

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

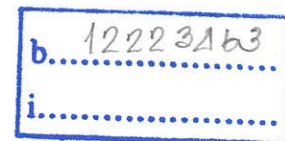
การใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแบบเพิ่มความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์  
สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปริมาณน้อยในน้ำเสียสังเคราะห์  
ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง

ACTIVATED CARBON SOLID-PHASE-PRECONCENTRATED  
SPECTROFLUOROMETRY FOR ULTRA-TRACES OF SOME  
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS (PAHs) IN  
SYNTHETIC WATER



นายไกรวิทย์ เอียวพันธ์  
นางสาวพรพิมล ฉวีวรรณ  
นายรุ่งคุณ เสือทองคำ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **108541**  
วัน,เดือน,ปี..... **-5 ก.ค. 2553**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

**ACTIVATED CARBON SOLID-PHASE-PRECONCENTRATED  
SPECTROFLUOROMETRY FOR ULTRA-TRACES OF SOME  
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS (PAHs) IN  
SYNTHETIC WATER**

**KRAIVITI EWPUN  
PORNPIMOL CHAWEEWAN  
RUNGKUN SUATHONGKAM**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2008**

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแบบเพิ่มความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปริมาณน้อยในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง

Activated Carbon Solid-Phase-Preconcentrated Spectrofluorometry for Ultra-Traces of some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Synthetic Water

**ชื่อนักศึกษา**

นายไกรวิทย์ เอียวพันธ์

นางสาวพรพิมล นวีวรรณ

นายรุ่งคุณ เสือทองคำ

**ปริญญา**

วิทยาศาสตร์บัณฑิต



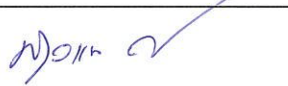
**สาขาวิชา**

เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์	



(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

ปฏิบัติหน้าที่ประธานสาขาวิชา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแบบเพิ่มความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปริมาณน้อยในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง
ชื่อนักศึกษา	นายไกรวิทย์ เอียวพันธ์ นางสาวพรพิมล ฉวีวรรณ นายรุ่งคุณ เสือทองคำ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2551
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแบบเพิ่มความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งได้แก่ แนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน และไพรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง จากการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน และไพรีน ที่ความเข้มข้น 1 ppm ได้เท่ากับ 75.63%, 72.84% และ 71.12% ตามลำดับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 3 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ที่เวลา 30 นาที ทั้งนี้พีเอชของสารละลายแนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน และไพรีนไม่มีผลต่อการดูดซับส่วนไอโซเทอมของการดูดซับ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นแบบฟลูนดิช พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไพรีนได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นแนฟทาลีน และฟิแนนทรีน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับ PAHs ที่ช่วงความเข้มข้นของสารละลาย 0.00 – 1.00 ppm ที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ซึ่งได้ผลออกมาเป็นกราฟเส้นตรง และเมื่อนำมาศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงความเข้มข้นดังกล่าวค่าที่ได้สามารถนำมาใช้ในการประยุกต์กับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ดี และขีดจำกัดในการวิเคราะห์ของสารละลายแนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน และไพรีน ที่ได้เท่ากับ 0.21, 0.02 และ 0.04 ppm ตามลำดับ

**คำสำคัญ** พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, แนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน, ไพรีน, ถ่านกัมมันต์, สเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง

<b>Title</b>	Activated Carbon Solid-Phase-Preconcentrated Spectrofluorometry for Ultra-Traces of some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Synthetic Water
<b>Students</b>	Kraivit Ewpun Pornpimol Chaweewan Rungkun Suathongkam
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2008
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Suwan Chaiyasith

### ABSTRACT

The propose of this project is to study on solid-phase-preconcentrated spectrofluorometry by activated carbon for ultra-traces of some Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) such as naphthalene, phenanthrene and pyrene in synthetic water. The adsorption of 1 ppm naphthalene, phenanthrene and pyrene are 75.63%, 72.84% and 71.12%, respective at which activated carbon 3 grams/100 mL of PAHs solution for 30 minutes. There is no effect of pH on adsorption. The adsorption in term of Freundlich isotherm for naphthalene, phenanthrene and pyrene were reported. Calibration curve over the range 0.00 – 1.00 ppm of PAHs gave good linearity and low relative standard deviation (%RSD). The recommended method has been applied to the determination of PAHs in water by solid-phase-preconcentrated spectrofluorometry. The detection limit of naphthalene, phenanthrene and pyrene are 0.21, 0.02 and 0.04 ppm, respectively.

**Keyword** Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs, Naphthalene, Phenanthrene, Pyrene, Activated Carbon, Solid phase Preconcentrated Spectrofluorometry

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ จึ่งใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้ทั้งในด้านคำปรึกษา คำแนะนำและการดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.ฉัฐวุฒิ เจริญชัย ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา และพี่น้องน้องๆ และเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจ ความห่วงใย และคอยช่วยเหลือกันด้วยดีตลอดมา

นอกเหนือจากนี้แล้วยังมีบุคคลอื่นอีกหลายท่านที่ได้กล่าวถึงที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และกำลังใจตลอดโครงการพิเศษนี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายไกรวิทย์ เอียวพันธ์

นายรุ่งคุณ เสือทองคำ

นางสาวพรพิมล ฉวีวรรณ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ถ่านกัมมันต์	4
- การผลิตถ่านกัมมันต์	6
- สมบัติถ่านกัมมันต์	7
- ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	9
- การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย	9
2.2 พอลิไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน	11
- แนฟทาลีน	14
- ฟีนานทริน	17
- ไพรีน	18
- การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม	19
- การเป็นสารก่อมะเร็ง	20
- ผลของ PAHs ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม	22
2.3 การดูดซับ	25
- รูปแบบการดูดซับ	25
- ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี	26
- ประเภทของตัวดูดซับ	27

	หน้า
- ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	27
- กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล	28
- สมดุลของการดูดซับ	30
2.4 สเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์	33
- Spectrofluorometry มีข้อดีเหนือกว่าวิธีการดูดกลืนแสง	34
- การประยุกต์วิธี Fluorometry ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์	35
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 วิธีการทดลอง	39
- การเตรียมสารละลายมาตรฐาน PAHs เข้มข้น 100 ppm	39
- การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ PAHs ในน้ำเสียสังเคราะห์	40
- การสร้างกราฟมาตรฐาน	42
- การศึกษาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit)	42
- การตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	44
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	44
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ ของ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์	46
- ศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ	46
- ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ	47
- ศึกษา pH ที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ	48
- ศึกษาความเข้มข้นของ PAHs ที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ	49
4.3 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%RSD)	50
4.4 การศึกษาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit)	51
4.5 การตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์	51
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก ก.	57
ภาคผนวก ข.	60

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	15
ตารางที่ 2.2	19
ตารางที่ 2.3	20
ตารางที่ 2.4	22
ตารางที่ 3.1	39
ตารางที่ 5.1	53
ตารางที่ ก.1	58
ตารางที่ ข.1	61
ตารางที่ ข.2	62
ตารางที่ ข.3	63
ตารางที่ ข.4	64
ตารางที่ ข.5	65
ตารางที่ ข.6	66
ตารางที่ ข.7	67
ตารางที่ ข.8	67
ตารางที่ ข.9	68
ตารางที่ ข.10	69
ตารางที่ ข.11	69
ตารางที่ ข.12	70
ตารางที่ ข.13	71
ตารางที่ ข.14	72
ตารางที่ ข.15	72
ตารางที่ ข.16	73
ตารางที่ ข.17	76
ตารางที่ ข.18	77
ตารางที่ ข.19	78
ตารางที่ ข.20	81
ตารางที่ ข.21	82

	หน้า
ตารางที่ ข.22 ค่า $(X_i - \bar{X})^2$ สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของ การวิเคราะห์การดูดซับแนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์	83
ตารางที่ ข.23 ค่า $(X_i - \bar{X})^2$ สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของ การวิเคราะห์การดูดซับพีแนนทรีนด้วยถ่านกัมมันต์	85
ตารางที่ ข.24 ค่า $(X_i - \bar{X})^2$ สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของ การวิเคราะห์การดูดซับไพรีนด้วยถ่านกัมมันต์	86
ตารางที่ ข.25 ค่า Intensity ของสารละลายแบลงค์ที่วัดที่ความยาวคลื่น ที่เหมาะสมของสารละลาย PAHs แต่ละชนิด	87
ตารางที่ ข.26 ตำเนาเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ของบริษัท RFCL จำกัด	98

## สารบัญรูปลูกภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	Carbon-oxygen complex บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	4
รูปที่ 2.2	แสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	6
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะรูพรุนของอนุภาคถ่านกัมมันต์เมื่อสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน ในน้ำผ่านรูพรุนจะเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ที่ผิวของรูพรุน	7
รูปที่ 2.4	การแทรกซึมของ โมเลกุลเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์	8
รูปที่ 2.5	ระบบบำบัดน้ำเสียที่ประยุกต์ใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการบำบัด	11
รูปที่ 2.6	สาร PAHs 16 ชนิด ที่กำหนดโดย US EPA	12
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของแนฟทาลีน	14
รูปที่ 2.8	การใช้ประโยชน์ต่างๆจากแนฟทาลีน	16
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของฟิแนนทริน	17
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของไพรีน	18
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	29
รูปที่ 2.12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน	30
รูปที่ 3.1	อุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ ที่สถานะของแข็ง	39
รูปที่ 4.1	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	44
รูปที่ 4.2	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	45
รูปที่ 4.3	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	45
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับของแนฟทาลีน, ฟิแนนทริน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm ที่เวลาสัมผัสต่างๆ	46
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับของแนฟทาลีน, ฟิแนนทริน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm โดยมีเวลาสัมผัส 30 นาที ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ	47
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับของแนฟทาลีน, ฟิแนนทริน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm โดยมีเวลาสัมผัส 30 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 กรัม ที่ pH ต่างๆ	48

	หน้า
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับในหน่วย mg/g ของถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 3 กรัมที่ดูดของเนฟทาลีน, ฟีนเนทรีน และไพรีน ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยไม่ปรับค่า pH	49
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของเนฟทาลีน	61
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของฟีนเนทรีน	62
รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานของไพรีน	63
รูปที่ ข.4 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเนฟทาลีน	73
รูปที่ ข.5 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของฟีนเนทรีน	76
รูปที่ ข.6 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของไพรีน	77
รูปที่ ข.7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนดิชของเนฟทาลีน	78
รูปที่ ข.8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนดิชของฟีนเนทรีน	81
รูปที่ ข.9 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนดิชของไพรีน	82
รูปที่ ข.10 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์	89
รูปที่ ข.11 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเนฟทาลีน	90
รูปที่ ข.12 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของเนฟทาลีน	91
รูปที่ ข.13 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับฟีนเนทรีน	92
รูปที่ ข.14 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของฟีนเนทรีน	93
รูปที่ ข.15 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ ไพรีน	94
รูปที่ ข.16 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของไพรีน	95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ [1-5]

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic hydrocarbon; PAHs) เป็นสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดอันตรายชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในร่างกาย ซึ่งมีข้อมูลจาก International Agency for Research on Cancer (IARC) ยืนยันแล้วว่าก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองหลายชนิด ส่วนข้อมูลทางระบาดวิทยาก็ยืนยันว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดมะเร็งในคนด้วย สาร PAHs ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ในน้ำมันดิบ ถ่านหิน คาร์บอนจากภูเขาไฟ ส่วนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญ คือ กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือจากสารอินทรีย์อื่นๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ยานพาหนะ กระจก ฉนวนกันความร้อนจากการเผาถ่านหิน หรือควันบุหรี่ [1] รวมทั้งการเผาขยะ PAHs ที่ถูกปล่อยออกจากกระบวนการเผาขยะ[2] สำหรับ PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนัก จะสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ แต่ยังคงไม่สมบูรณ์ [3] ทำให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแหล่งน้ำ และสามารถปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารจากการที่สัตว์ เช่น วัว ควาย กินหญ้าที่ปนเปื้อนสารนี้เข้าไป หรืออาจไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ PAHs อาจแพร่กระจายไปกับอากาศโดยปลิวไปตกยังพื้นที่อื่นๆ ทำให้เกิดความเป็นพิษได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีผลมาจากการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมทำให้ PAHs หลายชนิดถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมประเภทสี ย้อม ตัวทำละลาย และยาฆ่าแมลง เป็นต้น [4] และเนื่องจากขาดการจัดการ หรือการบำบัดที่ดีพอ ตลอดจนไม่ตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้มีการตรวจพบ PAHs ปนเปื้อนตามแหล่งน้ำ ดิน อากาศ ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ และสัตว์โดยตรง

ในปัจจุบันมีวิธีการมากมายในการวิเคราะห์สาร PAHs เช่น โครมาโทกราฟี แบบ Liquid Chromatography (LC) , แบบ Thin-Layer Chromatography (TLC) หรือแบบ High performance liquid chromatograph (HPLC) หรือด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีการวิเคราะห์สารในสถานะสารละลาย ซึ่งมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยใช้วิธีสเปกโทรฟลูออโรเมตรีที่สถานะ



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นวิธีการวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเพิ่มความเข้มข้น PAHs
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำตัวดูดซับนั้นไปใช้ให้เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มี PAHs
3. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้น PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์
4. ทราบถึงผลของโครงสร้างที่ต่างกันของ PAHs ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้มข้น

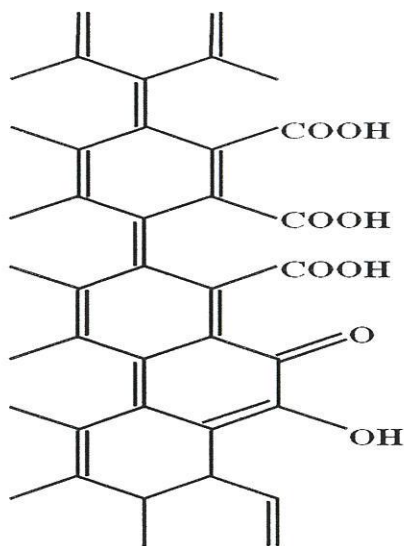
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

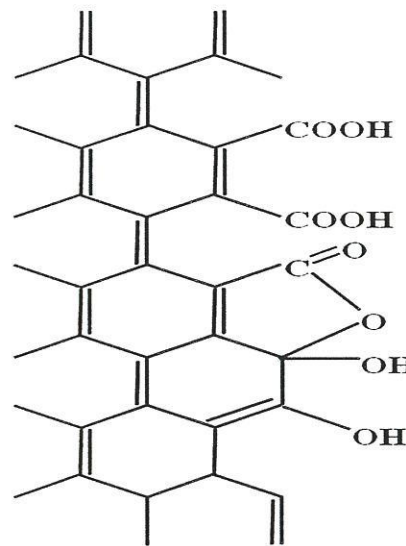
#### 2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) [6]

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐานชนิดหนึ่ง แต่ถูกทำขึ้นเป็นพิเศษโดยการกระตุ้นซึ่งทำให้พื้นผิวภายในเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก โครงที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีขั้ว (Polar) เล็กน้อยเนื่องจากมี Carbon-Oxygen Complexes เกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ผลิตหรือเกิดจากการออกซิเดชันของอากาศในขั้นตอนการกระตุ้น ดังนั้นที่พื้นผิวของถ่านจึงมีความชอบน้ำ (hydrophilicity) และมีความเป็นกรด (Acidity) Carbon-Oxygen Complexes บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆดังนี้ คือ

1. หมู่คาร์บอกซิลิกที่แรง
2. หมู่คาร์บอกซิลิกที่อ่อน
3. หมู่ฟีนอลิก
4. หมู่คาร์บอนิล



Open Type



Lactone type

รูปที่ 2.1 Carbon-Oxygen Complex บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [6]

โดยทั่วไปแล้วถ่านกัมมันต์ไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์แต่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเป็นผลึกและไม่สามารถเขียนออกมาเป็นสูตรทางเคมีได้ วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น กระดูกสัตว์ กะลามะพร้าว ไม้อื่นๆ ถ่าน ถ่านหิน หรือเมล็ดผลไม้บางชนิด เช่น Almond Walnut Hull ฯลฯ จากทฤษฎีอินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ แต่คุณสมบัติจะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงมากแล้วพยายามทำให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมีมากขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั่วไปที่นำมาใช้ มีขนาดพื้นที่ผิวตั้งแต่ 500 – 1500 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับแบบเม็ด และแบบผงจะมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 มิลลิเมตรและเล็กกว่า 200 Mesh ตามลำดับ ในระบบบำบัดอาจใช้ Powder Activated Carbon ผสมในถังเติมอากาศของระบบ Activated Sludge (AS) เพื่อช่วยกำจัดสารอินทรีย์ประเภทย่อยสลายได้ยาก ถ่านกัมมันต์จะมีการเปลี่ยนแปลงและรูปร่างตามอุณหภูมิของการเผา รูปร่างอะตอมคาร์บอนจะเปลี่ยนตามส่วนประกอบ และโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีผลอย่างมากต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อขนาด โดยรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสมากนัก ดังนั้นในการกระตุ้นคาร์บอนจึงเป็นการทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นสำหรับการดูดซับ (800-2500 ตารางเมตรต่อกรัม)

ถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ คือ

1.แบบผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC) คือ มีขนาดเล็กกว่า U.S. Sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) หรือประมาณ 10-50  $\mu$  (Micron) นำไปใช้ในการดูดซับสารละลาย เช่น สารอินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสีย เช่น เติมถ่านกัมมันต์แบบผงในน้ำเสียพร้อมกับ Coagulant ซึ่งทำให้เกิดการรวมตะกอนแขวนลอยในน้ำจนกลายเป็น Floc ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง โดยทั่วไปจะผลิตโดยกระตุ้นเศษไม้ ถ่าน ชี้อัลไค แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็ก PAC มีราคาถูกแต่ในการนำมาคืนสภาพ (Regeneration) นั้นไม่คุ้มค่านัก

2.แบบเม็ด (Granular Activated Carbon หรือ GAC) มีขนาดใหญ่กว่า U.S. Sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) หรือมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทราย แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย GAC จะใช้ในการดูดซับน้ำหรือไอระเหย คุดสีและกลิ่นในน้ำดื่ม และบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถบรรจุลงถังและให้น้ำไหลผ่านในลักษณะที่คล้ายกับการกรองน้ำตามปกติ และ GAC ที่ใช้แล้วสามารถนำไปคืนสภาพ (Regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของคาร์บอน แต่ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน และไม่เล็กจนเกินไป เพื่อที่จะป้องกันการเกิดความดันตกภายในเบดมากเกินไป และการหลุดของถ่านไปในกระแสก๊าซ

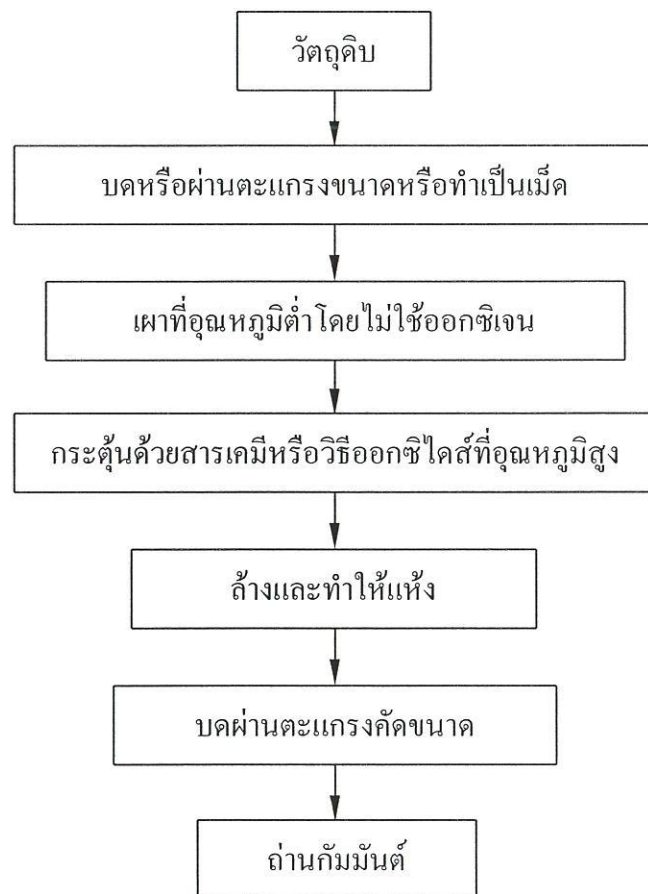
### 2.1.1 การผลิตถ่านกัมมันต์ [6]

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ผลิตมักพิจารณาจาก อินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่ เช่น กระจุก ชานอ้อย เมล็ดกาแฟ กากน้ำตาล ไม้

อินทรีย์วัตถุที่ใช้ผลิตสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- ก. พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด
- ข. พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท บิทูมินัส
- ค. วัตถุที่มาจากสัตว์ เช่น กระจุก

ในปัจจุบันการผลิตถ่านกัมมันต์ มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ว่าเป็นอะไร และต้องการ ถ่านที่มีสมบัติอย่างไร กรรมวิธีโดยทั่วไปประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ หมายถึง การอบแห้ง การ บด การทำให้เป็นเม็ด การเผาที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยสารเคมี



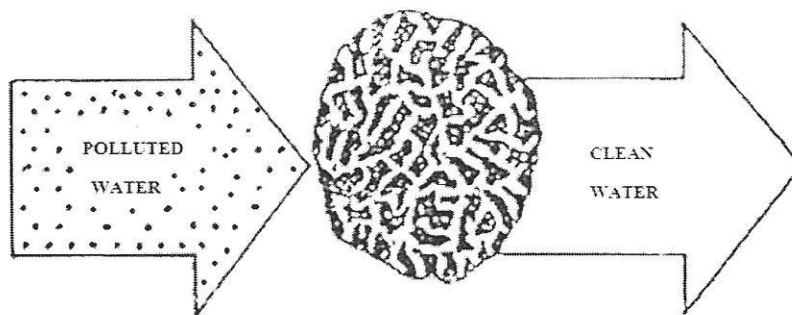
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ [6]

การกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้สารมีรูพรุนมากขึ้นละเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ กระบวนการกระตุ้นมีขั้นตอนดังนี้

1. ดีไฮเดรชัน การกำจัดน้ำโดยทำให้ร้อนถึง 170 องศาเซลเซียส
2. คาร์บอนไนเซชัน การเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนและกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส
3. การกระตุ้นคาร์บอน เป็นการทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น โดยใช้สารกระตุ้นต่างๆเป็นตัวกระตุ้น ผ่านเข้าไปยังคาร์บอนเพื่อเผา By Product ที่วางอยู่ที่รูพรุนและทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น

### 2.1.2 สมบัติถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) [7]

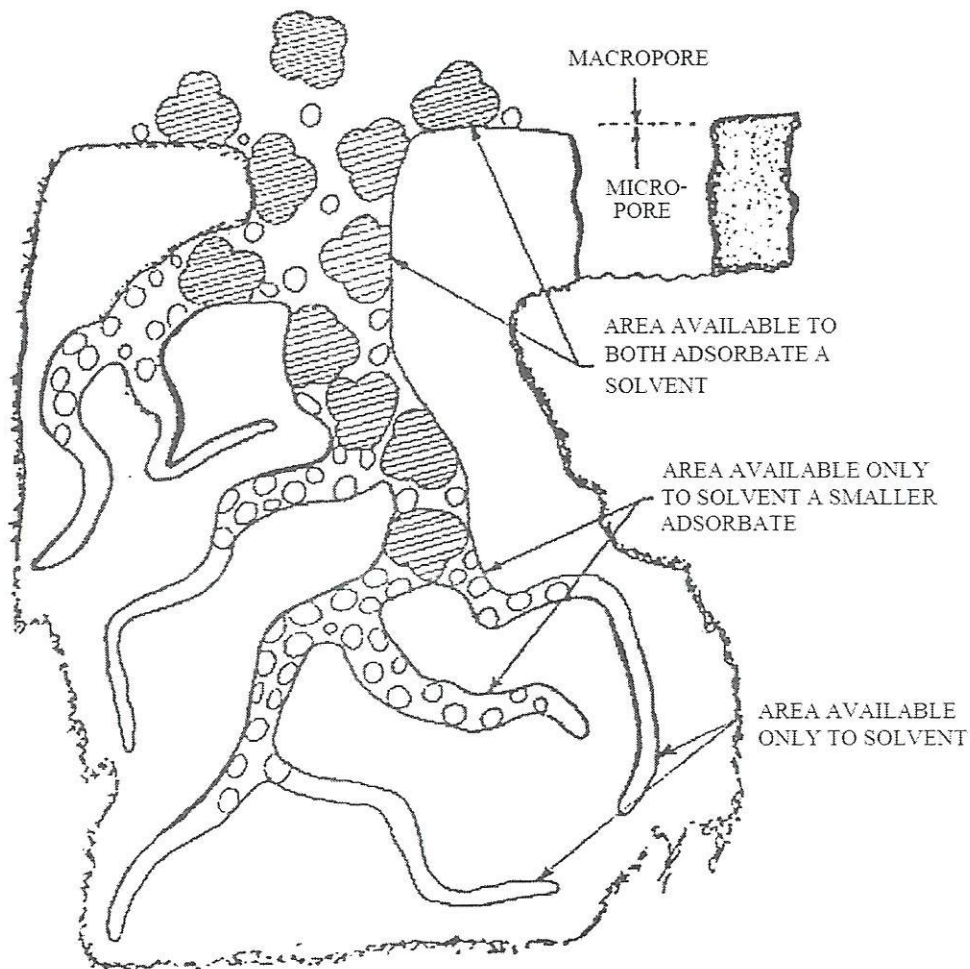
ถ่านกัมมันต์มีรูปร่างไม่แน่นอน ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด และมีรูพรุนอยู่ทั่วทั้งอนุภาคดังรูปที่ 2.3 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อขนาดอนุภาคมากจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้แต่เป็นทางผ่านเข้าสู่ภายในอนุภาคและรูพรุนขนาดเล็กได้ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) จะทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูพรุนของอนุภาคถ่านกัมมันต์ เมื่อสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านรูพรุน จะเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ที่ผิวของรูพรุน [7]

Macropore มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 1,000 Å ส่วน Micropore มีขนาด 10-100 Å พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) โดยการกระตุ้นทางกายภาพหรือการใช้เคมีทำให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจึงเป็นการเพิ่มช่องระหว่างผลึก (Elementary Crystallinities) จากการกระตุ้นที่เหมาะสมจะได้รูพรุนจำนวนมากทำให้ถ่านมีพื้นที่ภายในเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลให้สามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา การจำแนกขนาดของรูพรุนเพื่อบ่งชี้ว่าขนาดของโมเลกุลจะผ่านเข้าสู่อนุภาคของถ่านกัมมันต์จนเกิดการดูดซับได้หรือไม่ ดังรูปที่ 2.4

แสดงถึงอนุภาคต่างๆในรูพรุน โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะติดค้างอยู่ที่ Macropore อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนขนาดเล็กได้



รูปที่ 2.4 การแทรกซึมของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ [7]

กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพ ขนาด โมเลกุลของสารถูกดูดซับ ส่วนอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอน Carbonization และกระบวนการ Activation จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติการดูดซับ ซึ่งทำให้ถ่านกัมมันต์มีหลายชนิดและโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกตามคุณสมบัติการดูดซับต่างๆ เช่น กะลามะพร้าวเมื่อเผาจะให้ถ่านที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการดูดซับกลิ่น กระถุกเมื่อเผาจะให้ถ่านที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการดูดสี เป็นต้น ดังนั้นในการนำถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดจึงควรตระหนักถึงสิ่งเหล่านี้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.1.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ [6-7]

ได้มีการแบ่งประโยชน์การใช้ถ่านกัมมันต์ ออกเป็น 2 ประเภทคือ

#### 1. ประเภทใช้กับของเหลว (Liquid Phase Carbon) อุตสาหกรรมที่นำไปใช้ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล จะใช้ในการฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ใช้ในการฟอกสี และการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการดูดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ อาหารเช่น น้ำตาลเหลว น้ำเชื่อม น้ำส้มสายชู ซอสปรุงรส
- อุตสาหกรรมเครื่องคั้มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้เป็นตัวดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ
- อุตสาหกรรมเคมีและยา มีการนำถ่านกัมมันต์ไปช่วยในการผลิตยาปฏิชีวนะ วิตามินและฮอร์โมนบางชนิด
- อุตสาหกรรมทำให้น้ำบริสุทธิ์ โดยใช้ถ่านเป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสีจากน้ำที่มีมลพิษมาก

#### 2. ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ (Gas Phase Carbon) ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดก๊าซและไอของสารอินทรีย์ได้
- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านจะดูดซับสารเหล่านี้ที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศและจะคายออกมาที่ความดันไอระเหยต่ำๆ
- อุตสาหกรรมปรับอากาศและแยกก๊าซ จะใช้ถ่านดูดสารปนเปื้อนออกจากอากาศหรือก๊าซที่ต้องการ
- อุตสาหกรรมใช้ถ่านทำกันกรองของบูหรี

### 2.1.4 การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย [6-7]

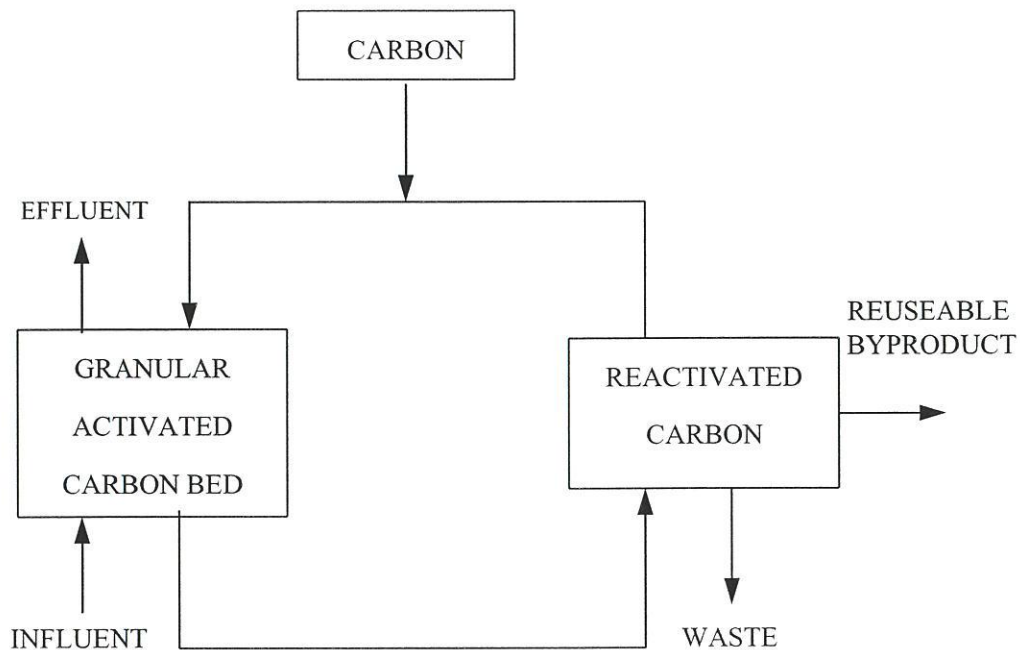
โมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกาะติดผิวคาร์บอนได้เป็นอย่างดีถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดูดซับคอลลอยด์ (Colloid) หรือโมเลกุลบางชนิดได้ เช่น โมเลกุลขนาดเล็ก (โมเลกุลที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 3 อะตอม) และ โมเลกุลแบบโพลาร์ (Polar Molecule) ได้แก่ แอลกอฮอล์ธรรมดา กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก และน้ำตาล โมเลกุลที่ถ่านกัมมันต์จับไม่ได้มักเป็น โมเลกุลที่ข่อยสลายทาง

ชีวภาพได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม โมเลกุลที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากมักสามารถเกาะติดพื้นผิว ถ่านกัมมันต์ได้ดี ดังนั้นประโยชน์ของถ่านกัมมันต์มีดังนี้

1. กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid) กรดฟุลวิก (Fulvic Acid) และสาร PAHs ต่างๆ
2. กำจัดคลอรีนในน้ำ
3. กำจัดโลหะหนักต่างๆ โดยเฉพาะ GAC สามารถกำจัดปรอท และเงินได้ สามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ ได้ เช่น ตะกั่ว ทองแดง ฯลฯ จนถึงระดับที่สามารถยอมรับได้ในมาตรฐานน้ำดื่ม
4. กำจัดสารฆ่าแมลง (Insecticide) ชนิดต่างๆ ได้เป็นอย่างดี
5. กำจัดผงซักฟอก
6. กำจัดฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอลได้
7. กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะแบบสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว (Saturated Chain Hydrocarbon)

ถ่านกัมมันต์นิยมนำมาใช้ในงานบำบัดน้ำเสียเพื่อเพิ่มคุณภาพ กำจัดสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดกลิ่น สี และรส อีกทั้งยังใช้ในการนำเอาวัตถุอันตรายในภาคอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่

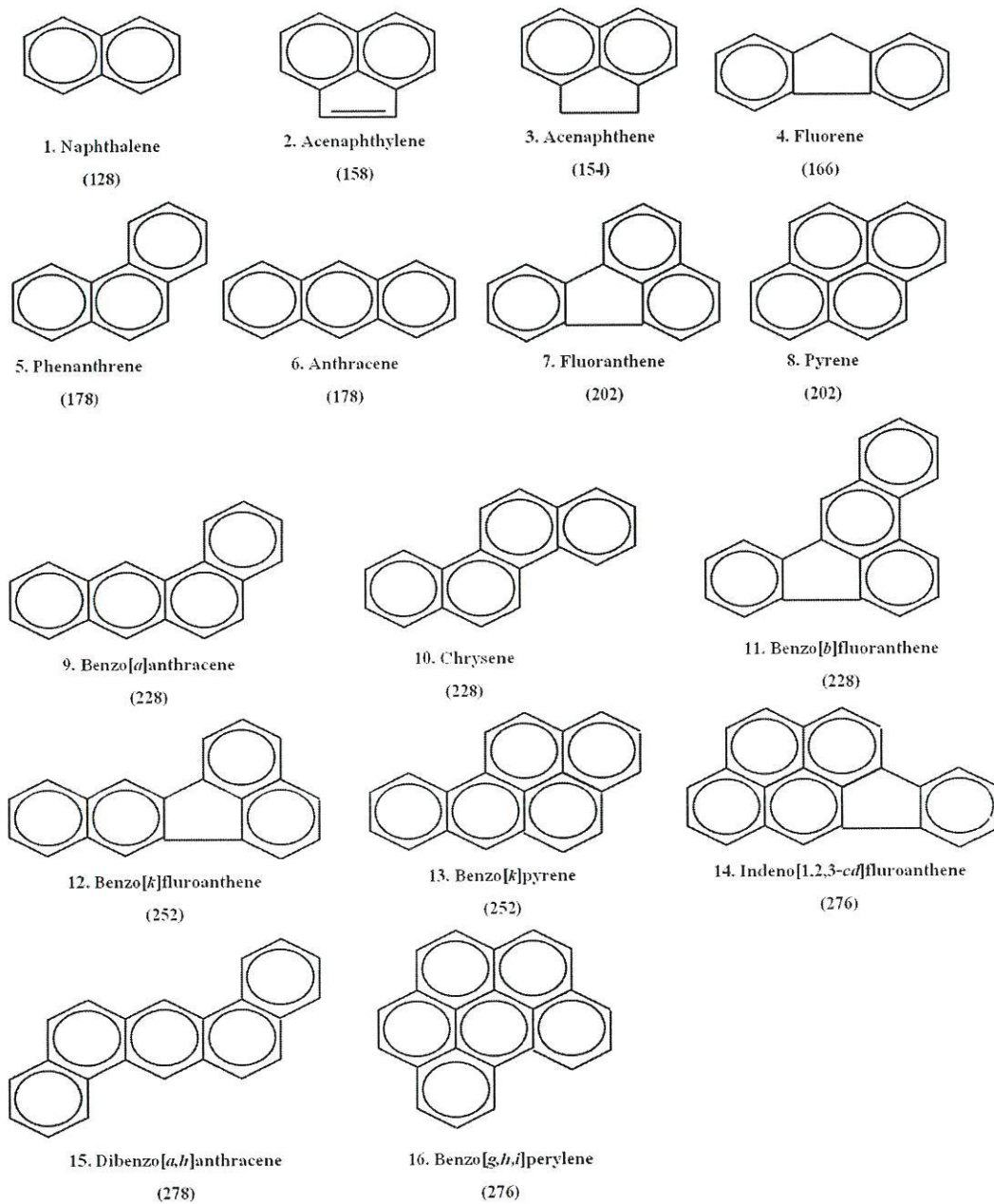
การประยุกต์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและเพิ่มคุณภาพน้ำ นิยมใช้ทั้งถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดเม็ด อาจใช้โดยให้ถ่านกัมมันต์อยู่กับที่แล้วให้น้ำเสียไหลผ่าน รส กลิ่น สี จากน้ำเทศบาลต่างๆ ก็จะถูกกำจัดออก และพวกสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสียอุตสาหกรรม เช่น สี ย้อม สารฆ่าแมลง สารลดแรงตึงผิว สาร PAHs และอื่นๆ จะถูกกำจัดออก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียที่ประยุกต์ใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการบำบัด [7]

## 2.2 พอลิไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAHs) [1-4], [8-11]

PAHs จัดเป็นสารเคมีอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยวงอะโรมาติก (Aromatic ring) ตั้งแต่ 2 วงเรียงเชื่อมต่อกัน ลักษณะการเชื่อมต่อกัน คือ วงอะโรมาติก 2 วงที่อยู่ติดกันจะใช้คาร์บอน 2 อะตอมร่วมกัน วงอะโรมาติกอาจมีคาร์บอน 5 หรือ 6 อะตอมก็ได้ ดังนั้นจึงเป็นสารเคมีที่มีความเสถียรมาก ลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์หรือถ่าน PAHs ประกอบด้วยสารที่มีสูตรโครงสร้างหลักหลายแบบแตกต่างกันทั้งหมด 35 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีอันตรายแตกต่างกัน [8] ตัวอย่างของ PAHs 16 ชนิด ที่กำหนดโดย US EPA ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 PAHs 16 ชนิด พร้อมน้ำหนักโมเลกุลที่กำหนดโดย US EPA [2]

PAHs เป็นสารเคมีที่ปรากฏอยู่ในธรรมชาติ เช่น ในน้ำมันดิบ ถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งปรากฏอยู่ในควันจากภูเขาไฟ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดได้จากการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญ คือ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เกิดจากรถยนต์ หรือ เครื่องบิน การเผาไม้ กระดาษ ขางรถยนต์ หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากซาก

ฟอสซิล และการเผาถ่านหิน นอกจากนี้ยังมีการผลิตทางปิโตรเคมีหลายชนิดที่ใช้วัตถุดิบเหล่านี้ในการผลิต เช่น ไฟเบอร์และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นแหล่งปล่อย PAHs ออกสู่สิ่งแวดล้อมที่สำคัญ [4] ในทางอุตสาหกรรมสามารถเกิด PAHs ได้จากการสกัดแยกจากน้ำมันดิน (Coal Tar) PAHs หลายชนิดมีความสำคัญทางอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตสารเคมีอื่นๆ เช่น ฟลูโอเรนทีน ใช้ผลิตสีชนิดเรืองแสง ไพรีน ใช้ผลิตสีชนิด Perinon Pigment เป็นต้น [9] และทั้งนี้ในหลายหน่วยงานที่คำนึงถึงอันตรายและผลเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการมี PAHs ปริมาณมากเกินไป จึงได้กำหนดมาตรฐาน PAHs ที่ยอมให้มีได้ เช่น THE Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ได้กำหนดค่า PAHs ที่ยอมให้มีได้ในอากาศเท่ากับ  $0.2 \text{ mg/m}^3$  และ The Nation Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ได้กำหนดค่าเฉลี่ยของอากาศในที่ทำงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันดิน (Coal Tar) ต้องมี PAHs ในอากาศไม่เกิน  $0.1 \text{ mg/m}^3$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมงของทำงานต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ [10]

PAHs เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทางทั้งจากธรรมชาติ เช่น การซึมของน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันใต้ดิน ไฟไหม้ป่า ภูเขาไฟระเบิดทำให้ PAHs ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดิน อากาศ และจากการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญ คือ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งนับเป็นกิจกรรมที่สำคัญที่ปล่อย PAHs สู่สิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ซึ่งการเผาไหม้ชนิดไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิด PAHs ได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เผาไหม้ [11]

ในกรณีที่ PAHs ปนเปื้อนในดิน การย่อยสลายของ PAHs เกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) การย่อยสลายโดยชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Biodegradation) และการย่อยสลายโดยตรง (Photolysis) [1]

ความเป็นพิษของ PAHs ได้แก่

1. การเป็นสารก่อเกิดมะเร็ง (Carcinogenicity)
2. การเป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity)
3. การเป็นสารทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Biochemical Interaction)
4. การเป็นสารที่เสริมพิษ และต่อต้านพิษ (Potentiation and Antagonism)
5. การระคายเคืองเบื้องต้น (Primary Irritation)

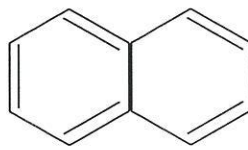
การป้องกันอันตรายจาก PAHs ได้แก่

1. กรณีสารกระเด็นเข้าตา ควรทำการล้างตาด้วยน้ำไหลผ่านทันที เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที จากนั้นรักษาอาการเบื้องต้นก่อนนำส่งแพทย์
2. กรณีสารสัมผัสผิวหนัง ควรทำความสะอาดบริเวณนั้นด้วยสบู่ และล้างด้วยน้ำสะอาด อย่างน้อย 15 นาที ส่วนเสื้อผ้าที่สวมใส่อยู่ควรถอดออก

3. ควรสวมถุงมือ และเครื่องแต่งกายที่เหมาะสมก่อนสัมผัสสาร
4. ควรสวมแว่นตานิรภัย
5. กรณีถ้าเกิดอุบัติเหตุ หรือรู้สึกไม่สบายควรไปพบแพทย์ทันที

สำหรับ PAHs ในงานวิจัยนี้มีอยู่ทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกัน คือ แนฟทาลีน (Naphthalene) ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) และไพรีน (Pyrene) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 แนฟทาลีน (Naphthalene) [4], [12]



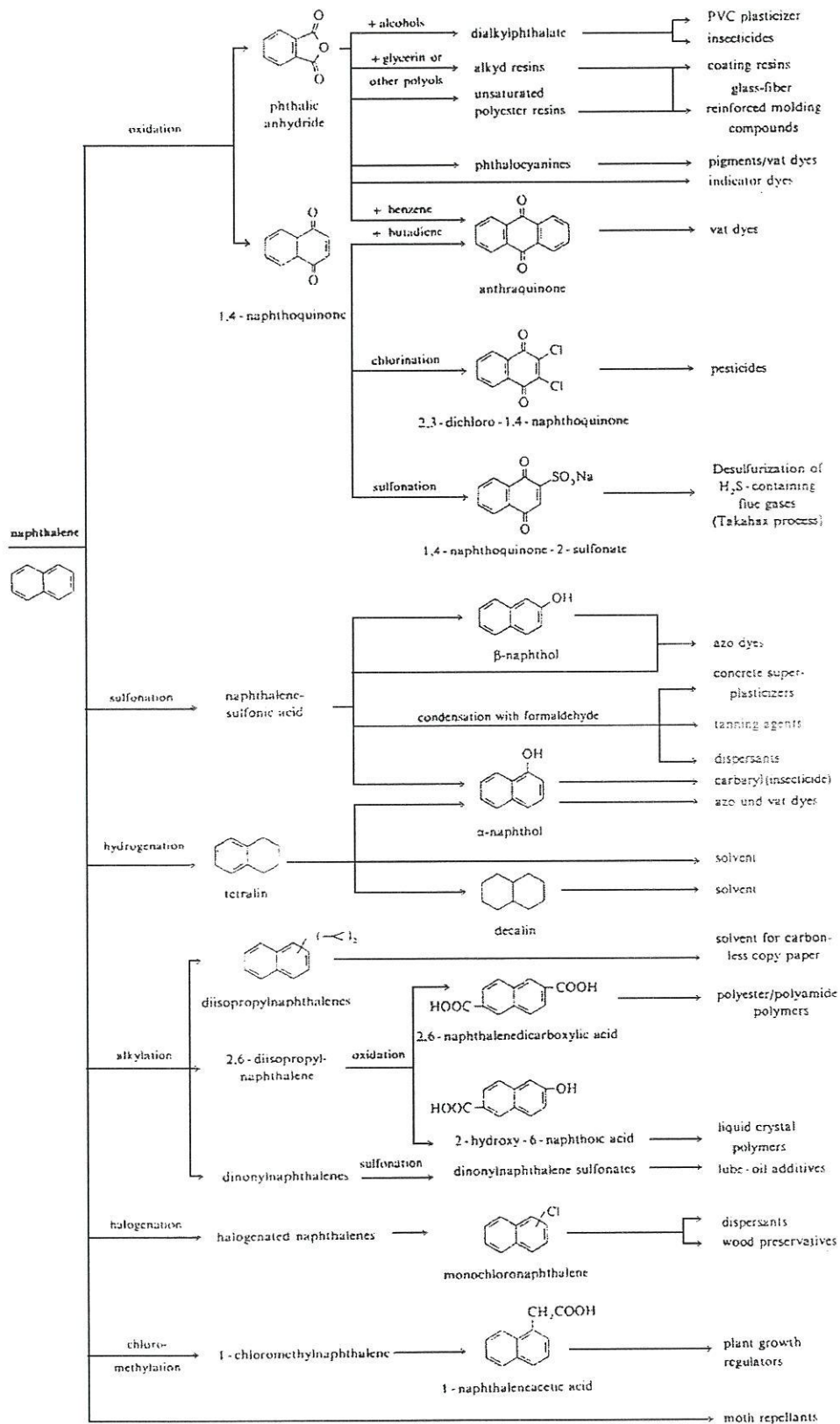
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแนฟทาลีน

-สูตร โมเลกุล	: $C_{10}H_8$
-น้ำหนัก โมเลกุล	: 128.17
-ลักษณะภายนอก	: ของแข็ง สีขาว กลิ่นคล้ายลูกเหม็น

โดยแนฟทาลีนจัดเป็น PAHs ที่มีการผลิตมากที่สุดในปี พ.ศ. 2530 พบว่ามีการผลิตแนฟทาลีนในยุโรป 410,000 ตัน ญี่ปุ่น 170,000 ตัน และสหรัฐอเมริกา 110,000 ตัน และในปี พ.ศ. 2538 มี ข้อมูลการผลิตอะซีแนฟทีน (Acenaphthene) 25,000 ตัน และแอนทราซีน (Anthracene) 20,000 ตัน นอกจากนี้แนฟทาลีนยังเป็น PAHs บริสุทธิ์เพียงสารเดียวที่มีข้อมูลการนำเข้าจากต่างประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538-2542 โดยประเทศไทยมีการนำเข้าประมาณ 3-4.5 ล้านกิโลกรัม [12]

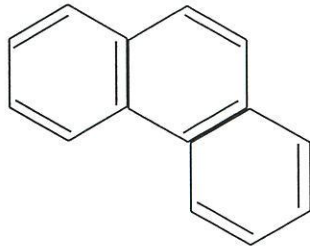
ตารางที่ 2.1 เปรอ์เซ็นต์การใช้เนฟทาไลน์ในปี ค.ศ. 1987 [13]

การใช้ประโยชน์	ยุโรปตะวันตก	สหรัฐอเมริกา	ญี่ปุ่น
Phthalic Anhydride	40	65	71
Dry	29	-	10
Surfactant, Tanning Agent, Dispersants	15	14	5
Moth repellent, Fumigany	9	5	2
Insecticides	-	14	-
Solvents and other uses	7	2	12



รูปที่ 2.8 การใช้ประโยชน์ต่างๆจากเนฟทาลิน [13]

2.2.2 ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) [2], [14-15]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของฟีนแอนทรีน

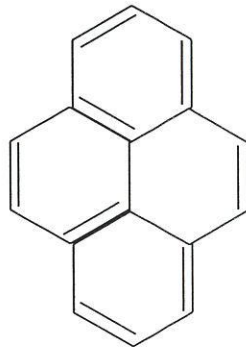
- สูตรโมเลกุล : C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>
- น้ำหนักโมเลกุล : 178.23
- ลักษณะภายนอก : ข่องแข็ง ไม่มีสี

ฟีนแอนทรีนเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ แต่ก็สามารถเกิดได้จากการกระทำของมนุษย์ด้วย เช่น ควันทันจากยานพาหนะ, ยางมะตอย, ไฟป่า, การสูบบุหรี่, การปิ้ง หรือการย่างอาหาร, การเผาไหม้ เชื้อเพลิง หรือพืชผลทางการเกษตร ตลอดจนของเสียอันตรายที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งฟีนแอนทรีนสามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้หลายทาง โดยสำหรับการหายใจเอาฟีนแอนทรีนเข้าไป มักพบในผู้ที่ทำงานอยู่บริเวณที่มีของเสียอันตรายที่มีฟีนแอนทรีนปนเปื้อนอยู่ นอกจากนี้ยังสามารถรับผ่านทางรับประทานหรือดื่มน้ำที่ได้รับการปนเปื้อน การรับประทานพืชผลที่เจริญเติบโตในดินที่มีการปนเปื้อนของฟีนแอนทรีน ทั้งนี้อาหารประเภทย่างหรืออาหารที่ไหม้เกรียมพบว่าจะมี PAHs ปนเปื้อนมาก ส่วนการได้รับผ่านทางผิวหนัง ได้แก่ การสัมผัสกับดิน หรือผลิตภัณฑ์ที่ปนเปื้อนน้ำมันดิน โดยฟีนแอนทรีนสามารถแพร่กระจายและเกิดการสะสมที่อวัยวะเป้าหมาย ได้แก่ ไต ตับ และไขมันในร่างกาย แต่ร่างกายก็สามารถขับสารนี้ออกมาได้ด้วยตัวเอง โดยจะขับออกมาทางปัสสาวะหรืออุจจาระ [14]

จากการทดลองกับหนูทดลองพบว่า ฟีนแอนทรีนสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อผิวหนัง ระบบป้องกันเชื้อโรค และอาจทำให้ไตอักเสบได้ โดยถ้าได้รับปริมาณ 308 ppm จากอาหารเป็นเวลา 10 วัน จะมีผลต่อน้ำหนักของลูกหนูรุ่นต่อไป และถ้าได้รับปริมาณ 923 ppm จากอาหารเป็นระยะเวลา 1 เดือน จะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับตับและระบบเลือด แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบนี้ยังไม่มีปรากฏในมนุษย์ โดย US.EPA ได้ระบุไว้ว่า ไม่มีข้อมูลมากพอที่จะระบุได้ว่าฟีนแอนทรีนเป็นสารก่อมะเร็ง [2]

โดยทั่วไปพีเเนนทรินจะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับสื่อไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์พลาสติก ยาน้ำแม่ลง วัสดุระเบิด และยา [15]

### 2.2.3 ไพรีน (Pyrene) [4]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของไพรีน

- สูตร โมเลกุล :  $C_{16}H_{10}$
- น้ำหนัก โมเลกุล : 202.36
- ลักษณะภายนอก : ของแข็ง ไม่มีสี เช่นเดียวกับพีเเนนทริน

ไพรีนสามารถพบได้ตามธรรมชาติ และอาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน, น้ำมัน, ก๊าซ และขยะ โดยทั่วไปไพรีนถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับสื่อไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์พลาสติก และยาน้ำแม่ลง สำหรับข้อมูลทางด้านกายภาพทั่วไปแล้วการได้รับไพรีนของมนุษย์ และข้อมูลความเป็นพิษต่างๆจะเหมือนกับพีเเนนทริน ดังที่กล่าวมาข้างต้น

เนื่องจาก PAHs ประกอบด้วยสารต่างๆมากมาย โดย PAHs ที่พบบ่อยและมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากจะมีการศึกษากันอย่างละเอียด ทำให้มีข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพค่อนข้างสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม PAHs ที่พบไม่บ่อยหรือมีปริมาณการปนเปื้อนเพียงเล็กน้อย ข้อมูลดังกล่าวจึงมีค่อนข้างจำกัด ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลของสาร PAHs ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของ PAHs [2-3], [16-17]

คุณสมบัติของสาร PAHs	แนฟทาลิน	ฟิแนนทริน	ไพรีน
มวลโมเลกุล	128.17	178.23	202.26
จุดหลอมเหลว (°C)	80.2	100	156
จุดเดือด (°C)	217.9	340	404
ปริมาตร (cm <sup>3</sup> /mol)	73.97	107.80	132.23
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	0.50-0.71	0.58-0.78	0.71-0.89
ความดันไอ (mmHg)	1	$6.8 \times 10^{-4}$	$6.8 \times 10^{-7}$
การละลายน้ำ (mg/L)	31.50	1.49	0.175
Henry's law constant	$1.98 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-3}$	$4.51 \times 10^{-4}$

### 2.2.5 การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม [1]

PAHs เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง ทั้งทางธรรมชาติ เช่น การซึมของน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันดิบใต้ดิน ทำให้ PAHs ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติและดิน ไฟไหม้ป่า ภูเขาไฟระเบิด และจากการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญ คือ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งนับว่าเป็นกิจกรรมที่สำคัญที่ปล่อย PAHs เข้าสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันรถยนต์นับเป็นแหล่งกำเนิด PAHs เข้าสู่สิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ปริมาณ PAHs ที่ปล่อยออกมาขึ้นกับปัจจัยหลัก คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ และการปล่อยน้ำเสียที่มีสาร PAHs ปนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ PAHs เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

#### 2.2.5.1 การสูญเสียและการคงสภาพ (Loss and Persistence)

การแตกสลาย (Degradation) ของสาร PAHs ในอากาศส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง (Photooxidation) กับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl), อัลคอกซิล (Alkoxy), และ เพอรอกซิล (Peroxy) ทั้งปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีความสำคัญที่สุด การแตกสลายของ Anthracene, Benz[a]anthracene และ Fluoranthene ในอากาศเป็นปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) การแตกสลายของสาร PAHs ในอากาศที่มี

การศึกษาสารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ยกเว้น Naphthalene และ Fluorine ที่มีค่าครึ่งชีวิต 29.6 และ 68.1 ชั่วโมง ตามลำดับ

การแตกสลายของสาร PAHs ในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดิน เกิดจากปฏิกิริยาแตกสลายด้วยน้ำ การย่อยสลายโดยชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Biodegradation) และการแตกสลายโดยแสง (Photolysis) ค่าครึ่งชีวิตของสาร PAHs จำนวน 13 สารแสดงในตารางที่

### 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าครึ่งชีวิตของ PAHs ในสิ่งแวดล้อม [18]

สิ่งแวดล้อม	ค่าครึ่งชีวิต	คำอธิบาย
<b>Pyrene</b>		
อากาศ	0.879 ชั่วโมง – 8.7 ชั่วโมง	ค่าครึ่งชีวิตของ Pyrene ในอากาศคำนวณจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง (Photooxidation)
น้ำผิวดิน	3 ชั่วโมง – 300 ชั่วโมง (12.5 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Pyrene ในน้ำผิวดินคำนวณจากปฏิกิริยาแตกสลายด้วยแสง (Photolysis)
น้ำใต้ดิน	590 ชั่วโมง – 4, 896 ชั่วโมง (24.6 วัน) (204 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Pyrene ในน้ำใต้ดินคำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน
ดิน	295 ชั่วโมง – 2, 448 ชั่วโมง (12.3 วัน) (102 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Pyrene ในดินคำนวณจากการศึกษาในคอลัมน์ดินแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Soil Column Test)

ตารางที่ 2.3 ค่าครึ่งชีวิตของ PAHs ในสิ่งแวดล้อม (ต่อ) [18]

สิ่งแวดล้อม	ค่าครึ่งชีวิต	คำอธิบาย
<b>Naphthalene</b>		
อากาศ	2.96 ชั่วโมง – 29.6 ชั่วโมง	ค่าครึ่งชีวิตของ Naphthalene ในอากาศ คำนวณจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง
น้ำผิวดิน	12 ชั่วโมง – 480 ชั่วโมง (20 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Naphthalene ในน้ำผิวดิน คำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดย ชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน
น้ำใต้ดิน	24 ชั่วโมง – 6,192 ชั่วโมง (258 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Naphthalene ในน้ำใต้ดิน คำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดย ชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ ออกซิเจน
ดิน	398 ชั่วโมง – 1,152 ชั่วโมง (16.6 วัน) (48 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Naphthalene ในดิน คำนวณจากการศึกษาโดยวิธี Soil Die- Away Test แบบใช้ออกซิเจน
<b>Phenanthrene</b>		
อากาศ	2.01 ชั่วโมง – 20.1 ชั่วโมง	ค่าครึ่งชีวิตของ Phenanthrene ในอากาศ คำนวณจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง
น้ำผิวดิน	3 ชั่วโมง – 25 ชั่วโมง	ค่าครึ่งชีวิตของ Phenanthrene ในน้ำผิวดิน คำนวณจากปฏิกิริยาแตกสลายด้วย แสง
น้ำใต้ดิน	768 ชั่วโมง – 9,600 ชั่วโมง (32 วัน) (1.10 ปี)	ค่าครึ่งชีวิตของ Phenanthrene ในน้ำใต้ดิน คำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดย ชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน
ดิน	384 ชั่วโมง – 4,800 ชั่วโมง (16 วัน) (200 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ Phenanthrene ในดิน คำนวณจากการศึกษาโดยวิธี Soil Die- Away Test แบบใช้ออกซิเจน

## 2.2.6 การเป็นสารก่อมะเร็ง [1]

PAHs แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการก่อมะเร็ง คือ กลุ่มที่ก่อมะเร็ง และ กลุ่มที่ไม่ก่อมะเร็ง จัดแยกกลุ่ม โดยใช้ข้อมูลที่แสดงศักยภาพของการก่อมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และเป็นที่น่าสังเกตว่าไม่มี PAHs ใดที่ International Agency for Research on Cancer (IARC) จัดเป็นสารก่อมะเร็งในคน (Group 1) แม้ว่า PAHs หลายสารเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารผสมที่ได้รับการยืนยันทางระบาดวิทยาว่าเป็นสาเหตุหรือมีส่วนทำให้เกิดมะเร็งในคน เช่น คาร์บอนหุรี, น้ำมันดิน, เเขม่า หรือจากท่อไอเสียรถยนต์ เนื่องจากการยากที่จะตรวจยืนยันปริมาณหรือความเข้มข้นของ PAHs แต่ละสารที่มนุษย์ได้รับจากสารผสมที่มนุษย์ได้รับจากสารผสมเหล่านี้ นอกจากนี้ยังมีสารก่อมะเร็งอื่นๆปะปนอยู่ในสารผสมดังกล่าวด้วย

ตารางที่ 2.4 การจัดกลุ่ม PAHs โดย International Agency for Research on Cancer [1], [4]

กลุ่มสาร	ประเภทของสาร PAHs
Group 2A	<p>สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน (Probable Carcinogenic to Humans) มี 3 สาร</p> <p>Benz[a]anthracene</p> <p>Benzo[a]pyrene</p> <p>Dibenz[a,h]anthracene</p>
Group 2B	<p>สารที่อาจก่อมะเร็งในคน (Possibly Carcinogenic to Humans) มี 11 สาร</p> <p>Benzo[b]fluoranthene      Benzo[j]fluoranthene</p> <p>Benzo[k]fluoranthene      Dibenzo[a,e]pyrene</p> <p>Dibenzo[a,h]pyrene      Dibenzo[a,l]pyrene</p> <p>Dibenz[a,l]pyrene      Dibenz[a,j]acridine</p> <p>Dibenz[a,h]acridine      Indeno[1,2,3-cd]pyrene</p> <p><b>Naphthalene</b></p>

ตารางที่ 2.4 การจัดกลุ่ม PAHs โดย International Agency for Research on Cancer (ต่อ) [1], [4]

กลุ่มสาร	ประเภทของสาร PAHs
Group 3	สารที่ไม่ก่อมะเร็งในคน (Unclassifiable as to Carcinogenic to Humans) มี 23 สาร
	Anthracene
	Benz[a]acridine
	Benz[c]acridine
	Benzo[gh]fluoranthene
	Benzo[a]fluorine
	Benzo[b]fluorine
	Benzo[c]fluorine
	Benzo[g,h,i]perylene
	Benzo[c]phenanthrene
	Benzo[e]pyrene
	Chrysene
	Coronene
	Cyclopental[c,d]pyrene
	Dibenao[a,e]fluoranthene
	Dibenzo[h,r,s,t]pentaphene
	Fluoranthene
	Fluorene
	Perylene
	<b>Phenanthrene</b>
	<b>Pyrene</b>
	Triphenylene

### 2.2.7 ผลของ PAHs ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม [4]

#### -สิ่งมีชีวิตในน้ำ

PAHs มีความเป็นพิษในสัตว์น้ำหลายสปีชีส์ เมื่อทำการทดลองภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต สมมติฐานที่ใช้อธิบายผลการทดลองดังกล่าว คือ พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ถูกดูดกลืนโดย โมเลกุลของ PAHs ถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของออกซิเจนทำให้โมเลกุลของออกซิเจนอยู่ในสภาพ ถูกกระตุ้นมีพลังงานสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้กับชีวโมเลกุลต่างๆเช่น กรดอะมิโนทำให้เกิด ความผิดปกติในเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การทำงานของอวัยวะต่างๆผิดปกติ และทำให้สัตว์ทดลองตายใน ที่สุด และความรุนแรงที่เกิดขึ้นในกรณีมากกว่าในสภาพที่ไม่มีแสงอัลตราไวโอเล็ตความเป็นพิษที่

เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้จากค่า  $LC_{50}$  ซึ่งลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับการศึกษาภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ ดังนั้นทำให้ทราบว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้ไพรินมีความเป็นพิษเพิ่มขึ้นใน Mysid Shrimp (*Mysidopsis bahia*) และหอยสองฝา (*Mulinia lateralis*)

-สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

PAHs มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำในสัตว์ทดลอง การได้รับ PAHs ในระยะเวลาสั้นมักไม่ทำให้เกิดความผิดปกติของทางร่างกายอย่างเด่นชัดหรือรุนแรง

แนฟทาลิน(พบได้ในลูกเหม็น) สามารถเข้าไปจับกับโมเลกุลของดีเอ็นเอ ปอด ยับยั้งกระบวนการหายใจที่ไม่โตคอนเดรีย เป็นพิษต่อระบบประสาท ระคายเคืองต่อผิวหนังและตา ก่อให้เกิดการแพ้แสง และเป็นสารก่อภูมิแพ้ที่อ่อน นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่างโครโมโซมคู่เหมือนมากขึ้น ยับยั้งการส่งสัญญาณผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ และลดระดับอิมมูโนโกลบูลินเอและอิมมูโนโกลบูลินจีในระบบภูมิคุ้มกัน ทั้งนี้ยังก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางเนื่องจากเม็ดเลือดแดงแตก และต่อกระเจก ความผิดปกติทั้ง 2 อย่างนี้เกิดได้ทั้งเฉียบพลันและเรื้อรัง มีรายงานการตายของคนที่ยกเลิกลูกเหม็นขนาด 5 กรัม ผลการชันสูตรร่างกายของผู้ตายพบว่าที่ปอดมีการกั่งของโลหิตและบวมน้ำที่ตับพร้อมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงของไขมันในเซลล์ตับ นอกจากนี้ยังมีรายงานการตายในเด็กอายุ 6 ปี ที่กินแนฟทาลินในขนาด 2 กรัม โดยคำนวณพบว่าปริมาณของแนฟทาลินที่ทำให้คนตายได้มีค่าเท่ากับ 71.4-214.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว โดยคิดจากน้ำหนักตัวโดยเฉลี่ย 70 กิโลกรัม [19]

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ PAHs นอกจากจะใช้เทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรีแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีอื่นๆอีก [20] เช่น

1. วิธี 6040B Closed-loop stripping GC/MS เป็นการใช้อนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon Filter) ดูดซับ PAHs จากน้ำตัวอย่าง จากนั้นสกัด PAHs ออกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เทคนิค GAS Chromatography/Mass Spectrometer (GC/MS)
2. วิธี 6410B Liquid- Liquid Extraction GC/MS เป็นการสกัด PAHs ออกจากน้ำตัวอย่างด้วยเมทิลีนคลอไรด์ 2 ครั้ง ที่ pH 2 และ 11 วิเคราะห์หาปริมาณ PAHs ในเมทิลีนคลอไรด์โดยใช้ GC/MS
3. วิธี 6440B Liquid- Liquid Chromatographic Method เป็นการสกัดน้ำตัวอย่างด้วยเมทิลีนคลอไรด์ จากนั้น Cleaned-up ด้วยคอลัมน์ที่บรรจุด้วยซิลิกาเจล วิเคราะห์ PAHs ด้วย HPLC

## 2.3 การดูดซับ (Adsorption) [21]

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพและเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการบำบัดน้ำเสียกระบวนการดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงสารที่มีขนาดเล็กจนถึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือกรองแบบธรรมดา ปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ” ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะเรียกว่า “ตัวดูดซับ”

การดูดซับจะมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อยและไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ

### 2.3.1 รูปแบบการดูดซับ [21], [22] แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. กระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ยึดติดกับผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆที่เรียกว่า “แรงแวนเดอร์วาลส์ที่อ่อน (Weak Van Der Waal's force)” และเรียกกระบวนการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากผิวตัวดูดซับเรียกว่า “การคายซับ (Desorption)” จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย ส่วนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น เรียกว่า “Multilayer” โดยแต่ละชั้นจะติดกันเป็นชั้นๆ โดยจำนวนของชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย [21]

นอกจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์แล้ว ยังมีกระบวนการดูดซับที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) ซึ่งอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้วและ โมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว [22] โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation Effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม
- ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากการกระจาย (Dispersion Effect) ซึ่งเห็นได้จากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อน ๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์
- ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

2. กระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) [21] โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีโดยพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์และยากต่อการเกิด Desorption การดูดซับทางเคมีนั้นแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ คือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่เป็นชั้นเดียวหรือมีความหนาแน่นของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว เรียกว่า “Monolayer” และไม่สามารถที่จะผันกลับได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ

การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในวัฏภาคก๊าซหรือของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งซึ่งเป็นตัวดูดซับซึ่งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซได้

ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

### 2.3.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี [22] คือ

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดพันธะได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา

4. การดูดซับทางกายภาพจะมีการเกิดขึ้นหลายโมเลกุลส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดขึ้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของการดูดซับทางเคมีก็ได้

5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นเดียวกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

### 2.3.3 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) [21] แบ่งได้ 3 ประเภท

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแอมมอนด์ (Activated Silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นผ่านที่ผ่านกระตุ้นให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 450-1500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-10000 Å ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากพืชและสัตว์จะมีแร่ธาตุที่อันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน

3. ประเภทของสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่สามารถปรับสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า คือ สามารถปรับสภาพใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [6], [21]

#### 1. สมบัติของตัวดูดซับ [21]

พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมีมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่แต่รูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

#### 2. สมบัติของตัวถูกดูดซับ

1) ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่เกิดการดูดซับ

2) น้ำหนักและขนาดโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นแบบโซ่กิ่ง (Branched Chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นแบบโซ่ตรง (Straight Chain)

### 3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การดูดซับสารขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น หาก pH ลดลง จะส่งผลก่อให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนต่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

### 4. อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ของตัวถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

### 5. เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสต้องเหมาะสมพอที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติก่อนนำไปใช้จริง

### 6. การปั่นกววน (Mixing speed) [6]

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัด อัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งตามแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำที่มีการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของแผ่นฟิล์มลดลง ส่งผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

## 2.3.5 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) [21], [22]

### 2.3.5.1 กลไกการดูดซับ [21] แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

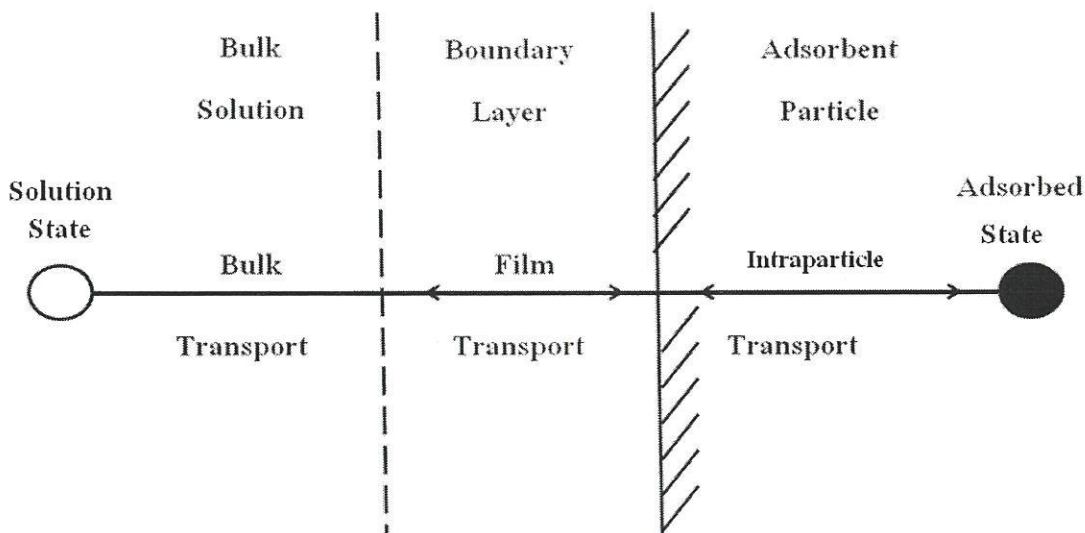
### 2.3.5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) [22]

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจึงทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มด้วยสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวอยู่สู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดการดูดซับเช่นเดียวกัน

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Pore Diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดการดูดซับเช่นเดียวกัน



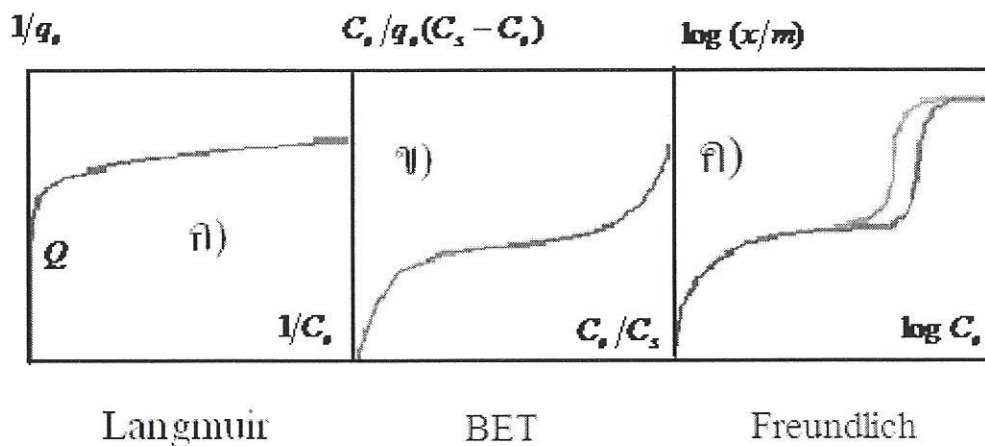
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [22]

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.3.6 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) [21-22]

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับตัวถูกละลายโดยใช้ตัวดูดซับ สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับและปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium State) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด และโดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่อุณหภูมิกงที่เมื่อถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล ปริมาณที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับความเข้มข้นที่จุดสมดุล ในสารละลายที่อุณหภูมิกงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับมี 3 แบบ ดังแสดงในรูป 2.13 ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ 2.13 ก. เป็นระบบที่เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียวส่วนที่เหลือเป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน [23]

หลายทฤษฎีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดง ไอโซเทอมการดูดซับ ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีไหนที่จะอธิบายสมการการดูดซับได้อย่างถูกต้อง ในที่นี้จะนำเสนอสมการทั่วไปสำหรับไอโซเทอมการดูดซับ ดังนี้

### 2.3.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

1. เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนย้ายอิสระบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้
3. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการ

$$q = \frac{K_A q_m C}{1 + K_A C} \quad \dots 2.1$$

เมื่อ  $q$  = ปริมาณของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่จุดสมดุล

$q_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับเมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว แบบสมบูรณ์

$C$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล

$K_A$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{q_m K_A} + \frac{C}{q_m} \quad \dots 2.2$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_A C} + \frac{1}{q_m} \quad \dots 2.3$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก. และสามารถหาค่าคงที่  $K_A$  และ  $q_m$  ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ

### 2.3.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บีทีอี (Brunauer-Emmett-Teller, BET, Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบบีทีอีพัฒนาจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น โดยสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
2. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
3. ทุกโมเลกุลในชั้นนี้พลังงานของการดูดซับเท่ากัน
4. ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนการดูดซับชั้นต่อไป

สมการไอโซเทอมแบบบีทีอี แสดงดังสมการ

$$q_e = \frac{QBC_e}{(C_s - C_e)(1 + (B-1)(C_e/C_s))} \quad \dots 2.4$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ

$Q$  = ปริมาณตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล

$C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e(C_s - C_e)} = \frac{1}{QB} + \frac{C_e(B-1)}{QBC_s} \quad \dots 2.5$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e(C_s - C_e)$  กับ  $C_e/C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B-1)/QB$  และจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/QB$  กราฟสมการการดูดซับแบบบีทีอีแสดงดังรูปที่ 2.13 ข.

### 2.3.6.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว

สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชแสดงในสมการ

$$q = K_F C^{1/n} \quad \dots 2.6$$

เมื่อ  $q$  = ปริมาณของตัวถูกละลายด้วยตัวดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$C$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล

$K_F, n$  = ค่าคงที่ของระบบ ( $n > 1$ )

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad \dots 2.7$$

พลอตกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ค. และ ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี

สมการ Freundlich มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับการละลายที่เจือจางปกติจะใช้กับการดูดซับสิ่งเจือปนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์

### 2.4 สเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Spectrofluorometer) [24]

เครื่อง Fluorotrometer ชนิดนี้ จะใช้ Excitation Monochromator (อุปกรณ์ซึ่งภายในประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำหรับการกระจายความยาวคลื่นแสงออก ซึ่งตรงกันข้ามกับตัวกรอง) แทน Excitation Filter และ Emission Monochromator แทน Emission Filter และจะทำการวัดโดยการเปลี่ยน Fixed Slit บน Monochromator ประโยชน์ของเครื่อง Spectrofluorometer คือ สามารถเลือกการใช้งานได้ที่ความยาวคลื่นหลายค่า การทำงานจึงสามารถตรวจสอบองค์ประกอบได้ในหลายความยาวคลื่น แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการทำงานมากกว่า Filter Fluorometer และมีความไวและความจำเพาะระดับปานกลางเท่านั้น

Spectrofluorometer ที่มีความไวที่เหมาะสมและจำเพาะเจาะจงจะต้องใช้เครื่อง Spectrofluorometer ชนิดสำหรับการวิจัย (Research-grade) เท่านั้น แล้วก็ดังเช่นเครื่องมือทั่วไปที่มี Monochromator จึงทำให้เครื่อง Spectrophotometer มีความต่อเนื่องในการทำงาน และด้วยการที่มี slit ที่หลากหลาย ทำให้มีช่วงความยาวคลื่นในการใช้งานกว้าง(200-1000 นาโนเมตร) นอกจากนี้ ในเครื่องบางรุ่นอาจมี Excitation Monochromator หรือ Emission Monochromator เป็นแบบคู่(Dual) ซึ่งจะช่วยให้มีความไวมากขึ้น และลดการเบี่ยงเบนของแสงได้ดีขึ้น นอกจากนี้ Spectrofluorometer ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้อาจจากการวัดเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลโดยทันทีได้ด้วย

ฟลูออเรสเซน หรือการวาวแสง เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของอะตอมและโมเลกุล ซึ่งเป็นความสามารถของโมเลกุลในการดูดซับพลังงานแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่ง และจะปล่อยพลังงานแสงอีกค่าหนึ่งออกมาทันทีซึ่งโดยทั่วไปความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจะยาวกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้กระตุ้น ในสารประกอบแต่ละชนิดนั้น การวาวแสงจะมีคุณลักษณะของความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น (ความยาวคลื่นของแสงที่สารนั้นดูดซับ) และคุณลักษณะของความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (ความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อ โมเลกุลผ่อนคลายตัวและกลับเข้าสู่สภาวะพื้น) แตกต่างกัน ซึ่งความยาวคลื่นทั้ง 2 ค่านี้ ก็คือคุณสมบัติการวาวแสงของสารประกอบนั่นเอง

#### 2.4.1 Spectrofluorometry มีข้อดีเหนือกว่าวิธีการดูดกลืนแสง คือ

1. วิธีการดูดกลืนแสงต้องอาศัยเครื่องวัดสัญญาณที่สามารถบอกความแตกต่างของสัญญาณ 2 สัญญาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยได้ และสัญญาณที่เข้ามาต้องมีความเข้มมากพอ แต่ Fluorimetry และ Phosphorimetry แม้แสงที่ออกมามีความเข้มน้อยก็สามารถวัดได้ ซึ่งมีความไวมากกว่าวิธีการวัดการดูดกลืนแสงถึง  $10^3$  เท่า การเพิ่ม  $P_0$  จะช่วยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์
2. มี Selectivity มากกว่า เนื่องจากมีสารจำนวนน้อยที่ให้ Fluorescence หรือ Phosphorescence ดังนั้นจึงถูกรบกวนได้น้อยกว่า
3. การที่ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นสาร และเลือกความยาวคลื่นที่จะวัดความเข้มแสง ซึ่งจะช่วยเพิ่ม Selectivity และลดการรบกวนได้

#### 2.4.2 การประยุกต์วิธี Fluorometry ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

- หาปริมาณของสารจำพวก Aromatic , Highly Unsaturated ที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและทางชีวภาพ
- เป็นเครื่องตรวจวัด (Detector) ให้กับเทคนิคอื่นๆ เช่น HPLC , Electrophoresis
- ใช้ในงาน Environmental Remote Sensing (Hydrologic , Aquatic , and Atmospheric)
- ศึกษาได้ดีในช่วง Sub-part per Million ซึ่งต่ำกว่า Detection Limit ของวิธีวัดการดูดกลืนแสง

#### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จะเห็นได้ว่าการปนเปื้อนของ PAHs ก่อให้เกิดปัญหาและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และในการนำถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้ทางสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องที่มีผู้ให้ความสนใจศึกษาค้นคว้าและทำการวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ดังรายงานการวิจัยที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

Zongqiang Gong และคณะ (2006) [25] ศึกษาการดูดซับ PAHs ในน้ำมันพืชที่ใช้สกัด PAHs ออกจากดิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ โดยจะศึกษาน้ำมันพืชที่เป็นตัวสกัดในดิน 4 ชนิด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ PAHs ออกจากน้ำมันพืช แบบ Batch Adsorption และแบบการดูดซับในคอลัมน์ พบว่าการดูดซับ PAHs แบบ Batch Adsorption มีประสิทธิภาพดีกว่าการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอต่อการดูดซับน้ำมันในคอลัมน์ ในขณะที่ Batch System มีพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับน้ำมันพืชมากกว่าและเร็วกว่า ซึ่ง Batch Adsorption มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PAHs ออกได้มากกว่า 90% ส่วนการดูดซับโดยใช้คอลัมน์จะได้ผลการทดลองอยู่ในช่วง 68.1–93.5% ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอต่อการดูดซับน้ำมันในคอลัมน์ ในขณะที่ Batch System มีพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับน้ำมันพืชมากกว่า

Mastral, Garcia และ Callen (2002) [26] ศึกษาการดูดซับ PAHs ที่ปล่อยจากเตาเผาถ่าน โดยจะศึกษา PAHs 4 ชนิด คือ อะซีแนฟทีน (Acenaphthene: Ac), ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene: Phe), ฟลูออรีน (Fluorene: Fu) และ แอนทราซีน (Anthracene: An) ซึ่งต่างมีจำนวนวงอะโรมาติก 3 วง เท่ากัน สำหรับตัวดูดซับที่ใช้เป็นคาร์บอนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 16 ชนิด พบว่าปริมาณของ Micropore เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการดูดซับและ PAHs ที่กลายเป็นไอได้ดีที่อุณหภูมิต่ำจะถูกดูดซับได้ดี ดังนั้น Ac มีจุดเดือดต่ำกว่า Fu, Phe และ An ตามลำดับ จึงสามารถถูกดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวได้เร็วที่สุด ซึ่งสามารถบอกถึงอัตราเร็วของการดูดซับได้ และเมื่อแปรค่าความเข้มข้นของ

PAHs พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ An และ Phe สูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย โดยการดูดซับช่วงแรกจะเกิดขึ้นที่รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับหลายชั้น ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ส่วนที่ไม่ใช่รูพรุนขนาดเล็ก (Non-Micropore) เช่น รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore), รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) และพื้นผิวด้านนอก (External Surface) ซึ่งต่างจาก Ac และ Fu ที่ความเข้มข้นสูงถึงระดับหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับจะคงที่ไม่เพิ่มตามความเข้มข้น เนื่องจากไอระเหยของ Ac และ Fu จะไม่เกิดการดูดซับแบบหลายชั้นในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

Mastral, Garcia และ Callen (2002) [26] ศึกษาความสามารถในการดูดซับ PAHs ที่มีจำนวนวงอะโรมาติกแตกต่างกัน คือ 2, 3 และ 4 วง ที่ได้จากเตาเผา โดยศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ของคาร์บอนที่ใช้ตัวดูดซับ ดังนั้นปริมาณรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) รูพรุนขนาดเล็กที่แคบ (Narrow Micropore), รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และตำแหน่งที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยา (Free Active Site) สำหรับ PAHs ที่เลือกทำการศึกษาคือ แนฟทาลิน (Nap: 2 วง) ฟีนแอนทรีน (Phe: 3 วง) และ ไพรีน (Pyr: 4 วง) พบว่าความสามารถในการดูดซับ PAHs แต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและอุณหภูมิที่ระเหยกลายเป็นไอ เมื่อใช้ตัวดูดซับเดียวกัน สามารถดูดซับแนฟทาลินได้ 60% โดยจะถูกดูดซับได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นกับปริมาตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ขนาดเล็กที่แคบ ในขณะที่ฟีนแอนทรีนจะดูดซับได้ 86% ขึ้นอยู่กับรูพรุนขนาดเล็ก และรูพรุนขนาดกลาง ส่วนไพรีนจะถูกดูดซับได้ถึง 88% โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลาง โดยสารที่สามารถดูดซับ PAHs สูงขึ้น จะสามารถดูดซับได้เพิ่มขึ้นยกเว้นแนฟทาลินที่จะไม่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น

Luis และคณะ (1993) [5] ศึกษาการวิเคราะห์แอนทราซีนที่ละลายอยู่น้อยมากในน้ำ ตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ น้ำจากแหล่งธรรมชาติ น้ำประปา และน้ำทะเล โดยใช้ Octadecyl (C-18) ที่มีซิลิกาเจลเป็น โครงสร้างหลัก และให้ความยาวคลื่น  $\lambda_{ex} = 357 \text{ nm}$  และ  $\lambda_{em} = 405 \text{ nm}$  จากนั้นจึงนำซิลิกาเจลที่ผ่านการดูดซับแอนทราซีนมาบรรจุในเซลล์ควอตซ์แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง จากการศึกษาพบว่า วิธีการดังกล่าวสามารถวิเคราะห์สารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ ซึ่งอยู่ในช่วงความเข้มข้น  $50\text{-}10,000 \text{ ng/dm}^3$  หรือ  $0.00005\text{-}0.01 \text{ ppm}$  และเป็นวิธีการปฏิบัติสามารถทำได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สาร PAHs บางชนิดได้ เช่น ฟีนแอนทรีนและไพรีน ที่ความเข้มข้นมากกว่า  $5,000 \text{ ng/dm}^3$  แต่ไม่สามารถวิเคราะห์แนฟทาลินได้ เนื่องจากแนฟทาลินจะไม่ยึดเกาะบนซิลิกาเจลจึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

ชนาภรณ์ เรืองศรี และภควันต์ กาญจนพาที (2002) [16] ศึกษาการประยุกต์ใช้เหน็บเปิดในการบำบัดสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกคาร์บอน (PAHs) ในน้ำซึ่ง ได้แก่ แนฟทาลิน, ฟีนแอนทรีน

และไพรีน โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ และตรวจวัดด้วยฟลูออโรเมตริกเทคนิค ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ที่เหมาะสม เท่ากับ 7 โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้แก่ แนฟทาลีน, ฟีนแอนทริน และไพรีน เป็น 83.00%, 66.0% และ 64.0% ตามลำดับ ปริมาณแห้งเปิดที่เหมาะสม คือ 5 กรัม และขนาดที่เหมาะสม คือ 100 mesh โดยเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม คือ 120 นาที ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ PAHs ด้วยแห้งเปิด โดยศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิช พบว่า แห้งเปิดสามารถดูดซับแนฟทาลีน ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นฟีนแอนทริน และไพรีน ตามลำดับ

คุชฎี มั่นภักดี และคณะ (2003) [27] ศึกษาการบำบัด PAHs ได้แก่ แนฟทาลีน, ฟีนแอนทริน และไพรีนออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยพอลิเมอร์บีต้าไซโคลเด็กซ์ทริน จากการศึกษพบว่า พอลิเมอร์บีต้าไซโคลเด็กซ์ทรินที่สังเคราะห์ได้จากอีพิคลอโรไฮดรินและบีต้าไซโคลเด็กซ์ทรินในสัดส่วนโดยโมลเท่ากับ 10 สามารถดูดซับแนฟทาลีน, ฟีนแอนทริน และไพรีนได้เท่ากับ 78.87%, 90.88% และ 64.42% ตามลำดับ โดยใช้พอลิเมอร์บีต้าไซโคลเด็กซ์ทรินเท่ากับ 15-20 มิลลิกรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิลิตร เวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม คือ 60-180 นาที ทั้งนี้ พีเอชของสารละลายแนฟทาลีน, ฟีนแอนทริน และไพรีน ไม่มีผลต่อการดูดซับ และพอลิเมอร์บีต้าไซโคลเด็กซ์ทรินที่ผ่านการดูดซับแล้วจะมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ รุ่น FP-6300 บริษัท Jasco ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (FT-IR) รุ่น Spectrum-GX บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) รุ่น 1455 VP บริษัท EDAX ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องเขย่า รุ่น A007452 บริษัท Gallenkamp
5. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument
6. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด รุ่น TC-254 บริษัท Denver Instrument
7. ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะของแข็ง ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์
8. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
9. ชุดเครื่องกรองแบบสุญญากาศ
10. แผ่นพาราฟิน
11. กระดาษกรองเบอร์ 2 ยี่ห้อ Advantec

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แนนฟาทีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
2. ฟีนานทริน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
3. ไพรีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
4. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) บริษัท APEX
5. โปแทสเซียมโบรไมด์ บริษัท Marck
6. อะซิโตน เกรดการค้า บริษัท Merck

7. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% w/v
8. สารละลายกรดซัลฟิวริก 10% w/w
9. น้ำกลั่น

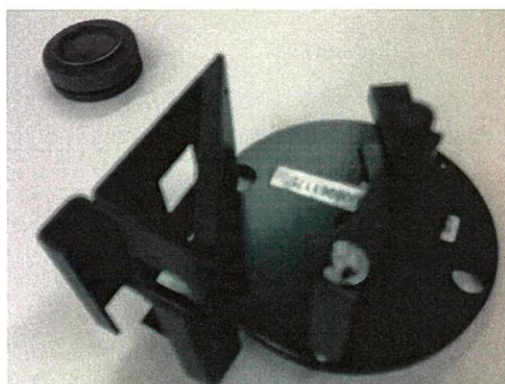
### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเนฟทาลีน, พีแนนทรีน และไพรีน เข้มข้น 100 ppm

ชั่งเนฟทาลีน, พีแนนทรีน และไพรีน อย่างละ 100 mg ละลายด้วยอะซิโตนปริมาตร 40 mL จนผง PAHs ละลายหมด จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการดูดกลืนแสงและคายแสงของ PAHs [27]

PAHs	Excitation wavelength (nm)	Emission wavelength (nm)
เนฟทาลีน	232	360
พีแนนทรีน	250	363
ไพรีน	335	372



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ที่สถานะของแข็ง

### 3.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแนฟทาลีน, ฟิแนนทรีน, ไพรีน ในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.3.2.1 ศึกษาเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ

1. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 1 g ลงในน้ำเสียสังเคราะห์แนฟทาลีนเข้มข้น 1 ppm ที่ปริมาตร 100 mL แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 10 นาที
2. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก
3. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ในสถานะของแข็ง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น โดยเปลี่ยนเวลาจาก 10 นาที เป็น 20, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนจากสารละลายแนฟทาลีนเป็นฟิแนนทรีน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ครั้ง
7. ในการทดลองแต่ละครั้ง จะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมต่างจากชุดทดลองตรงที่ไม่ต้องสารละลาย PAHs

#### 3.3.2.2 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 1.0 g ลงในน้ำเสียสังเคราะห์แนฟทาลีนเข้มข้น 1 ppm ที่ปริมาตร 100 mL แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
2. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก
3. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ในสถานะของแข็ง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์ จาก 1.0 g เป็น 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 g ตามลำดับ

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนจากสารละลายเนฟทาลินเป็นฟิแนน-ทริน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ครั้ง
7. ในการทดลองแต่ละครั้ง จะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมต่างจากชุดทดลองตรงที่ไม่ต้องสารละลาย PAHs

### 3.3.2.3 ศึกษา pH ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. เติมน้ำมันก๊าด ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เนฟทาลินเข้มข้น 1 ppm ที่ปริมาตร 100 mL ที่มี pH เป็น 3 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับ pH จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
2. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกน้ำมันก๊าดออก
3. นำน้ำมันก๊าดที่แยกออกมาวิเคราะห์ในสถานะของแข็ง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น โดยเปลี่ยนค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการดูดซับจาก 3 เป็น 7 และ 11 ตามลำดับ
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนจากสารละลายเนฟทาลินเป็นฟิแนน-ทริน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ครั้ง
7. ในการทดลองแต่ละครั้ง จะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมต่างจากชุดทดลองตรงที่ไม่ต้องสารละลาย PAHs

### 3.3.2.4 ศึกษาความเข้มข้นของ PAHs ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. เติมน้ำมันก๊าด ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เนฟทาลินเข้มข้น 0.10 ppm ที่ปริมาตร 100 mL ที่มี pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.3 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
2. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกน้ำมันก๊าดออก

3. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ในสถานะของแข็ง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์จาก 0.10 ppm เป็น 0.50, 1.00, 5.00, 10.00 และ 15.00 ppm ตามลำดับ
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนจากสารละลายแนฟทาลินเป็นฟิแนนทริน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ครั้ง
7. ในการทดลองแต่ละครั้ง จะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมต่างจากชุดทดลองตรงที่ไม่ต้องเติมสารละลาย PAHs

### 3.3.3 การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานแนฟทาลิน เข้มข้น 0, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.00 ppm
2. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์แนฟทาลินที่มีปริมาตร 100 mL ในแต่ละความเข้มข้น แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
3. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก
4. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ในสถานะของแข็ง
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนจากแนฟทาลินเป็นฟิแนนทริน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 4 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการหา % RSD

### 3.3.4 การศึกษาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit)

1. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปราศจากสารละลาย PAHs ปริมาตร 100 mL แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1

2. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เนฟทาลินที่มีปริมาตร 100 mL ในแต่ละความเข้มข้น แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
3. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก
4. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ในสถานะของแข็ง
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 9 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการหาขีดความสามารถในการวิเคราะห์

### 3.3.5 การตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์

1. เติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.2 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เนฟทาลินเข้มข้น 1 ppm ที่ปริมาตร 100 mL ที่มี pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.3 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2.1
2. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก
3. นำถ่านกัมมันต์ที่แยกออกมาพร้อมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรด (FT-IR)
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนจากสารละลายเนฟทาลินเป็นพีแนนทริน และไพรีน ตามลำดับ
6. ทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมต่างจากชุดทดลองตรงที่ไม่ต้องเติมสารละลาย PAHs
7. นอกจากนี้ นำสาร PAHs ในสถานะของแข็งออกมาพร้อมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรด (FT-IR) เพื่อเปรียบเทียบ

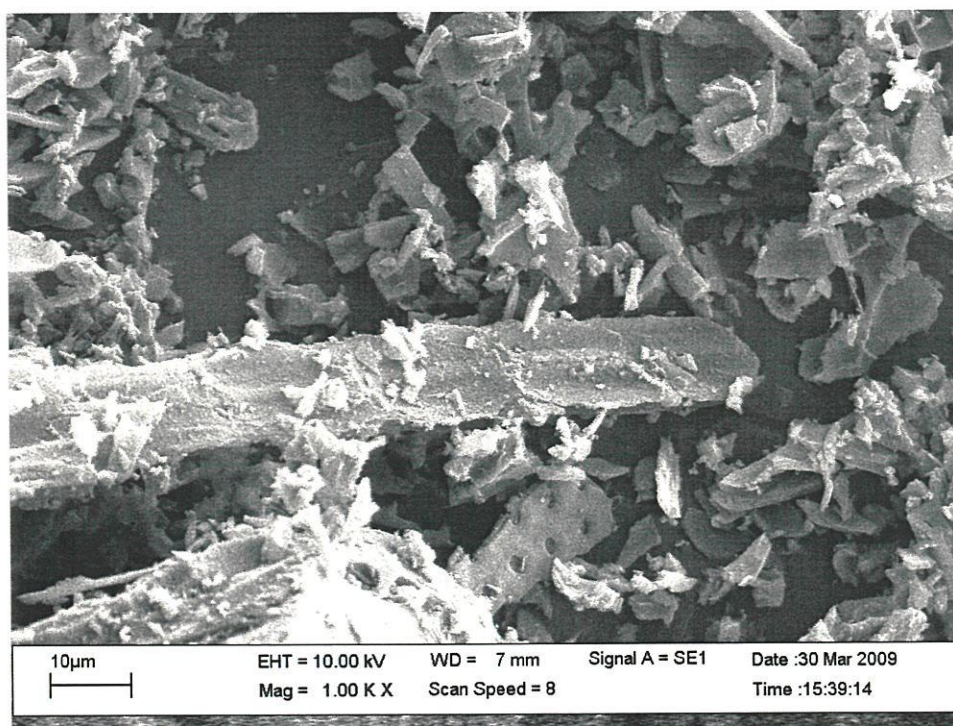
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

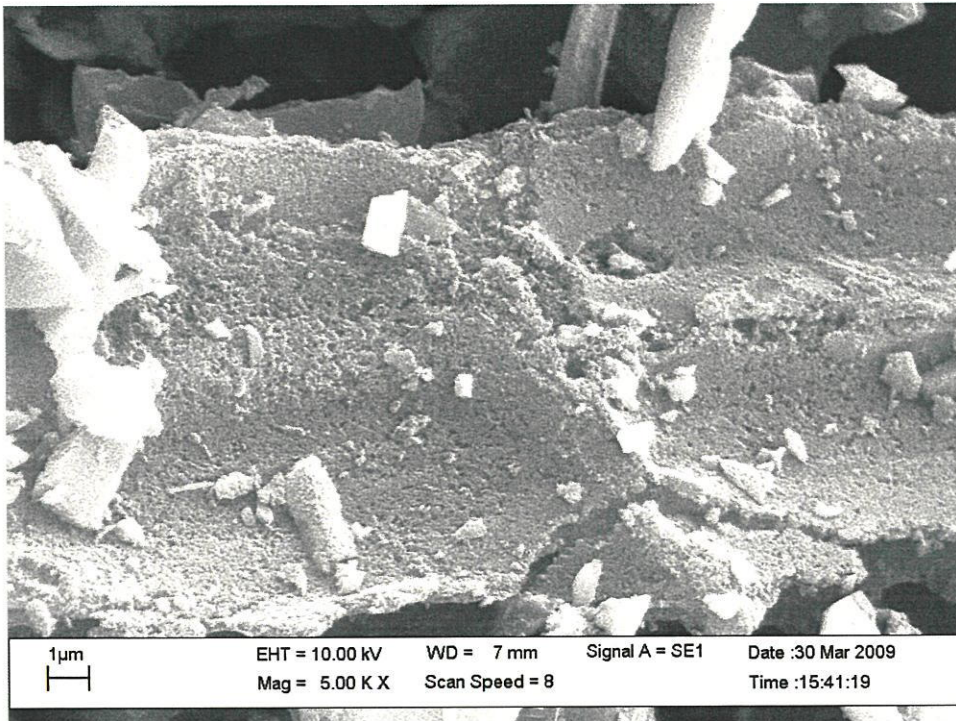
การนำเสนอโครงการพิเศษ เรื่อง การวิเคราะห์สาร PAHs ที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเพิ่มความเข้มข้นด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ที่สถานะของแข็งนี้ มีขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้น โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้น ได้แก่ เวลาสัมผัส, ปริมาณถ่านกัมมันต์, pH และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%RSD) ขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit) รวมทั้งการตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการศึกษาเป็นดังนี้

#### 4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

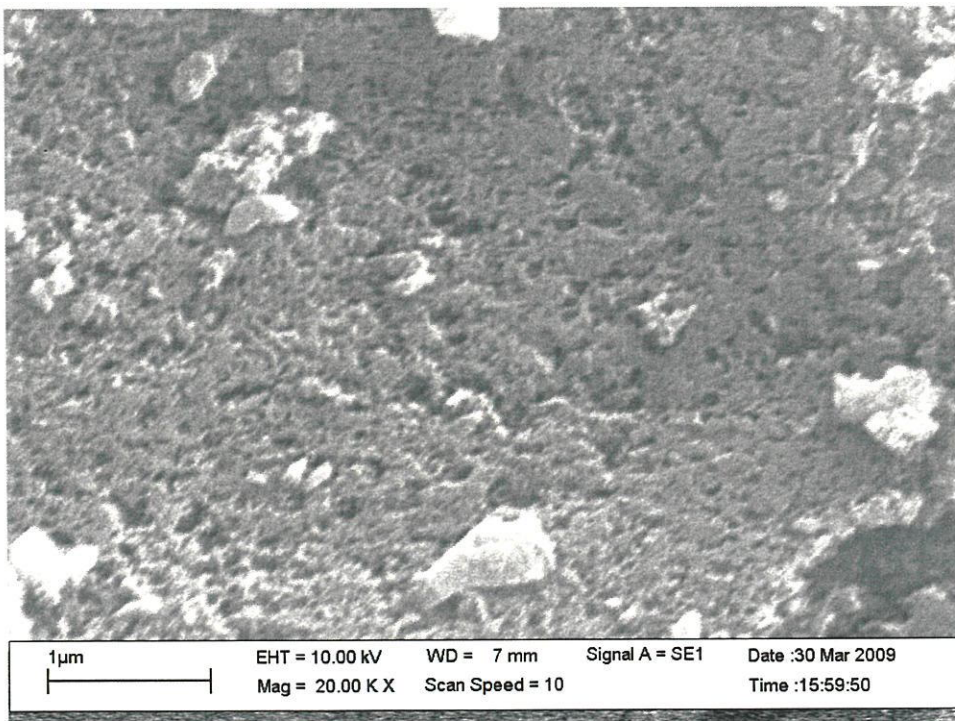
จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 จนถึง 20,000 เท่า ได้ผลดังรูป 4.1-4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



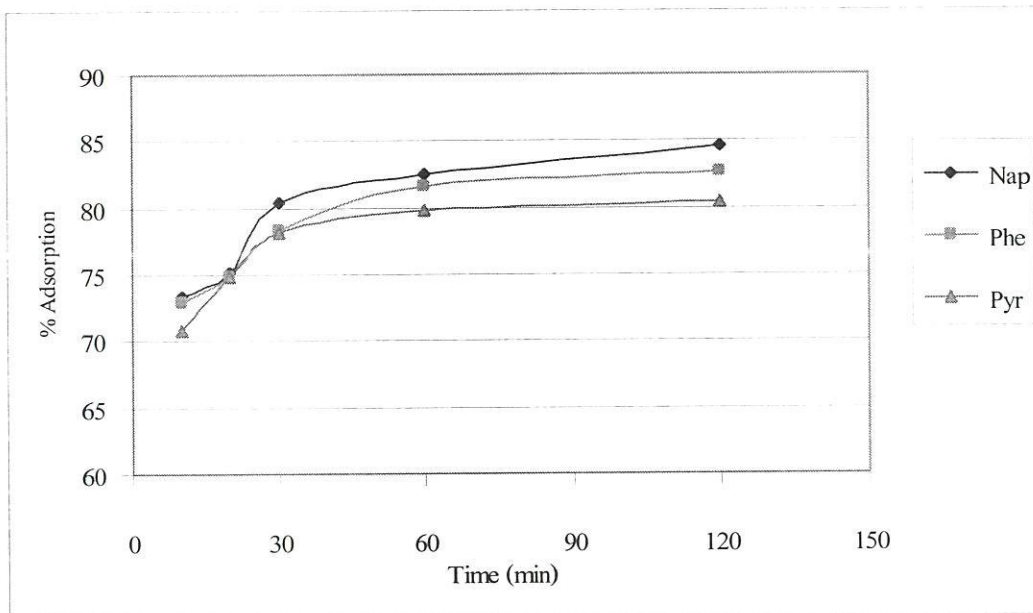
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะเห็นพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก จึงมีความเหมาะสมที่จะดูดซับสารละลายต่างๆที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย แต่การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่มักจะเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งเป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับจึงต้องใช้เวลาพอสมควร

## 4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์

### 4.2.1 ศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ

ในการศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน ที่เวลา 10, 20, 30, 60, และ 120 นาที โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเพิ่มความเข้มข้น พบว่า เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน แตกต่างกันไป ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ของแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

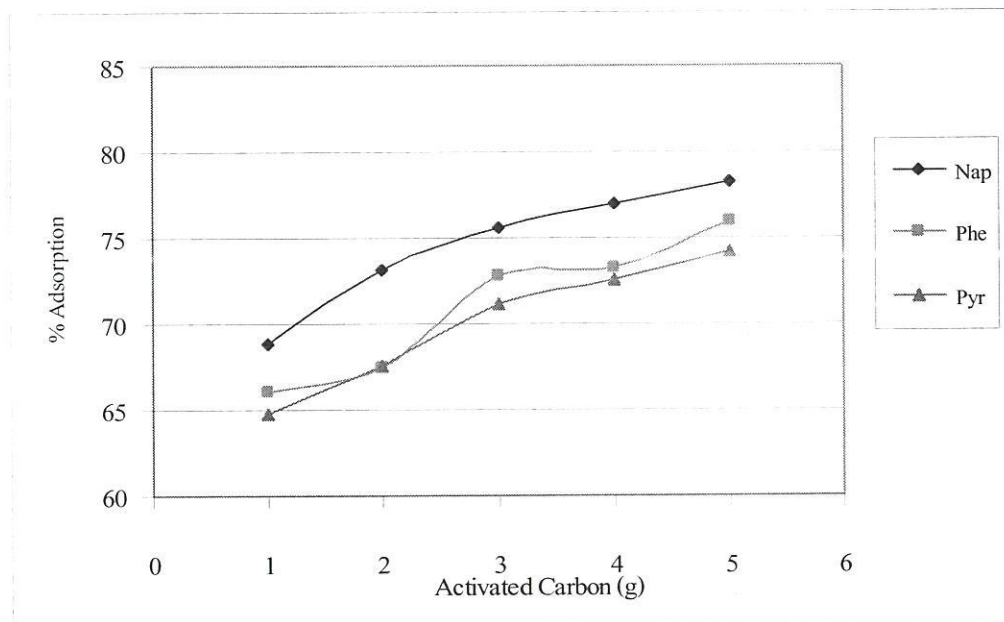
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อัตราการเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับสูงสุดของแนฟทา ลิน, ฟีนานทริน และไพรีนจะอยู่ในช่วง 30 นาทีแรก โดยเมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพของการ เพิ่มความเข้มข้น โดยใช้ถ่านกัมมันต์ของแนฟทาลินจะสามารถดูดซับได้ 80.45% ,ฟีนานทรินจะ สามารถดูดซับได้ 78.35% และไพรีนจะสามารถดูดซับได้ 78.08% โดยอัตราการเพิ่มนั้นจะเป็นไป อย่างช้าๆ จนถึง 120 นาที เปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ ดังนั้นจึงถือว่าเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีนอยู่ที่ 30 นาที สังเกตได้ว่า

อัตราการเพิ่มความเข้มข้นของไพรีนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเกือบคงที่ เนื่องจากขนาดของโมเลกุลที่ใหญ่กว่าเนฟทาลินและฟีแนนทรีน จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปเกาะติดกับถ่านกัมมันต์นั้นเป็นไปได้ยากกว่า

ดังนั้นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีน ที่ความเข้มข้น 1 ppm ปริมาตร 100 ml คือ 30 นาที

#### 4.2.2 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ

ในการศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีน เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์แบบผง ปริมาณ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 g เป็นตัวดูดซับ พบว่า ปริมาณถ่านกัมมันต์มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับของเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีน ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ของเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm โดยมีเวลาสัมผัส 30 นาที ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ

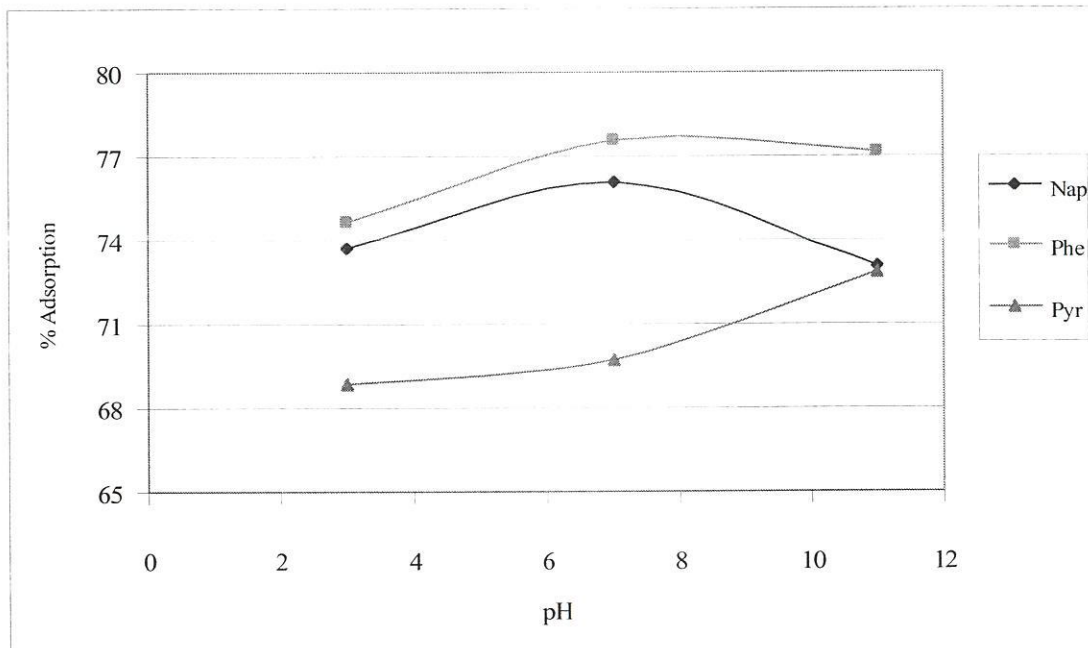
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของสารทั้ง 3 ชนิด ก็จะเพิ่มสูงขึ้น โดยเนฟทาลินจะมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับมากที่สุด และรองลงมาเป็นฟีแนนทรีน และไพรีน ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีนมีดังนี้ 75.62%, 72.84% และ 71.12% ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าเนฟทาลิน, ฟีแนนทรีน และไพรีนจะมีค่า

เปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 3 g ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่ลดลงจนเกือบขนานกับแกน x

ดังนั้นปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสารทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 1 ppm ปริมาตร 100 ml คือ 3 g

#### 4.2.3 ศึกษา pH ที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ

ในการศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับแนฟทาลีน, ฟีนานทริน และไพรีน จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับ pH ให้มีค่าเป็น 3, 7 และ 11 ซึ่งพบว่า pH ที่แตกต่างกันนั้น ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแนฟทาลีน, ฟีนานทริน และไพรีน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟที่แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แนฟทาลีน, ฟีนานทริน และไพรีน เข้มข้น 1 ppm โดยมีเวลาสัมผัส 30 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 กรัม ที่ pH ต่างๆ

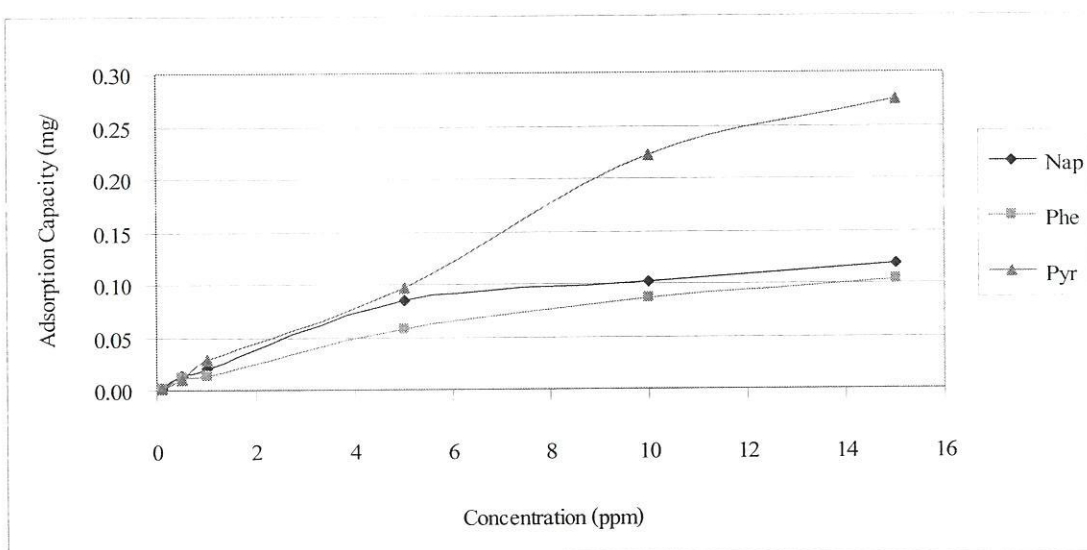
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ pH ต่างๆ ทั้งในสถานะที่เป็นกรด, กลาง และเบส จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน ทั้งแนฟทาลีน, ฟีนานทริน และไพรีน โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้น โดยการดูดซับจะอยู่ในช่วง 73-76% , 74-77% และ 68-73% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากแนฟทาลีน, ฟีนานทริน และไพรีน จัดเป็นสารกลุ่มอะโรมาติกที่ปราศจากหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยา และการเปลี่ยนแปลง pH ทั้งนี้ยังมีการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กทรอนิกส์แบบกลับไปที่กลับมา (Resonance) ภายในวงอะโรมาติกอีกด้วย ส่งผลให้การแตกตัวเป็นไอออนบวกหรือลบเปลี่ยนแปลงตามค่า pH นั้นเกิดขึ้นได้ยาก

ดังนั้นในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน ด้วยถ่านกัมมันต์จึงไม่จำเป็นต้องปรับค่า pH ให้เหมาะสมก่อนการดูดซับ โดยสามารถใช้ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเตรียมไว้ได้เลย ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์นั้นมีค่า pH ช่วง 7-8

#### 4.2.4 ศึกษาความเข้มข้นของ PAHs ที่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 และ 15 ppm พบว่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีผลต่อปริมาณของ PAHs ที่ดูดซับ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับในหน่วย mg/g ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัมที่ดูดซับแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีน ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยไม่ปรับค่า pH

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ปริมาณแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีนที่ถูกดูดซับได้ (mg) ต่อหน่วยน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโมเลกุลของแนฟทาลิน, ฟีนานทริน และไพรีนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าสู่โพรงของถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแนฟทาลิน เข้มข้น 5 ppm ได้ 0.0854 mg ต่อ 1 g ของถ่านกัมมันต์ และสามารถดูดซับฟีนานทริน เข้มข้น 5 ppm ได้ 0.0578 mg ต่อ 1 g ของ

ถ่านกัมมันต์ และสามารถดูดซับไพรีน เข้มข้น 5 ppm ได้ 0.0958 mg ต่อ 1 g ของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้ เนื่องจากไอโซเทอร์มของการดูดซับของสาร PAHs ทั้ง 3 ชนิด เป็นการดูดซับแบบฟลูนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) แสดงผลการศึกษาได้ดังนี้

PAHs	$K_F$	1/n	n
แนฟทาลีน	0.724	0.501	1.995
ฟิแนนทรีน	0.060	0.856	1.168
ไพรีน	0.047	1.055	0.948

จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ ( $K_F$ ) ที่ได้จากการคำนวณของ แนฟทาลีน > ฟิแนนทรีน > ไพรีน โดยค่า  $K_F$  นี้ จะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับสาร PAHs ของแต่ละชนิด ซึ่งจากการศึกษาทางทฤษฎีไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟลูนดิชพบว่า  $K_F$  ของไพรีนที่ได้มีค่าสูงกว่าแนฟทาลีน และ ฟิแนนทรีน ซึ่งจะทำให้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่ว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไพรีน ได้สูงสุด รองลงมาเป็นแนฟทาลีน และฟิแนนทรีน ตามลำดับ และจากค่า 1/n ที่เป็นความชันของกราฟไอโซเทอร์มแบบฟลูนดิช ที่ได้จากการทดลองนั้น ไพรีนซึ่งมีค่า 1/n มากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของการดูดซับทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับได้เพิ่มมากขึ้นและดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามกราฟรูปที่ 4.4 ส่วนแนฟทาลีนและฟิแนนทรีน มีค่า 1/n น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่การดูดซับบนถ่านกัมมันต์นั้นมีปริมาณที่จำกัด ซึ่งแสดงตามกราฟรูปที่ 4.4 ที่เห็นได้ว่า เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นตั้งแต่ 5 – 15 ppm นั้น ความชันของกราฟจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเกือบคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสารละลายถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ได้จนถึงจุดหนึ่งแล้วทำให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแล้วถ่านกัมมันต์ก็จะดูดซับได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับเริ่มมีจำกัด

#### 4.3 การศึกษาสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Relative Standard Deviation หรือ %RSD)

จากการทำซ้ำและการคำนวณแล้วได้สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับสารละลายมาตรฐาน PAHs และทำการตรวจวัดด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง ซึ่งผลที่ได้คือ ในการวิเคราะห์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของแนฟทาลีน มีค่า %RSD โดยเฉลี่ยแล้วนั้นเท่ากับ 0.52% , ฟิแนนทรีน เท่ากับ 0.48% และไพรีน เท่ากับ 2.08% ทั้งนี้จากภาคผนวก ข. การทดลองที่ 8 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น

ต่ำๆ นั้น ค่า % RSD จะมีค่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นต่ำๆ นั้น ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จะน้อยกว่าที่ความเข้มข้นมากกว่า

#### 4.4 การศึกษาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit)

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่เติมสารละลาย PAHs มาวิเคราะห์จะสามารถคำนวณหาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของสารละลายแนฟทาลิน, ฟีนแอนทริน และไพรีน ได้ดังนี้ 0.21, 0.02 และ 0.04 ppm ตามลำดับ

#### 4.5 การตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์

เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จะเห็นได้ว่าการดูดซับสารละลาย PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งการดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับทางกายภาพที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี หรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของถ่านกัมมันต์หรือสารละลาย PAHs (ภาคผนวก ข. หน้า 89-95)

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยวิธีสเปกโตรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง โดยการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับสาร PAHs ทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการศึกษา มีจำนวนวงอะโรมาติกแตกต่างกัน ได้แก่ แนฟทาลีน (2 วง), ฟิแนนทรีน (3 วง) และไพรีน (4 วง) ตลอดจนหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ รวมทั้งประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ PAHs ดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. PAHs แต่ละชนิดจะมีสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับของสาร PAHs ทั้ง 3 ชนิดนั้น คือ ใช้ถ่านกัมมันต์ 3 g เขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 30 นาที และสามารถดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแนฟทาลีนที่ความเข้มข้นเข้มข้น 5 ppm ได้ 0.0854 mg ต่อ 1 g ของถ่านกัมมันต์ และสามารถดูดซับฟิแนนทรีน เข้มข้น 5 ppm ได้ 0.0578 mg ต่อ 1 g ของถ่านกัมมันต์ และสามารถดูดซับไพรีน เข้มข้น 15 ppm ได้ 0.2742 mg ต่อ 1 g ของถ่านกัมมันต์ ส่วนค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จะไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ PAHs ทั้ง 3 ชนิด
2. โครงสร้างและจำนวนวงอะโรมาติกที่แตกต่างกันของ PAHs มีผลต่อการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยเมื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสารทั้งสามชนิดแล้ว พบว่า แนฟทาลีนจะถูกดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมา คือ ฟิแนนทรีน และไพรีน ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลอง

PAHs	กราฟมาตรฐาน 0.00 - 1.00 ppm	Freundlich Isotherm		% RSD		Detection Limit (ppm)
		$K_F$	n	Conc. (ppm)	% RSD	
Naphthalene*	$y = 27.021 + 120.15x$ ( $R^2 = 0.9906$ )	0.724	1.995	0.00	0.61	0.21
				0.05	0.59	
				0.10	0.30	
				0.25	0.74	
				0.50	0.52	
				1.00	0.38	
				% RSD เฉลี่ย	0.52	
Phenanthrene**	$y = 41.159x + 82.965$ ( $R^2 = 0.9902$ )	0.060	1.168	0.00	0.57	0.02
				0.05	0.55	
				0.10	0.71	
				0.25	0.20	
				0.50	0.37	
				1.00	0.47	
				% RSD เฉลี่ย	0.48	
Pyrene***	$y = 25.745x + 17.167$ ( $R^2 = 0.987$ )	0.047	0.948	0.00	3.71	0.04
				0.05	3.50	
				0.10	1.43	
				0.25	1.40	
				0.50	1.41	
				1.00	1.02	
				% RSD เฉลี่ย	2.08	

หมายเหตุ

\* Naphthalene วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น  $\lambda_{ex} = 232$  nm และ  $\lambda_{em} = 360$  nm\*\* Phenanthrene วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น  $\lambda_{ex} = 250$  nm และ  $\lambda_{em} = 363$  nm\*\*\* Pyrene วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น  $\lambda_{ex} = 335$  nm และ  $\lambda_{em} = 372$  nm

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับแนฟทาลีน, ฟีนแอนทรีน และไพรีน ด้วยถ่านกัมมันต์ ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆที่คาดว่าจะมีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิ, ความเร็วในการเขย่า เป็นต้น
2. ควรศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์เทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ
3. ควรศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ PAHs โดยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของเหลวเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ
4. ควรนำสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นโดยการดูดซับที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง
5. ควรศึกษาลักษณะขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมในการดูดซับสารละลายอื่นๆ

## บรรณานุกรม

1. Alsberg,T;etal. **Chemical and biological characterization of organic material form gasoline exhaust particles.** Environment Science Tecnology. 1985.
2. US EPA. List of the sixteen PAHs with the Highest Carcinogenic Effect. **IEA Coal Research,** London. 1984
3. Cuypers, C., Pancras, T. and Grotenhuis, T. The Estimation of PAH Bioavailability in Contaminated Sediments Using Hydroxypropyl- $\beta$ -Cyclodextrin and Triton x-100 Extraction Techniques. **Chemosphere.** 46: 1235-1245. 2001
4. กรมควบคุมมลพิษ. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง เรือง เรือง พีเอเอช. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: กรุงเทพฯ. ประเทศไทย.หน้า 71-82. 2543.
5. Luis F., Enrique Jesus A., Monsalud O. and Jose L., **Determination of Ultra-Traces of Anthracene in Water Samples by Solid-Phase Spectrofluorometry.** Department of Analytical Chemistry, University of Granada. Spain. 1993.
6. เกียรติศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, การบำบัดน้ำเสีย. มิตรนราการพิมพ์, 264-285, 2531.
7. Cheremisinof and Morresi, **Carbon Adsorption Handbook,** Ann arbor Science Publisher : borough Green, 1987
8. [Online].Available:<http://www.goodson.com/msds/GLO-2.pdf>
9. กระทรวงอุตสาหกรรม. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องรายชื่อวัตถุอันตราย พ.ศ.2538.** กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม. 2538
10. Crini, G. Studies on Adsorption of Dyes on Beta-cyclodextrin polymer. **Bioresource Technology.** 90: 193-198. 2001
11. กองจัดการสารอันตรายและการของเสียกรมควบคุมมลพิษกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง พีเอเอช (โพลีไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน). 2539
12. [Online].Available:<http://www.zoo.utoronto.ca/zoo3446/2003Group19/NAPHALENE.html>

13. Elvers, B., Hawkins S. and Schulz, G. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. The Federal Republic, Germany, A17: 1-7. 1991.
14. [Online].Available:<http://www.nature.nps.gov/toxic/phenanth.pdf>
15. [Online].Available:<http://www.cira.ornl.gov/documents/PHENANTH.pdf>
16. ชนากรณ์ เรืองศรี และภกวันต์ กาญจนพาทิ. การบำบัดสารพอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ในน้ำด้วยแหนเป็ด. โครงการงานพิเศษ ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
17. [Online].Available:<http://www.dtsc.cagov/AssessingRisk/upload/Henry-law-factsheet.pdf>
18. Philip H., **Handbook of Environmental Degradation Rates.**, CRC Press, 1991
19. [Online].Available:[http://doc.clib.psu.ac.th/public7/thesis7/full/223363/223363\\_ch4.pdf](http://doc.clib.psu.ac.th/public7/thesis7/full/223363/223363_ch4.pdf)
20. [Online].Available:<http://www.astrochem.Org/PAHs.JPG>
21. Suzuki,M. **Adsorption Engineering**. Tokyo : Elsevier, Inc. 1990.
22. Slejkoi, F.L. **Adsorption Technology**. New York : Marcel Dekker, Inc.1985.
23. [Online].Available:<http://saf.chem.ox.ac.uk/Instruments/BET/isotherms.jpg>
24. [Online].Available:[http://www.thaiscience.com/lab\\_vol/p40/Fluorometer.asp](http://www.thaiscience.com/lab_vol/p40/Fluorometer.asp)
25. Zongqiang G., Kassem A., Berndt-Michael W., Peijun Li . **Activated carbon adsorption of PAHs from vegetable oil used in soil remediation** .a Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, PR China Institute of Ecology, Berlin University of Technology, Berlin, Germany. 372-378. 2006
26. Mastral, A.M., Garcal T. and Callen M.S. , Influence of Sorbent Characteristics on the Adsorption of PAC II. Adsorption of PAH with Different Numbers of Rings. **Fuel Processing Technology**. 77-78: 365-372. 2002.
27. ดุษฎี มั่นภักดี, วรุฒม์ ตากแสง และ วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา. การบำบัดสารพอลิไซคลิกอะโรมาติก (PAHs) ด้วยพอลิเมอร์บีต้าไซโคลเฮกซ์ทริน. โครงการงานพิเศษ ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546
28. [Online].Available:<http://www.iupac.org/goldbook/S06004.pdf>

**ภาคผนวก ก**

## ภาคผนวก ก

### 1. การเตรียมสารละลาย PAHs ความเข้มข้นต่างๆ

1.1 สารละลายมาตรฐานเนฟทาไลน์ เข้มข้น 100 ppm

- เตรียมสารละลายเนฟทาไลน์ เข้มข้น 1 ppm จากสารละลายมาตรฐานเนฟทาไลน์ เข้มข้น 100 ppm

$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad N_1 V_1 &= N_2 V_2 \\ \text{จะได้} \quad 1 \times 100 &= 100 \times V_2 \\ \therefore V_2 &= 1 \text{ ml} \end{aligned}$$

∴ ปิเปิดเนฟทาไลน์ เข้มข้น 100 ppm 1 ml ลงในขวดวัดปริมาตร 100 ml จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

- เตรียมสารละลายเนฟทาไลน์ เข้มข้น 0.5 ppm จากสารละลายมาตรฐานเนฟทาไลน์ เข้มข้น 100 ppm

$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad N_1 V_1 &= N_2 V_2 \\ \text{จะได้} \quad 0.5 \times 100 &= 100 \times V_2 \\ \therefore V_2 &= 0.50 \text{ ml} \end{aligned}$$

∴ ปิเปิดเนฟทาไลน์ เข้มข้น 1 ppm 50 ml ลงในขวดวัดปริมาตร 100 ml จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

สำหรับสารละลายเนฟทาไลน์ที่ความเข้มข้นอื่นๆ รวมทั้งสารละลายพีแนนทรีนและไพรีนคำนวณเช่นเดียวกับข้างต้น ได้ผลดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลาย PAHs ที่ความเข้มข้นต่างๆ

[PAHs] สุดท้าย (ppm)	[PAHs] เริ่มต้น (ppm)	ปริมาตร PAHs เริ่มต้น ที่ใช้ (ml)	ปริมาตรสุทธิ (ml)
1.00	100	1.00	100
0.50	100	0.50	100
0.25	100	0.25	100
0.10	100	0.10	100
0.05	100	0.50	100

## 2. การเตรียมสารละลาย NaOH 10% w/w

ละลาย NaOH (เกรดวิเคราะห์) 10 g ด้วยน้ำกลั่น 90 ml และนำไปใช้เมื่อสารละลาย NaOH เย็นลง

หมายเหตุ : การเก็บสารละลาย NaOH ต้องเก็บในภาชนะพลาสติกเท่านั้น ห้ามเก็บในสถานะที่ทำด้วยแก้ว

## 3. การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 10% w/w

นำกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 ml ละลายด้วยน้ำกลั่น 90 ml และนำไปใช้เมื่อสารละลายกรดซัลฟิวริกเย็นลง

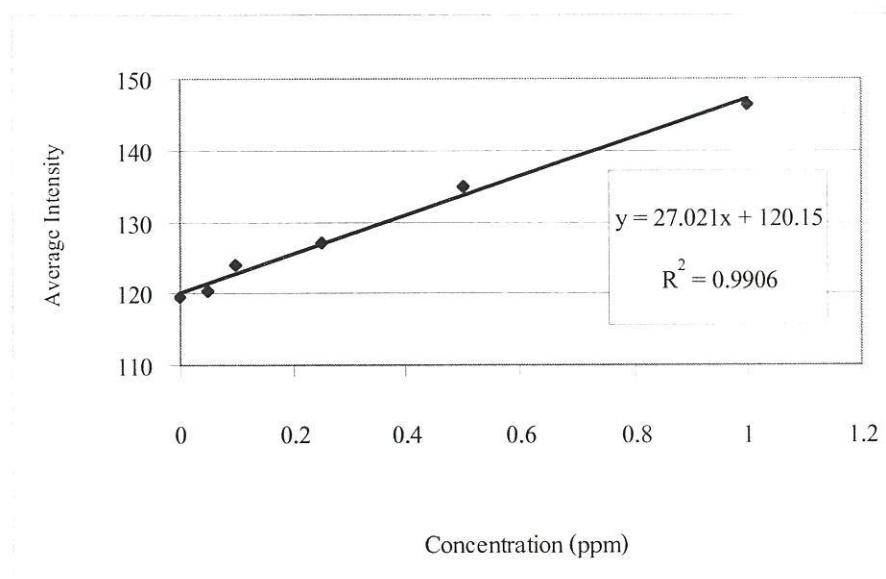
## ภาคผนวก ข

## ภาคผนวก ข

### ผลจากการทดลอง

การทดลองที่ 1 การศึกษากราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของ PAHs แต่ละชนิด  
ตารางที่ ข.1 ผลการคายแสงของเนฟทาลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

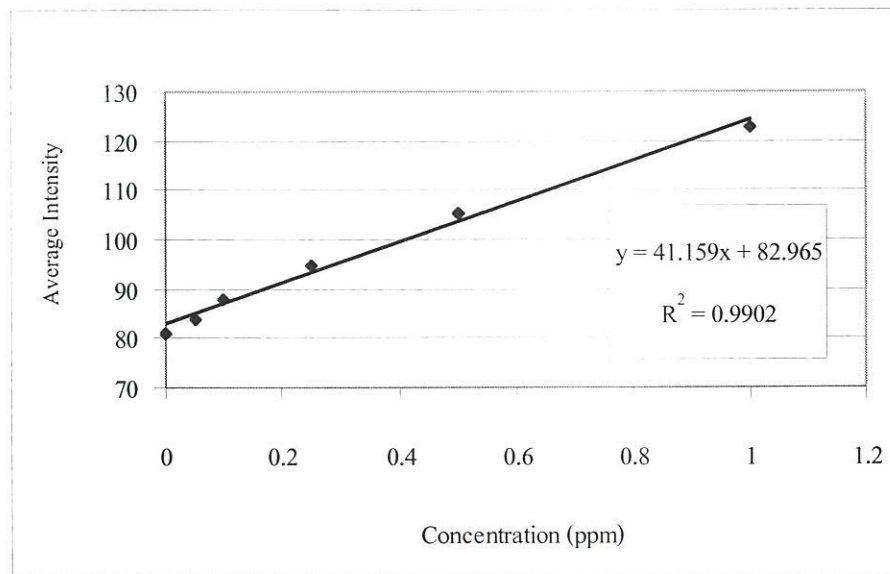
Concentration (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity 4	Intensity 5	Intensity เฉลี่ย
0.00	119.0355	118.2791	119.8801	119.7350	120.0510	119.3961
0.05	120.4135	121.6552	120.0510	119.7950	120.3510	120.4531
0.10	123.7325	123.5592	123.8823	123.9019	124.5399	123.9232
0.25	126.4815	126.303	126.6883	128.5963	127.4851	127.1108
0.50	134.6485	135.2528	133.9521	135.8369	134.9753	134.9331
1.00	146.0425	147.3259	145.9302	146.3355	146.5208	146.4310



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของเนฟทาลีน

ตารางที่ ข.2 ผลการกายแสงของพีแนนทรินที่ความเข้มข้นต่างๆ

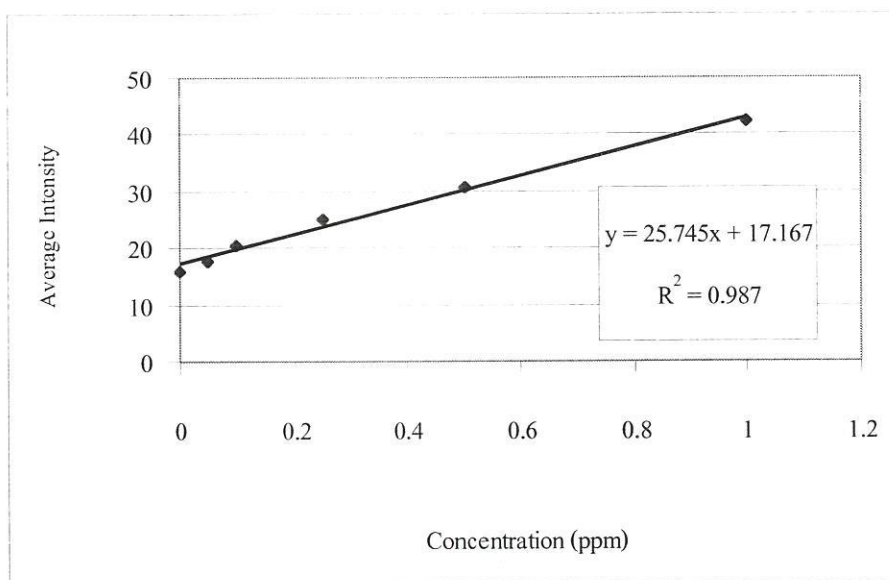
Concentration (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity 4	Intensity 5	Intensity เฉลี่ย
0.00	81.6233	81.1688	80.5728	81.5588	80.7999	81.1447
0.05	83.3295	83.8541	84.5647	83.8034	84.1813	83.9466
0.10	88.0858	88.1425	87.1682	88.8354	87.6357	87.97352
0.25	95.1435	94.8832	95.0308	94.7146	94.7332	94.9011
0.5	104.8324	105.2593	105.0089	104.8784	105.7753	105.1509
1.00	122.8832	122.0244	123.1158	122.7489	123.5931	122.8731



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของพีแนนทริน

ตารางที่ ข.3 ผลการคายแสงของไพรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity 4	Intensity 5	Intensity เฉลี่ย
0.00	15.2885	15.4038	15.2846	16.5326	16.2015	15.7422
0.05	17.7274	17.9568	16.835	17.4378	18.5070	17.6928
0.10	20.7917	20.2245	20.6433	20.3722	20.9368	20.5937
0.25	24.6956	25.4933	25.4058	24.9831	24.8322	25.0820
0.50	30.1073	30.209	31.0953	30.9221	30.5849	30.5837
1.00	42.0322	42.1882	42.9573	41.8357	42.1008	42.2228



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานของไพรีน

การทดลองที่ 2 การศึกษาเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์  
ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองการดูดซับแนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที่)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
10	139.7728	139.5283	140.5821	139.9611	0.7332	73.32
Control	119.2059	120.5368	121.0308	120.2578	0.0040	-
20	140.3652	140.8702	140.0873	140.4409	0.7509	75.09
Control	120.8391	121.5372	119.8537	120.7433	0.0220	-
30	141.8406	142.0538	141.7732	141.8892	0.8045	80.45
Control	122.3052	120.0097	121.1034	121.1394	0.0366	-
60	142.0561	142.9642	142.2768	142.4324	0.8246	82.46
Control	123.5307	121.8305	119.5308	121.6307	0.0548	-
120	143.3076	142.6151	143.1062	143.0096	0.8460	84.60
Control	121.9357	118.1802	121.3008	120.4722	0.0119	-

จากกราฟมาตรฐานของแนฟทาลิน

$$y = 27.021x + 120.15$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่า Intensity เฉลี่ย

$x$  คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (ppm)

จะได้  $139.9611 = 27.021x + 120.15$

$$x = 0.7332 \text{ ppm}$$

∴ การดูดซับแนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็นความเข้มข้น 0.7332 ppm

เมื่อนำมาคิดเป็น % การดูดซับของสารละลายแนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์ จะได้

$$\% \text{ การดูดซับ} = 0.7332 \times 100$$

$$\% \text{ การดูดซับ} = 73.32 \%$$

∴ การดูดซับแนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็น 73.32 %

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองการดูดซับฟีนานทรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
10	112.8436	112.7621	113.2670	112.9576	0.7287	72.87
Control	82.9728	83.7256	83.0649	83.2544	0.0070	-
20	113.7648	113.5647	114.0781	113.8025	0.7492	74.92
Control	84.0257	83.1793	83.0726	83.4259	0.0112	-
30	115.7248	115.4386	114.4731	115.2122	0.7835	78.35
Control	84.5928	83.0576	83.1204	83.5903	0.0152	-
60	116.2784	117.2427	116.1931	116.5714	0.8165	81.65
Control	82.5934	84.4295	82.6471	83.2233	0.0063	-
120	117.3645	116.9537	116.6379	116.9854	0.8266	82.66
Control	83.9421	84.1957	83.1627	83.7668	0.0195	-

จากกราฟมาตรฐานของฟีนานทริน

$$y = 41.159x + 82.965$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่า Intensity เฉลี่ย  
 $x$  คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (ppm)

จะได้  $112.9576 = 41.159x + 82.965$   
 $x = 0.7287 \text{ ppm}$

∴ การดูดซับฟีนานทรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็นความเข้มข้น 0.7287 ppm

เมื่อนำมาคิดเป็น % การดูดซับของสารละลายฟีนานทรินด้วยถ่านกัมมันต์ จะได้

$$\begin{aligned} \% \text{ การดูดซับ} &= 0.7287 \times 100 \\ \% \text{ การดูดซับ} &= 72.87 \% \end{aligned}$$

∴ การดูดซับฟีนานทรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็น 72.87 %

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองการดูดซับไพรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาทื)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
10	34.8972	35.4895	35.7869	35.3912	0.7079	70.79
Control	18.2789	17.0186	17.6428	17.6468	0.0186	-
20	36.3761	36.4283	36.4921	36.4322	0.7483	74.83
Control	17.5792	15.7824	18.6428	17.3348	0.0065	-
30	37.6482	37.2186	36.9421	37.2696	0.7808	78.08
Control	16.5943	16.7824	17.6428	17.0065	-0.0062	-
60	37.5492	38.0219	37.5492	37.7068	0.7978	79.78
Control	17.2893	17.4829	17.0084	17.2602	0.0036	-
120	37.9094	38.1175	37.5276	37.8515	0.8034	80.34
Control	17.5648	17.6429	17.2843	17.4973	0.0128	-

จากกราฟมาตรฐานของไพริน

$$y = 25.745x + 17.167$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่า Intensity เฉลี่ย  
 $x$  คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (ppm)

จะได้

$$35.3912 = 25.745x + 17.167$$

$$x = 0.7079 \text{ ppm}$$

∴ การดูดซับไพรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็นความเข้มข้น 0.7079 ppm

เมื่อนำมาคิดเป็น % การดูดซับของสารละลายไพรินด้วยถ่านกัมมันต์ จะได้

$$\% \text{ การดูดซับ} = 0.7079 \times 100$$

$$\% \text{ การดูดซับ} = 70.79 \%$$

∴ การดูดซับไพรินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 10 นาที คิดเป็น 70.79 %

**การทดลองที่ 3** การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการดูดซับ PAHs

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองการดูดซับเนฟทาลินด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (g)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การ ดูดซับ
1	138.2573	138.9562	139.0827	138.7654	0.6889	68.89
2	139.9237	140.1831	139.6485	139.9184	0.7316	73.16
3	140.3637	140.2894	141.0932	140.5821	0.7562	75.62
4	140.0238	141.5231	141.2867	140.9445	0.7696	76.96
5	141.2624	141.6088	141.0507	141.3073	0.7830	78.30
Control	120.0088	121.1980	119.1098	120.1055	-0.0016	-

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองการดูดซับพีแนนทรินด้วยถ่านกัมมันต์

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (g)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การ ดูดซับ
1	110.0537	110.5644	109.8231	110.1471	0.6604	66.04
2	110.2834	110.8729	110.9562	110.7042	0.6740	67.40
3	113.0285	113.2853	112.5247	112.9462	0.7284	72.84
4	113.6521	112.7862	112.9578	113.1320	0.7329	73.29
5	114.1596	114.5287	113.9512	114.2400	0.7599	75.99
Control	82.3591	82.7938	83.5493	82.9007	-0.0016	-

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองการดูดซับไพรีนด้วยถ่านกัมมันต์

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ (g)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การ ดูดซับ
1	33.5895	34.8312	33.1128	33.8445	0.6478	64.78
2	34.5281	34.8627	34.2871	34.5593	0.6756	67.56
3	35.1277	36.0129	35.2878	35.4761	0.7112	71.12
4	35.8246	36.1281	35.0467	35.8452	0.7255	72.55
5	36.8246	35.6281	36.5467	36.2772	0.7423	74.23
Control	17.2893	16.8629	16.4675	16.8732	-0.0114	-

การทดลองที่ 4 การศึกษา pH ที่เหมาะสมของ PAHs ในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์  
ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองดูดซับแอฟทาลีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ pH ต่างๆ

pH	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
3	139.0483	140.3979	140.7537	140.0666	0.7371	73.71
Control	121.8729	120.4536	121.5392	121.2886	0.0421	-
7	140.2398	141.5893	140.2647	140.6979	0.7604	76.04
Control	121.7824	120.9317	120.6731	121.1291	0.0362	-
11	138.4923	140.3826	140.8357	139.9035	0.7310	73.10
Control	121.0836	120.7935	121.0684	120.9818	0.0308	-

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองดูดซับพีแนนทรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ pH ต่างๆ

pH	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
3	113.2349	113.4792	114.3831	113.6991	0.7467	74.67
Control	82.0753	83.1736	83.6387	82.9625	-0.0001	-
7	115.2903	114.9287	114.4562	114.8917	0.7757	77.57
Control	82.9437	83.9401	83.0458	83.3099	0.0084	-
11	114.2938	115.9381	113.9238	114.7186	0.7715	77.15
Control	83.0135	84.2367	82.4847	83.2450	0.0068	-

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองดูดซับ ไพรินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ pH ต่างๆ

pH	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูด ซับ
3	35.2084	34.8295	34.6523	34.8967	0.6887	68.8667
Control	17.7382	17.3040	16.3923	17.1448	-0.0009	-
7	34.9280	35.7626	34.6489	35.1132	0.6971	69.7074
Control	16.3048	17.3948	17.5478	17.0825	-0.0033	-
11	35.8389	35.9208	35.9928	35.9175	0.7283	72.8316
Control	17.4902	17.4930	17.3423	17.4418	0.0107	-

การทดลองที่ 5 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ PAHs ในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์  
ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองการดูดซับเนฟทาลินที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยถ่านกัมมันต์

ความ เข้มข้น Nap (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความ เข้มข้น (ppm)	% การ ดูดซับ	ปริมาณ Nap ที่ดูดซับได้ (mg/g ถ่าน)
0.10	121.9382	119.2384	122.3213	121.1660	0.0376	37.60	0.0013
0.50	130.7765	129.8978	131.8876	130.8540	0.3961	79.23	0.0132
1.00	136.7643	137.7641	135.5674	136.6986	0.6124	61.24	0.0204
5.00	189.6589	188.8732	189.5876	189.3732	2.5618	51.24	0.0854
10.00	201.8473	203.7612	201.4418	202.3501	3.0421	30.42	0.1014
15.00	215.4536	215.7609	216.6009	215.9385	3.5450	23.63	0.1182
Control	119.8748	120.7761	121.0711	120.5740	0.0157	-	-

จากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเนฟทาลินในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

- ใช้สารละลายเนฟทาลิน 100 mL เข้มข้น 0.10 ppm
- ถ่านกัมมันต์ 3 g
- เวลาสัมผัส 30 นาที

ปริมาณสารละลายที่ดูดซับได้ ( $q$ ) =  $[C_{AC} \times (\text{ปริมาตรสารละลายที่ใช้}/1000)] \div \text{ปริมาณถ่าน}$   
(mg/g ถ่านกัมมันต์)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } q &= [0.0376 \times (100/1000)] \div 3 \\ q &= 0.0013 \text{ mg/g ของถ่านกัมมันต์} \end{aligned}$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณสารละลายที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้ หน่วย mg/g ของถ่านกัมมันต์  
 $C_{AC}$  คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองการดูดซับฟีนานทรินที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น Phe (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูดซับ	ปริมาณ Phe ที่ดูดซับได้ (mg/g ถ่าน)
0.10	85.7823	85.9831	84.5612	85.4422	0.0602	60.19	0.0020
0.50	95.7492	96.7825	97.9087	96.8135	0.3365	67.29	0.0112
1.00	100.7420	99.3456	100.2123	100.1000	0.4163	41.63	0.0139
5.00	153.8112	155.2490	153.7600	154.2734	1.7325	34.65	0.0578
10.00	189.5463	188.3427	188.0965	188.6618	2.5680	25.68	0.0856
15.00	210.7432	210.9983	209.3864	210.3760	3.0956	20.64	0.1032
Control	83.9980	83.7364	82.0053	83.2466	0.0068	-	-

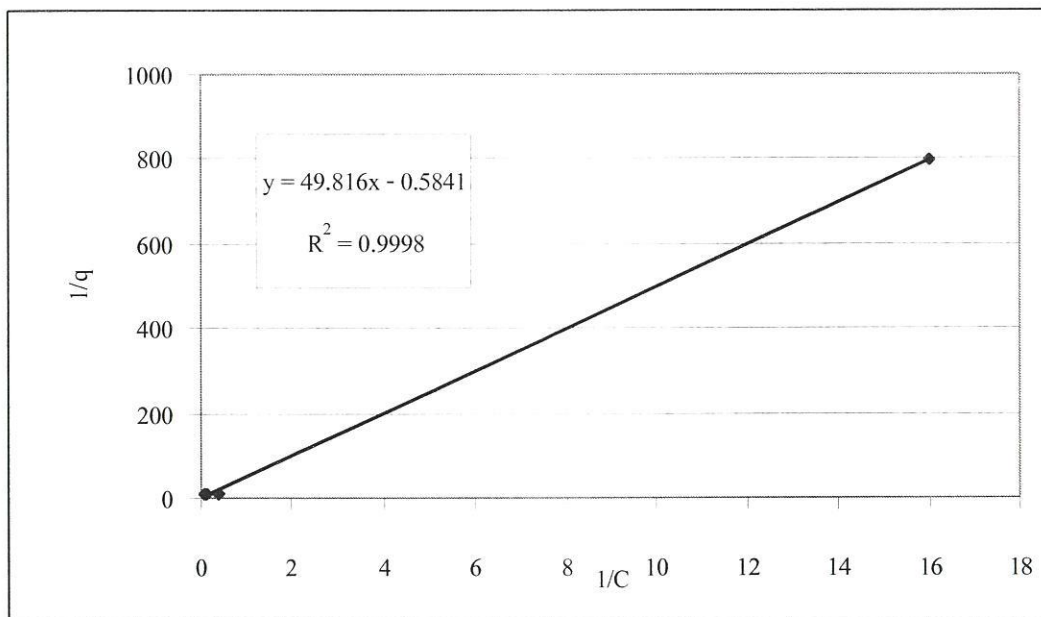
ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองการดูดซับไพรีนที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น Pyr (ppm)	Intensity 1	Intensity 2	Intensity 3	Intensity เฉลี่ย	ความเข้มข้น (ppm)	% การดูดซับ	ปริมาณ Pyr ที่ดูดซับได้ (mg/g ถ่าน)
0.10	18.4673	18.4651	18.3520	18.4281	0.0490	48.99	0.0016
0.50	25.9821	24.7564	24.9911	25.2432	0.3137	62.74	0.0105
1.00	39.8665	38.5662	40.7121	39.7149	0.8758	87.58	0.0292
5.00	90.7326	91.7661	90.9183	91.1390	2.8733	57.47	0.0958
10.00	187.9783	188.8362	189.8971	188.9039	6.6707	66.71	0.2224
15.00	229.9873	228.7165	228.1262	228.9433	8.2259	54.84	0.2742
Control	17.3202	17.9823	16.9871	17.4299	0.0102	-	-

**การทดลองที่ 6** การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของ PAHs ด้วยความเข้มข้นของสารละลาย

ตารางที่ ข.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของแนฟทาลีน (จากตารางที่ ข.13)

m (g)	$C_0$ (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	1/C	1/q
3	0.10	0.0624	0.0013	16.0254	797.8904
3	0.50	0.1039	0.0132	9.6279	75.7317
3	1.00	0.3876	0.0204	2.5802	48.9848
3	5.00	2.4382	0.0854	0.4101	11.7104
3	10.00	6.9579	0.1014	0.1437	9.8617
3	15.00	11.4550	0.1182	0.0873	8.4627



รูปที่ ข.4 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของแนฟทาลีน

$1/q_m$	$q_m$	$1/q_m K_A$	$q_m K_A$	$K_A$
0.584	1.712	49.816	0.020	0.012

$$\text{จากสมการ} \quad q = \frac{K_A q_m C}{1 + K_A C}$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_A C} + \frac{1}{q_m}$$

ซึ่งเมื่อนำค่า  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  มาพลอตกราฟจะได้ดังกราฟข้างต้น และค่าเหล่านี้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} C &= C_0 - C_{AC} \\ C &= 0.1000 - 0.0376 \\ C &= 0.0624 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

และ

ปริมาณสารละลายที่ดูดซับได้ ( $q$ ) =  $[C_{AC} \times (\text{ปริมาตรสารละลายที่ใช้}/1000)] \div \text{ปริมาณถ่าน}$   
(mg/g ถ่านกัมมันต์)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad q &= [0.0376 \times (100/1000)] \div 3 \\ q &= 0.0013 \text{ mg/g ของถ่านกัมมันต์} \end{aligned}$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล  
 $C_{AC}$  คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์  
 $q$  คือ ปริมาณสารละลายที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้ หน่วย mg/g ของถ่านกัมมันต์

จากนั้นนำมาคำนวณ ค่า  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  ได้ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{0.0013} = 797.8904$$

และ

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{0.0624} = 16.0254$$

เมื่อนำค่า  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  มาพลอตกราฟแล้ว จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 49.816x - 0.5841$$

เมื่อนำมาพิจารณาในสมการ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_A C} + \frac{1}{q_m}$$

จะได้  $\frac{1}{q_m K_A C} = 49.816$

และ  $\frac{1}{q_m} = 0.5841$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา  $q_m$  และ  $K_A$  ซึ่งปรากฏดังตารางข้างต้น

จะได้  $q_m = \frac{1}{0.5841}$

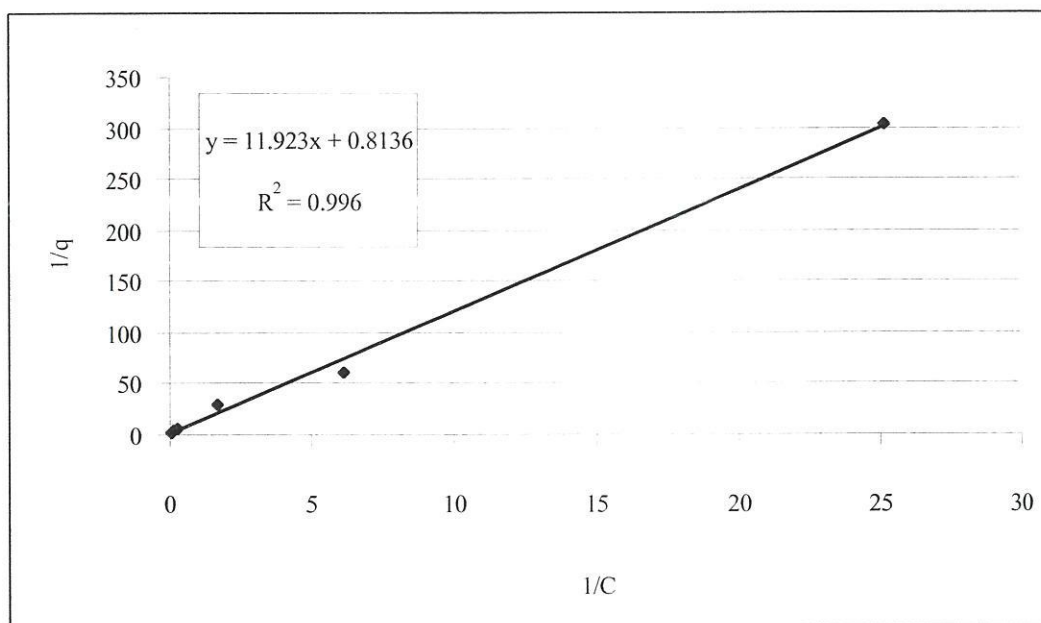
$$q_m = 1.712$$

และ  $K_A = \frac{1}{(0.5841)(0.1000)(49.816)}$

$$K_A = 0.012$$

ตารางที่ ข.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของพีแนนทริน (จากตารางที่ ข.14)

m (g)	$C_0$ (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	1/C	1/q
3	0.10	0.0398	0.0033	25.1169	303.0303
3	0.50	0.1635	0.0167	6.1148	59.8802
3	1.00	0.5837	0.0333	1.7132	30.0300
3	5.00	3.2675	0.1667	0.3060	5.9988
3	10.00	7.4320	0.3333	0.1346	3.0003
3	15.00	11.9044	0.5000	0.0840	2.0000

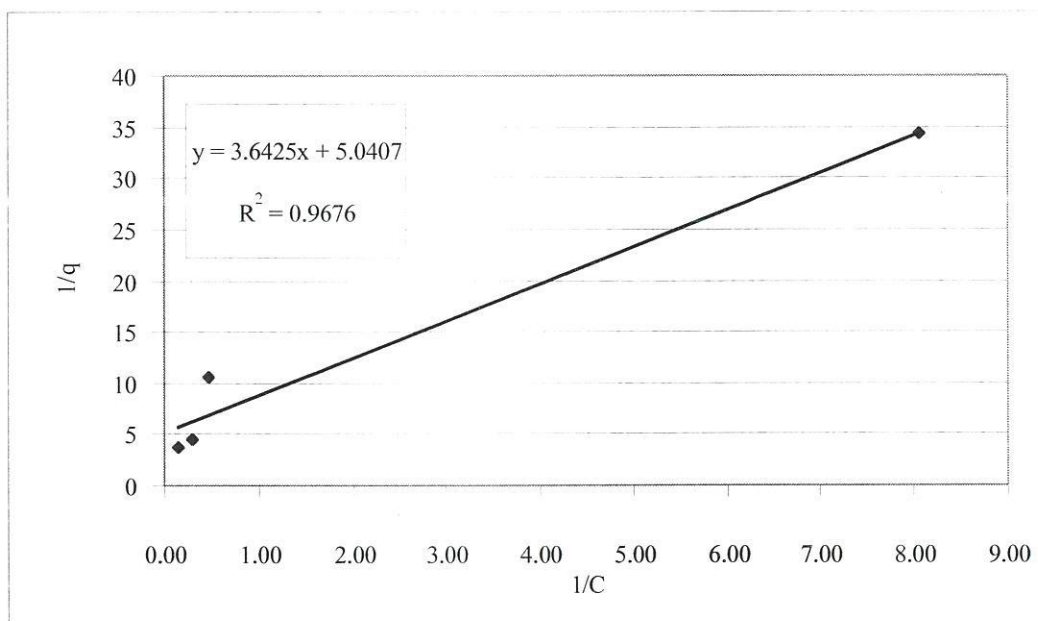


รูปที่ ข.5 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของพีแนนทริน

$1/q_m$	$q_m$	$1/q_m K_A$	$q_m K_A$	$K_A$
0.814	1.229	11.923	0.084	0.068

ตารางที่ ข.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของไพรีน (จากตารางที่ ข.15)

m (g)	$C_0$ (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	1/C	1/q
3	0.10	0.0510	0.0016	19.6023	612.4253
3	0.50	0.1863	0.0105	5.3677	95.6327
3	1.00	0.1242	0.0292	8.0527	34.2537
3	5.00	2.1267	0.0958	0.4702	10.4411
3	10.00	3.3293	0.2224	0.3004	4.4973
3	15.00	6.7741	0.2742	0.1476	3.6470

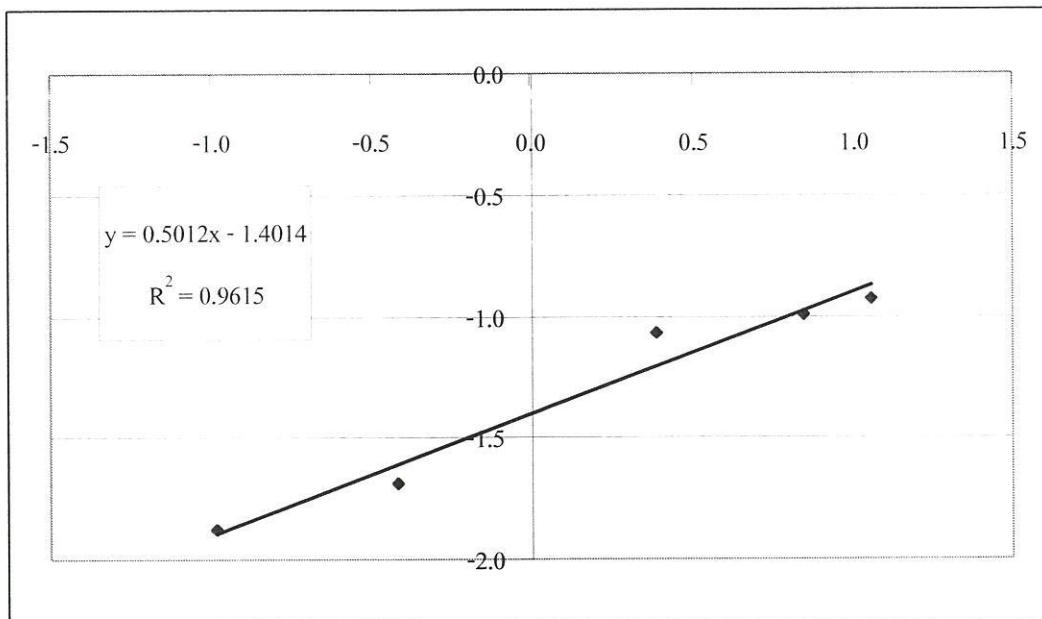


รูปที่ ข.6 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของไพรีน

$1/q_m$	$q_m$	$1/q_m K_A$	$q_m K_A$	$K_A$
5.041	0.198	3.643	0.275	1.384

การทดลองที่ 7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิคซ์ของ PAHs ด้วยถ่านกัมมันต์  
 ตารางที่ ข.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิคซ์ของเนฟทาซีน (จากตารางที่ ข.13)

m (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	log C	log q
3	0.10	0.0624	0.0013	-1.2048	-2.9019
3	0.50	0.1039	0.0132	-0.9835	-1.8793
3	1.00	0.3876	0.0204	-0.4117	-1.6901
3	5.00	2.4382	0.0854	0.3871	-1.0686
3	10.00	6.9579	0.1014	0.8425	-0.9940
3	15.00	11.4550	0.1182	1.0590	-0.9275



รูปที่ ข.7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิคซ์ของเนฟทาซีน

$\log K_F$	$K_F$	$1/n$	$n$
-0.1401	0.7242	0.5012	1.9952

$$\text{จากสมการ} \quad q = K_F C^{1/n}$$

$$\text{จะได้} \quad \log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C$$

ซึ่งเมื่อนำค่า  $\log q$  และ  $\log C$  มาพลอตกราฟจะได้ดังกราฟข้างต้น และค่าเหล่านี้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} C &= C_0 - C_{AC} \\ C &= 0.1000 - 0.0376 \\ C &= 0.0624 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารละลายที่ดูดซับได้ (q)} &= [C_{AC} \times (\text{ปริมาตรสารละลายที่ใช้}/1000)] \div \text{ปริมาณถ่าน} \\ & \text{(mg/g ถ่านกัมมันต์)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad q &= [0.0376 \times (100/1000)] \div 3 \\ q &= 0.0013 \text{ mg/g ของถ่านกัมมันต์} \end{aligned}$$

เมื่อ	$C$	คือ	ความเข้มข้นของตัวดูดถูกซับในสารละลายที่จุดสมดุล
	$C_0$	คือ	ความเข้มข้นของตัวดูดถูกซับในสารละลายที่จุดสมดุล
	$C_{AC}$	คือ	ความเข้มข้นของตัวดูดถูกซับในสารละลายที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์
	$q$	คือ	ปริมาณสารละลายที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้ หน่วย mg/g ของถ่านกัมมันต์

จากนั้นนำมาคำนวณ ค่า  $\log q$  และ  $\log C$  ได้ดังนี้

$$\log q = \log 0.0013 = -2.9019$$

และ

$$\log C = \log 0.0624 = -1.2048$$

เมื่อนำค่า  $\log q$  และ  $\log C$  มาพลอตกราฟแล้ว จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.5012x - 1.4014$$

เมื่อนำมาพิจารณาในสมการ

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C$$

จะได้  $\log K_F = 0.5012$

และ  $\frac{1}{n} \log C = -1.4014$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา  $K_F$  และ  $n$  ซึ่งปรากฏดังตารางข้างต้น

จะได้  $K_F = 10^{0.5012}$

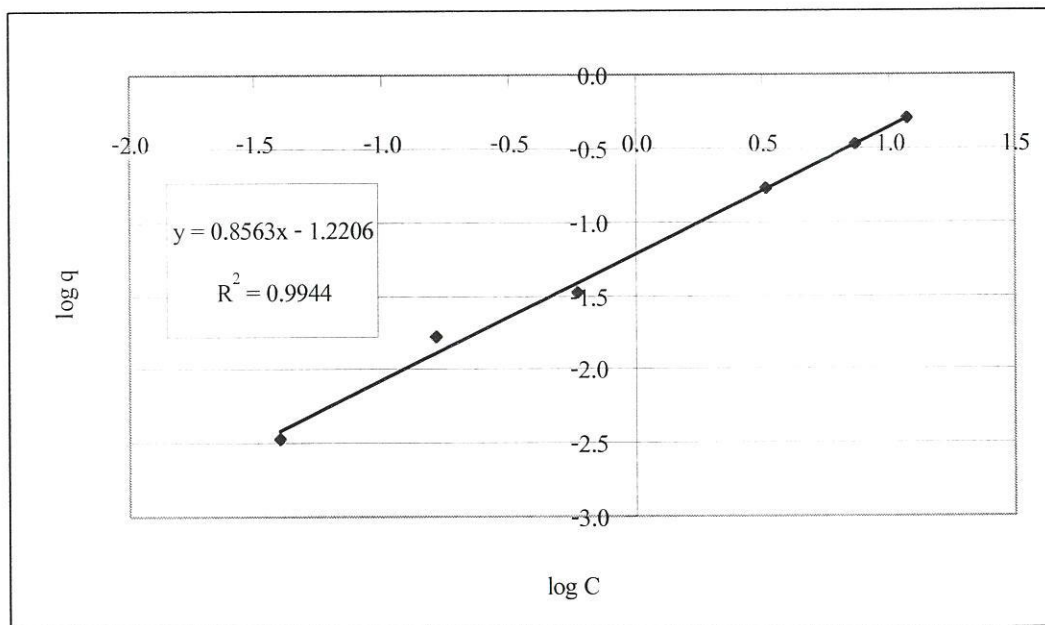
$$n = 0.1000$$

และ  $K_F = \frac{1}{(0.5841)(0.1000)(49.816)}$

$$K_F = \frac{1}{-1.4014} (-1.2048)$$

ตารางที่ ข.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิชของพีแนนนทริน (จากตารางที่ ข.14)

m (g)	$C_0$ (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	log C	log q
3	0.10	0.0398	0.0033	-1.4000	-2.4771
3	0.50	0.1635	0.0167	-0.7864	-1.7782
3	1.00	0.5837	0.0333	-0.2338	-1.4771
3	5.00	3.2675	0.1667	0.5142	-0.7782
3	10.00	7.4320	0.3333	0.8711	-0.4771
3	15.00	11.9044	0.5000	1.0757	-0.3010

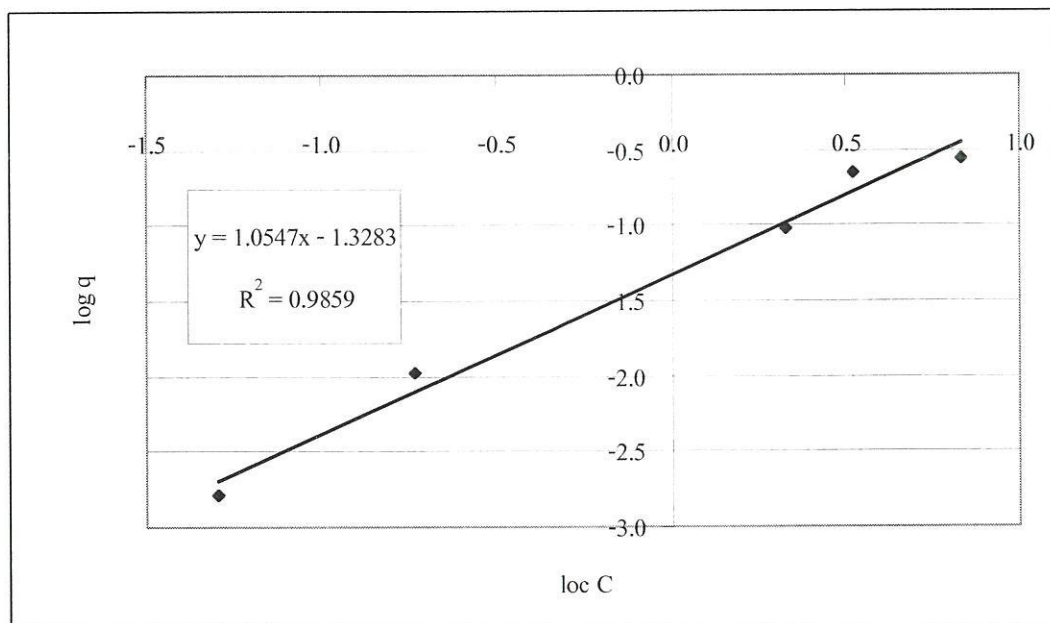


รูปที่ ข.8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิชของพีแนนนทริน

$\log K_F$	$K_F$	$1/n$	$n$
-1.2206	0.0602	0.8563	1.1678

ตารางที่ ข.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิคซ์ของไพรีน (จากตารางที่ ข.15)

m (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	log C	log q
3	0.10	0.0510	0.0016	-1.2923	-2.7871
3	0.50	0.1863	0.0105	-0.7298	-1.9806
3	1.00	0.1242	0.0292	-0.9059	-1.5347
3	5.00	2.1267	0.0958	0.3277	-1.0187
3	10.00	3.3293	0.2224	0.5224	-0.6530
3	15.00	6.7741	0.2742	0.8309	-0.5619



รูปที่ ข.9 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนิคซ์ของไพรีน

$\log K_F$	$K_F$	$1/n$	$n$
-1.3283	0.0470	1.0547	0.9481

**การทดลองที่ 8** การหา %RSD ของการวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่  
สถานะของแข็ง

ตารางที่ ข.22 ค่า  $(X_i - \bar{X})^2$  สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของการวิเคราะห์การดูดซับแนฟทาลิน  
ด้วยถ่านกัมมันต์

ครั้งที่	0 ppm	0.05 ppm	0.10 ppm	0.25 ppm	0.50 ppm	1 ppm
1	0.1301	0.0016	0.0364	0.3961	0.0810	0.1509
2	1.2478	1.4449	0.1325	0.6526	0.1022	0.8009
3	0.2342	0.1617	0.0017	0.1785	0.9624	0.2508
4	0.1148	0.4331	0.0005	2.2066	0.8168	0.0091
5	0.4288	0.0104	0.3804	0.1401	0.0018	0.0081
$\sum (X_i - \bar{X})^2$	2.1557	2.0518	0.5513	3.5739	1.9642	1.2198
SD	0.7341	0.7162	0.3713	0.9452	0.7007	0.5522
% RSD	0.61	0.59	0.30	0.74	0.52	0.38
$\bar{X}$	119.3961	120.4531	123.9232	127.1108	134.9331	146.4310

จากสมการค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

$$SD = \sqrt{\frac{2.1557}{5-1}}$$

$$SD = 0.7341$$

∴ ค่า SD ของการดูดซับสารละลายแนฟทาลิน 0 ppm ด้วยถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.7341

จากนั้นนำค่า SD ที่ได้มาเทียบตามสมการ ( $\bar{X}$  คือ Intensity เฉลี่ย จากตารางที่ ข.1)

$$\% \text{ RSD} = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

$$\% \text{ RSD} = \frac{0.7341}{119.3961} \times 100$$

$$\% \text{ RSD} = 0.61$$

∴ ค่า % RSD ของการดูดซับสารละลายเนฟทาลิน 0 ppm ด้วยถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.61

และเมื่อนำค่า % RSD ของสารละลายเนฟทาลินที่ความเข้มข้น 0.00 – 1.00 ppm มาเฉลี่ยจะได้

$$\% \text{ RSD เฉลี่ย} = \frac{\sum \% \text{ RSD}}{6}$$

$$\% \text{ RSD เฉลี่ย} = \frac{3.15}{6}$$

$$\% \text{ RSD เฉลี่ย} = 0.52$$

ตารางที่ ข.23 ค่า  $(X_i - \bar{X})^2$  สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของการวิเคราะห์การดูดซับ ฟีนานทริน  
ด้วยถ่านกัมมันต์

ครั้งที่	0 ppm	0.05 ppm	0.10 ppm	0.25 ppm	0.50 ppm	1 ppm
1	0.1301	0.0016	0.0364	0.3961	0.0810	0.1509
2	1.2478	1.4449	0.1325	0.6526	0.1022	0.8009
3	0.2342	0.1617	0.0017	0.1785	0.9624	0.2508
4	0.1148	0.4331	0.0005	2.2066	0.8168	0.0091
5	0.4288	0.0104	0.3804	0.1401	0.0018	0.0081
$\sum (X_i - \bar{X})^2$	2.1557	2.0518	0.5513	3.5739	1.9642	1.2198
SD	0.7341	0.7162	0.3713	0.9452	0.7007	0.5522
% RSD	0.61	0.59	0.30	0.74	0.52	0.38
$\bar{X}$	119.3961	120.4531	123.9232	127.1108	134.9331	146.4310

ตารางที่ ข.24 ค่า  $(X_i - \bar{X})^2$  สำหรับคำนวณหาค่า % RSD ของการวิเคราะห์การดูดซับไพรีนด้วย  
ถ่านกัมมันต์

ครั้งที่	0 ppm	0.05 ppm	0.10 ppm	0.25 ppm	0.50 ppm	1 ppm
1	0.2058	0.0012	0.0392	0.1493	0.2270	0.0363
2	0.1145	0.0697	0.1363	0.1692	0.1404	0.0012
3	0.2094	0.7358	0.0025	0.1048	0.2617	0.5394
4	0.6247	0.0650	0.0491	0.0098	0.1145	0.1499
5	0.2110	0.6629	0.1177	0.0624	0.0000	0.0149
$\sum (X_i - \bar{X})^2$	1.3654	1.5347	0.3448	0.4955	0.7436	0.7417
SD	0.5843	0.6194	0.2936	0.3520	0.4312	0.4306
% RSD	3.71	3.50	1.43	1.40	1.41	1.02
$\bar{X}$	15.7422	17.6928	20.5937	25.0820	30.5837	42.2228

การทดลองที่ 9 การศึกษาขีดความสามารถในการวิเคราะห์ (Detection Limit)

ตารางที่ ข.25 ค่า Intensity ของสารละลายแบลงค์ที่วัดที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลาย PAHs แต่ละชนิด

ครั้งที่	Intensity		
	Nap	Phe	Pry
1	125.5849	81.0593	15.5830
2	125.2341	80.9583	16.5987
3	125.4653	79.5734	15.4431
4	125.3105	81.5836	15.0591
5	125.4834	80.1475	14.3134
6	125.5823	81.5873	16.4831
7	126.5860	82.0592	15.9314
8	120.0958	80.4857	15.4834
9	121.5731	81.5732	14.4987
10	126.5459	81.9912	16.4134
เฉลี่ย	124.7461	81.1019	15.5807

จากสมการค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

$$SD = \sqrt{\frac{41.3381}{10-1}}$$

$$SD = 2.1432$$

- จากนั้นนำค่า SD ที่ได้มาคูณ 3 แล้วจึงนำมาบวกกับสารละลายเบดจ์ (3SD + Blank)

$$y = (3 \times 2.1432) + 119.3961$$

$$y = 125.8257$$

- นำค่าที่ได้มาแทนค่า y ในสมการของกราฟมาตรฐานของเนฟทาลีน

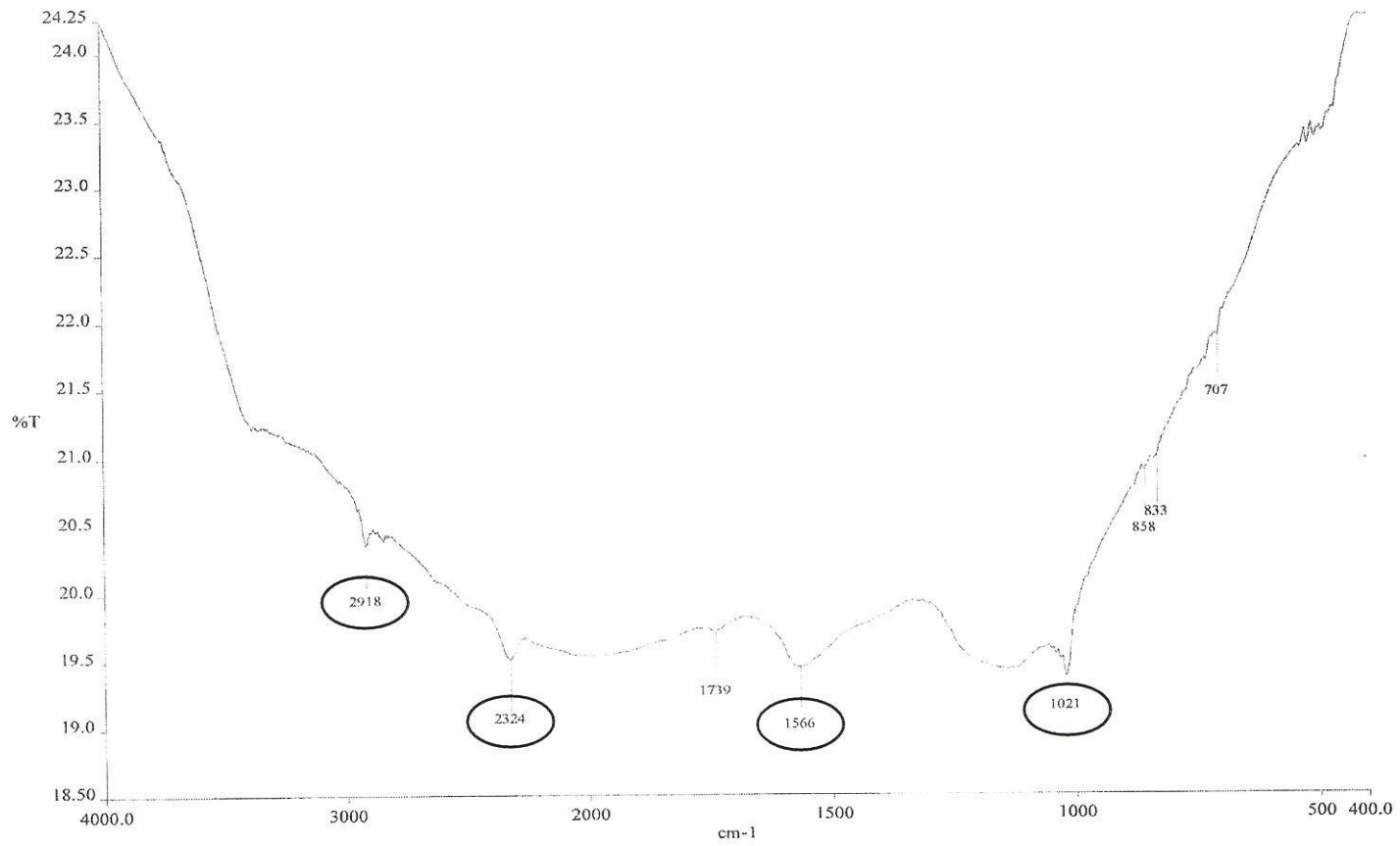
$$y = 27.021x + 120.15$$

$$125.8257 = 27.021x + 120.15$$

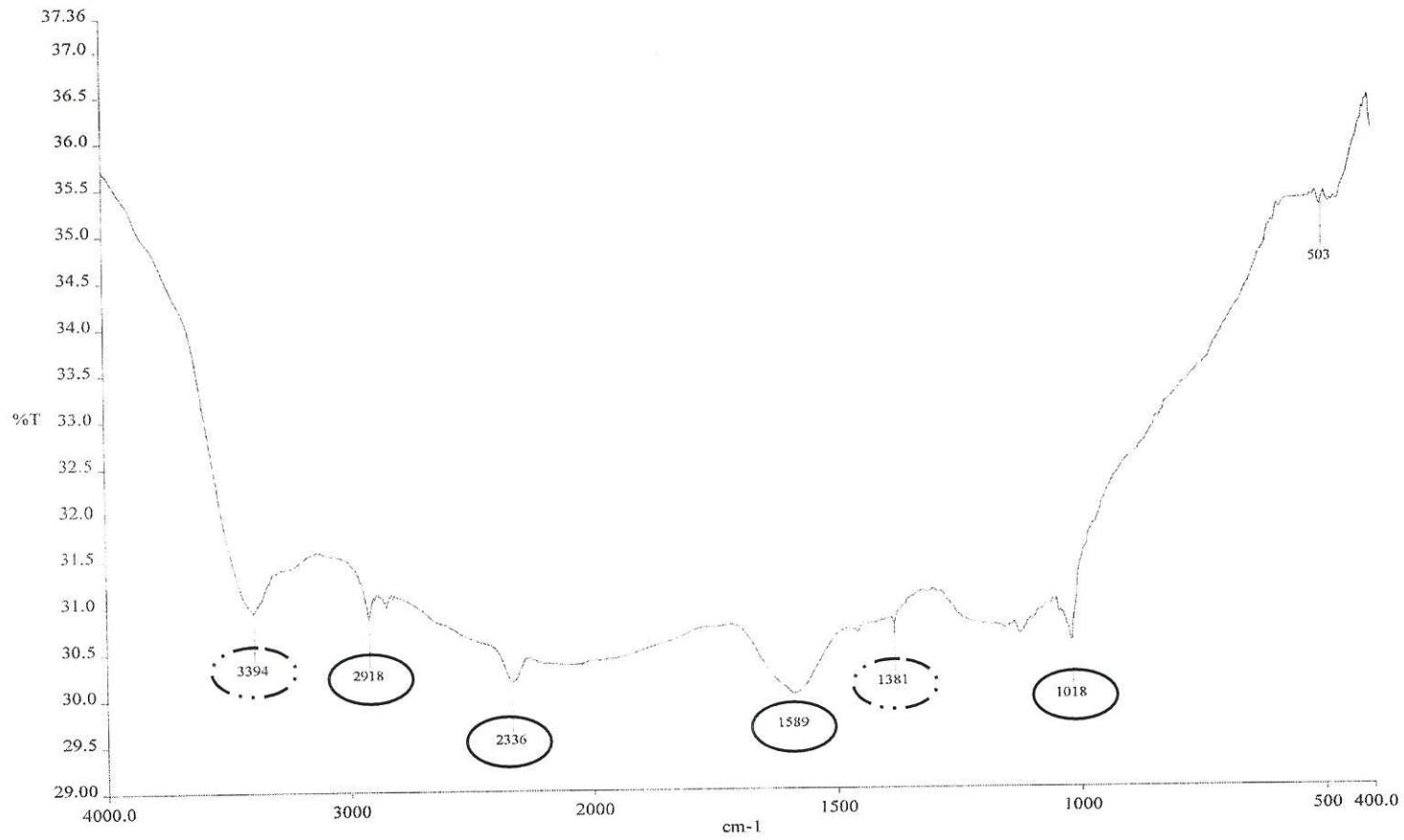
$$x = 0.21$$

∴ การขีดความสามารถในการวิเคราะห์เนฟทาลีนที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.21 ppm

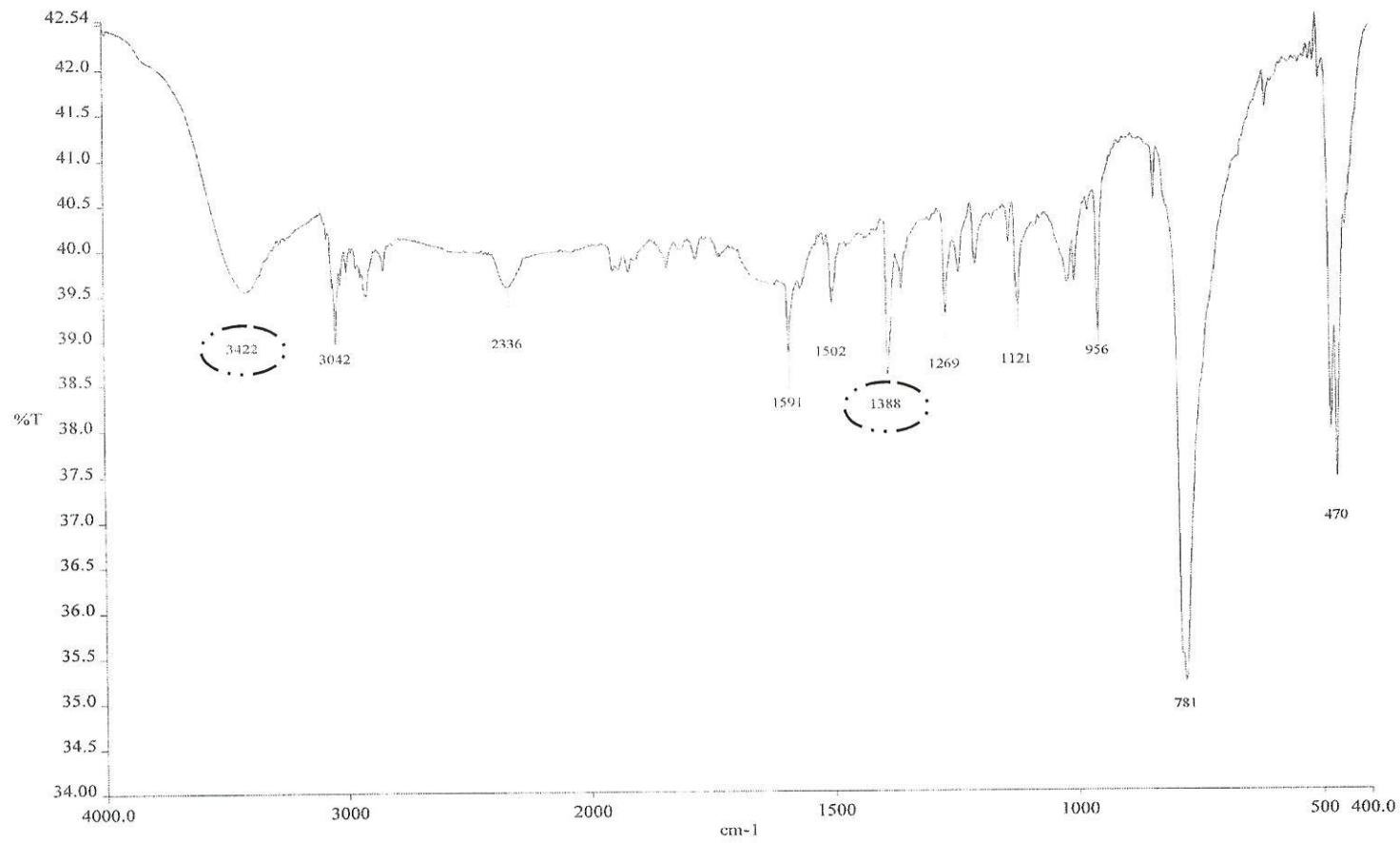
การทดลองที่ 10 การตรวจสอบการดูดซับสารละลาย PAHs บนถ่านกัมมันต์



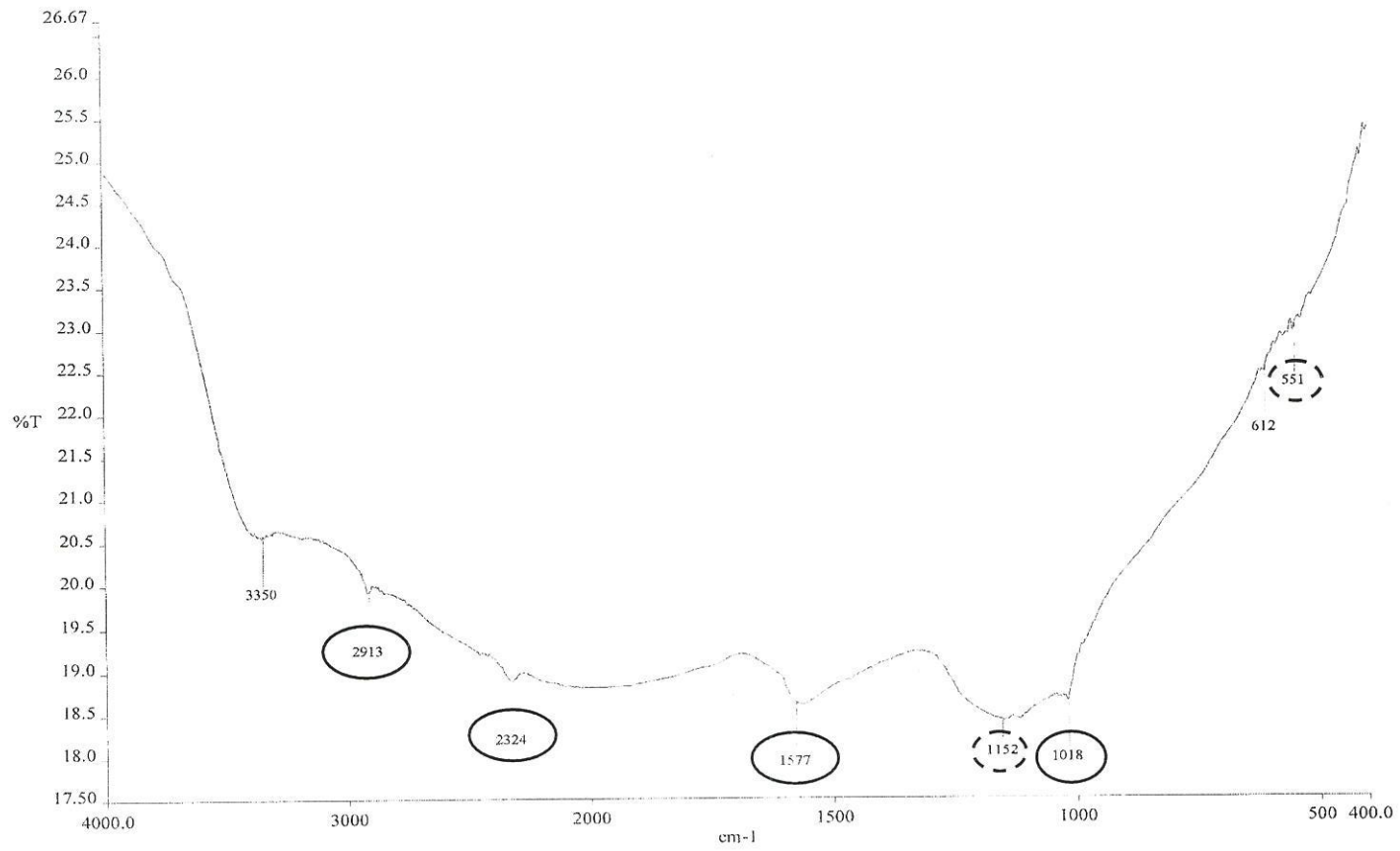
รูปที่ ข.10 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์



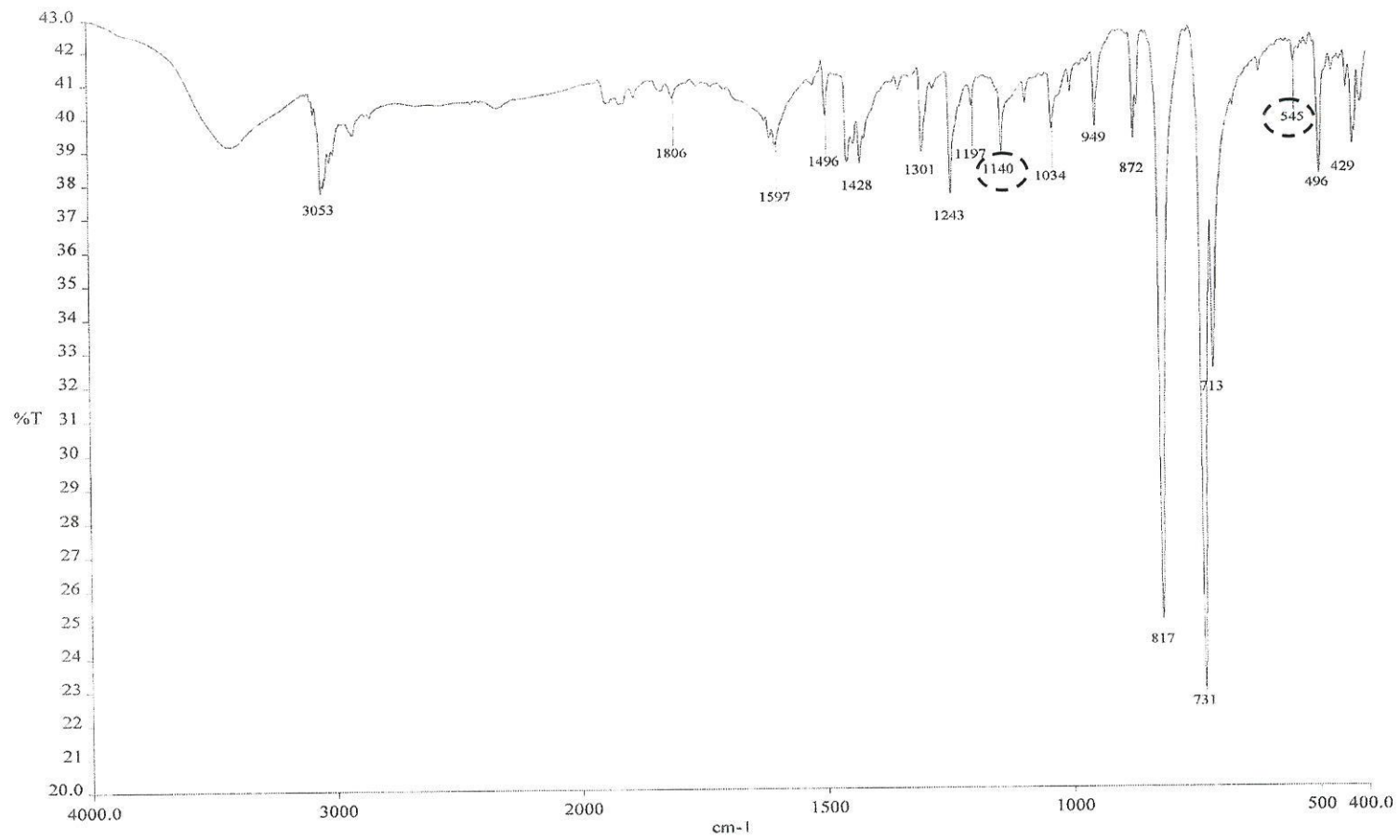
รูปที่ ข.11 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับแนฟทาลีน



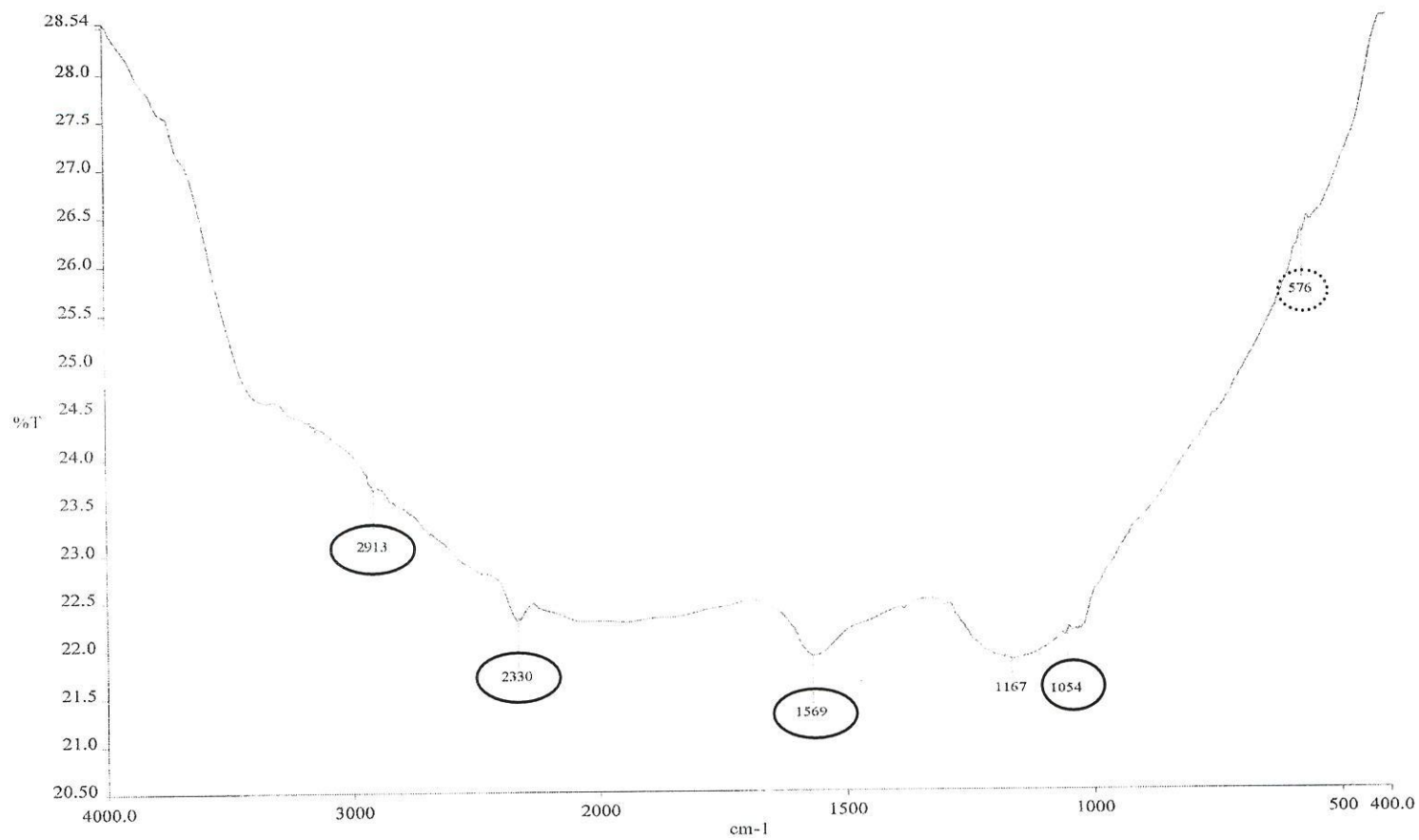
รูปที่ ข.12 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของเนฟทาลีน



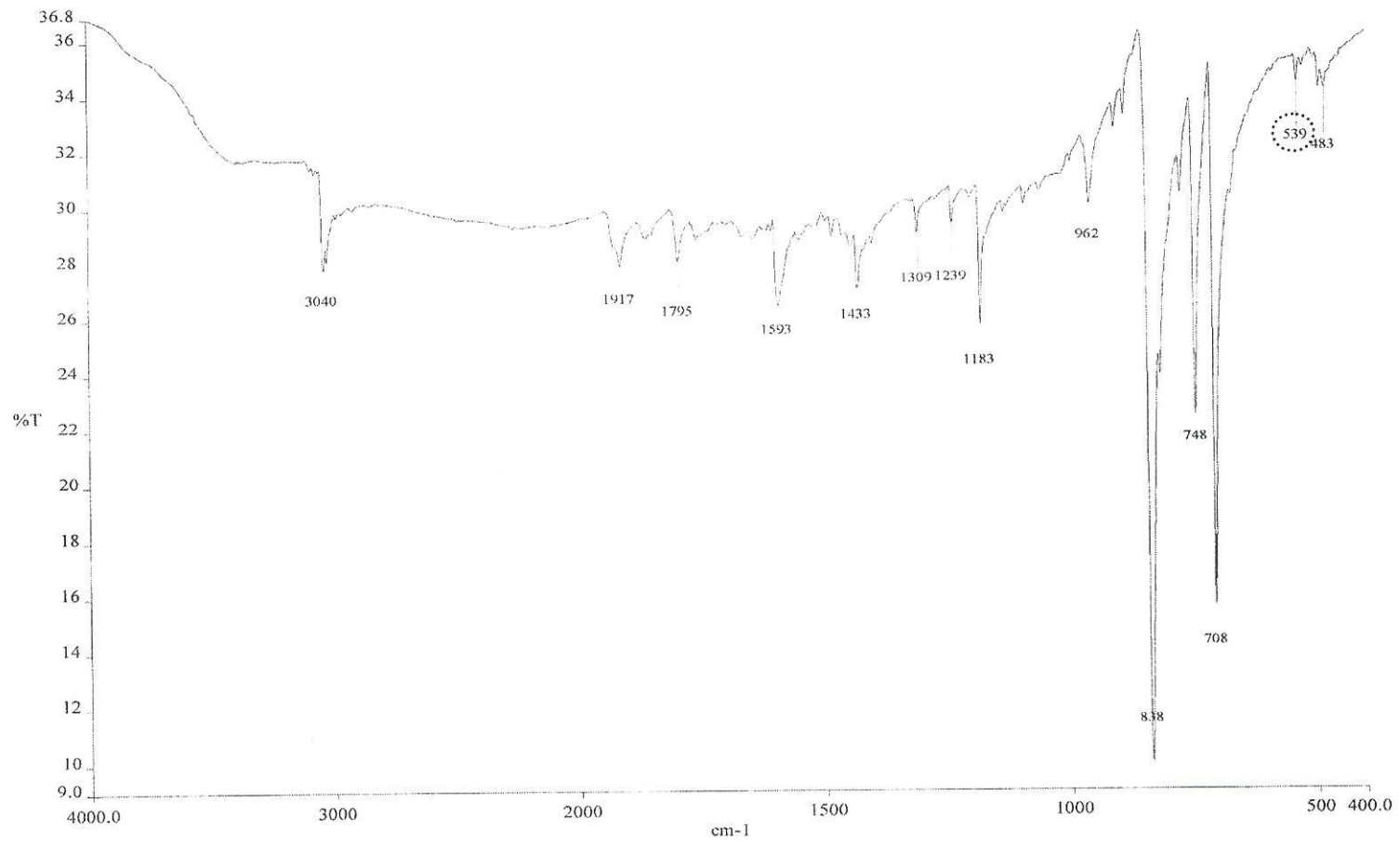
รูปที่ ข.13 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับฟิแนนทรีน



รูปที่ ข.14 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของฟีนแอนทริน



รูปที่ ข.15 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับไพรีน



รูปที่ ข.16 กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของไพรีน

หมายเหตุ

- หมายถึง ค่าพีคที่พบในถ่านกัมมันต์และสามารถพบในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ  
สารละลาย PAHs
- · · · หมายถึง ค่าพีคที่พบในแนฟทาลีนและสามารถพบในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ  
สารละลายแนฟทาลีน
- — — — หมายถึง ค่าพีคที่พบในฟีนแอนทรินและสามารถพบในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ  
สารละลายฟีนแอนทริน
- ..... หมายถึง ค่าพีคที่พบในไพรีนและสามารถพบในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ  
สารละลายไพรีน

## ตำแหน่งพีคที่พบจากกราฟมีดังนี้

3500 – 3300 $\text{cm}^{-1}$	O – H Stretching (Typically Broad)
3100 – 3000 $\text{cm}^{-1}$	C – H Stretching (Unsat. Aromatic)
$\approx 2850 \text{ cm}^{-1}$	– C – CH <sub>2</sub> – C – Stretching (Sym.)
2300 – 2000 $\text{cm}^{-1}$	C $\equiv$ C Stretching
1600 – 1430 $\text{cm}^{-1}$	C = C Stretching
1385 – 1380 $\text{cm}^{-1}$	– CH <sub>3</sub> Bending
1150 – 1200 $\text{cm}^{-1}$	C – O Stretching (Tertiary)
$\approx 1021 \text{ cm}^{-1}$	Cycloalkane
840 – 790 $\text{cm}^{-1}$	– C = C – H Bending (Out of plane)

สำเนาเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ของบริษัท RFCL จำกัด

ชื่อผลิตภัณฑ์ : CHARCOAL ACTIVATED LR-500 GM

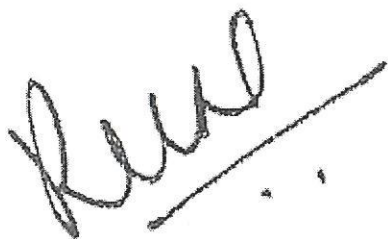
หมายเลขกลุ่ม : P209B08

รหัสผลิตภัณฑ์ : C0155

เดือน ปี ที่ผลิต : กุมภาพันธ์ 2551

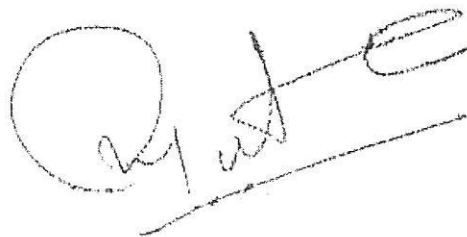
เดือน ปี หมดยอายุ : มกราคม 2554

ผ่านการวิเคราะห์โดย



นักวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์

ผ่านการรับรองโดย



ผู้จัดการฝ่ายรับรองคุณภาพผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ข.26 สำเนาเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ของบริษัท RFCL จำกัด

Test	Results	Specification
Description	Complies	A fine black powder, odourless, free from gritty matter
Guarantee Analysis OH(5 % Aqueous Suspension)	6.62	6.00 - 8.00
Methylene Blue Adsorption	195.00 mg/g	$\geq 180.00$ mg/g
<b>Maximum Limit of Impurities</b>		
Residue on Ignition (At 800°C)	2.44%	$\leq 5.00\%$
Loss on Drying (120°C)	2.35%	$\leq 10.00\%$
Chloride (Cl)	$< 0.20\%$	$\leq 0.20\%$
Sulphate (SO <sub>4</sub> )	$< 0.20\%$	$\leq 0.20\%$
Iron (Fe)	$< 0.07\%$	$\leq 0.07\%$
Heavy Metal (as Pb)	$< 0.005\%$	$\leq 0.005\%$
Water Soluble Matter	0.37%	$\leq 1.00\%$
Alcohol Soluble Matter	0.35%	$\leq 1.00\%$
Substance Soluble in HCl	1.45%	$\leq 2.00\%$

หมายเหตุ

- ในการผลิตแต่ละครั้งจะเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้
- ผ่านการรับรองแล้ว