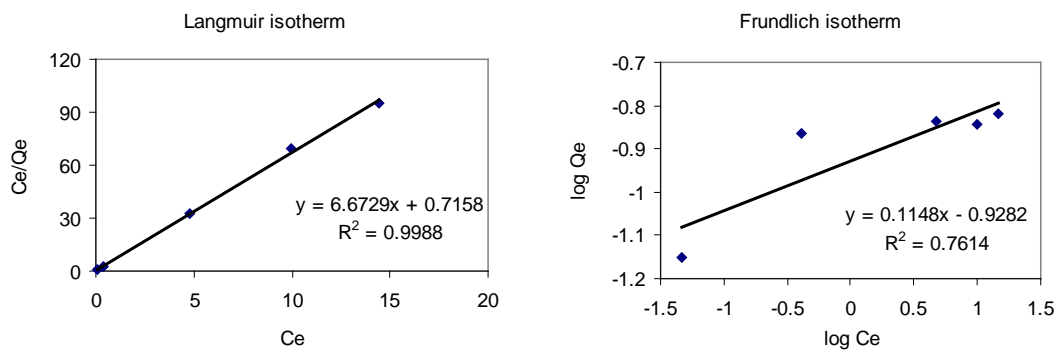


(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

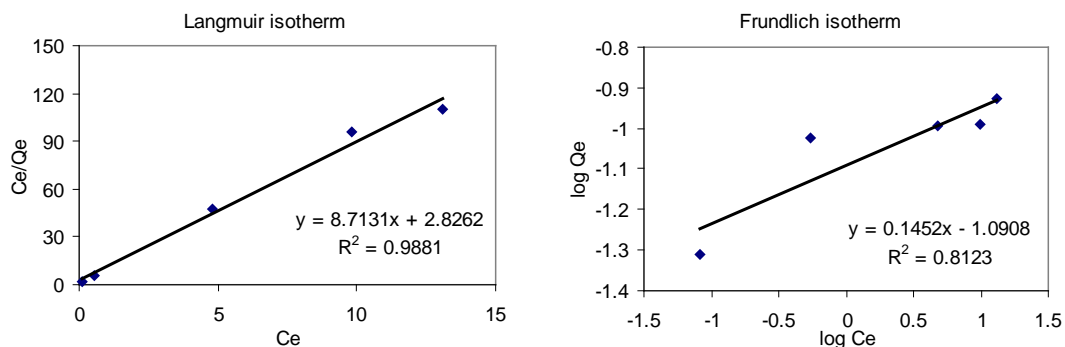
ภาพที่ 69 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี



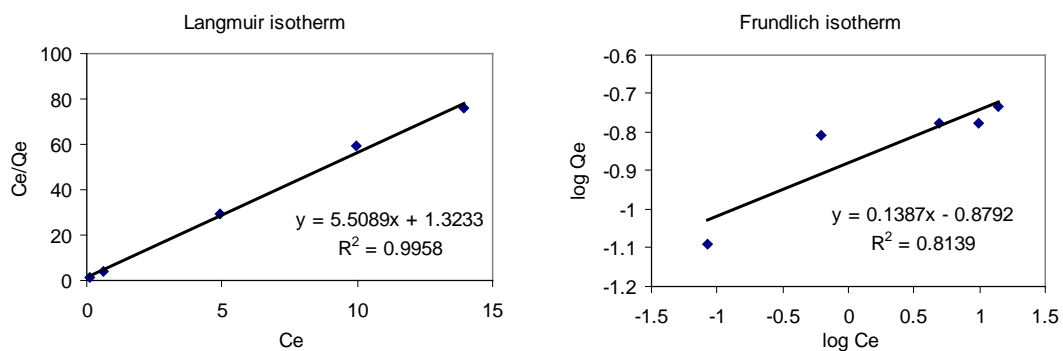
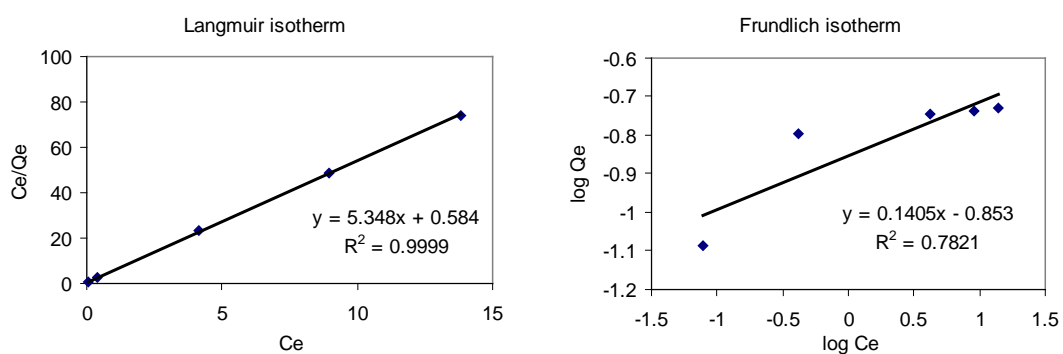
(ง) ถ่านไม้ไฟไหม้หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 69 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

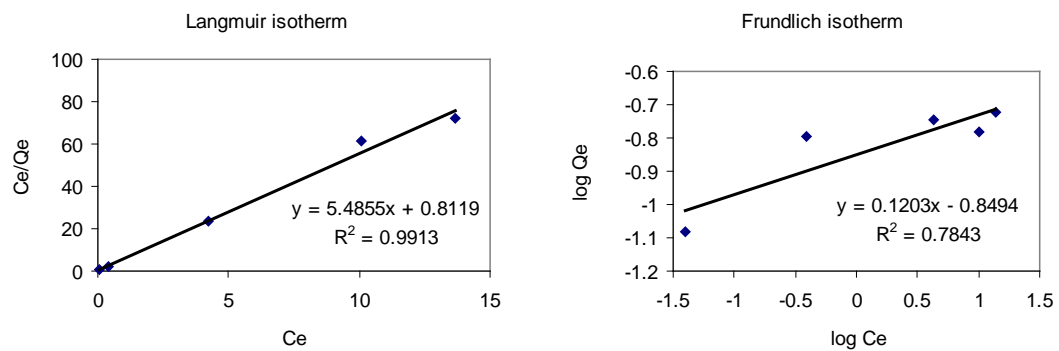


(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

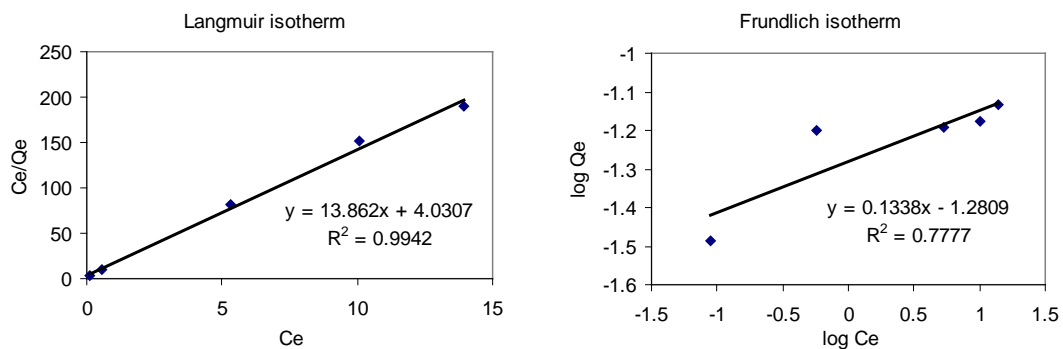
ภาพที่ 70 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี



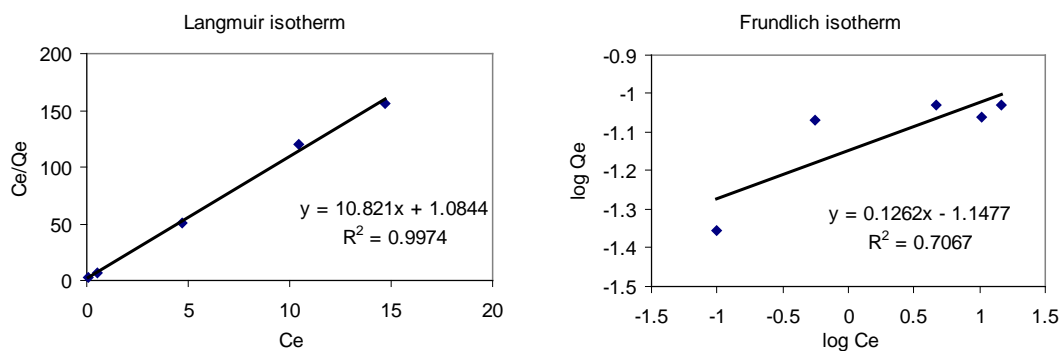
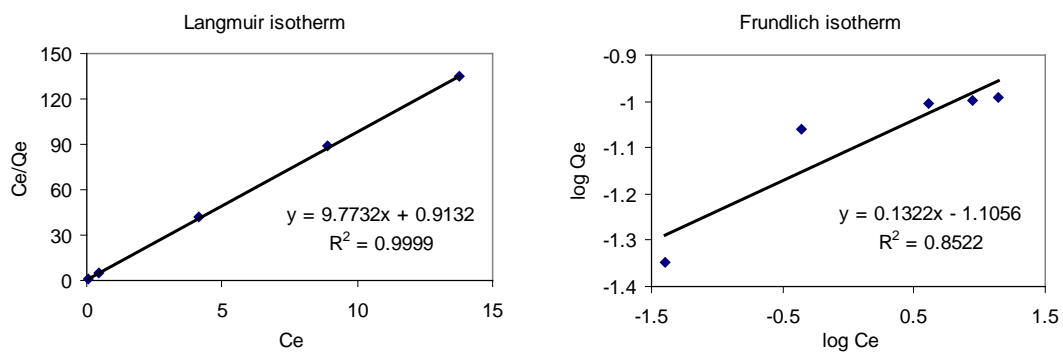
(ง) ถ่านไม้ไผ่ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 70 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



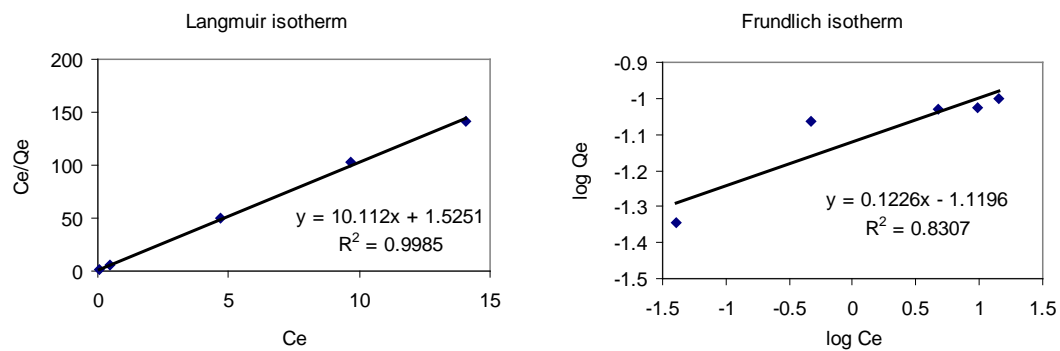
(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 71 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี





(ง) ถ่านไม้ไฟไหม้หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้น โดย  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น

ภาพที่ 71 (ต่อ)

- เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 19 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม แบบแลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช

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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 11.168x + 2.4076$	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 <sub>3</sub>	$y = 11.285x + 1.5145$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 5.5571x + 0.7398$	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 <sub>3</sub>	$y = 5.6361x + 0.733$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 10.901x + 0.2584$	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 <sub>3</sub>	$y = 10.69x + 0.6303$	1.0000	$y = 0.1164x - 1.1307$	0.7319

\* ถ่านกัมมันต์ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 19 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิซ	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	$R^2$	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	$R^2$
ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 10.175x + 2.2767$	0.9960	$y = 0.1364x - 1.1412$	0.7387
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 6.2642x + 1.1861$	0.9992	$y = 0.1423x - 0.9328$	0.8145
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 6.4251x + 0.5285$	0.9998	$y = 0.1298x - 0.921$	0.7758
		กระตุ้น โดย $HNO_3$	$y = 6.6729x + 0.7158$	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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 5.5089 + 1.3233$	0.9958	$y = 0.1387x - 0.8792$	0.8139
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 5.348x + 0.584$	0.9999	$y = 0.1405x - 0.853$	0.7821
		กระตุ้น โดย $HNO_3$	$y = 5.4855x + 0.8119$	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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 10.821x + 1.0844$	0.9974	$y = 0.1262x - 1.1477$	0.7067
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 9.7732x + 0.9132$	0.9999	$y = 0.1322x - 1.1056$	0.8522
		กระตุ้น โดย $HNO_3$	$y = 10.112x + 1.5251$	0.9985	$y = 0.1226x - 1.1196$	0.8307

จากตารางที่ 19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient :  $R^2$ ) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่า พิจารณาค่าคงที่ ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในตารางที่ 20

ซึ่งค่า  $Q^0$  แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับไอออนแคดเมียมในสารละลาย ถ้าถ่านกัมมันต์ใดมีค่า  $Q^0$  สูง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ชนิดนั้น สามารถดูดซับไอออนแคดเมียมได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่า  $Q^0$  ต่ำ

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่า  $Q^0$  ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่ชนิดและอายุเดียวกัน พบว่า การกระตุ้นถ่านด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้ค่า  $Q^0$  สูงกว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และ กรดไนตริก จึงสรุปได้ว่า ในการดูดซับไอออนแคดเมียมนั้น การใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เหมาะสมที่สุด

และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $Q^0$  ที่ได้ พบว่า ถ่านจากไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี และ ไม้หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะให้ค่า  $Q^0$  มากที่สุด คือ ประมาณ 0.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัท Fluka และ ถ่าน Bunton แล้ว จะพบว่าถ่านทั้งสองชนิด ให้ค่า  $Q^0$  ต่ำกว่าถ่านที่ถูกกระตุ้น แสดงว่า ถ่านไม้ไผ่ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีความสามารถในการดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัท Fluka และ ถ่าน Bunton

ตารางที่ 20 ค่าคงที่การดูดซับแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	$Q^0$	b	
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	
	ไม้ไผ่ทมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.0983	4.4692
			กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	0.1596	5.2813
			กระตุ้นโดย KOH	0.1556	12.1572
2 ปี		กระตุ้นโดย $HNO_3$	0.1499	9.3223	
		ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1148	3.0830	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	0.1815	4.1630	
3 ปี		กระตุ้นโดย KOH	0.1870	9.1575	
		กระตุ้นโดย $HNO_3$	0.1823	6.7564	
		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

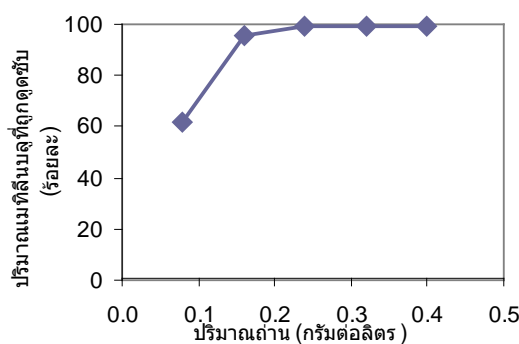
\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

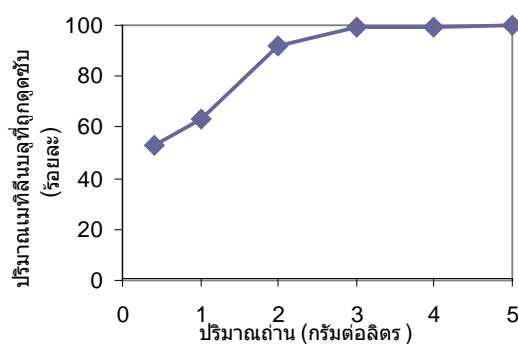
#### 3.2.1 การศึกษาปริมาณของถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

ในการทำการทดลองดูดซับเมทิลลิโนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายเมทิลลิโนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร และมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเพิ่มน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.025 กรัม จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ภาพที่ 72 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 21 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

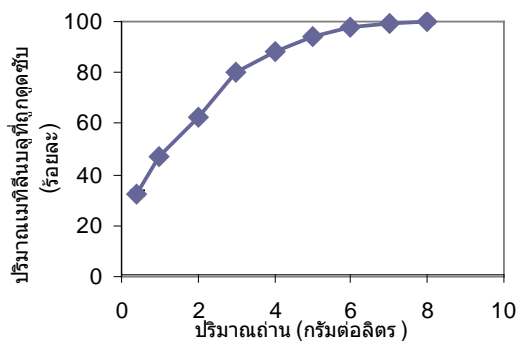


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

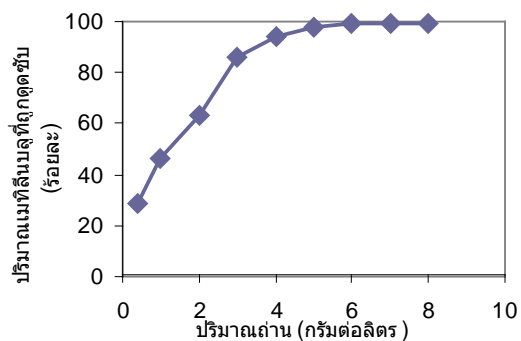


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

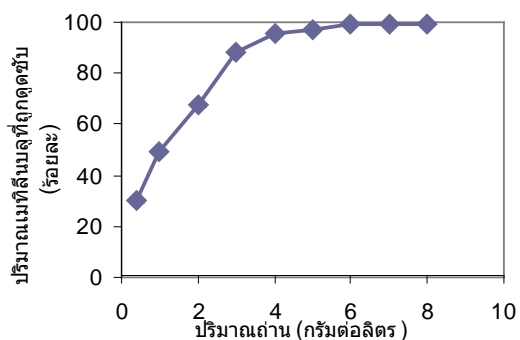
ภาพที่ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



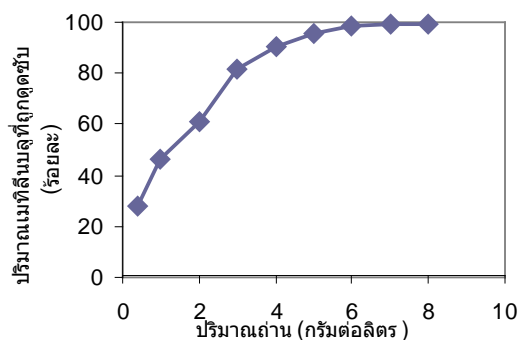
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



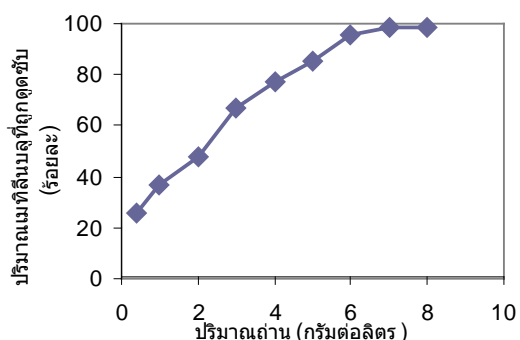
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



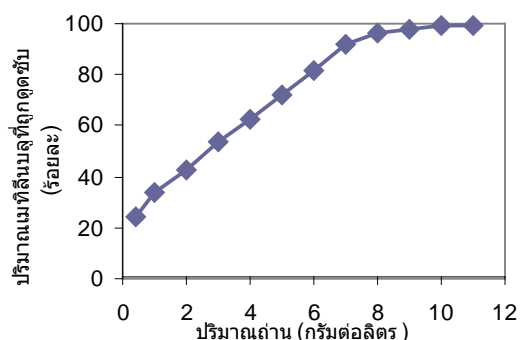
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



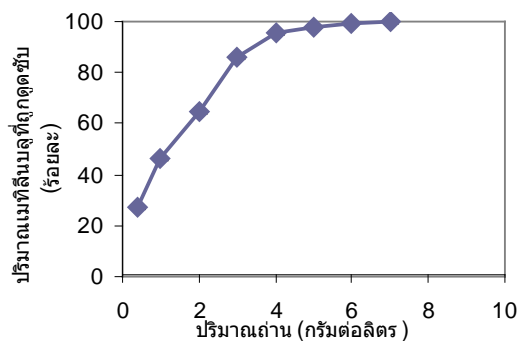
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



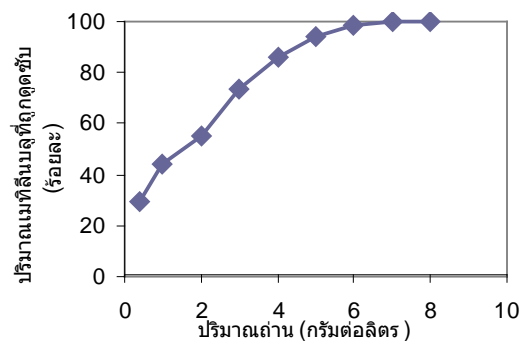
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



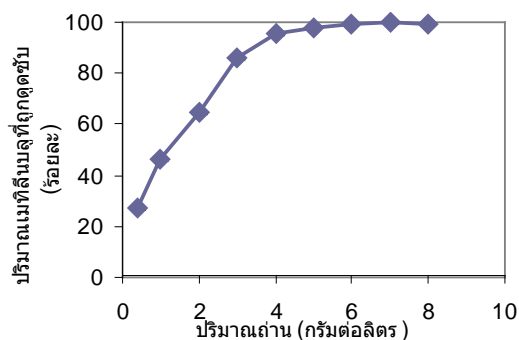
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



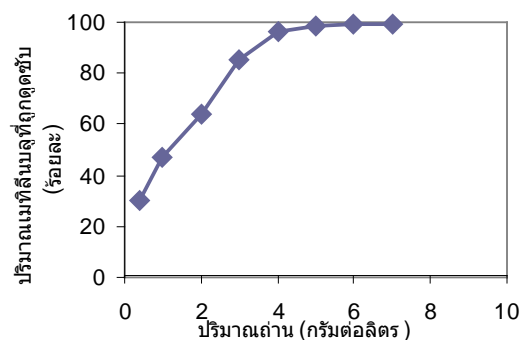
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



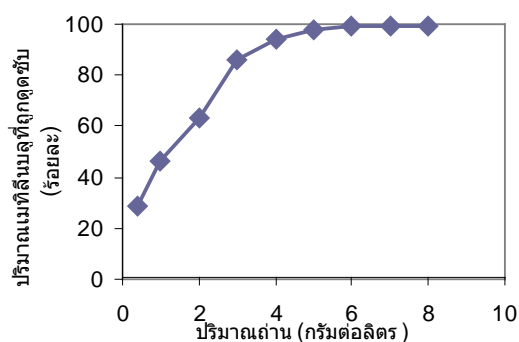
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



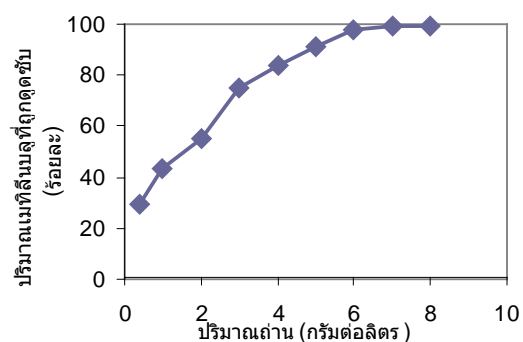
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ท) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



ตารางที่ 21 แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลีนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่  
แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ ใช้ในการ ทดลอง (กรัม)	ปริมาณถ่านที่ เหมาะสม (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณ เมทิลลีนบลู ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.0060	0.24	99.22 ± 1.07
ถ่าน Bantan**	-	-	0.0750	3.00	99.06 ± 0.62
ไม้ไผ่แดง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1750	7.00	99.33 ± 0.14
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.1500	6.00	99.24 ± 0.20
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.34 ± 0.16
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.1750	7.00	99.05 ± 0.05
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1750	7.00	98.27 ± 0.09
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.2500	10.00	99.26 ± 0.03
ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.36 ± 0.14
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.1750	7.00	99.65 ± 0.09
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1250	5.00	99.36 ± 0.11
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.1500	6.00	99.47 ± 0.01
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.42 ± 0.08
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.1750	7.00	99.55 ± 0.06

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

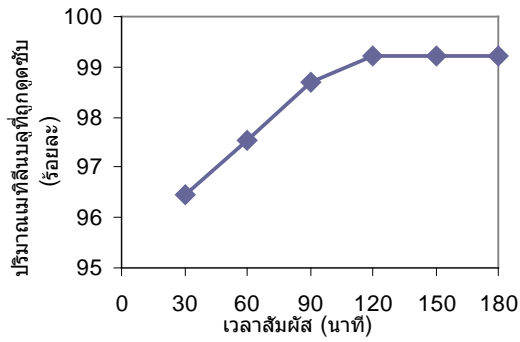
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้  
ปริมาณถ่านที่สูงกว่าในการดูดซับเมทิลลีนบลู เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้น ที่พันธุ์และ  
อายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้น ทำให้ความสามารถของถ่านในการดูดซับเมทิลลีนบลู  
ลดลง

### 3.2.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

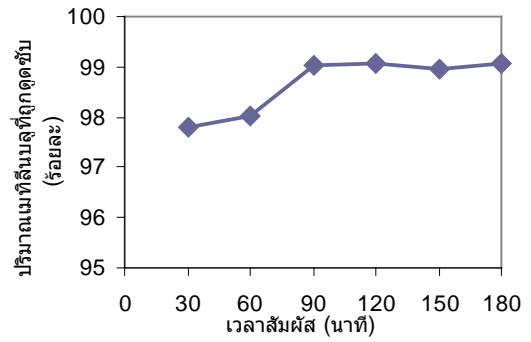
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ที่เหมาะสม และปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 30 นาที จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่า ร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 73 แสดงเวลา กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 22 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟแต่ละชนิด

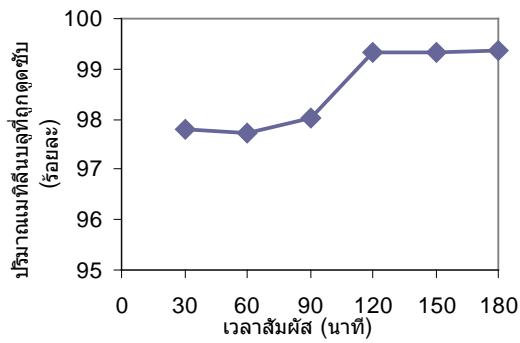
จากการทดลองพบว่า ในถ่านไม้ไฟตงทุกอายุปี เวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 120 นาที ทั้งถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นและถ่านที่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว ยกเว้น ถ่านไม้ไฟตงอายุ 2 ปีที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เวลาที่เหมาะสม คือ 90 นาที แสดงว่า การกระตุ้นไม่ได้ช่วยให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับเมทิลลิโนบลูเปลี่ยนแปลง ส่วนในถ่านไม้ไฟหม่าจูนั้น ถ่านที่ไม่ได้ถูกกระตุ้น มีเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 60 นาที แต่ ในถ่านที่ถูกกระตุ้นแล้ว เวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที แสดงว่า ในไม้ไฟหม่าจูนั้น การกระตุ้นทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับเมทิลลิโนบลูเพิ่มขึ้น หรือ การกระตุ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูลดลง



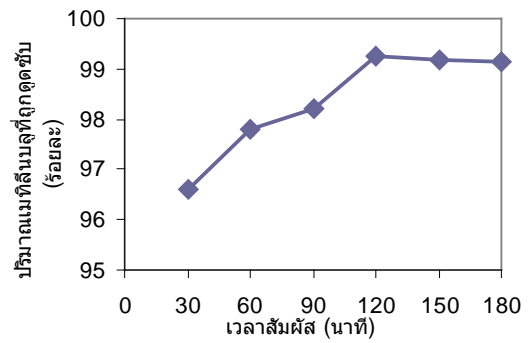
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



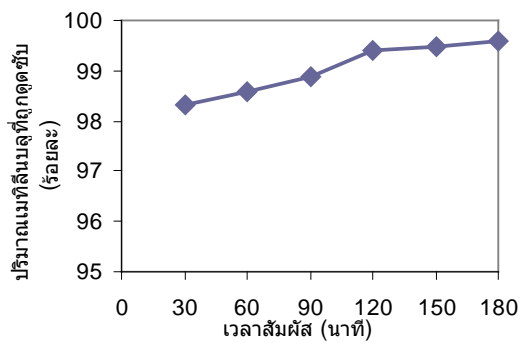
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton



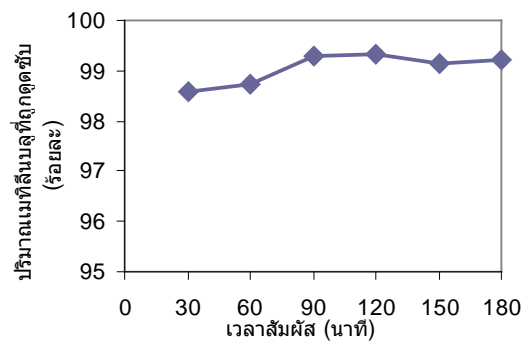
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

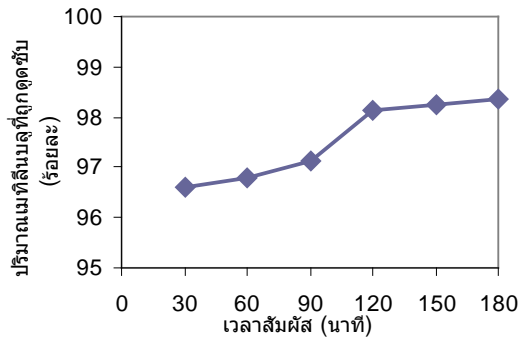


(จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

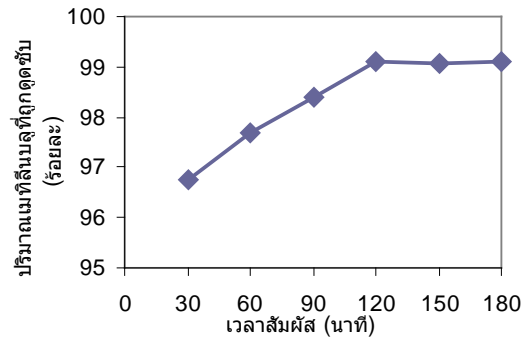


(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

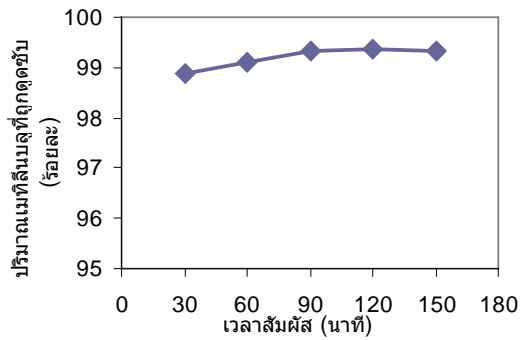
ภาพที่ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมพัทธ์ กับ ปริมาณของเมทิลีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



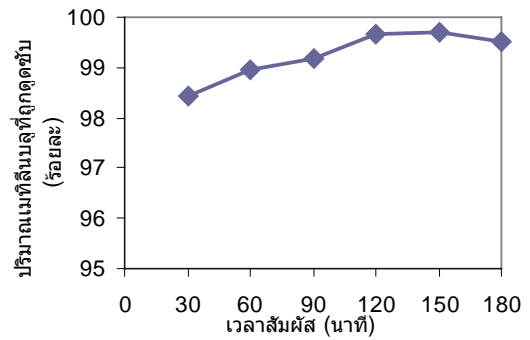
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



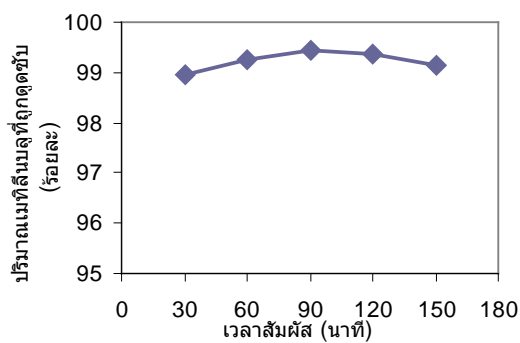
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



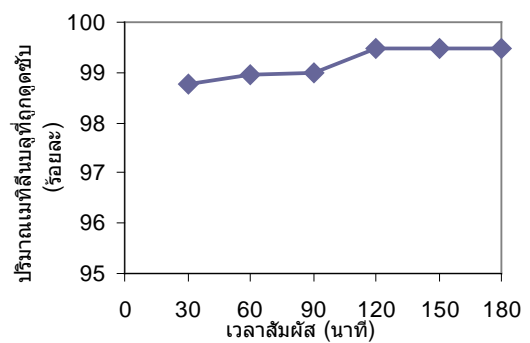
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



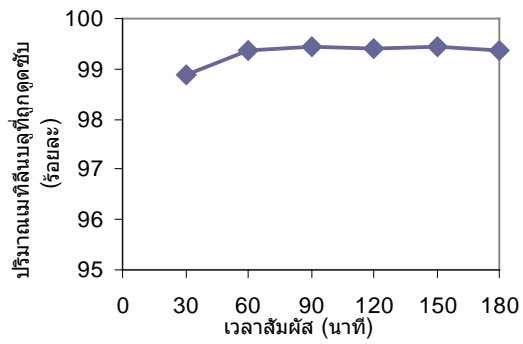
(จ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



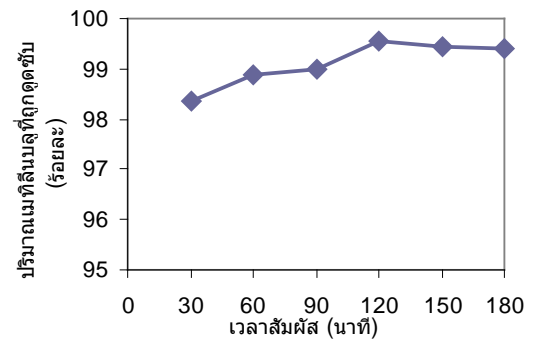
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 73 (ต่อ)

ตารางที่ 22 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่  
แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่ เหมาะสม (นาที)	ปริมาณเมทิลลิโนบลู ที่ถูกดูดซับ (%)	
ถ่าน Fluka *	-	-	90	98.68 ± 1.09	
ถ่าน Bunton **	-	-	90	99.04 ± 0.28	
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	99.33 ± 0.14	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	99.24 ± 0.20	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	99.37 ± 0.10	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	90	99.34 ± 0.02	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	98.14 ± 0.11	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	99.11 ± 0.04	
	ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.12 ± 0.27
			กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	99.65 ± 0.09
2 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.24 ± 0.17	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	99.48 ± 0.05	
3 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.36 ± 0.29	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	120	99.55 ± 0.06	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

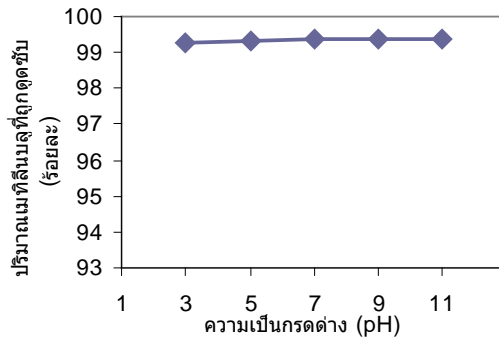
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.2.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

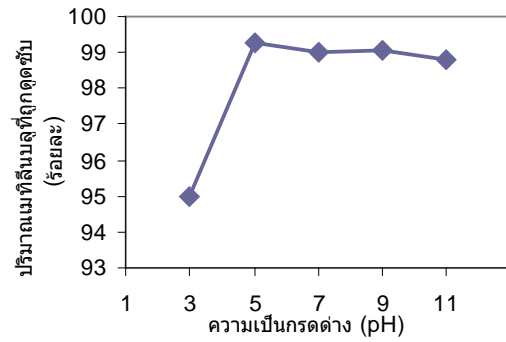
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.2.1 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาลัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด และ เลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลูถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 74 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 23 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

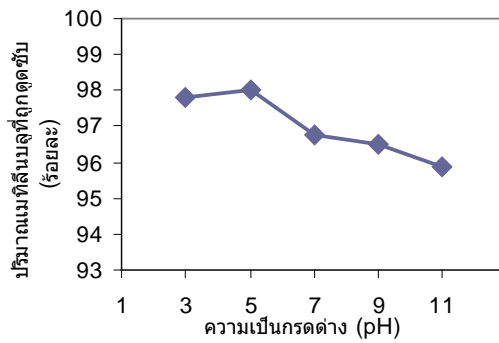
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือ ในสภาวะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเนื่องจากโครงสร้างของเมทิลลิโนบลู มีความเป็นอะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของเมทิลลิโนบลูเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างเมทิลลิโนบลู และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี (Emad N. El Qada, 2006)



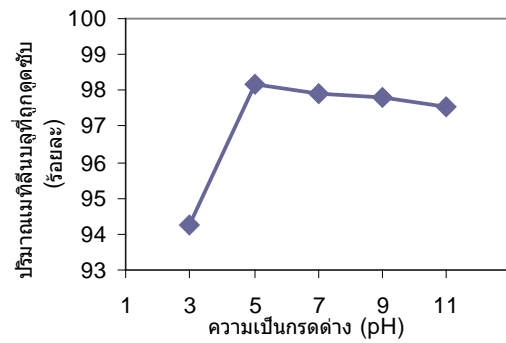
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



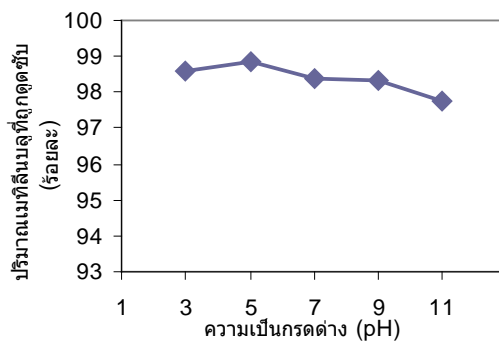
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton



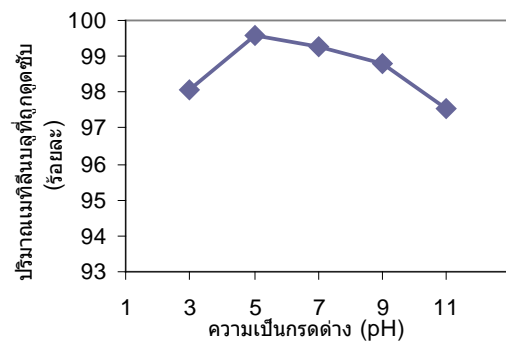
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



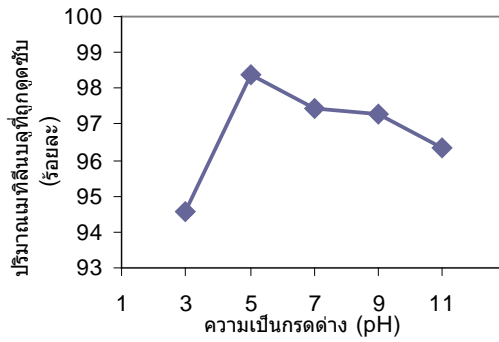
(จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



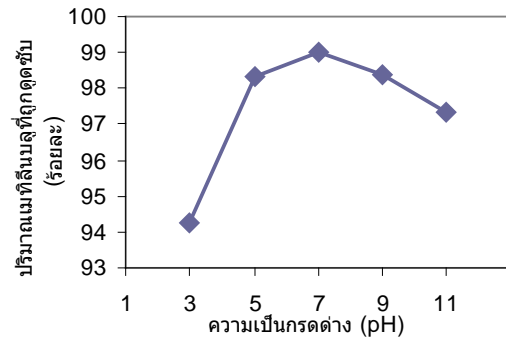
(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ภาพที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของเมทัลลิลินบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ

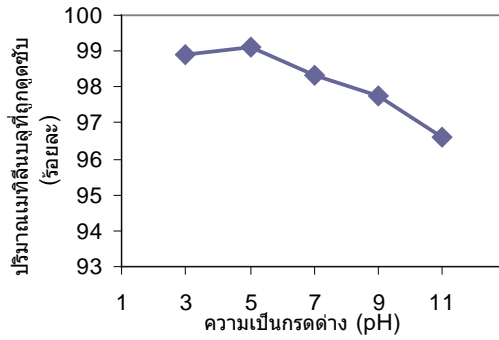




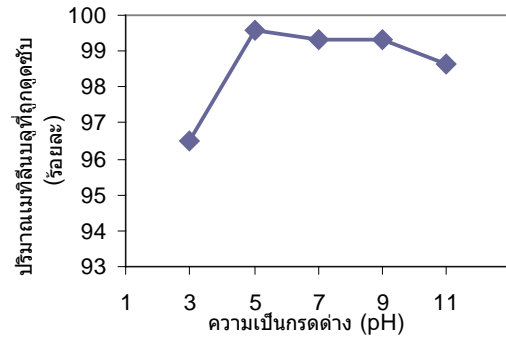
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



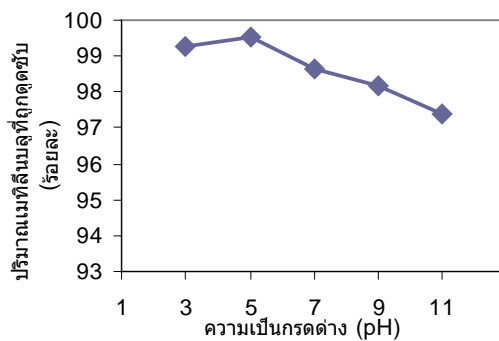
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



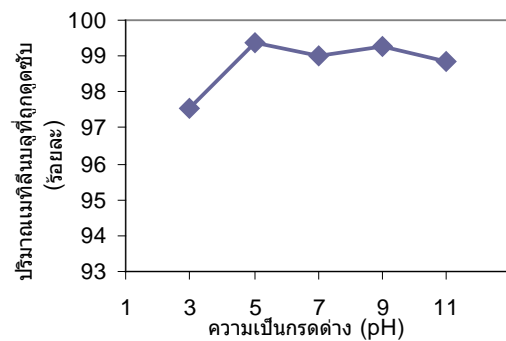
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



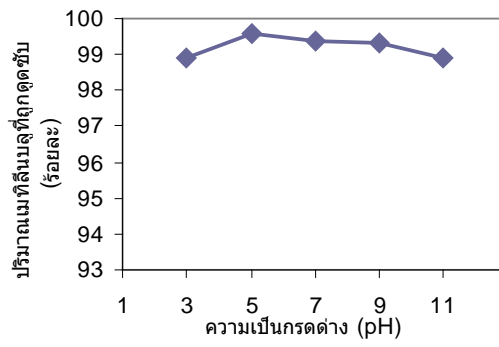
(จ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



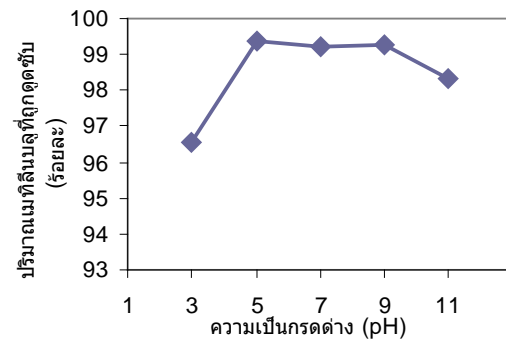
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 74 (ต่อ)

ตารางที่ 23 แสดงความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด

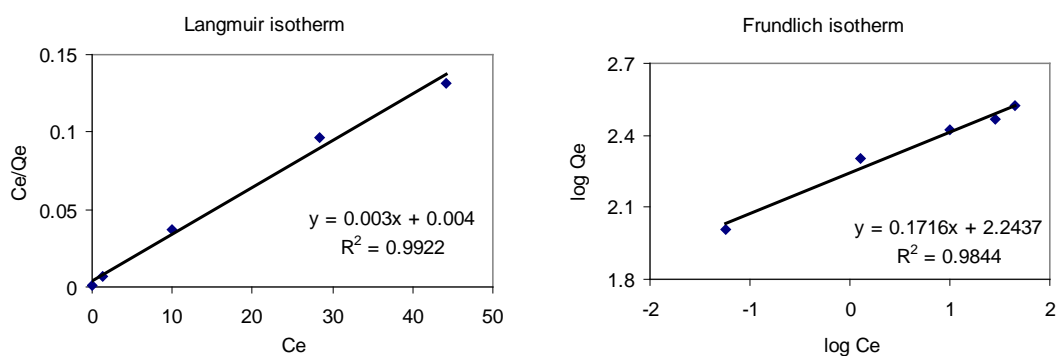
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดค่าที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณเมทิลลิโนบลู ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	7.0	99.37 ± 1.05
ถ่าน Bunton **	-	-	7.0	98.99 ± 0.11
ไม้ไฟต่ง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.00 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	97.93 ± 0.17
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.84 ± 0.18
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.25 ± 0.24
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.38 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.01 ± 0.08
ไม้ไฟหมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	99.12 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.34 ± 0.21
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	99.54 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.00 ± 0.17
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.37 ± 0.21
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.21 ± 0.04

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

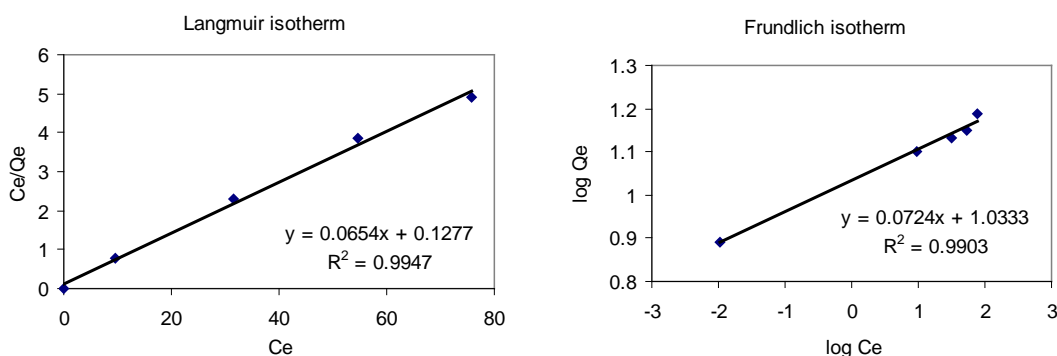
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลลินบลู

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับเมทิลลินบลูความเข้มข้น 25, 50, 75, 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และ ความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.2.1, 3.2.2 และ 3.2.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของเมทิลลินบลูที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 75 ถึง 81 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเมทิลลินบลู

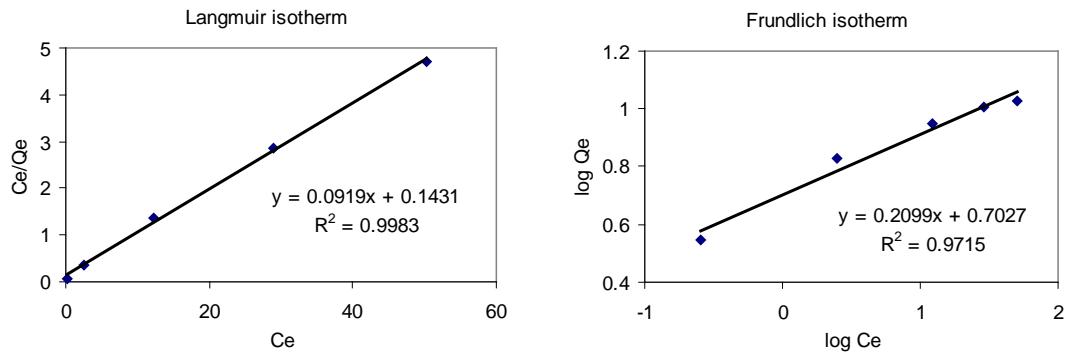


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

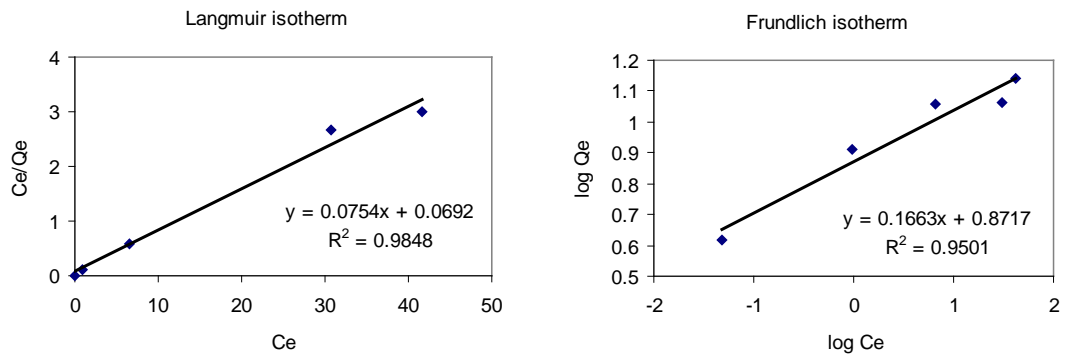
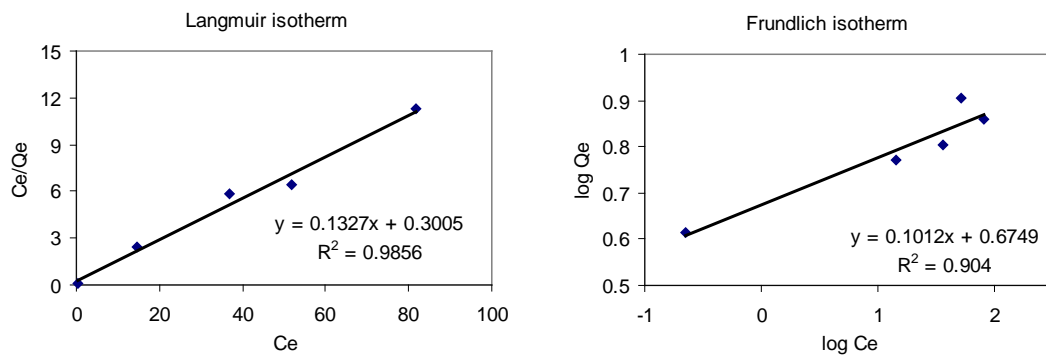


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 75 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลินบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

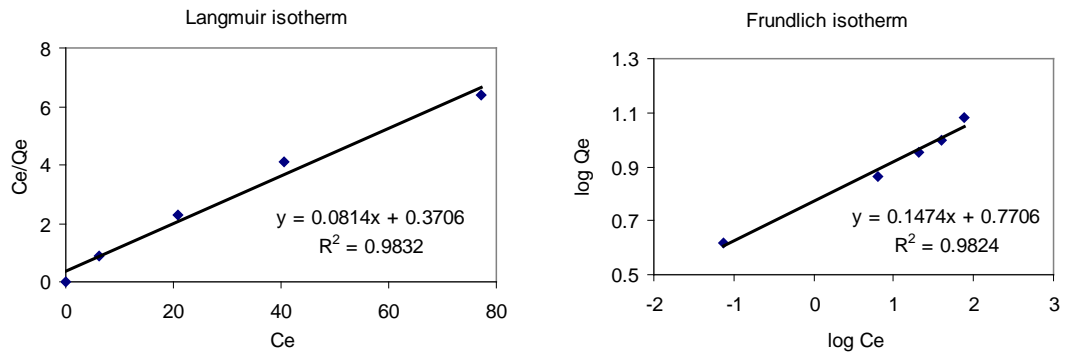
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

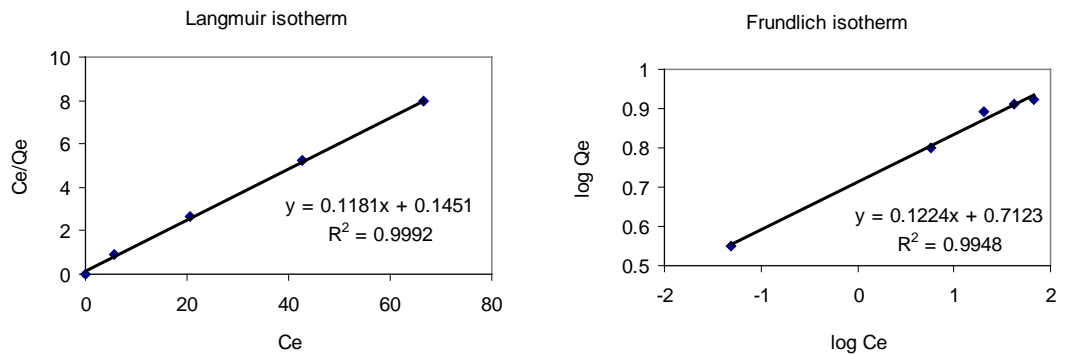
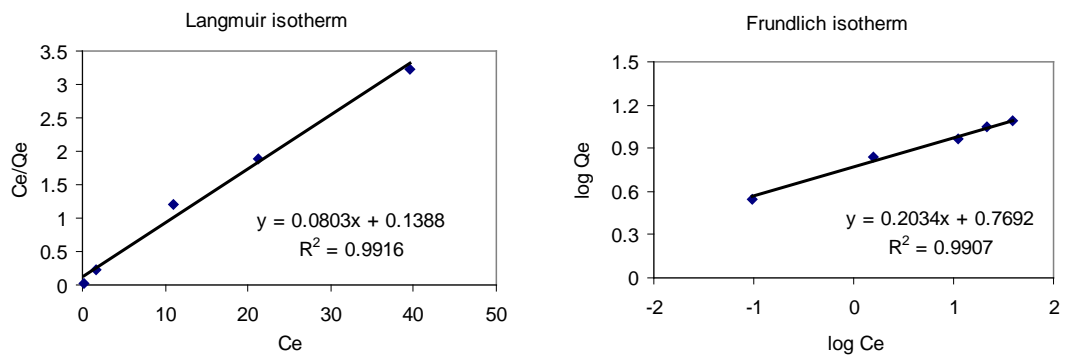
ภาพที่ 76 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

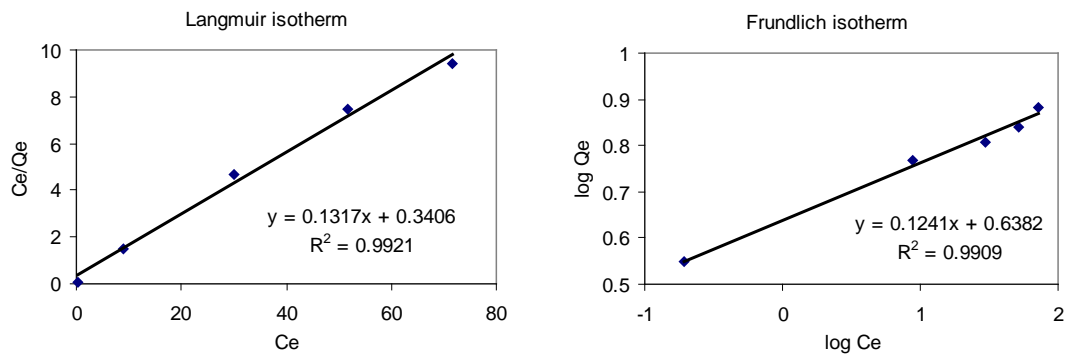
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

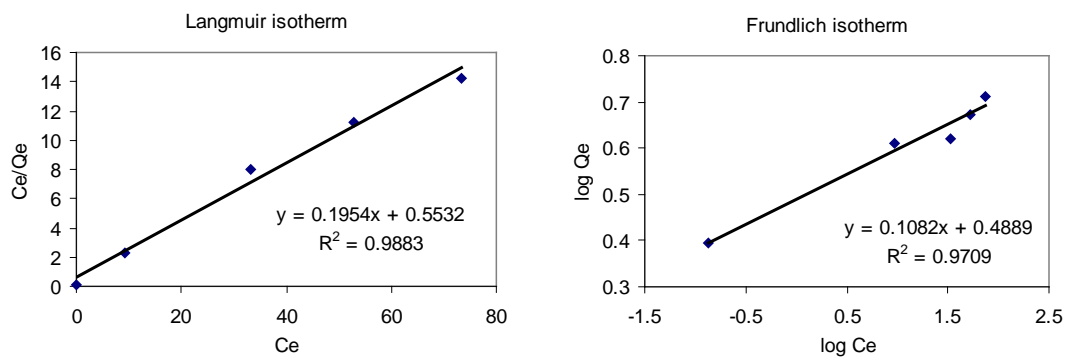
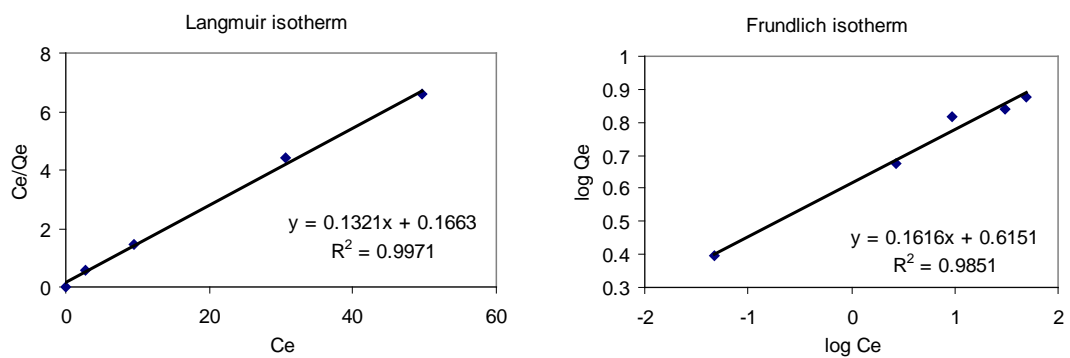
ภาพที่ 77 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลินบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

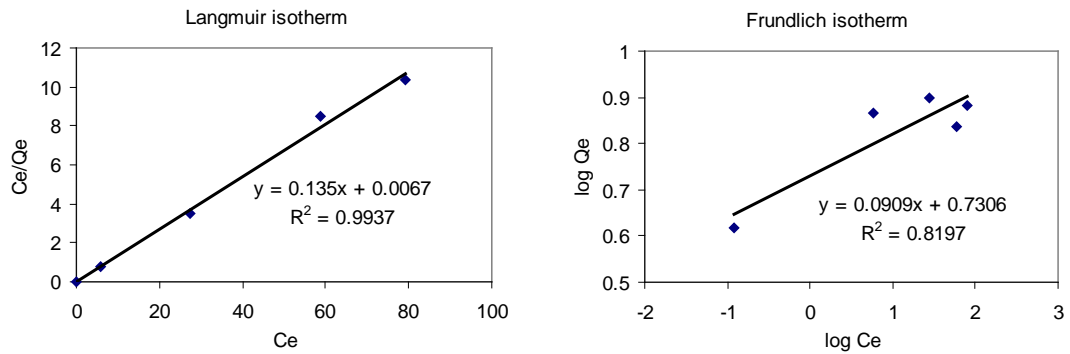
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

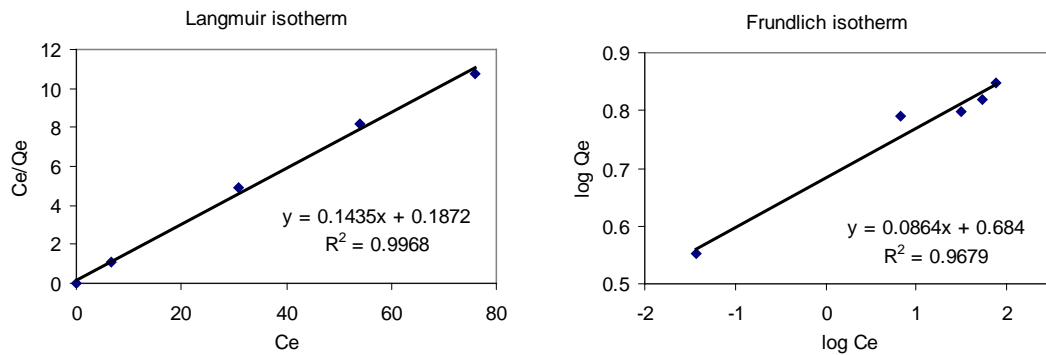
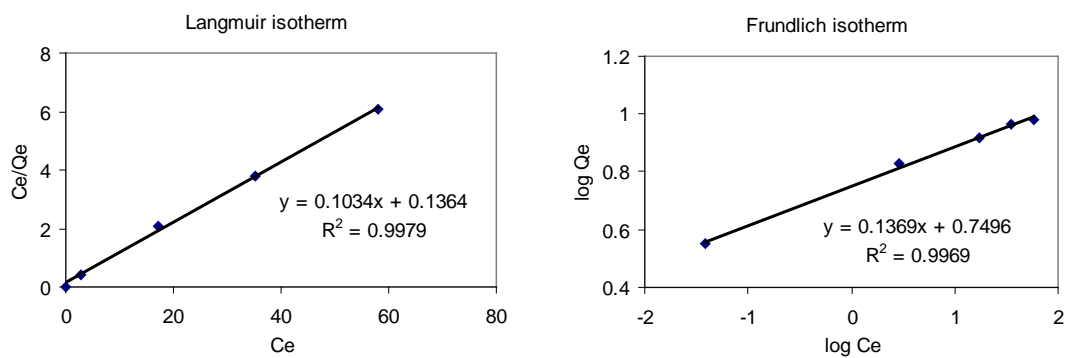
ภาพที่ 78 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

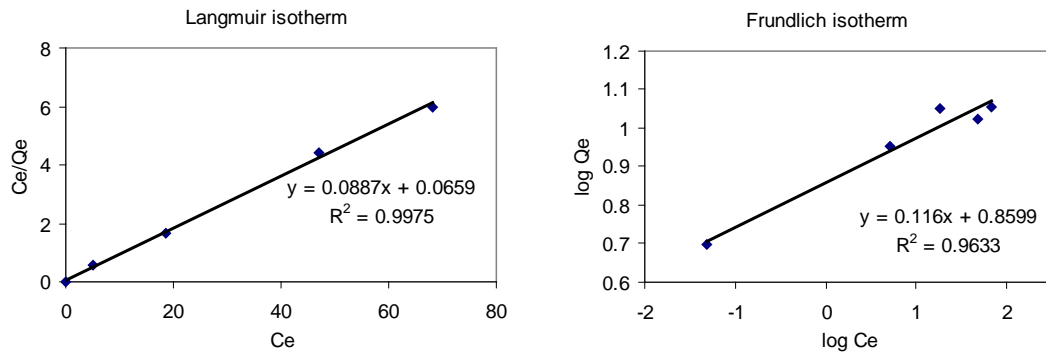
(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 79 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี

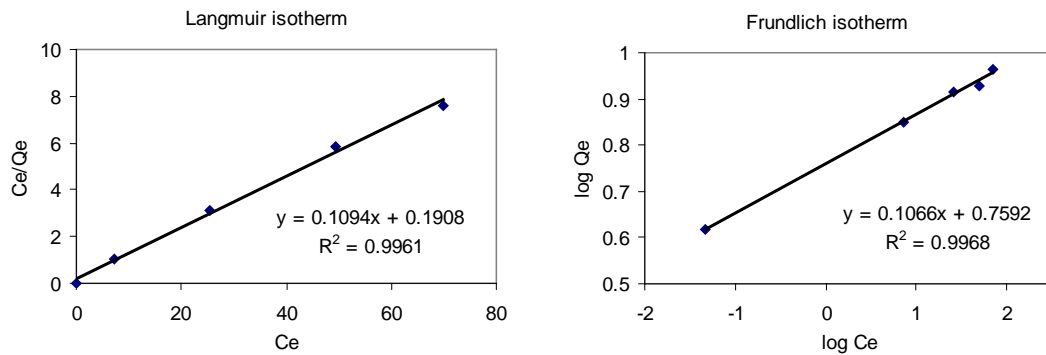
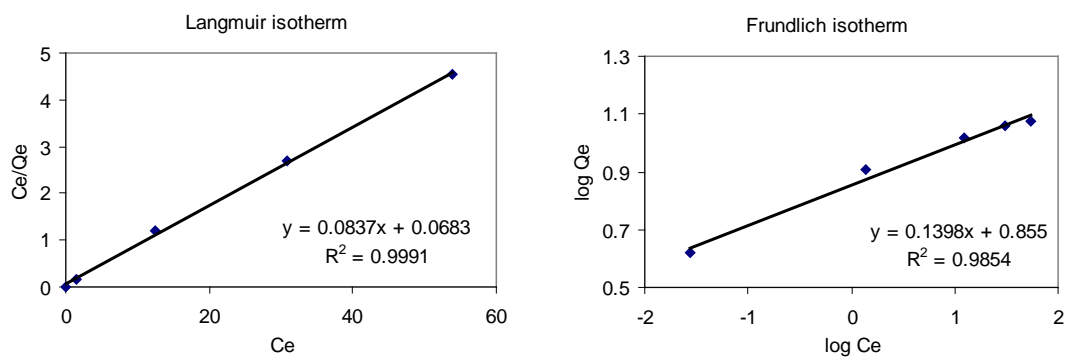
เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกระตุ้นบนตัวดูดซับ 1 กรัม





(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

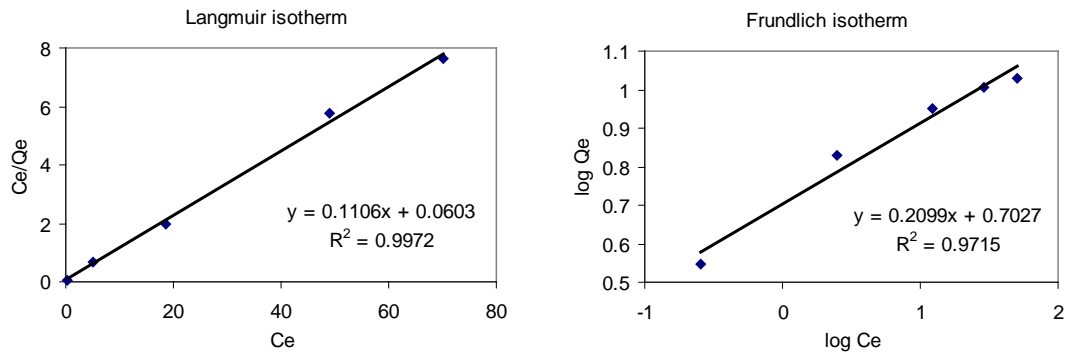
(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

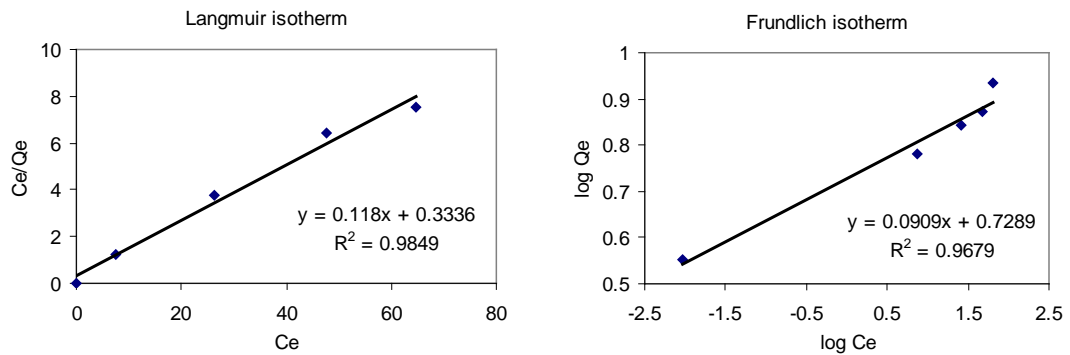
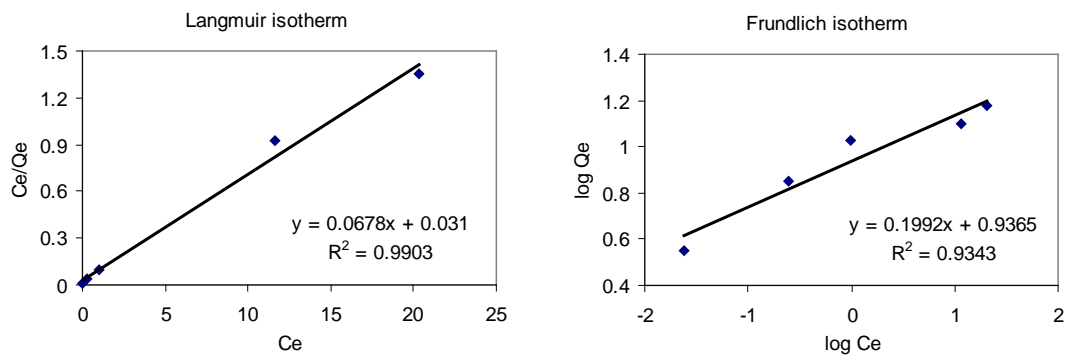
ภาพที่ 80 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกระบุบนตัวดูดซับ 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 81 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกระงับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 24 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช 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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.0754x + 0.0692$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.1181x + 0.1451$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.1954x + 0.5532$	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

\* ถ่านถัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 24 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิซ	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	$R^2$	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	$R^2$
ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.1350x + 0.0067$	0.9937	$y = 0.0909x + 0.7306$	0.8197
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.1435x + 0.1872$	0.9968	$y = 0.0864x + 0.6840$	0.9679
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.1094x + 0.1908$	0.9961	$y = 0.1066x + 0.7592$	0.9968
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.1180x + 0.3336$	0.9849	$y = 0.0909x + 0.7289$	0.9679
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 0.0678x + 0.0310$	0.9903	$y = 0.1992x + 0.9365$	0.9343

จากตารางที่ 24 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient :  $R^2$ ) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่นำมาเขียนเป็น ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่า พิจารณาค่าคงที่ ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในตารางที่ 25

ซึ่งค่า  $Q^0$  แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูในสารละลาย ถ้าถ่านใดมีค่า  $Q^0$  สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้น สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า  $Q^0$  ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $Q^0$  ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านที่ได้จากไม้ไผ่หมางูอายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะให้ค่า  $Q^0$  สูงสุด คือ 14.7493 กรัมต่อมิลลิกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านไม้ไผ่ Buntan ซึ่งมีค่า  $Q^0$  เท่ากับ 15.2905 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งมีค่า  $Q^0$  เท่ากับ 333.33 มิลลิกรัมต่อกรัม ยังถือว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูยังต่ำกว่ามาก

ตารางที่ 25 ค่าคงที่การดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟแต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	$Q^0$	b	
ถ่าน Fluka *	-	-	333.3333	0.7500	
ถ่าน Bunton **	-	-	15.2905	0.5121	
ไม้ไฟตง	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	
	ไม้ไฟหมาจู้	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

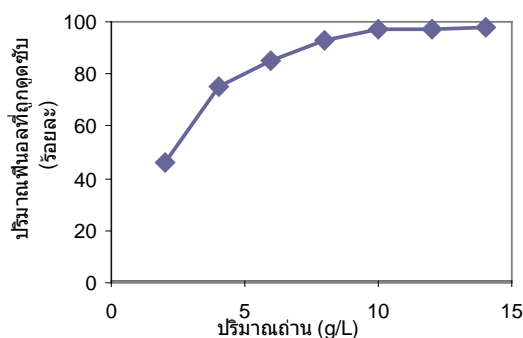
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล

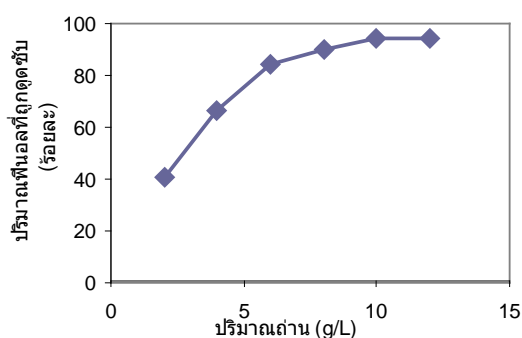
#### 3.3.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทำการทดลองดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายฟีนอล ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร และมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยเพิ่มน้ำหนักของ ถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.050 กรัม จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของ ถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะ เข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ภาพที่ 82 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 26 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของฟีนอลที่ถูก ดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

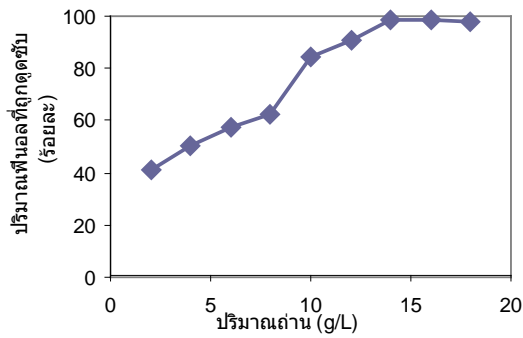


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

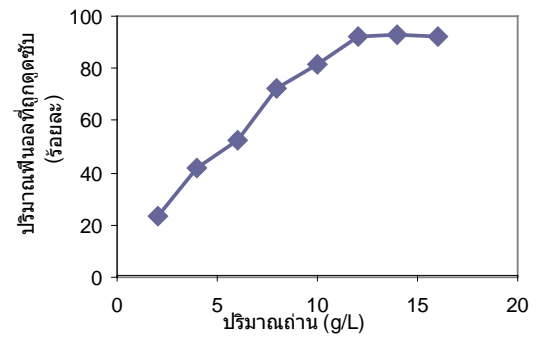


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

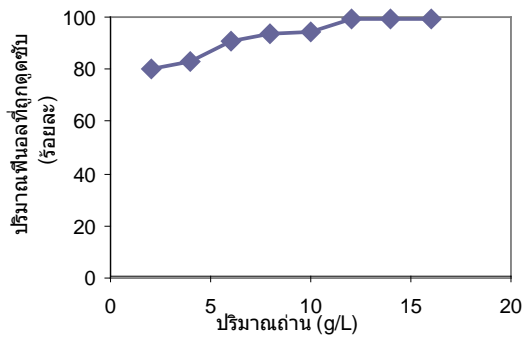
ภาพที่ 82 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



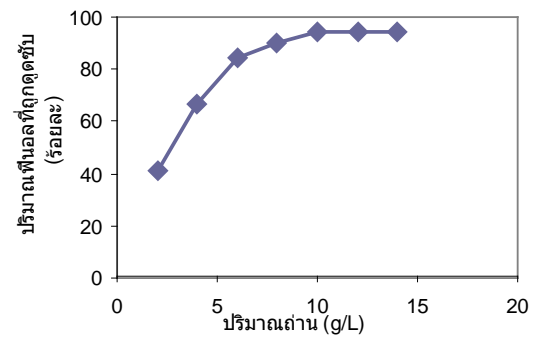
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



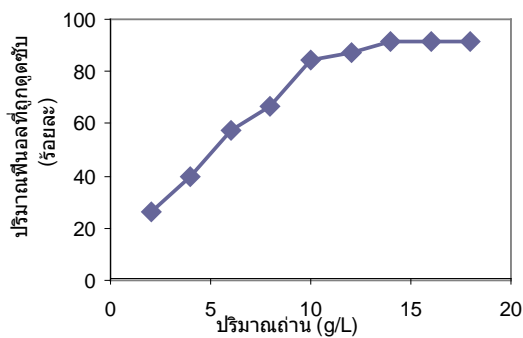
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



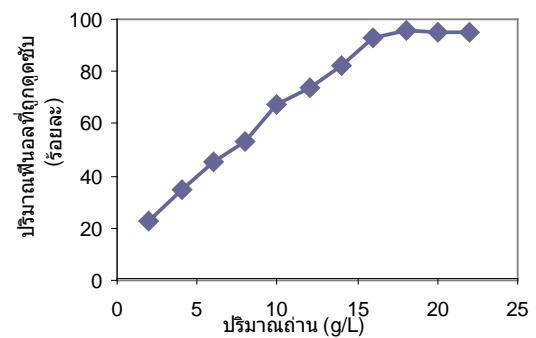
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

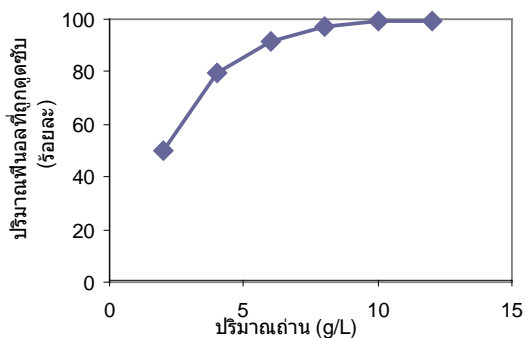


(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

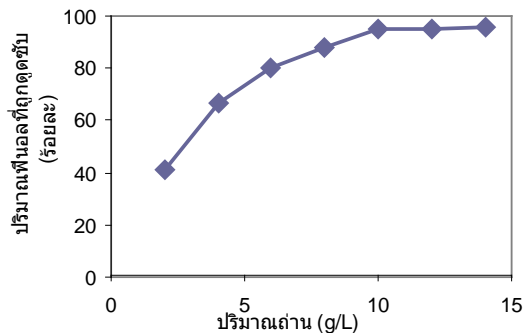


(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

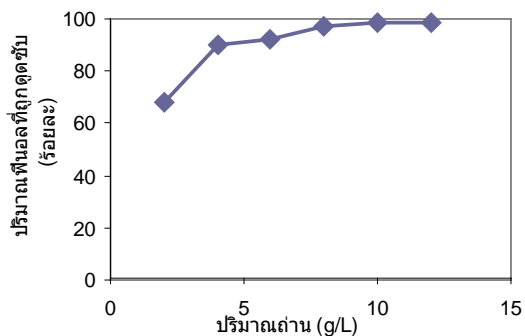




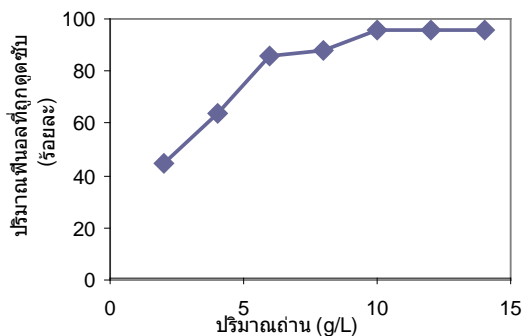
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



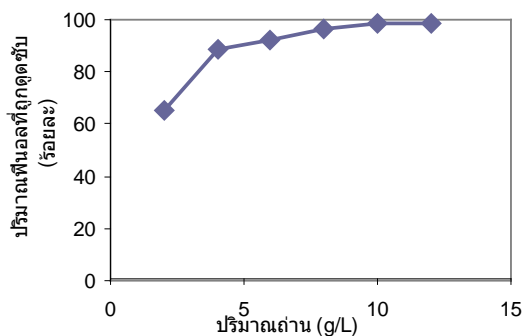
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



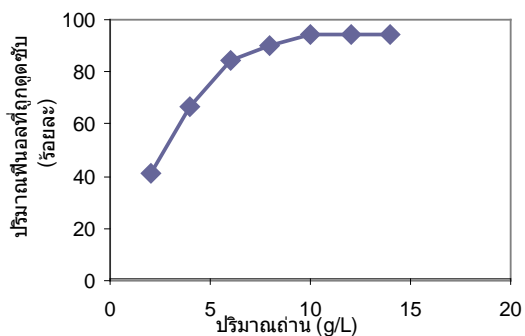
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ตารางที่ 26 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิดที่เหมาะสม  
ในการดูดซับฟีนอล

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)	ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.25	10.0	97.50 ± 0.52
ถ่าน Bantan**	-	-	0.25	10.0	94.59 ± 0.49
ไม้ไฟผัดง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.35	14.0	98.67 ± 0.97
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.30	12.0	92.49 ± 0.44
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.30	12.0	99.28 ± 0.66
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.30	12.0	92.36 ± 0.50
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.35	12.0	91.46 ± 1.92
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.45	18.0	95.41 ± 0.52
ไม้ไฟหมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	99.36 ± 0.42
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.25	10.0	95.25 ± 1.34
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	98.89 ± 0.50
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.25	10.0	95.77 ± 0.28
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	98.31 ± 1.26
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.30	12.0	96.30 ± 0.69

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

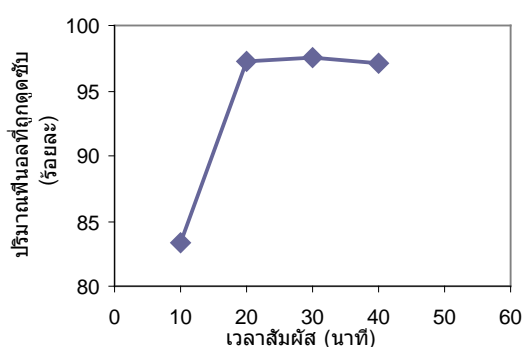
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้ปริมาณถ่านที่สูงกว่าในการดูดซับฟีนอล หรือ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลงเมื่อปริมาณถ่านเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง

### 3.3.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล

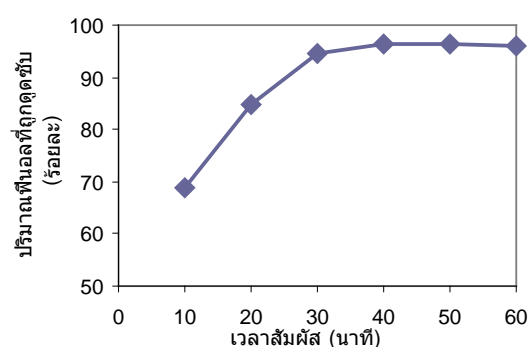
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.5 และปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 10 นาที จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่า ร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 83 แสดงเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 27 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟแต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า ในถ่านไม้ไฟทั้งไฟตงและไฟหมาจู้ ทุกอายุปี ถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นจะใช้เวลาสัมผัสน้อยกว่าถ่านที่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว และ ความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นมีค่าสูงกว่า แสดงว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง

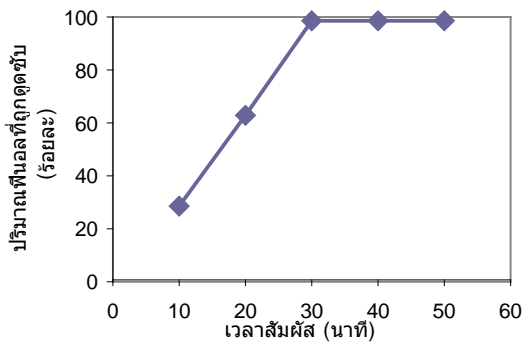


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

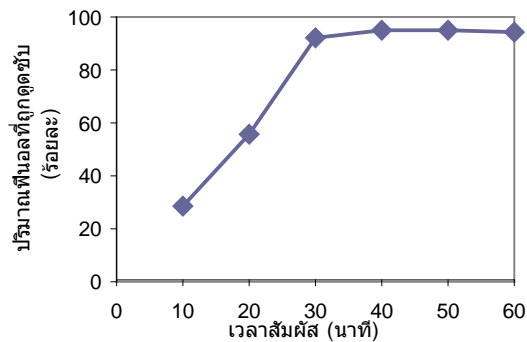


(ข) ถ่านไม้ไฟ Buntan

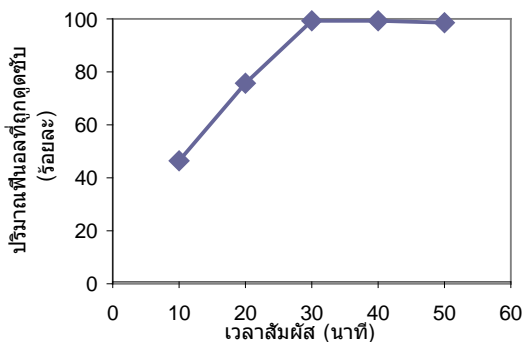
ภาพที่ 83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



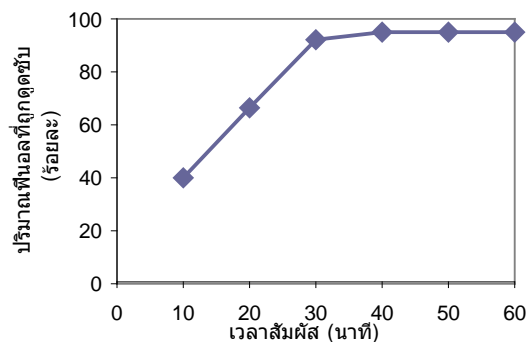
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



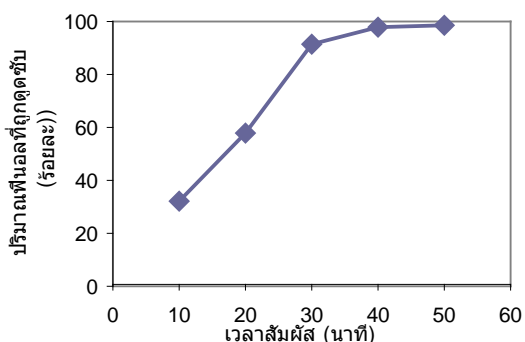
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



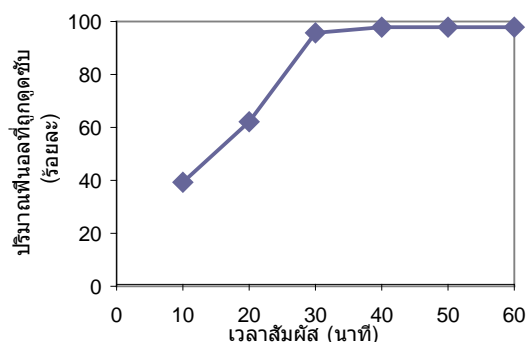
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



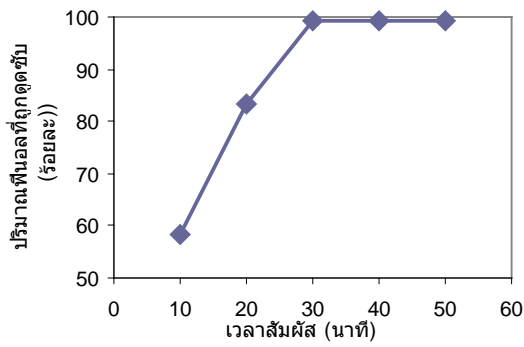
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



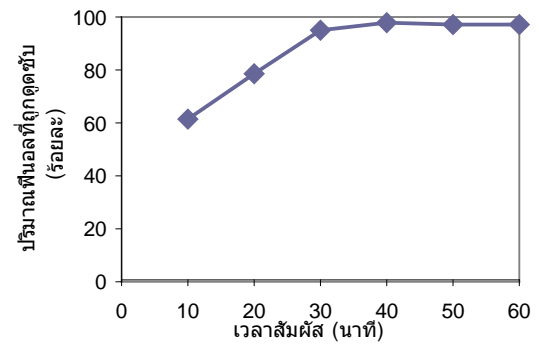
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



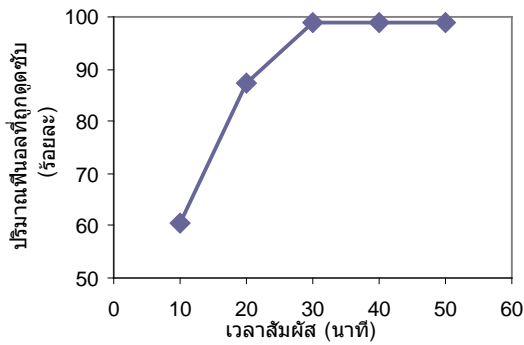
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



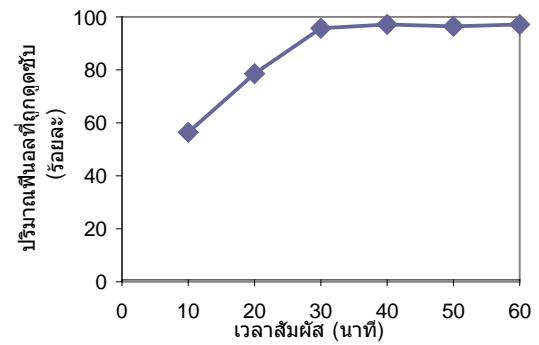
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



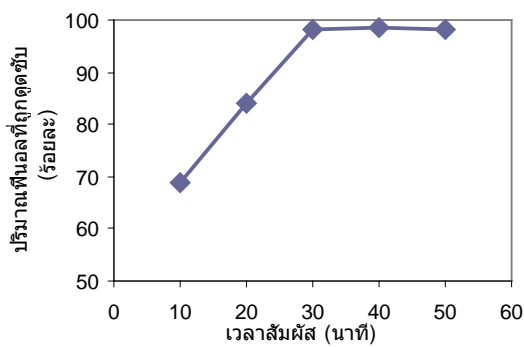
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



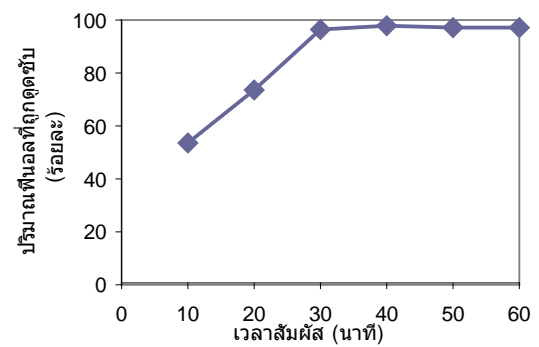
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(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 27 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่  
แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่ เหมาะสม (นาที)	ปริมาณฟีนอล ที่ถูกดูดซับ (%)	
ถ่าน Fluka *	-	-	20	97.28 ± 0.30	
ถ่าน Bunton **	-	-	40	96.51 ± 0.49	
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.67 ± 0.97	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	94.89 ± 1.00	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	99.28 ± 0.66	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	95.29 ± 0.34	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	40	98.19 ± 0.54	
		กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	97.68 ± 0.45	
	ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	99.36 ± 0.42
			กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	97.51 ± 0.36
		2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.89 ± 0.50
			กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	96.87 ± 0.37
		3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.31 ± 1.26
			กระตุ้น โดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	40	97.61 ± 0.62

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

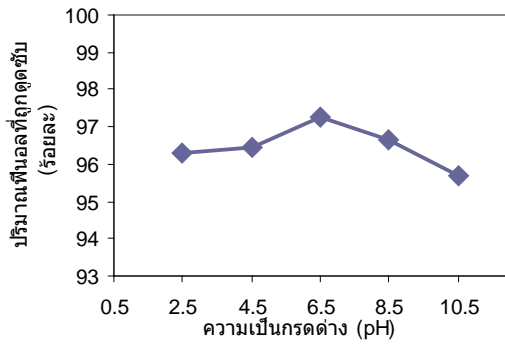
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.3.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล

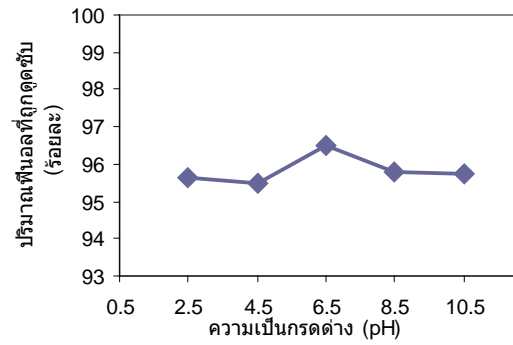
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 และ 10.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด และ เลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ปริมาณของฟีนอลถูกดูดซับสูงสุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 84 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 28 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

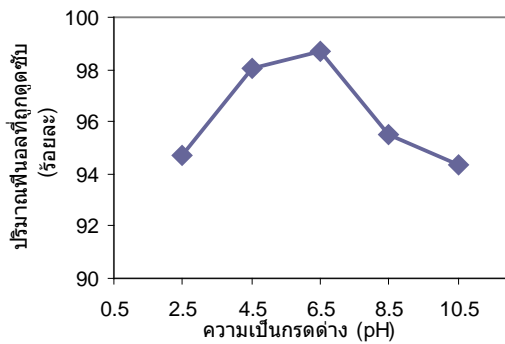
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือ ในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และในสถานะที่เป็นด่าง ฟีนอลจะอยู่ในโครงสร้างของ ฟีนอลเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด (Kaustubha Mohanty et.al., 2005)



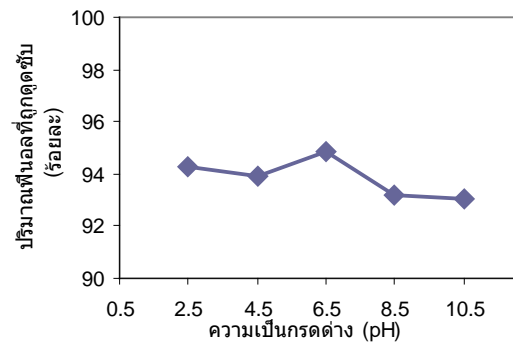
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



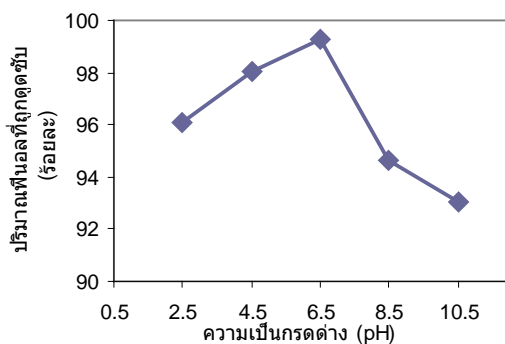
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Buntan



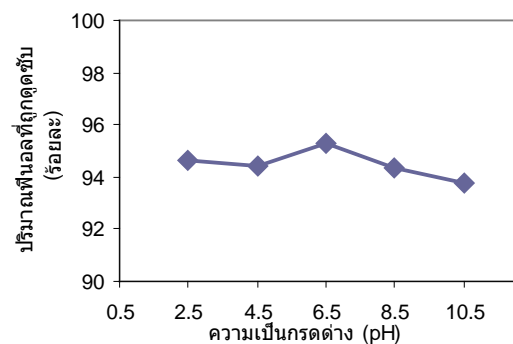
(ค) ถ่านไม้ไผ่ต่ง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ง) ถ่านไม้ไผ่ต่ง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



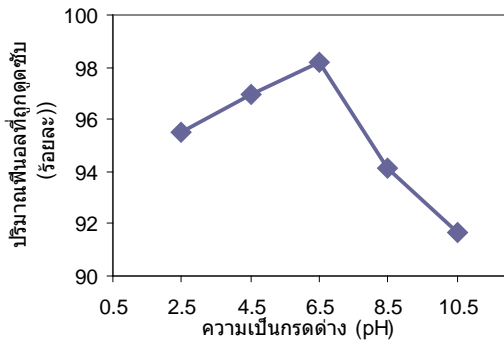
(จ) ถ่านไม้ไผ่ต่ง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



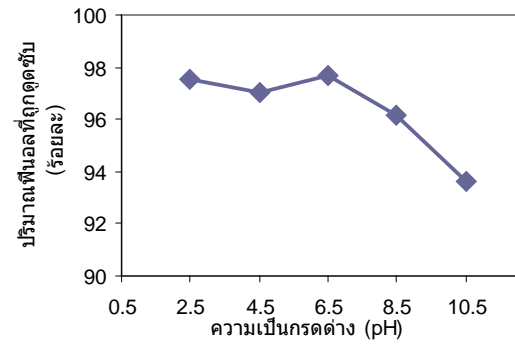
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ต่ง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ภาพที่ 84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ

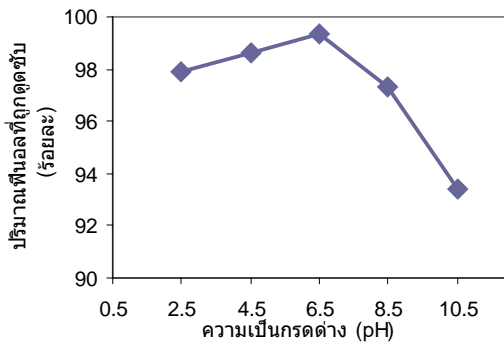




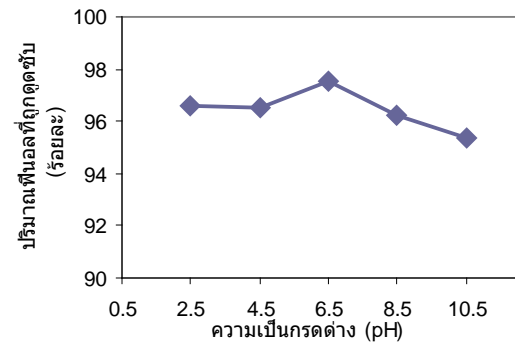
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



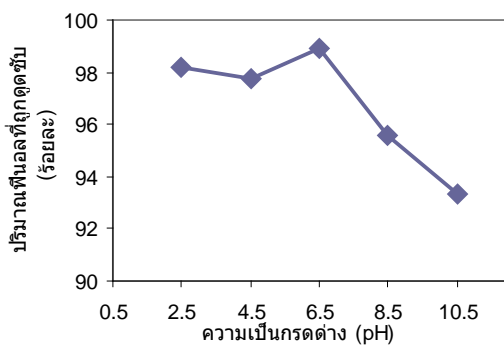
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



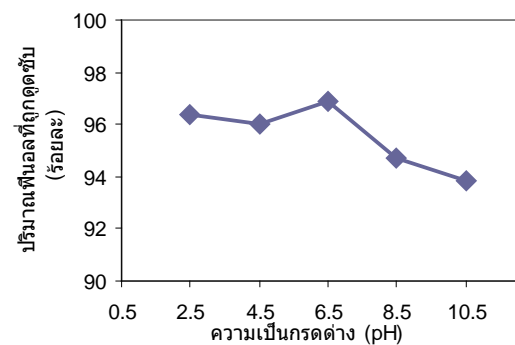
(ฅ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



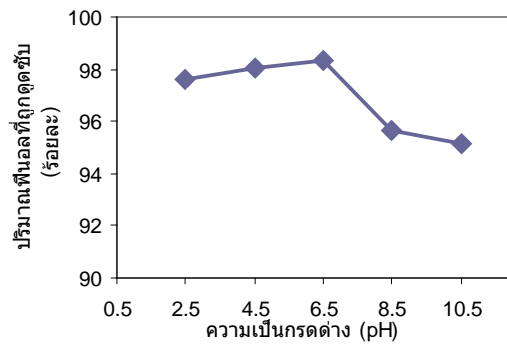
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



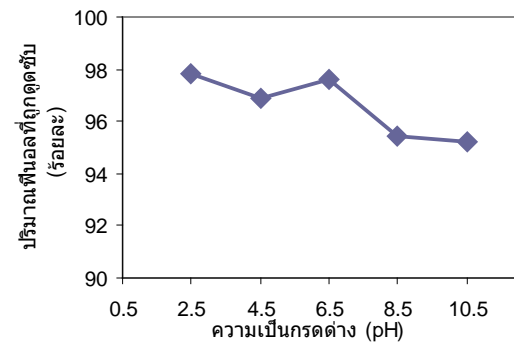
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 84 (ต่อ)

ตารางที่ 28 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด

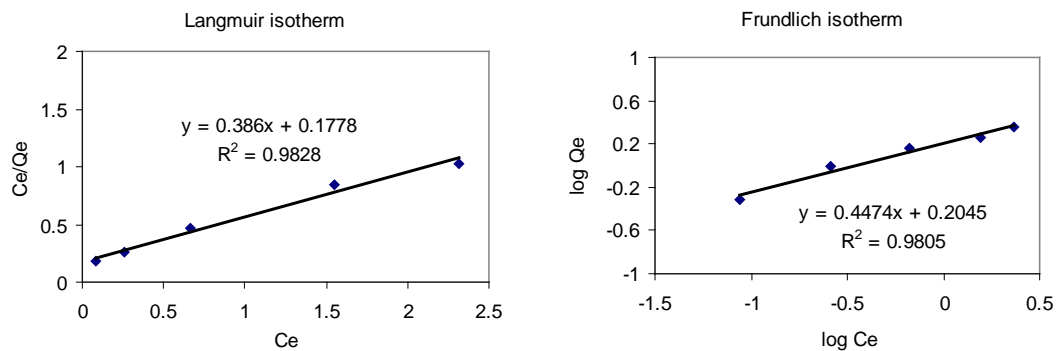
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณฟีนอล ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	6.5	97.278 ± 0.30
ถ่าน Bunton **	-	-	6.5	96.51 ± 0.39
ไม้ไฟต่ง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.67 ± 0.97
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	94.89 ± 1.00
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	99.28 ± 0.66
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	95.29 ± 0.34
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.19 ± 0.54
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	97.68 ± 0.45
ไม้ไฟหมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	99.36 ± 0.42
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	97.51 ± 0.36
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.89 ± 0.50
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	96.87 ± 0.37
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.31 ± 1.26
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6.5	97.61 ± 0.62

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

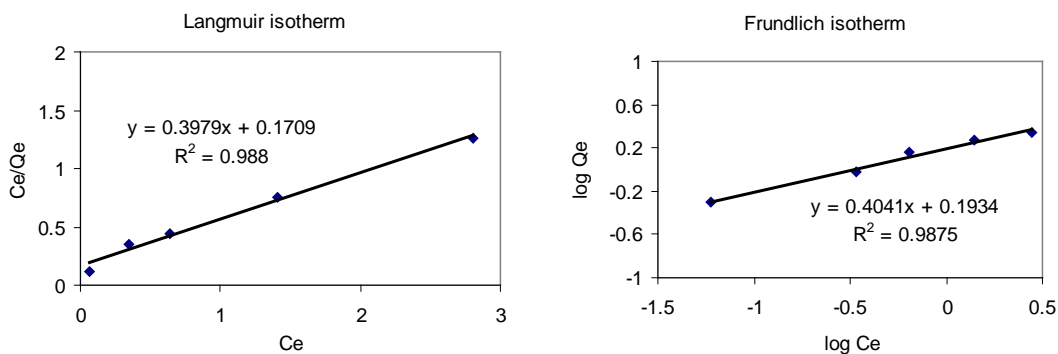
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

3.3.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับฟีนอลความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และ ความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1, 3.3.2 และ 3.3.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 85 ถึง 91 ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอล

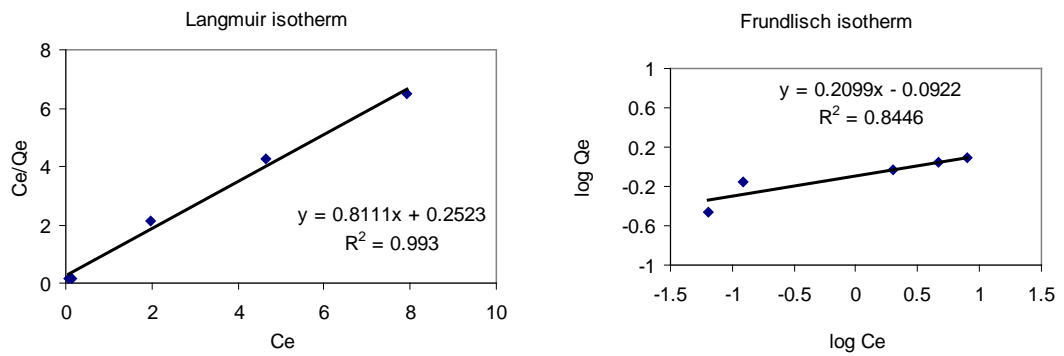


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

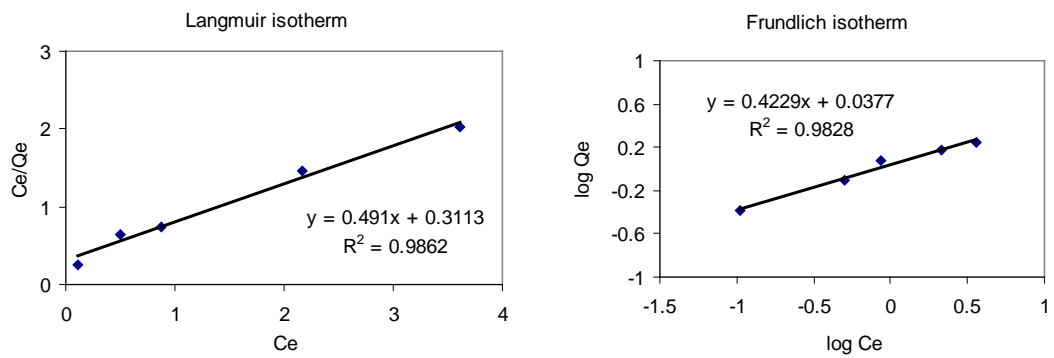
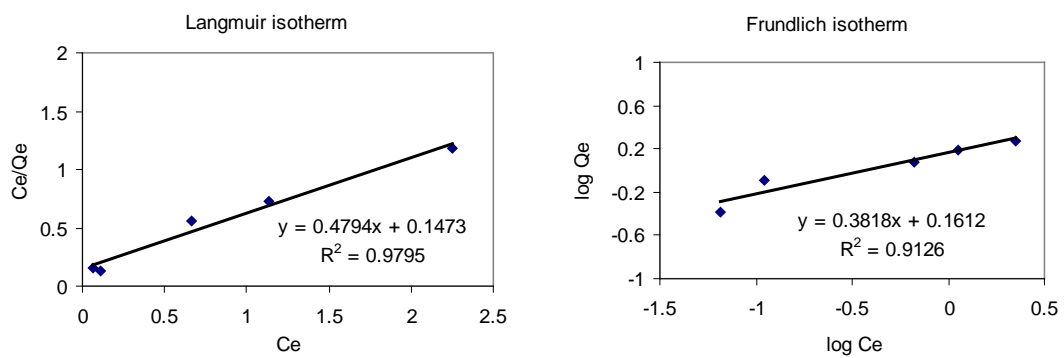


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 85 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

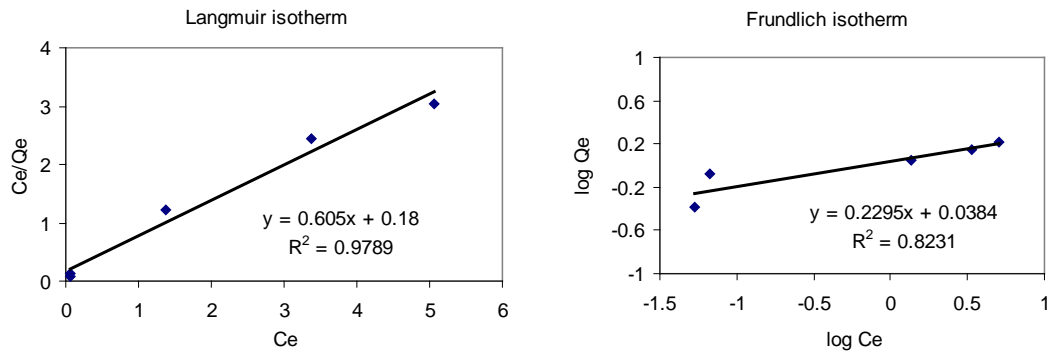
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

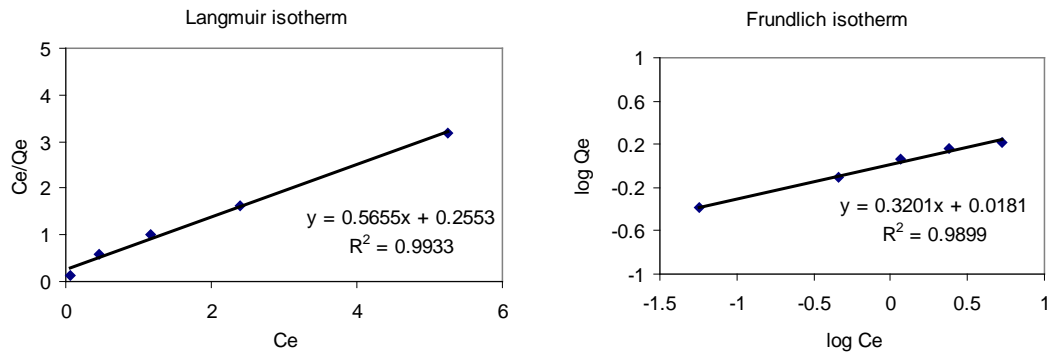
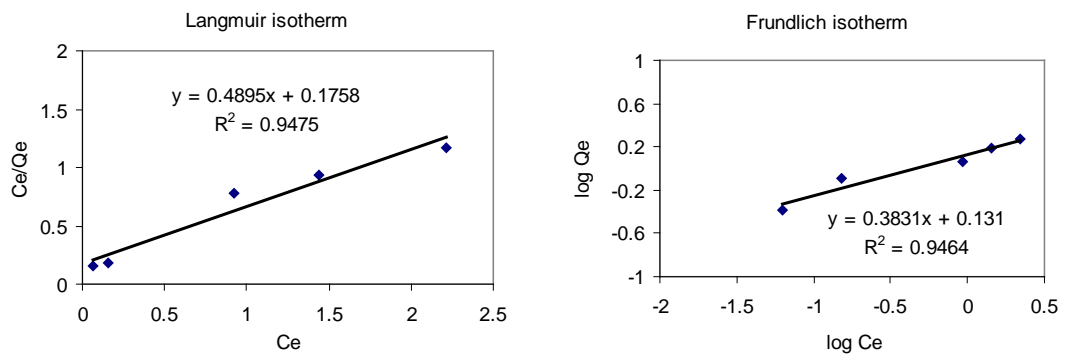
ภาพที่ 86 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ  $C_c$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_c$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

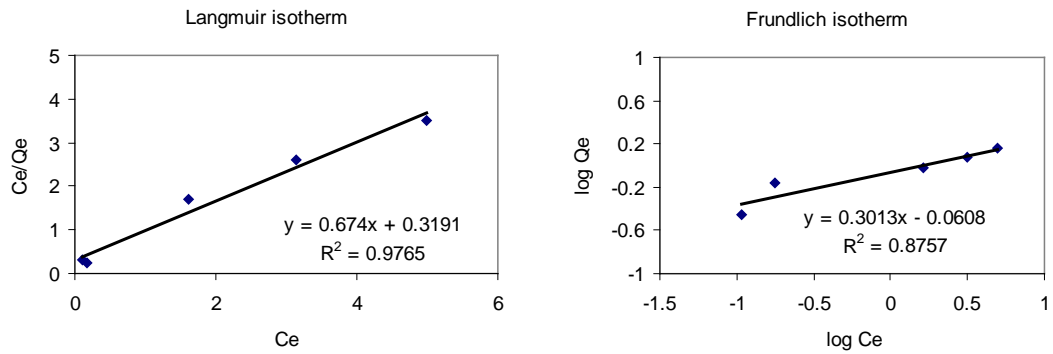
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

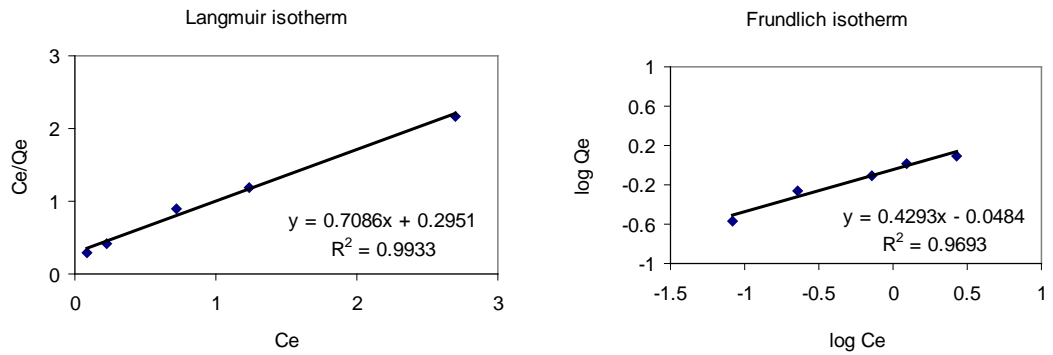
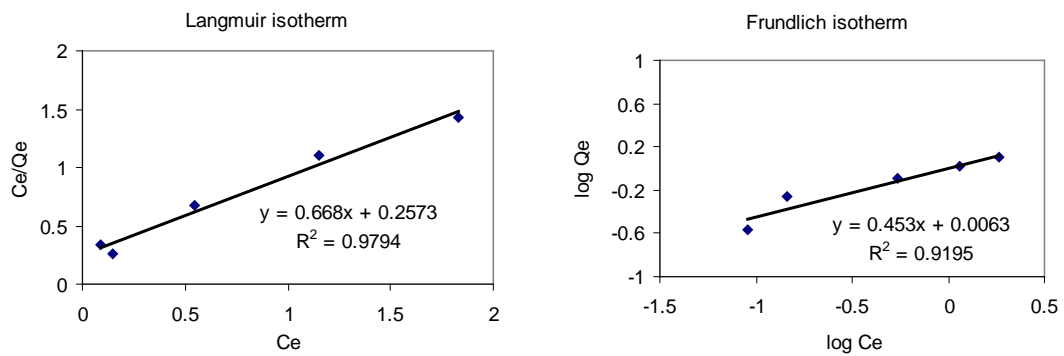
ภาพที่ 87 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

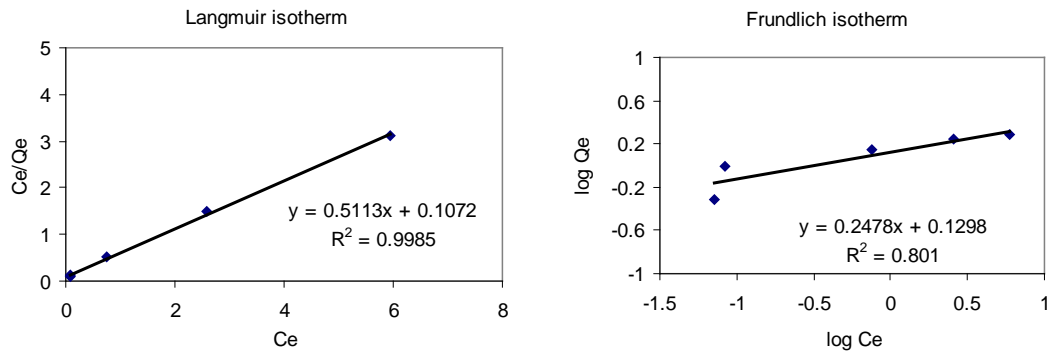
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

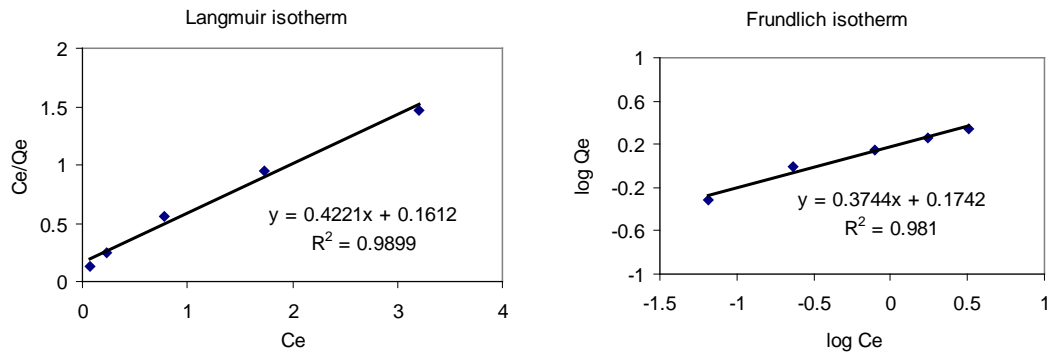
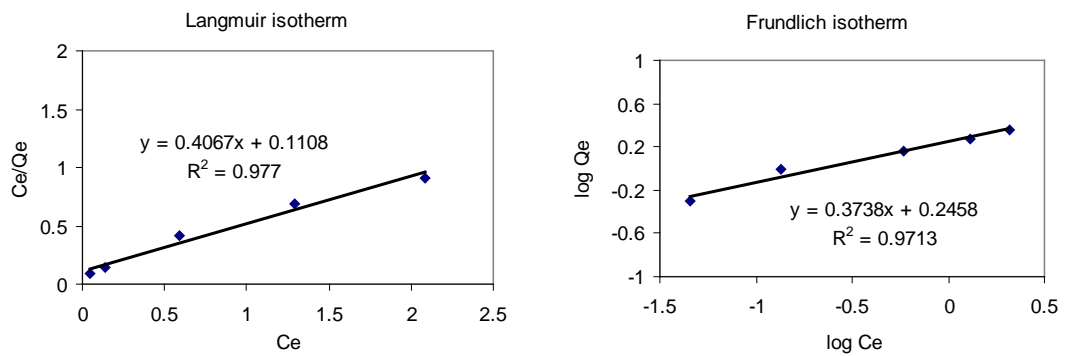
ภาพที่ 88 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

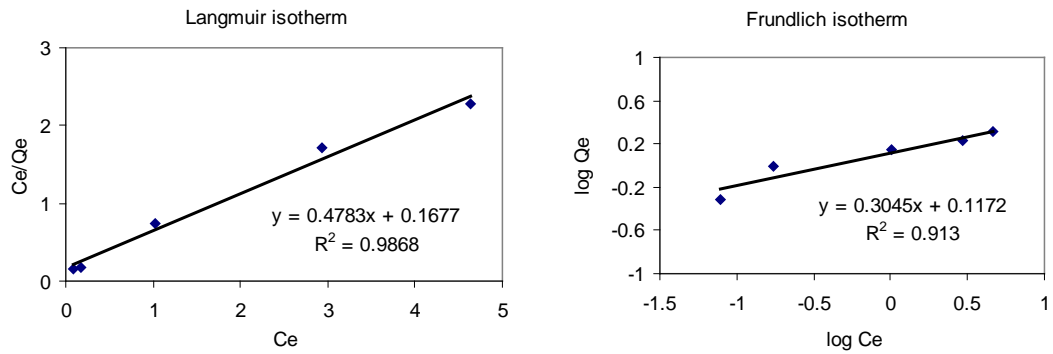
(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 89 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 1 ปี

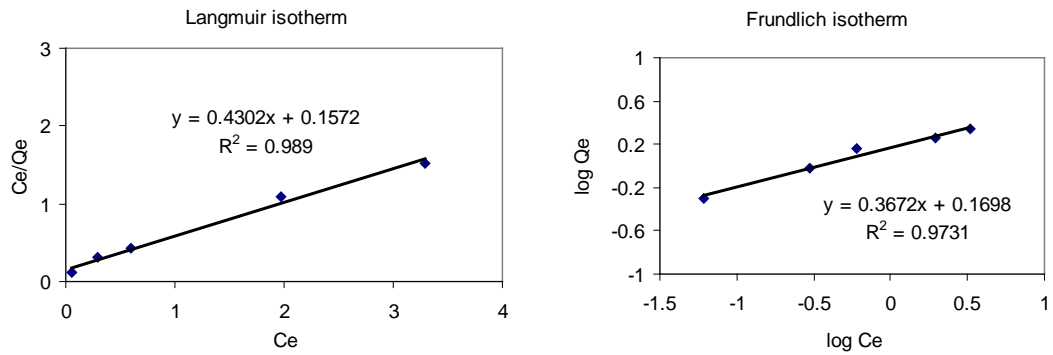
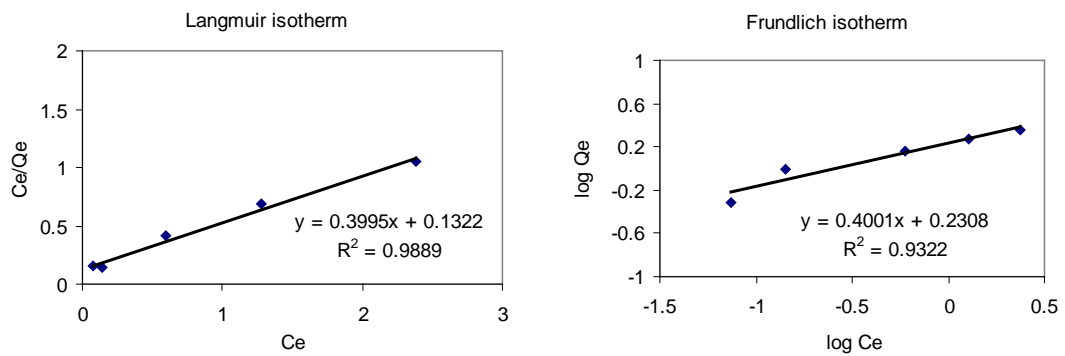
เมื่อ  $C_c$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_c$  คือ ปริมาณของตัวถูกระตุ้นบนตัวถูกระตุ้น 1 กรัม





(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

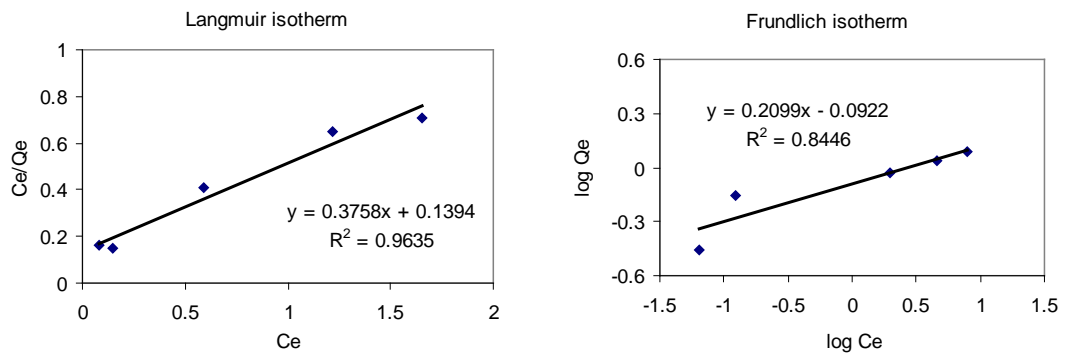
(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

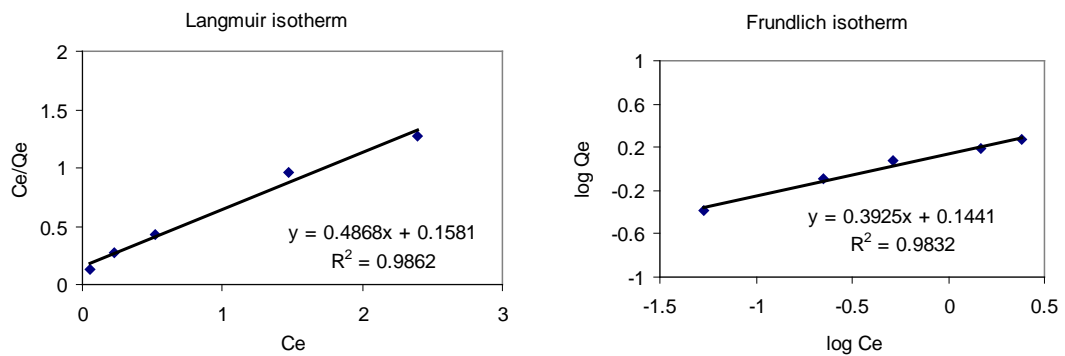
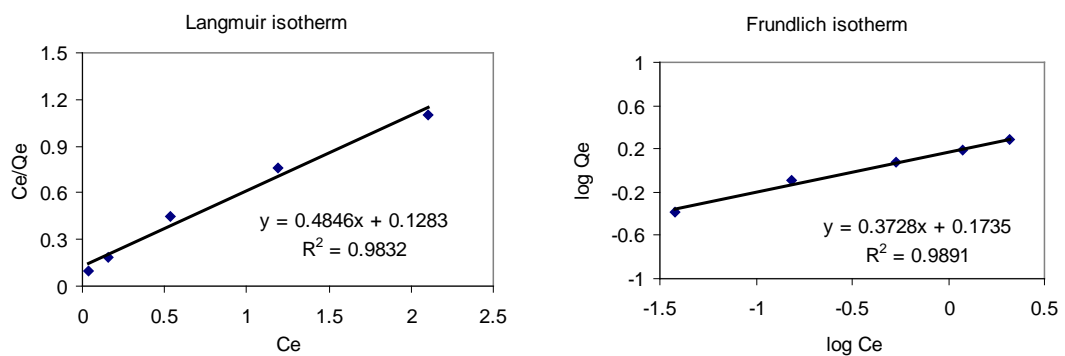
ภาพที่ 90 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 91 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 29 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช 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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.4910x + 0.3313$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.5855x + 0.2553$	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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	$y = 0.7086x + 0.2951$	0.9933	$y = 0.4293x - 0.0484$	0.9693	
			กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.6680x + 0.2573$	0.9794	$y = 4530x + 0.0063$	0.9195

\* ถ่านถัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 29 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	$R^2$	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	$R^2$
ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.5113x + 0.1702$	0.9985	$y = 0.2478x + 0.1298$	0.8010
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.4221x + 0.1612$	0.9889	$y = 0.3744x + 0.1742$	0.9810
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.4302x + 0.1572$	0.9890	$y = 0.3672x + 0.1698$	0.9731
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.4868x + 0.1581$	0.9862	$y = 0.3925x + 0.1441$	0.9832
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 0.4846x + 0.1283$	0.9832	$y = 0.3728x + 0.1735$	0.9891

จากตารางที่ 29 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient :  $R^2$ ) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่า พิจารณาค่าคงที่ ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในตารางที่ 30

ซึ่งค่า  $Q^0$  แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับฟีนอลในสารละลาย ถ้าถ่านใดมีค่า  $Q^0$  สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้นสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า  $Q^0$  ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $Q^0$  ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านที่ได้จากไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้นใดๆ จะให้ค่า  $Q^0$  สูงสุด คือ 2.6610 กรัมต่อมิลลิกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไผ่ Bunton ซึ่งมีค่า  $Q^0$  เท่ากับ 2.5907 และ 2.5132 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านที่ได้จากไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้นใดๆ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านทางการค้า

ตารางที่ 30 ค่าคงที่การดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	$Q^0$	b	
ถ่าน Fluka *	-	-	2.5907	2.1710	
ถ่าน Bunton **	-	-	2.5132	2.3283	
ไม้ไฟตง	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	
	ไม้ไฟหมาจู้	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

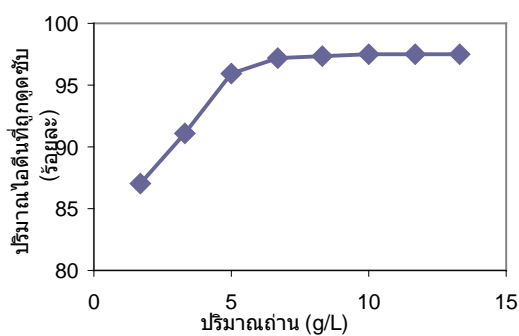
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

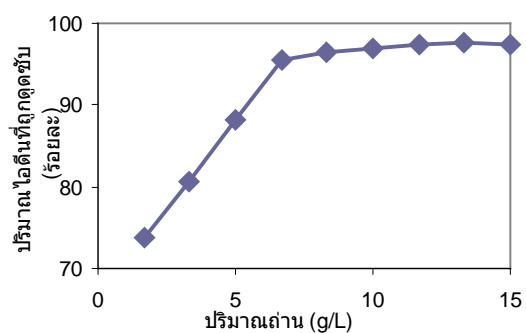
#### 3.4.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทำการทดลองดูดซับไอโอดีนด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายไอโอดีน ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที โดยเพิ่มน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.1250 กรัม จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ภาพที่ 92 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 31 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

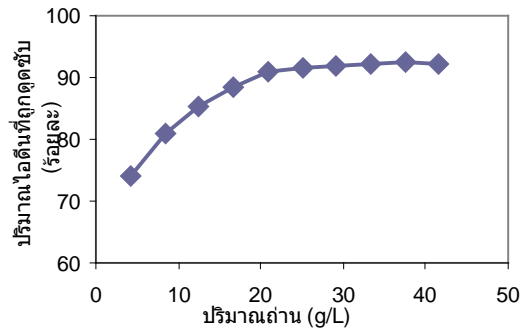


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

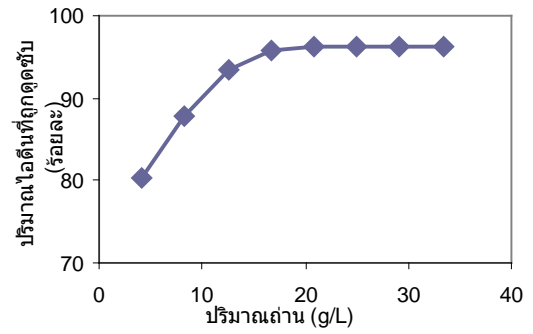


(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton

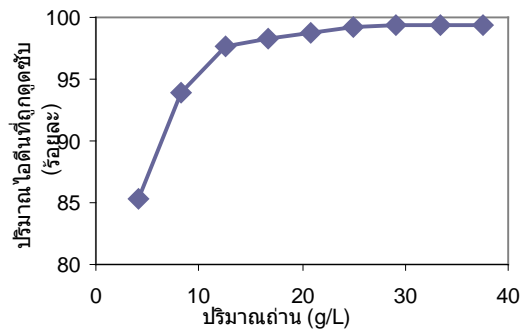
ภาพที่ 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



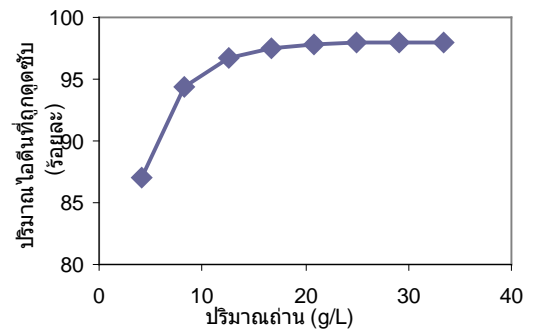
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



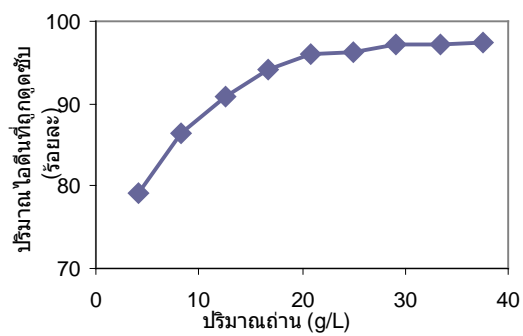
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



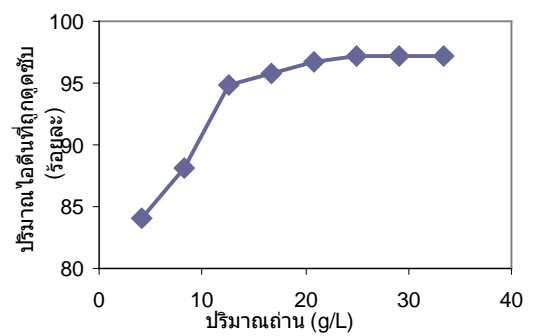
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

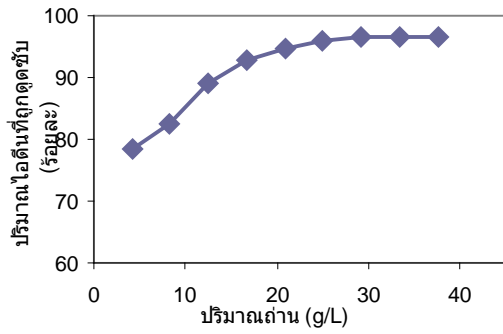


(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

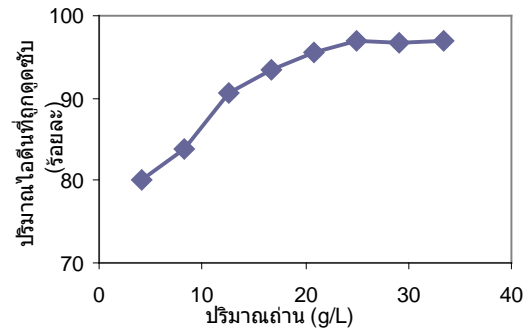


(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

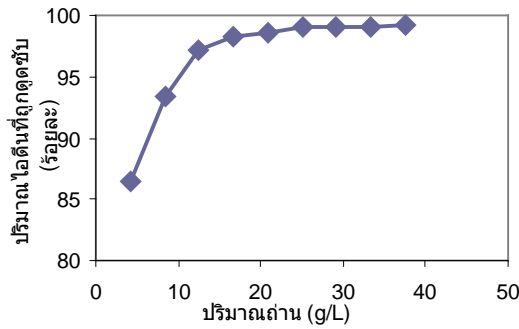




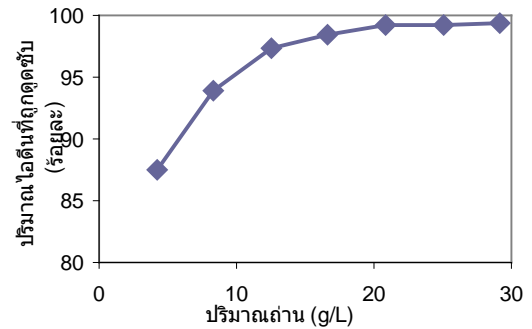
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



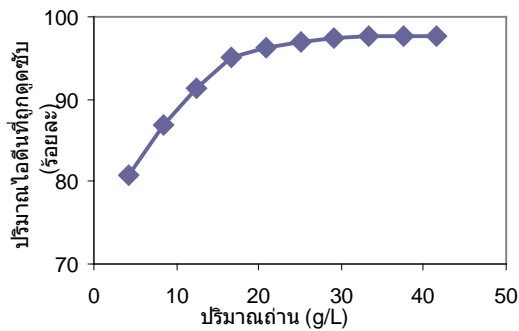
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



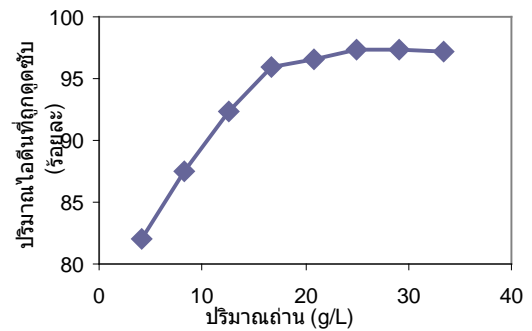
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ตารางที่ 31 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิดที่เหมาะสม  
ในการดูดซับไอโอดีน

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

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

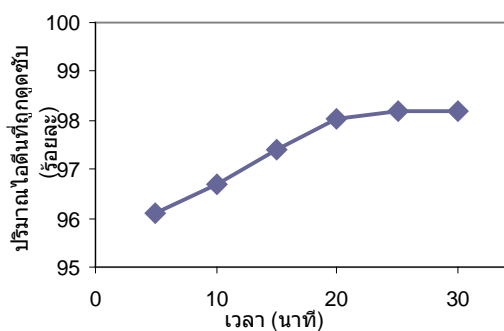
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้ปริมาณถ่านที่ต่ำกว่าในการดูดซับไอโอดีน หรือ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณถ่านเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น

### 3.4.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ ไอโอดีน

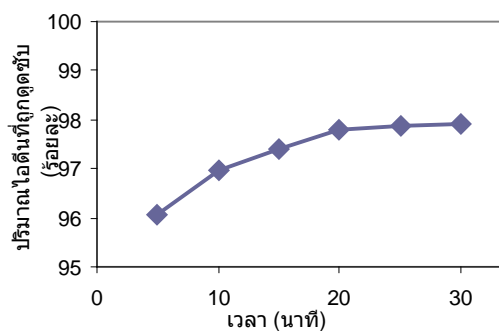
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลาย ไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.0 และ ปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 5 นาที จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีน ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่า ร้อยละของปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 93 แสดงเวลา กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 32 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือ ในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และ ไตรไอโอดด์แอนไอออน (triiodide anion) มีสถานะที่เป็นลบ ดังนั้น การเกิดแรงดึงดูด ระหว่างกับ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์กับ ไตรไอโอดด์แอนไอออน จึงเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด

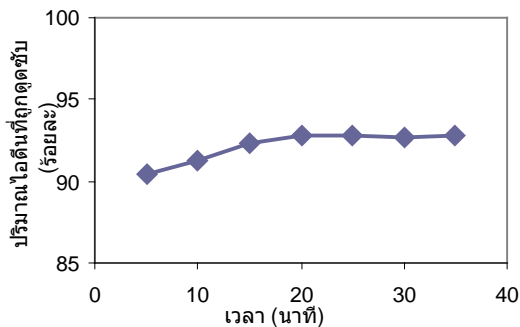


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

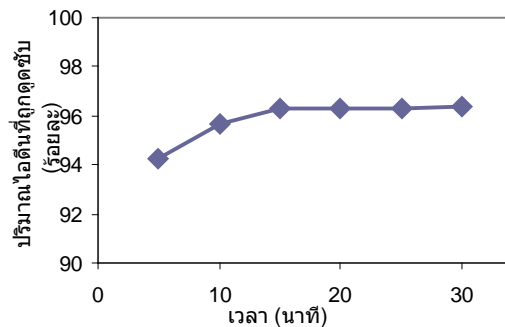


(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton

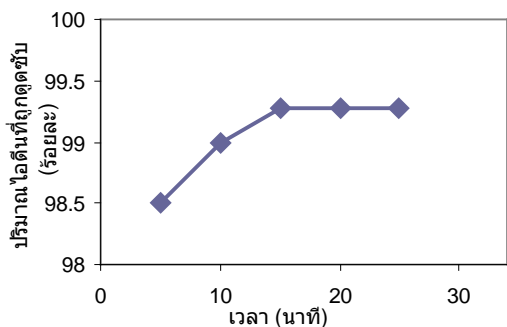
ภาพที่ 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



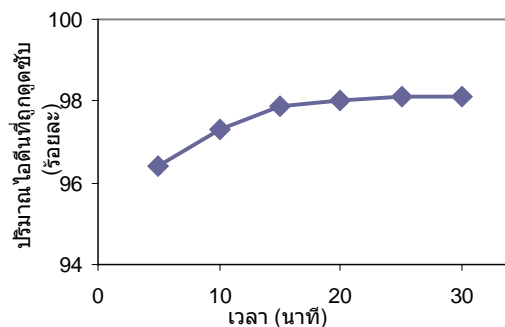
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



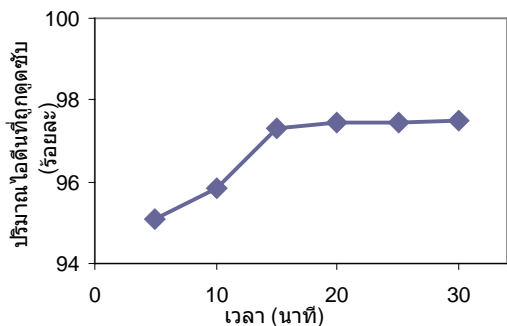
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



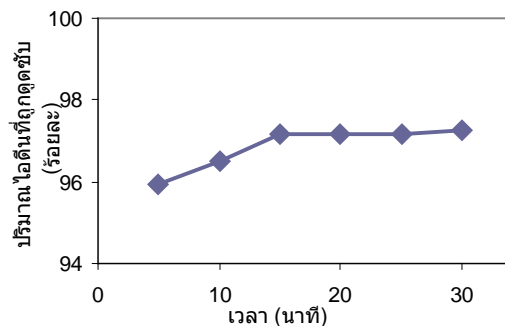
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



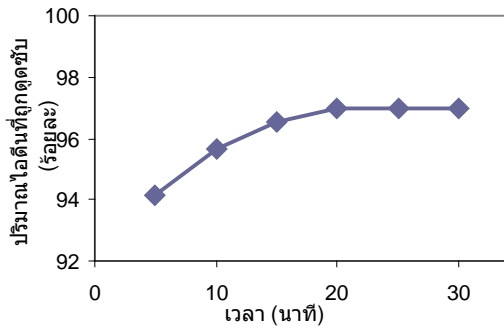
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



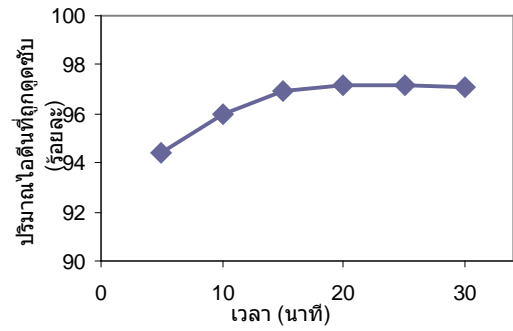
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



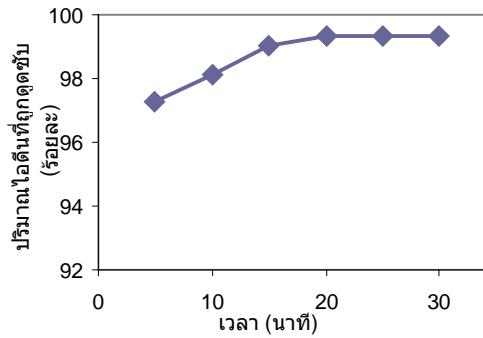
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



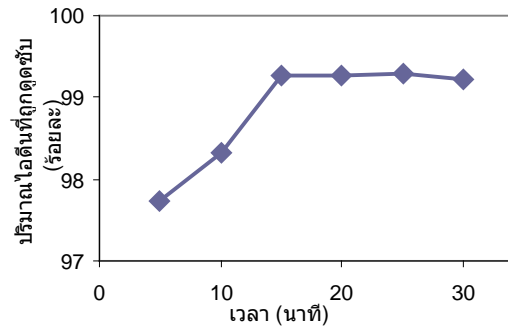
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



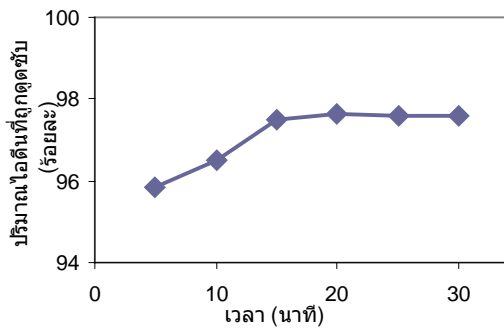
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



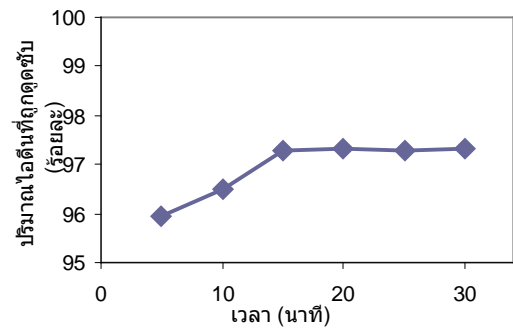
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ตารางที่ 32 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่  
แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่ เหมาะสม (นาที)	ปริมาณไอโอดีน ที่ถูกดูดซับ (%)	
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 <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	15	96.29 ± 0.12	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	99.27 ± 0.10	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	20	98.03 ± 0.07	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	97.29 ± 0.08	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	15	97.15 ± 0.08	
	ไม้ไผ่หมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	20	96.99 ± 0.08
			กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	20	97.14 ± 0.09
2 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	20	99.32 ± 0.08	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	15	99.26 ± 0.07	
3 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	97.48 ± 0.07	
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	15	97.30 ± 0.09	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

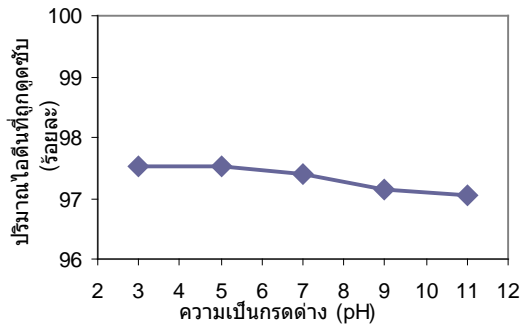
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.4.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน

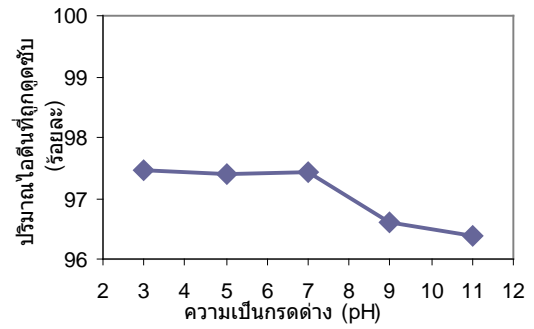
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.4.1 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.4.2 และ เลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ปริมาณของไอโอดีนถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 94 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 33 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

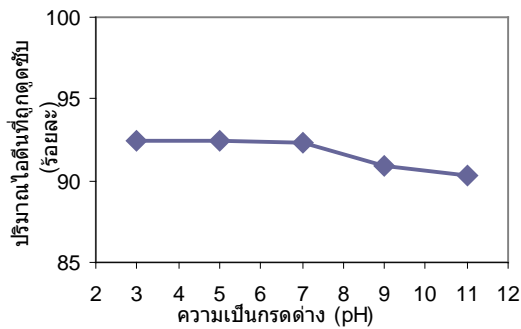
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และ ไตรไอโอดีแอน-ไอออน (triiodide anion) มีสถานะที่เป็นลบ ดังนั้น การเกิดแรงดึงดูด ระหว่างกับ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์กับไตรไอโอดีแอน ไอออน จึงเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด



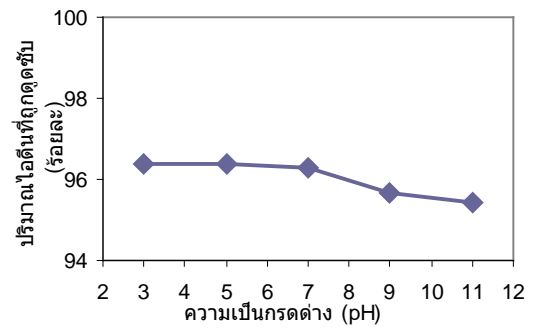
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



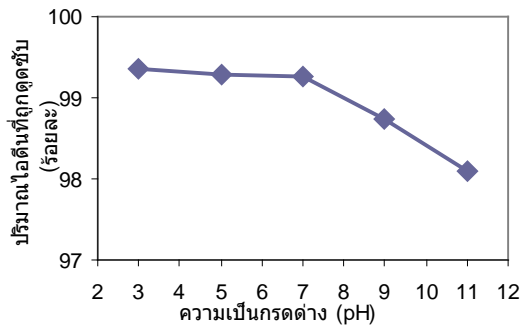
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton



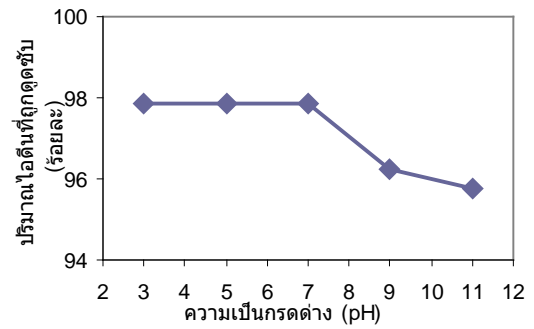
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



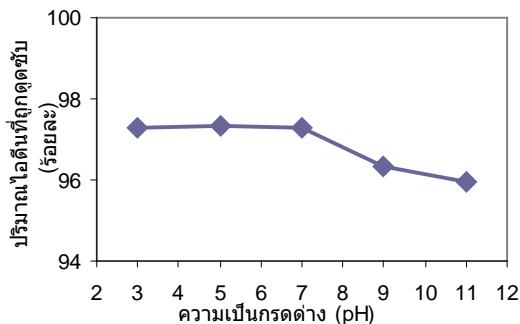
(จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



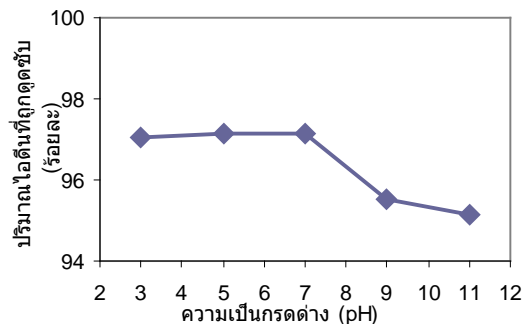
(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ภาพที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ

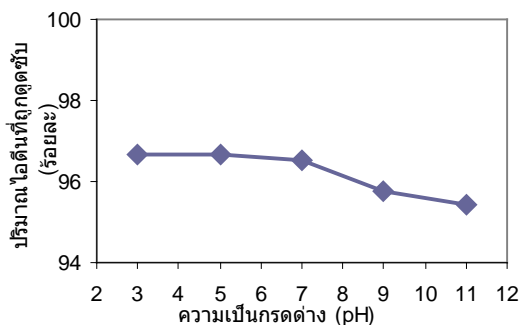




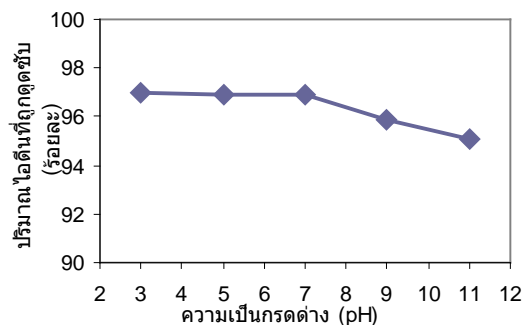
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



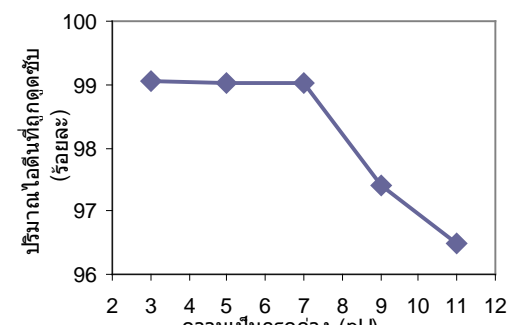
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



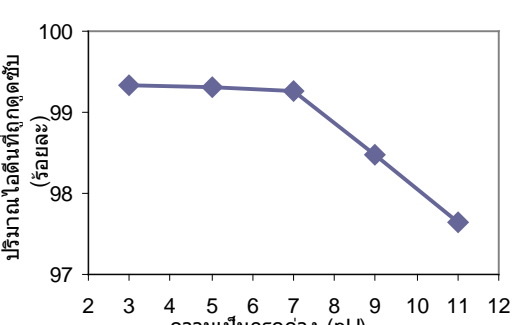
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



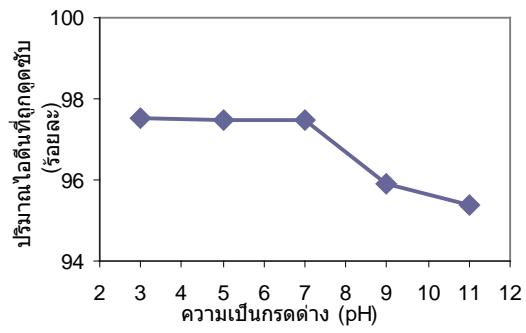
(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



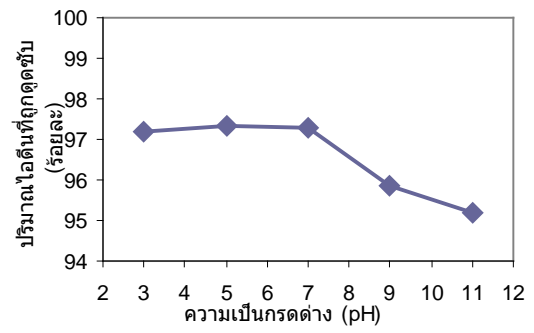
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี  
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$

ภาพที่ 93 (ต่อ)

ตารางที่ 33 แสดงความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด

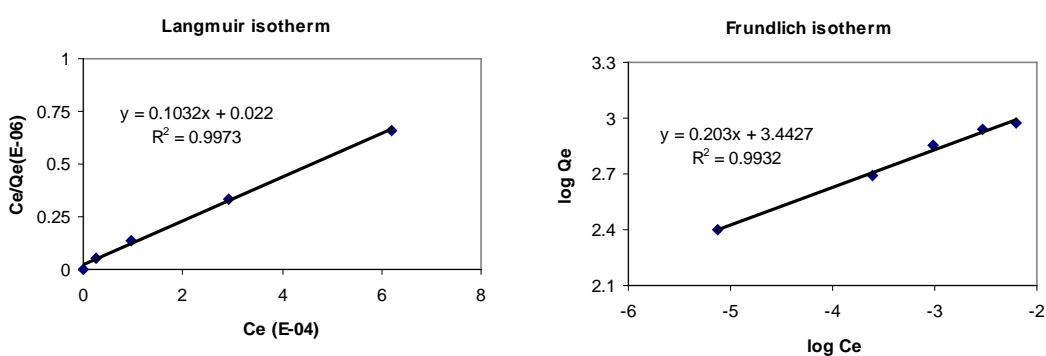
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดค่า ที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณไอโอดีน ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	7.0	98.02 ± 0.12
ถ่าน Bunton **	-	-	7.0	97.98 ± 0.08
ไม้ไฟต่ง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	92.62 ± 0.72
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	96.29 ± 0.12
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.27 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	98.03 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	97.29 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	97.15 ± 0.08
ไม้ไฟหมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	96.99 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	97.14 ± 0.09
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.32 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	99.26 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	97.48 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.0	97.30 ± 0.09

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

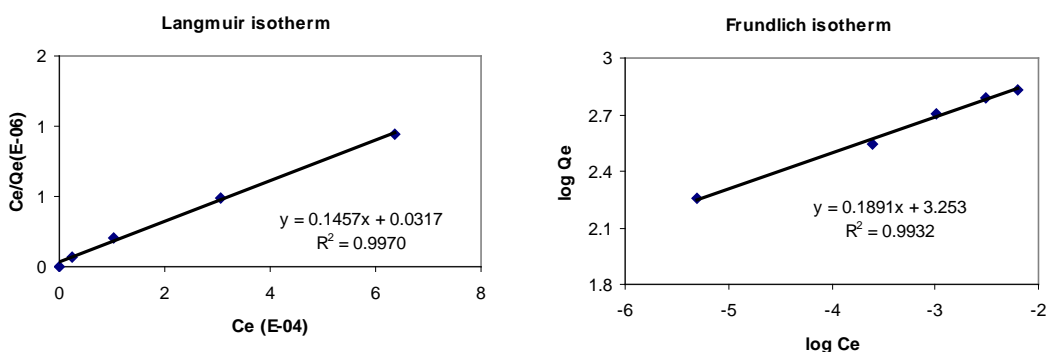
\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

### 3.4.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับไอโอดีนความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 และ 250 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และ ความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.4.1, 3.4.2 และ 3.4.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไทเทรตกับโซเดียมไธโอซัลเฟต เพื่อหาปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่ และนำมาคำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ จากนั้นนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 95 ถึง 101 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

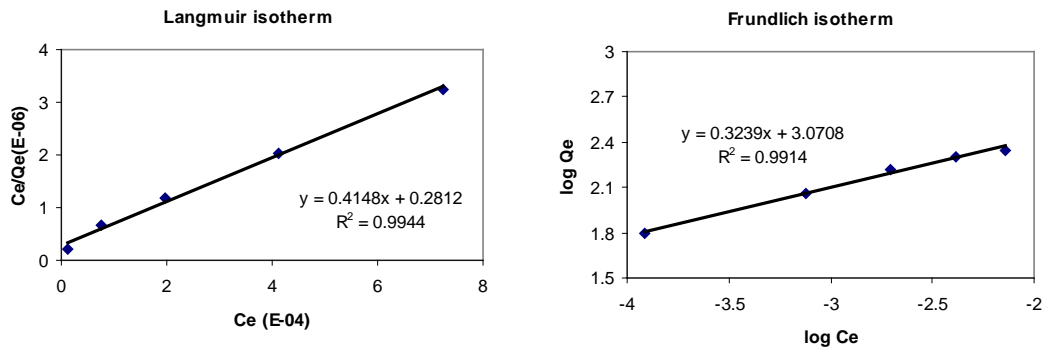


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

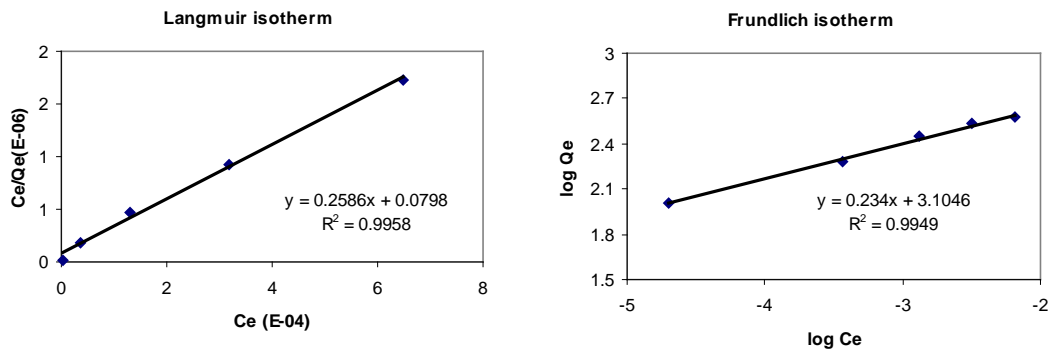
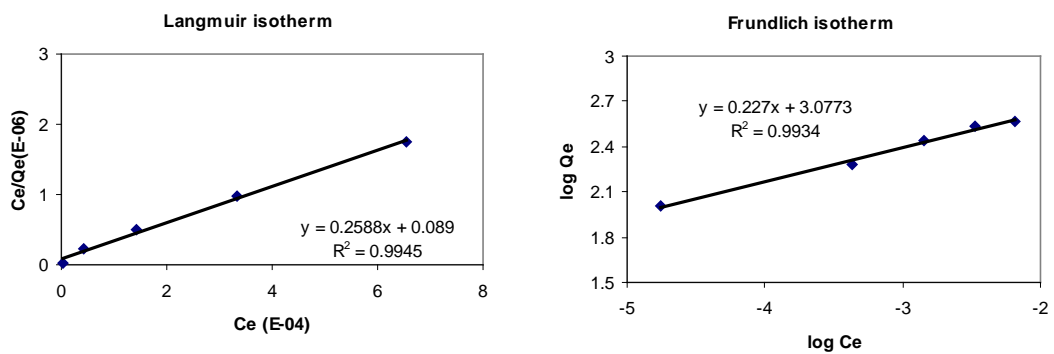


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 95 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิจ ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

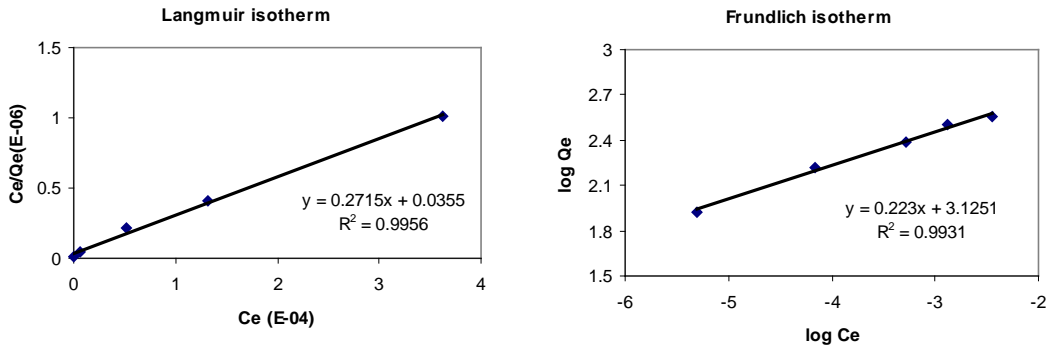
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

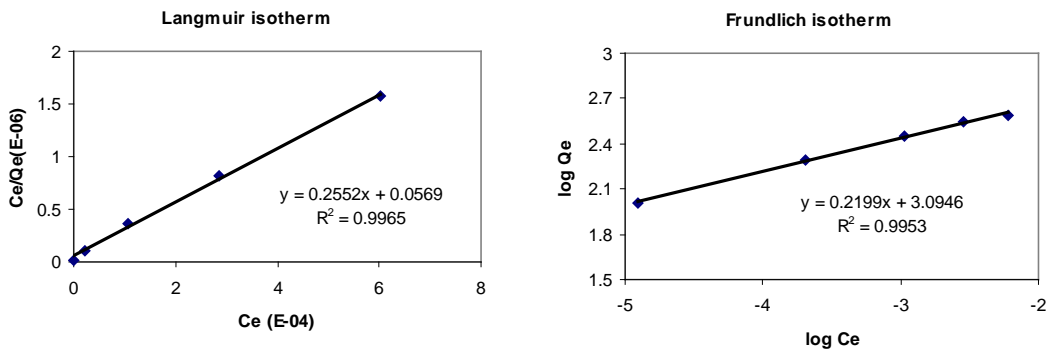
ภาพที่ 96 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

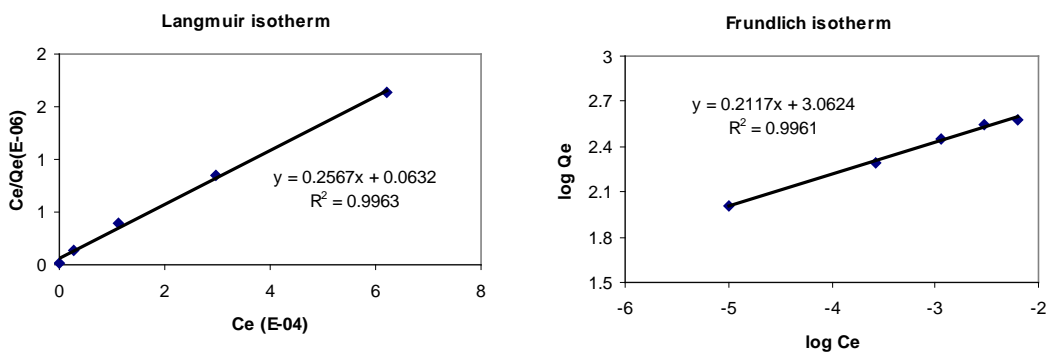
$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



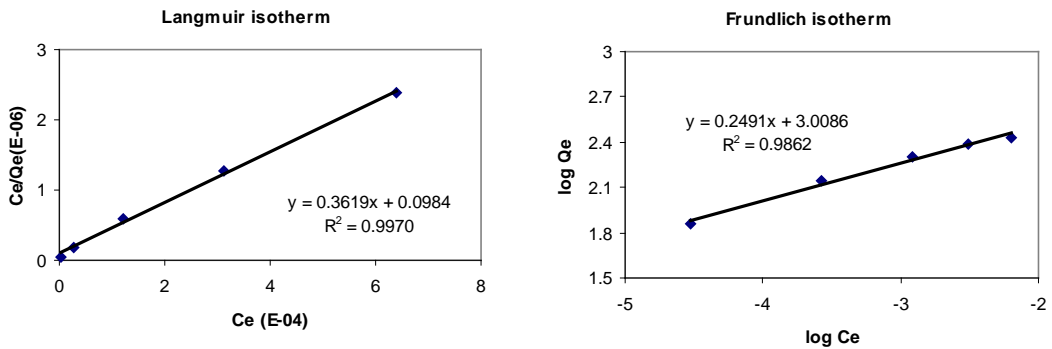
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$



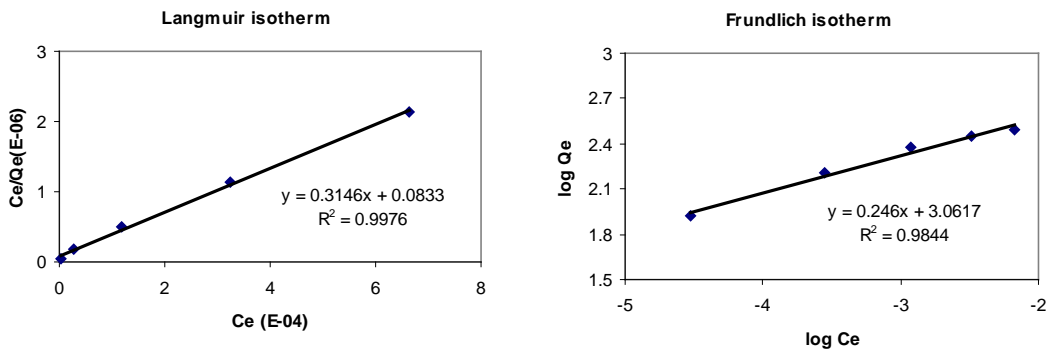
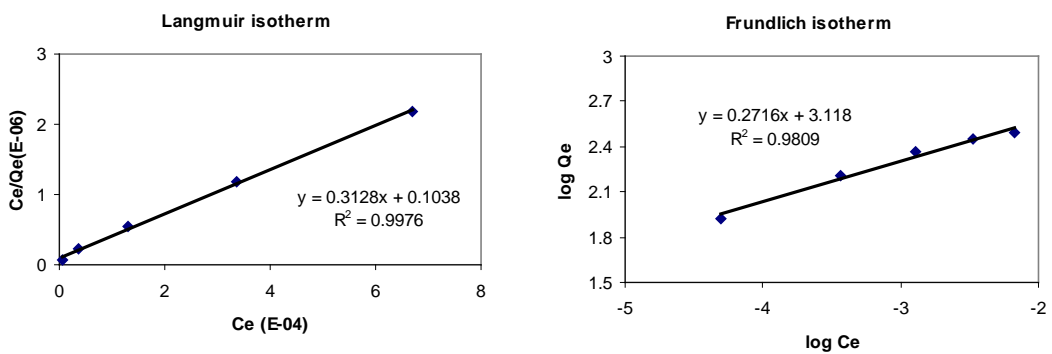
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 97 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



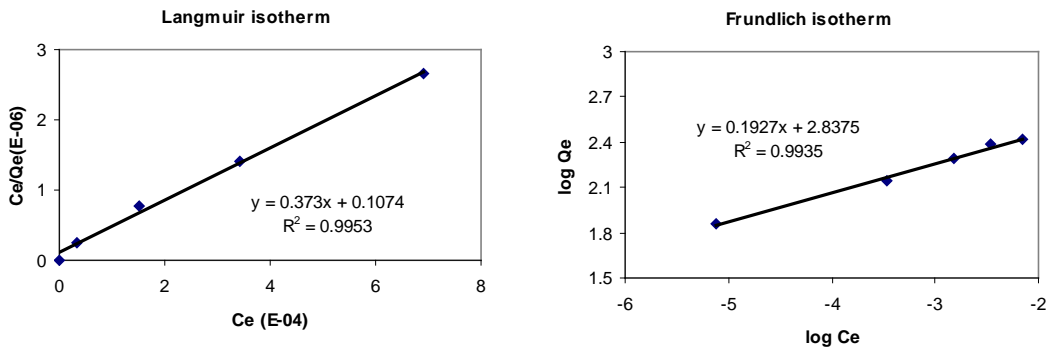
(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ (ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60%  $KOH$ 

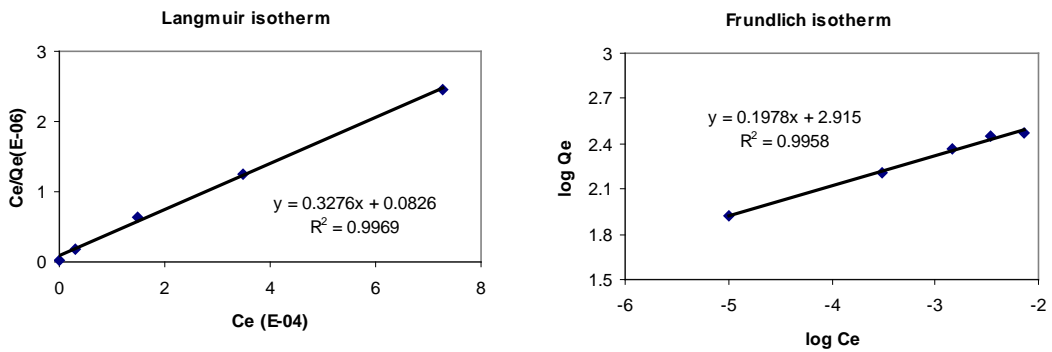
ภาพที่ 98 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

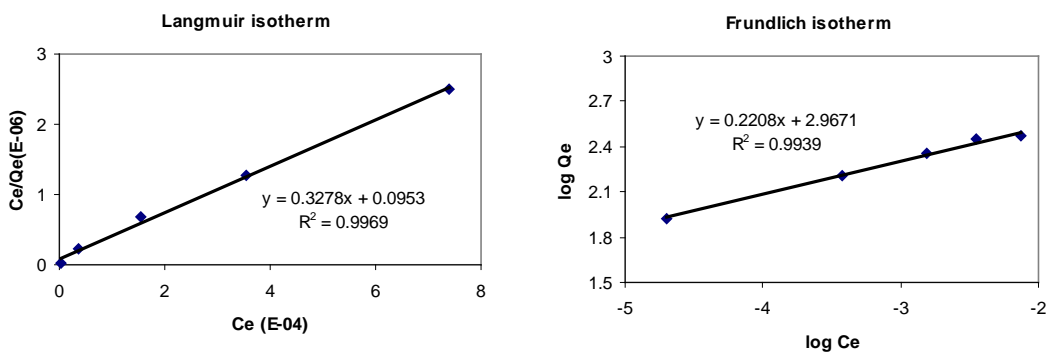
$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

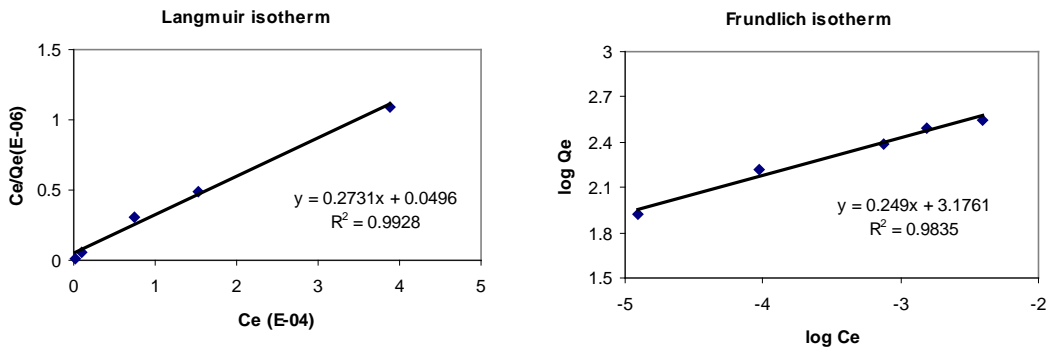


(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

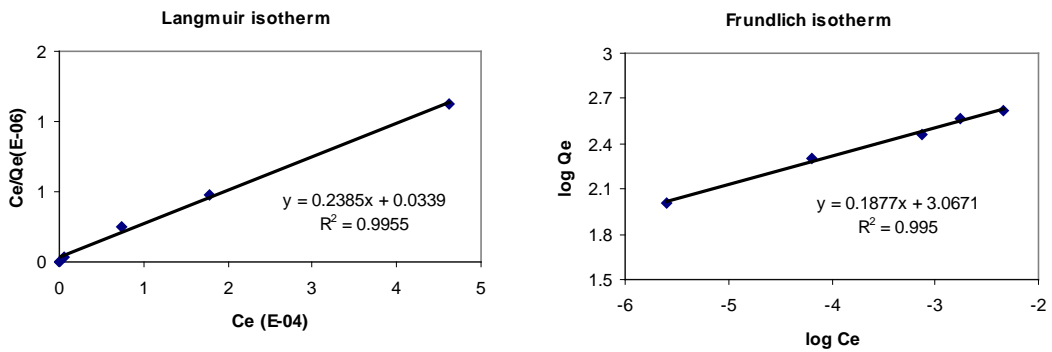
ภาพที่ 99 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ 1 กรัม

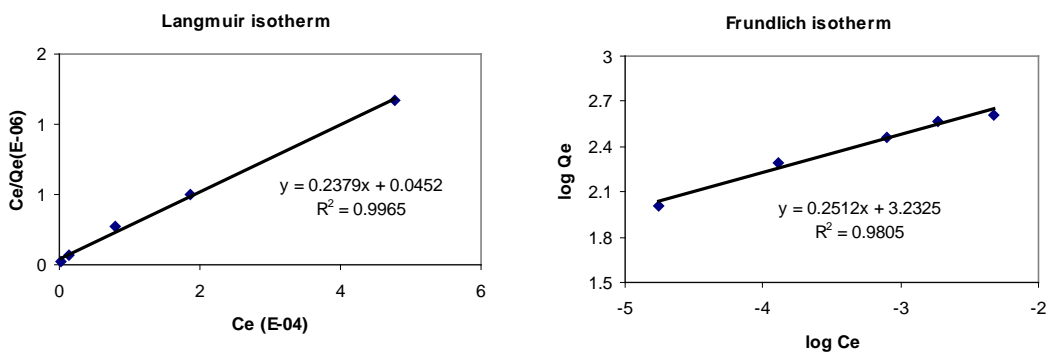




(ก) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



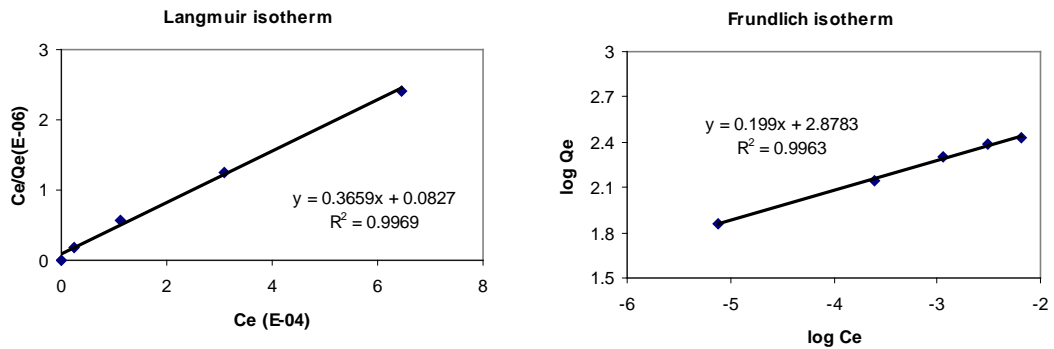
(ข) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>



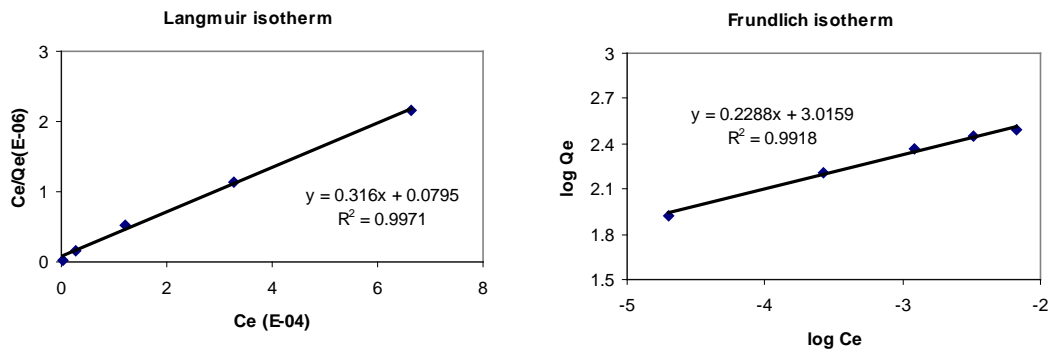
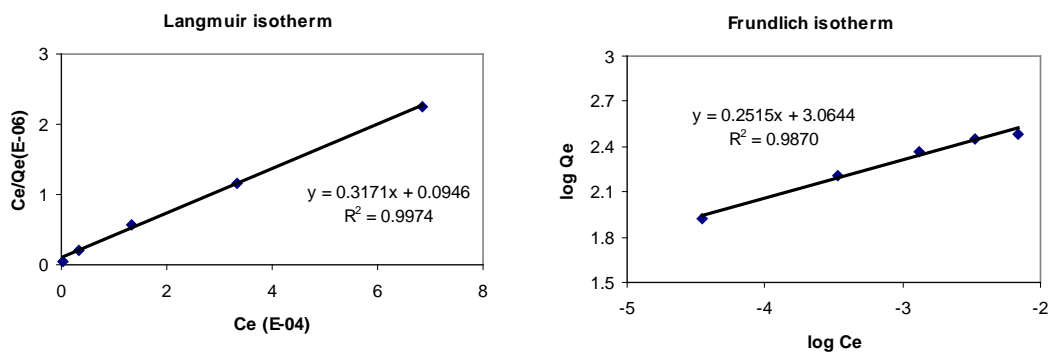
(ค) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 100 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล  
 $Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85%  $H_3PO_4$ 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 101 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 34 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ 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 34 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิซ	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	$R^2$	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	$R^2$
ไม้ไผ่หม่าจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.3730x + 0.1074$	0.9953	$y = 0.1927x + 2.8375$	0.9935
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.3276x + 0.0826$	0.9969	$y = 0.1978x + 2.9150$	0.9958
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.2385x + 0.0339$	0.9955	$y = 0.1877x + 3.0671$	0.9950
		กระตุ้น โดย 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
		กระตุ้น โดย $H_3PO_4$	$y = 0.3160x + 0.0795$	0.9971	$y = 0.2288x + 3.0159$	0.9918
		กระตุ้น โดย KOH	$y = 0.3171x + 0.0946$	0.9974	$y = 0.2515x + 3.0644$	0.9870

จากตารางที่ 34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient :  $R^2$ ) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่า พิจารณาค่าคงที่ ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในตารางที่ 35

ซึ่งค่า  $Q^0$  แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับไอโอดีนในสารละลาย ถ้าว่านใดมีค่า  $Q^0$  สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้นสามารถดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า  $Q^0$  ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $Q^0$  ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านที่ได้จากไม้ไผ่ ซึ่งถูกกระตุ้น จะให้ค่า  $Q^0$  มากกว่า ถ่านที่ไม่ได้ถูกกระตุ้น แสดงว่า การกระตุ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น และ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Bunton ซึ่งมีค่า  $Q^0$  เท่ากับ 9.6899 และ 6.8634 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ พบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ทดลองยังมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ตารางที่ 35 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิดในการดูดซับไอโอดีน จากสมการ  
ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

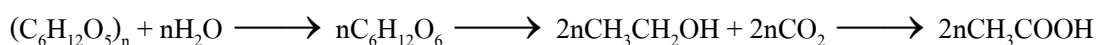
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	$Q^0$	b	
ถ่าน Fluka *	-	-	9.6899	4.6909	
ถ่าน Bunton **	-	-	6.8634	4.5962	
ไม้ไฟตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.4108	1.4751	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	3.8670	3.2406	
		กระตุ้นโดย KOH	3.8640	2.9079	
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	3.6832	7.6479	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	3.9185	4.4851	
		กระตุ้นโดย KOH	3.8956	4.0617	
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.7632	3.6778	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	3.1786	3.7767	
		กระตุ้นโดย KOH	3.1969	3.0135	
	ไม้ไฟหมาจู้	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.6810	3.4730
			กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	3.0525	3.9661
			กระตุ้นโดย KOH	3.0506	3.4397
2 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	3.6617	5.5060	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	4.1929	7.0354	
		กระตุ้นโดย KOH	4.2034	5.2633	
3 ปี		ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.7330	4.4244	
		กระตุ้นโดย $H_3PO_4$	3.1646	3.9748	
		กระตุ้นโดย KOH	3.1536	3.3520	

\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

\*\* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

#### 4. การศึกษาหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากการเผาไม้ผุ และ ไม้หมากู

จากตารางที่ 36 แสดงปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ผุและไม้หมากู ซึ่งจะพบว่า กรดอินทรีย์ที่มีปริมาณมากที่สุด ในน้ำส้มควันไม้ทุกชนิด คือ กรดอะซิติก เนื่องจาก ในไม้ผุไม้แห้งมี เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบอยู่มาก ซึ่งเมื่อเซลลูโลส ถูกย่อยสลายด้วยความร้อน จะให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวออกมา จากนั้น น้ำตาลจะเกิดการย่อยสลายให้ เอทิลแอลกอฮอล์ และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย เอทิลแอลกอฮอล์อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อจนได้ กรดอะซิติก ตามสมการ



และสามารถเปรียบเทียบปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆที่พบในน้ำส้มควันไม้ ได้ดังนี้

##### 4.1 น้ำส้มควันไม้ จาก ไม้ผุผุ

- กรดซิตริก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดทาตาลิก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้
- กรดมาลิก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้
- กรดแลกติก เพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดฟอร์มิก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดอะซิติก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้
- กรดโพรพอนิก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดไอโซบิวทริก ไม่พบในน้ำส้มควันไม้ที่ได้
- กรดบิวทริก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้

##### 4.2 น้ำส้มควันไม้ จาก ไม้หมากู

- กรดซิตริก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดทาตาลิก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้
- กรดมาลิก ปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้
- กรดแลกติก เพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดฟอร์มิก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี

- กรดอะซิติก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี
- กรดโพรพิออนิก ปริมาณลดลงตามอายุของไข่
- กรดไอโซบิวทิริก พบในน้ำส้มควันไม้ของไข่อายุ 3 ปี ในปริมาณเล็กน้อย
- กรดบิวทิริก ปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 2 ปี แต่จะลดลง เมื่ออายุ 3 ปี

จากการเปรียบเทียบ พบว่า อายุของไข่ที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลกระทบต่อปริมาณของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในน้ำส้มควันไม้ โดยกรดอินทรีย์บางชนิดอาจเพิ่มขึ้นตามอายุของไข่ และ บางชนิดอาจลดลงตามอายุของไข่



ตารางที่ 36 แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ตอง และ ไม้หมาจู้

พันธุ์ไม้	อายุ (ปี)	ปริมาณกรดชนิดต่างๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
		ซิตริก	ทาทาริก	มาลิก	แลคติก	ฟอร์มิก	อะซิติค	โพลีโอนิก	ไอโซบิวทิริก	บิวทิริก
ไม้ตอง	1	7,739.52	5,262.79	3,165.47	(-)	20,786.42	246,433.50	16,068.15	(-)	38,800.66
	2	9,967.21	6,787.26	3,146.43	5,655.47	44,138.86	252,562.14	24,662.86	(-)	58,053.02
	3	6,539.93	15,294.11	4,642.27	(-)	35,371.76	275,915.00	24,058.63	(-)	93,005.77
ไม้หมาจู้	1	7,403.58	6,353.44	4,954.81	(-)	44,320.87	216,389.42	25,262.04	(-)	56,587.05
	2	10,920.61	10,993.50	9,045.74	6,272.47	54,590.05	224,216.82	22,276.24	(-)	91,634.31
	3	10,828.10	15,137.31	18,351.46	934.28	28,308.52	194,552.05	15,134.41	682.72	73,944.33

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่พบกรดอินทรีย์ชนิดนั้นๆ

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

#### 1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่

##### 1.1 สภาพที่เหมาะสมในการทำให้เป็นถ่าน

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม้ไผ่ต่าง อายุ 1 2 และ 3 ปี พบว่า การใช้ อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านลดลง และถ่านที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่า ถ่านที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไม้ไผ่ต่าง คือ 450 องศาเซลเซียส และได้ใช้ข้อมูลนี้ ดังกล่าว ในการเผาไม้ไผ่หม่าจู้ ด้วย

##### 1.2 สภาพที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ได้ทำการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านให้กลายเป็น ถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาที่สภาวะต่างๆกัน เช่น ชนิด และ ความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ระยะเวลาที่ใช้ ในการกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งเมื่อทำการกระตุ้นแล้ว จะใช้การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนในการ เลือกสภาวะที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในการทดลองขั้นต่อไป

##### 1.2.1 การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ต่าง ที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ต่าง อายุ 2 ปี ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้น เท่ากับ 4 ชั่วโมง จึงใช้เวลานี้มาศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่ต่างทุกอายุปี ซึ่ง พบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นจะทำให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด

ส่วนในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หม่าจู้ ที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็น ตัวกระตุ้นนั้น พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เมื่อใช้

เวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 24 ชั่วโมง แต่มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้เวลากระตุ้น เท่ากับ 8 ชั่วโมงมากนัก จึงใช้เวลา 8 ชั่วโมง ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่หม่าจู่ทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นจะทำให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเช่นกัน

### 1.2.2 การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

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

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หม่าจู่ ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หม่าจู่ อายุ 3 ปี ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 60 จึงใช้ความเข้มข้นนี้มาศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่หม่าจู่ทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การทำการกระตุ้นโดยใช้ เวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด

## 1.3 ค่าการดูดซับฟีนอล

จากการศึกษา พบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น มีค่าการดูดซับค่าการดูดซับฟีนอล ต่ำกว่าถ่านไม้ไผ่ที่ได้รับการกระตุ้น ซึ่งหมายถึงมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ดีกว่า เนื่องจากการกระตุ้นทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์มีความเป็นลบมากขึ้น สามารถดึงดูดฟีนอลได้ดีลง

## 2. สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากไม้ไผ่

### 2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

จากการศึกษาพบว่า ถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่เตรียมได้ มีปริมาณ แถ้ และ สารระเหย สูงกว่า และ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ต่ำกว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงว่า ยังมีสารอนินทรีย์ และ สารที่สามารถระเหยได้ หลงเหลืออยู่มาก

## 2.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่

จากผลการศึกษา พบว่า การกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของถ่าน ถ่านไม้ไผ่ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น จะมีแถบของหมู่ -OH เกิดขึ้น แต่จะมีแถบของหมู่ C=O หรือ COO<sup>-</sup> ในความเข้มที่ต่ำมาก หรืออาจไม่มีเลย แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือ โปแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ จะพบว่า แถบหมู่ -OH มีความเข้มต่ำลง และ ความเข้มของแถบ C=O หรือ COO<sup>-</sup> เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับสารเปลี่ยนแปลงไป

## 2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่

จากการศึกษา พบว่าลักษณะของพื้นผิวถ่านไม้ไผ่ตง และ ไม้หมากู๋ เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแล้ว มีจำนวนรูพรุนมากขึ้น ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วย โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของขนาดของรูพรุนกับขนาดของตัวถูกดูดซับ

## 3. ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ

โดยจะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ โดยทำการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไผ่ เวลาที่ใช้ และ ความเป็นกรดต่าง ที่มีผลต่อการดูดซับ

### 3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับแคดเมียมที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของแคดเมียมนั้น แคดเมียมจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับ ได้ดีขึ้น

การดูดซับแคดเมียม ต้องมีค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 4.0 – 5.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ แคดเมียมจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถเข้าไปในรูพรุนได้น้อยลง การดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมากกว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และกรดไนตริก โดยเมื่อนำถ่านจากไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี และ ไม้หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไปเปรียบ เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัท Fluka และ ถ่าน Bunton แล้ว จะพบว่า ถ่านทั้งสองชนิด มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าถ่านที่กระตุ้น ซึ่งอาจพิจารณาได้จากว่า การกระตุ้นนั้น ทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุน ขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของแคดเมียม มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมีมากขึ้น และ อีกกรณีหนึ่ง คือ การกระตุ้นทำให้มีหมู่ฟังก์ชัน C=O หรือ COO<sup>-</sup> เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากขึ้นด้วย

### 3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลิบบลู

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับเมทิลลิบบลูที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวูพรุนมีขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของเมทิลลิบบลูนั้น เมทิลลิบบลูจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับเมทิลลิบบลู ต้องมีค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 5.0 – 7.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเนื่องจากโครงสร้างของเมทิลลิบบลู มีความเป็นอะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของเมทิลลิบบลูเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างเมทิลลิบบลู และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับเมทิลลิบบลูเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งในบางกรณีอาจทำให้การดูดซับน้อยลง โดยอาจเป็นเพราะการกระตุ้นไม่สามารถทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่มากพอ ที่เมทิลลิบบลูจะสามารถเข้าไปในช่องว่างของรูพรุนได้ การดูดซับจึงเกิดขึ้น ได้น้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเมทิลลิบบลูสูงมาก เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ Fluka มีขนาดของรูพรุนใหญ่พอที่เมทิลลิบบลูจะเข้าไปในช่องว่างได้

### 3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับฟีนอลที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดกลาง ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของฟีนอลนั้น ฟีนอลจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับฟีนอล ต้องมีค่าความเป็นกรดค่าประมาณ 6.5 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และในสภาวะที่เป็นด่าง ฟีนอลจะอยู่ในโครงสร้างของ ฟีนอเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจพิจารณาได้จากว่า การกระตุ้นนั้น ทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของฟีนอล ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านที่ได้จากไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น จะให้ความสามารถในการดูดซับมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้าคือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไผ่ Buntan แล้ว จะเห็นว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

### 3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับไอโอดีนที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของไอโอดีนนั้น ไอโอดีนจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับไอโอดีน ต้องมีค่าความเป็นกรดค่าประมาณ 7.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และ ไตรไอโอไดด์แอนไอออน (triiodide anion) มีสภาวะที่เป็นลบ

ดังนั้น การเกิดแรงดึงดูด ระหว่างกับ หมูฟุ้งชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์กับไตรโอ-โอโดด์แอนไอออน จึงเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไฟ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจพิจารณาได้จากว่า การกระตุ้นนั้น ทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของไอโอดีน ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านไม้ไฟ และ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟทางการค้า พบว่า ถ่านไม้ไฟที่ทดลองยังมีความ สามารถในการดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

#### 4. การวิเคราะห์หาความปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้

จากการศึกษา พบว่า กรดอินทรีย์ที่มีปริมาณมากที่สุด ในน้ำส้มควันไม้ทุกชนิด คือ กรดอะซิติก ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นกรดอะซิติก ซึ่งจากการทดลองจะพบกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆในความเข้มข้นที่สูง ถ้าทำการแยกกรดอินทรีย์เหล่านั้นในบริสุทธิ์ จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้มากมาย เช่น ใช้เป็นยากำจัดแมลง เชื้อราต่างๆ หรือ เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรม เป็นต้น

#### ข้อเสนอแนะ

1. ในการเผาไฟให้กลายเป็นถ่านนั้น ควรมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาให้สูงขึ้น เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามักนิยมเผาที่อุณหภูมิสูงมาก
2. ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ควรศึกษาในสภาวะที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น เช่น อุณหภูมิ หรือ ความเร็วที่ใช้ในการเขย่า เป็นต้น เนื่องจาก สภาวะเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับได้

3. ควรมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารต่างๆจากน้ำเสียจริงๆ เนื่องจากการวิจัยนี้ ศึกษาจากน้ำเสียสังเคราะห์เท่านั้น ซึ่งในน้ำเสียจริงๆอาจมีสารอื่น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้

4. ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว มาฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ได้ใหม่ หรือนำไปทดลองดูดซับสารอื่นๆต่อ เพื่อใช้ความสามารถในการดูดซับที่เหลือหลังจากดูดซับสารชนิดแรก



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมอุตสาหกรรม. (2550). สถิติการนำเข้าส่งออก. แหล่งข้อมูล:

[http://www.oie.go.th/industrystatus\\_th.asp](http://www.oie.go.th/industrystatus_th.asp)

เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30-14. โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

พุดินันท์ พิงญาดี. 2546. ถ่านไม้และน้ำส้มควันไม้. ชมรมสวนป่า ผลิตภัณฑ์ และพลังงานจากไม้.

ณัฐยา พูนสุวรรณ, 2545, การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อย โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสุรนารี.

ทรงศักดิ์ ศรีอนุชาต. (2543). แคดเมียม โลหะพิษที่อันตราย. แหล่งที่มา:

[http://www.healthtoday.net/thailand/scoop/scoop\\_43.html](http://www.healthtoday.net/thailand/scoop/scoop_43.html)

บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2536. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บุญชัย ตระกูลมหชัย, มนัส อาคมะพันธ์, น้อมจิตต์ เกิดผล, ผาสุก คงชาติรี และเกศรา นุตาลัย.

2534. การผลิตถ่านกัมมันต์จากพีทและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาฟลูอิดไชน์เบด. รายงานฉบับที่ 2 โครงการวิจัยที่ อ-ต 34-01. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

ประกฤต เดิศจรีสอร่ามดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟังข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยะพร บารมี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางที่เหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ เคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพียรพรรค ทศกร. 2535. หน่วยปฏิบัติการทั่วไป. กรุงเทพมหานคร. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

เสริมสุข รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2514. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

Annual Book of ASTM Standards. 1998. **Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon D2866-94.** 15.01. 707-708. United State of America.

Annual Book of ASTM Standards. 1998. **Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon D2867-95.** 15.01. 709-711. United State of America.

Annual Book of ASTM Standards. 1998. **Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon D4607-94.** 15.01. 755-759. United State of America.

Annual Book of ASTM Standards. 1998. **Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples D5832-95**. 15.01. 782. United State of America.

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

Ajmal, M. 2003. Adsorption studies on rice husk: removal and recovery Cd(II) from wastewater. *Bioresource Technology*. 86: 147-149.

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

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

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

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

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

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

- 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. 1697. **Activated carbon**. London: Leonard Hill.
- Hassler, J.W. 1974. **Publication with activated carbon**. New York: Mercel Dekker, Inc.
- 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.
- Kohan, S.M. and D.M. Barkodor. 1979. Mission Analysis for Federal Fuel from Biomass Program vol IV. **Thermalchemical Conversion of Biomass to Fuels and Chemistry**, Chapter VI, Production of Oil and Char Pyrolysis of Wood, January.
- Kula, I., M. Ugurla, H. Karaoglu and A. Celik. 2008. Adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl<sub>2</sub> activation. **Bioresource Technology**. 99: 492-501
- 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. 2005. Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from *Tectona grandis* sawdust by  $ZnCl_2$  activation. **Chemical Engineering Journal**. 115: 121-131
- Mohanty, K., M. Jha, B.C. Meikap and M.N. Miswas. 2005. 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.
- 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 Material**. 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.
- Probstein and Hicks. 1985. **Synthetic Fuels**. Mc Graw Hill.
- Puangchit, L., B. Thaiutsa and S. Thamincha. 2000. **Bamboo 2000**. Bangkok: Kasetsart University.
- Qada, E.N.E., S.J. Allen and G.M. Walker. 2006. Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal: A study equilibrium adsorption isotherm. **Chemical Engineering Journal**. 124: 103-110

Rao, A.N., G. Dhanarajan and C.B. Sastry. 1985. Recent research on bamboos : proceedings of the International Bamboo Workshop, October 6-14, 1985, Hangzhou, People's Republic of China. **International Bamboo Workshop (1985: Hangzhou)**. Ministry of Forestry, People's Republic of China, International Development Research Centre, Canada, International Union of Forestry Research Organizations.

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.
- Usmani, 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
- 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

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

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