



การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์
บนเขม่า: เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล
**Adsorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Synthetic Ground Water
on Soots: Comparison between Soots from Petroleum Fuel and Biomass Fuel**

นั้มนวล มานพ

Nimnual Manop

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบั้ณัติต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดิน
 สังกะระหีบ้นเขม่า: เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและ
 เชื้อเพลิงชีวมวล

ผู้เขียน นางสาวนันทวรรณ มานพ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

.....กรรมการ
 (ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์)

.....กรรมการ
 (ดร.พินทุ์สุดา วีรวัฒน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่า: เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและ เชื้อเพลิงชีวมวล
ผู้เขียน	นางสาวนันทวรรณ มานพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (สารพีเอเอช) เป็นสารมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ รวมทั้งเป็นสารก่อมะเร็งและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในมนุษย์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า 2 ชนิด คือ เขม่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (เขม่าดีเซล) และเขม่าเชื้อเพลิงชีวมวล (เขม่าเตาฟืน) ซึ่งสารพีเอเอชที่ทำการศึกษาคือ แอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีน เขม่าจะถูกสกัดเอาสารปนเปื้อนออกด้วยอุปกรณ์ซอกซ์เลต โดยใช้โทลูอินและเมทานอล ในอัตราส่วน 1:6 เป็นตัวสกัด ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า เขม่าทั้งสองชนิดส่วนใหญ่จะมีปริมาณธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีปริมาณไฮโดรเจนและไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย พื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าเตาฟืนมีค่าสูงกว่าเขม่าดีเซล คือ 6.090 และ 4.850 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับสารพีเอเอชบนเขม่าทั้งสองชนิดนั้น พบว่าเขม่าเตาฟืนสามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้สูงกว่าเขม่าดีเซล และสารประกอบพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเกิดการดูดซับบนเขม่าได้ดีกว่าสารประกอบพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จากการศึกษาถึงเวลาในการเข้าสู่สมดุลในการดูดซับสารประกอบพีเอเอช พบว่าสารพีเอเอชใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 12 วัน และพบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าได้ดี

Thesis Title Adsorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Synthetic Ground Water on Soots: Comparison between Soots from Petroleum Fuel and Biomass Fuel

Author Miss Nimmual Manop

Major Program Chemical Engineering

Academic Year 2008

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are generally toxic to aquatic organisms and impact the quality of surface and ground water and many of them are carcinogenic and mutagenic to human. This study investigated adsorption of PAH compounds in synthetic ground water on two soots, one from petroleum fuel (diesel soot) and the other from biomass fuel (biomass soot). This PAHs study would be focus on anthracene pyrene and benzo(a)pyrene. A contaminating substance contained in the collected soot was extracted by soxhlet apparatus using toluene/methanol (1:6). Chemical composition and particulate surface of the soot were investigated. Two soots have carbon as the main element and a little amount of nitrogen and hydrogen. BET surface area of biomass soot is a higher than the one from diesel soot are 6.090 and 4.850 m²/g, respectively. The results showed that biomass soot exhibited much higher PAHs sorption capacities than diesel soot in aqueous solutions. From the experiments, the isotherm demonstrated that the uptake of anthracene, pyrene and benzo (a) pyrene required 12 days to reach the equilibrium. The degree of adsorption was inversely correlated to molecular weight, the sorption capacities increased with decreasing the molecular weight of the PAH compounds. Freundlich and Polanyi – Dubinin – Manes adsorption isotherm could fit PAHs sorption characteristic in synthetic groundwater on two soots.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยและการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จูไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล และ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ ดร.พินทุ์สุดา วีรวัฒน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาชี้แนะและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บุคลากร พี่ เพื่อน และน้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่จัดสรรเงินทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณป้า แม่ น้องและทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นัมนวล มานพ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
รายการตารางภาคผนวก	(13)
รายการภาพประกอบภาคผนวก	(15)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(19)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	
2.1 สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	6
2.1.2 แหล่งกำเนิดและการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของสารประกอบพีเอเอช	9
2.1.2.1 สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ	10
2.1.2.2 กิจกรรมของมนุษย์	10
2.1.3 สาเหตุการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	11
2.1.3.1 สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในดินและน้ำใต้ดิน	12
2.1.4 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม	12
2.1.5 ความเป็นพิษของสารประกอบพีเอเอช	12
2.1.5.1 การเข้าสู่ร่างกาย	13
2.1.5.2 ความเป็นพิษแบบอื่น	13
2.1.5.3 ความเสี่ยง	14
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.6 การบำบัดสารประกอบฟีนอลในสิ่งแวดล้อม	14
2.1.6.1 การบำบัดทางกายภาพ	14
2.1.6.1.1 การดูดซับ	14
2.1.6.1.2 การระเหย	15
2.1.6.1.3 การแตกสลายจากแสง	15
2.1.6.2 การบำบัดทางเคมี	15
2.1.6.2.1 การใช้ก๊าซโอโซน	15
2.1.6.2.2 การใช้สารเคมี	15
2.1.6.3 การบำบัดทางชีวภาพ	15
2.2 กระบวนการดูดซับ	16
2.2.1 กลไกการดูดซับ	16
2.2.2 ประเภทของการดูดซับ	17
2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ	17
2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี	17
2.2.2.3 การดูดซับด้วยประจุ	18
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	18
2.2.3.1 ความปั่นป่วน	18
2.2.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ	19
2.2.3.3 อุณหภูมิ	19
2.2.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ	19
2.2.3.5 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ	19
2.2.4 สมดุลการดูดซับ	20
2.2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ	20
2.2.5.1 สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิทซ์	21
2.2.5.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์	22
2.2.5.3 สมการไอโซเทอมการดูดซับโพลานีย์ คูบินิน เมนส์	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุ	31
3.2 สารเคมี	31
3.2.1 สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมาตรฐาน	31
3.3.2 สารเคมีทั่วไปที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์	31
3.3.3 สารเคมีอื่นๆที่ใช้เป็น Laboratory Chemical	31
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	31
3.4 วิธีการวิจัย	32
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเขม่า	32
3.4.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเขม่า	32
3.4.3 ศึกษาเวลาการเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time)	33
3.4.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)	34
3.4.5 ศึกษาการคายซับ (Desorption Test)	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเขม่า	38
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของเขม่า	38
4.1.2 การศึกษาภาพถ่ายขยายระดับไมครอน	39
4.1.3 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Brunauer – Emmet – Teller (BET)	39
4.1.4 การศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเขม่า	40
4.2 การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (สารพีเอเอช) ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล	41
4.2.1 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับและสัมประสิทธิ์การ พาร์ทิชันของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	41
4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)	46
4.2.3 การคายซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	
ก โครงสร้างและคุณสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	73
ข คุณสมบัติทางกายภาพ	76
ค ข้อมูลการทดลอง	80
ง รายละเอียดการคำนวณ	93
จ สัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน	99
ฉ ไอโซเทอมของการดูดซับ	104
ช ข้อมูลการทดลองการคายซับ	117
ประวัติผู้เขียน	128

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	9
2.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	18
4.1 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (%CHN) ของเขม่า	38
4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าแต่ละชนิด	40
4.3 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าแต่ละชนิดในช่วงขนาดอนุภาคต่างๆ	40
4.4 แสดงเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าดีเซล และเขม่าเตาฟืน	41
4.5 ค่า K_{sw} ของการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	46
4.6 ปริมาณการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดที่เวลาสมดุล	47
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสมการฟรุนดลิชส์และสมการแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	57
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ โพลานีย์ ดูบินิน เมนส์	62
4.9 แสดงจำนวนการคายซับของสารไพรีนบนเขม่า	64
4.10 แสดงจำนวนการคายซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่า	64

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 สารประกอบพีเอเอชที่กำหนดให้อยู่ในรายชื่อสารพิษของ U.S.E.P.A	7
2.2 ไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 แบบ	21
2.3 แสดงกราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิกซ์	22
2.4 แสดงกราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์	24
3.1 ชุดอุปกรณ์การสกัดซอกซ์เลต (Soxhlet Apparatus)	34
3.2 เครื่อง BET Surface Area Analyzer (SA 3100)	35
3.3 เครื่อง Particle Size Analyzer	35
3.4 เครื่องเขย่า	36
3.5 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี SHIMADZU GC-14 B	36
3.6 แผนผังวิธีการเตรียมตัวอย่างเขม่า	37
4.1 ลักษณะเขม่า	39
4.2 ภาพถ่ายขยายระดับไมครอนของเขม่าดีเซลที่กำลังขยาย 500 3500 8500 เท่า	42
4.3 ภาพถ่ายขยายระดับไมครอนของเขม่าเตาฟืนที่กำลังขยาย 500 3500 8500 เท่า	43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารแอนทราซีนบนเขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ	44
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารไพรีนบนเขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ	44
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ	45
4.7 ไอโซเทอมการดูดซับของสารแอนทราซีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมดุล	47
4.8 ไอโซเทอมการดูดซับของสารไพรีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมดุล	48
4.9 ไอโซเทอมการดูดซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมดุล	48
4.10 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.11 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่า	51
4.12 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่า	52
4.13 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่า	54
4.14 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่า	55
4.15 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่า	56
4.16 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับ สารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	60
4.17 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับ สารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	60
4.18 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับ สารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า	61
4.19 แสดงการคายซับของสารไพรีนบนเขม่าระหว่าง soot-water partitioning coefficient กับเวลา	65
4.20 แสดงการคายซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าระหว่าง soot-water partitioning coefficient กับเวลา	66

รายการตารางภาคผนวก

ตารางที่	หน้า
ข.1 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าในช่วงขนาดอนุภาคต่างๆ	77
ข.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าแต่ละชนิด	78
ค.1 ผลการดูดซับสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าเตาพื้นจำนวน 0.200 กรัม	81
ค.2 ผลการดูดซับสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าดีเซลจำนวน 0.200 กรัม	83
ค.3 ผลการดูดซับสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าเตาพื้นจำนวน 0.200 กรัม	85
ค.4 ผลการดูดซับสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร เขม่าดีเซลจำนวน 0.200 กรัม	87
ค.5 ผลการดูดซับสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าเตาพื้นจำนวน 0.200 กรัม	89
ค.6 ผลการดูดซับสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าดีเซลจำนวน 0.200 กรัม	91
ง.1 แสดงการคำนวณค่า subcooled liquid solubilities ของสารประกอบ โพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	95
ง.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิคซ์ของสารประกอบพีเอชบนเขม่า	97

รายการตารางภาคผนวก (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ ของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่า	98
จ.1 Soot-water partitioning coefficient, K_{sw} ที่อธิบายการดูดซับสารประกอบ พีเอเอชบนเขม่า	100
ช.1 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าเตาฟืน	118
ช.2 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าดีเซล	121
ช.3 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าเตาฟืน	124
ช.4 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซล	126

รายการภาพประกอบภาคผนวก

ภาพประกอบที่	หน้า
ข.1 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่า	77
ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับสัดส่วนเชิงปริมาตรเปรียบเทียบระหว่างเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืน	78
ข.3 N_2 adsorption isotherms of diesel soot and biomass soot	79
จ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารแอนทราซีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำพาร์ทิชัน	101
จ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารไพรีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำพาร์ทิชัน	101
จ.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำพาร์ทิชัน	102
จ.4 แสดง sorption isotherm data ของสารแอนทราซีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล	102
จ.5 แสดง sorption isotherm data ของสารไพรีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล	103
จ.6 แสดง sorption isotherm data ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล	103
ฉ.1 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	105
ฉ.2 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน	105
ฉ.3 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	106
ฉ.4 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน	106
ฉ.5 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	107
ฉ.6 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน	107

รายการภาพประกอบภาคผนวก (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ฉ.7 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าดีเซล	108
ฉ.8 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าเตาฟืน	108
ฉ.9 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าดีเซล	109
ฉ.10 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าเตาฟืน	109
ฉ.11 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าดีเซล	110
ฉ.12 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าเตาฟืน	110
ฉ.13 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารประกอบ พีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	111
ฉ.14 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารประกอบ พีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน	111
ฉ.15 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	112
ฉ.16 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าดีเซล	112
ฉ.17 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่าดีเซล	113
ฉ.18 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน	113
ฉ.19 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่าเตาฟืน	114

รายการภาพประกอบภาคผนวก (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ฉ.20 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน สังเคราะห์บนเขม่าตาฟีน	114
ฉ.21 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารไพรีนบนเขม่าดีเซล	115
ฉ.22 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารไพรีนบนเขม่าตาฟีน	115
ฉ.23 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซล	116
ฉ.24 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าตาฟีน	116

ตัวย่อและสัญลักษณ์

ANT	=	Anthracene
PYR	=	Pyrene
BENZ	=	Benzo(a)pyrene
PDM	=	Polanyi – Dubinin – Manes
BET	=	Brunauer – Emmet – Teller
SEM	=	Scanning Electron Microscope
GC	=	Gas Chromatography
cm ³ /g	=	Cubic meter per gram
μ g/l	=	Microgram per liter
μ g/g	=	Microgram per gram
J/mol	=	Joule per mole
K _F	=	ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรอนดลิช
K _L	=	ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์
1/n	=	ค่าคงที่ของฟรอนดลิช
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

การปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในการพัฒนาทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมจะต้องมีการผลิต การเก็บรักษา และการขนส่ง รวมทั้งการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการขนส่ง การอุตสาหกรรมและการหุงต้มในครัวเรือน นอกเหนือจากการได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้วก็ยังมีผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้อื่นๆอีกมากมาย เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ และสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) เป็นต้น สามารถพบสารประกอบพีเอเอชเหล่านี้ ได้จากน้ำทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทำยาง การสังเคราะห์สารอินทรีย์ วัตถุระเบิด ยาฆ่าแมลง แลคเกอร์ สี ย้อม น้ำหอม และโรงงานกลั่นน้ำมัน การใช้สารเคมีบางชนิด เช่น สารฆ่าแมลงและปราบศัตรูพืช นอกจากนี้ยังพบในควันและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ต่างๆ (ยูทธร เย่าเนื่อง 2544) ผลที่ตามมาคือปัญหาลังแวดล้อมเป็นพิษ ยิ่งกว่านั้นควันจากท่อไอเสีย ควันไฟ ก๊าซจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน การเกษตรแผนใหม่ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม การฝังกลบและการเผาขยะ เป็นต้น ก่อให้เกิดผลกระทบและอันตรายต่อคุณภาพอากาศ น้ำ ดินและสุขภาพของประชาชนที่อาศัยอยู่รอบๆบริเวณนั้นอีกด้วย (จิริทีปณ์ แสนรัก 2547)

เขม่าที่เกิดขึ้นนี้เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ อาจเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน หรือปฏิกิริยากอนเดนเซชันของเชื้อเพลิง ซึ่งด้วยลักษณะทางกายภาพที่มีความเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปตามพื้นที่ผิวของเขม่าทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้บนพื้นผิวของเขม่าในลักษณะเป็นชั้น (Layer) ได้

สารประกอบพีเอเอชเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีเฉพาะคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้นเป็นองค์ประกอบ เรียงตัวเป็นวงแหวนเบนซีนมาเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง มุมงอ หรือเป็นกลุ่มตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง การปล่อยควันเสียจาก

ยานพาหนะ การเผาสารอินทรีย์ต่างๆ ทั้งสารประกอบพีเอเอช และเขม่ามีน้ำหนักเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้ที่มีผลเชิงลบต่อสุขภาพและต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งสารประกอบพีเอเอชนี้มีความเป็นพิษ แบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิต เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารเบี่ยงเบนพันธุกรรม (mutagen) และทำให้ทารกในครรภ์มีรูปร่างผิดปกติ (teratogen) (จิริทีปณ์ แสนรัก 2547) ประเภท หนึ่ง หากมีการสะสมไว้มากเกินค่ากำหนดรวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ทางอากาศและ เกี่ยวข้องกับการเกิดแก๊สเรือนกระจกอีกด้วย เมื่อสารประกอบพีเอเอชและเขม่าถูกปล่อยออกจาก แหล่งกำเนิด ก็จะเกิดการกระจายสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ในอากาศ ดิน และน้ำ ซึ่งสารประกอบพีเอเอช เหล่านี้จะสลายตัวได้ยาก สามารถปนเปื้อนอยู่ในดินและถ่ายโอนไปสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ ในน้ำใต้ดิน จะมีปริมาณสารพิษซึ่งมีผลต่อคุณภาพของน้ำใต้ดิน ซึ่งสารพิษในน้ำใต้ดินนี้อาจเกิดจากการกระจายตัว ของขนาดอนุภาค สภาวะอากาศเสีย การสะสมของสารพิษบนดิน การแขวนตัวของอนุภาค โลหะหนัก น้ำมัน และสารประกอบพีเอเอช การถ่ายโอนสู่ชั้นน้ำใต้ดินของสารประกอบพีเอเอช จะ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบนั้น เช่น โครงสร้างของโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการละลาย และคุณสมบัติทางสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณ สารอินทรีย์คาร์บอน เป็นต้น การถ่ายโอนของสารประกอบพีเอเอชเหมาะสมที่จะใช้ในการหาค่า ทางสิ่งแวดล้อมของสารประกอบ โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารประกอบสามารถใช้ ลักษณะทางสิ่งแวดล้อมที่สารประกอบนั้นอาศัยอยู่ตัวอย่างเช่นสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันระหว่าง เขม่าและน้ำใต้ดิน (Soot – Water Partitioning Coefficient, K_{sw}) (Bucheli et al., 2000 และ Boving et al., 2004) ที่ใช้ในการอธิบายการกระจายตัวของสารประกอบระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน ซึ่ง สามารถช่วยในการทำนายแนวโน้มของสารประกอบพีเอเอชที่เคลื่อนที่ไปยังชั้นน้ำใต้ดินซึ่งมีผลต่อ คุณภาพของน้ำและต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา ลักษณะเฉพาะของเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและ เขม่าเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อที่จะได้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน และลักษณะของเขม่าจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ก่อนเพื่อนำไปศึกษาถึง การกระจายตัวของสารประกอบพีเอเอชระหว่างน้ำใต้ดิน และเขม่าแต่ละชนิดด้วยพารามิเตอร์ สัมประสิทธิ์การพาร์ทิชัน ระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน (Soot – Water Partitioning Coefficient , K_{sw}) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถช่วยในการทำนายแนวโน้มของสารประกอบพีเอเอชที่เคลื่อนที่ไป ยังชั้นน้ำใต้ดินได้ ในการศึกษาจะรวบรวมข้อมูลปริมาณการกระจายตัวของสารประกอบพีเอเอชใน เขม่าและในน้ำใต้ดินที่สภาวะสมดุลเพื่อนำมาทำการถดถอยไม่เชิงเส้นกับแบบจำลองการดูดซับ

ของฟรอนด์ลิกซ์ (Freundlich Adsorption Isotherm) แลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และ โพลานีย์ ดูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes, PDM Adsorption Isotherm)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม และเชื้อเพลิงชีวมวล
2. เพื่อหาสถานะสมดุลระหว่างเขม่า (ของแข็ง) – น้ำใต้ดินสังเคราะห์ (ของเหลว) ของสารประกอบพีเอเอช (แอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ (เอ)ไพรีน) ของเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล
3. เพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับกับแบบจำลองของฟรอนด์ลิกซ์ (Freundlich model) แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir model) และแบบจำลองของ Polanyi – Dubinin – Manes (PDM model)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเขม่าแต่ละชนิด คือ ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่า โดยวิธี Brunauer – Emmet – Teller: BET ศึกษาลักษณะของเขม่าทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope: SEM และตรวจสอบหาลองค์ประกอบทางเคมีของเขม่าแต่ละชนิด โดยการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยใช้เครื่อง CHNS elemental analyzer: CHNS - 001
2. ศึกษาถึงสมดุลวัฏภาคระหว่างเขม่า (ของแข็ง) – น้ำใต้ดินสังเคราะห์ (ของเหลว) และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารประกอบพีเอเอช (แอนทราซีน ไพรีนและเบนโซ (เอ)ไพรีน) ระหว่างน้ำใต้ดินและเขม่าแต่ละชนิด
3. ทำการถอดแบบไม่เชิงเส้นของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารประกอบพีเอเอชกับแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิกซ์ (Freundlich Adsorption Isotherm) แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และ โพลานีย์ ดูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm, PDM Adsorption Isotherm)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการติดตามผลของสารประกอบพีเอเอชที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิตอื่นๆ และที่เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้สำหรับหาแนวทางในการบำบัดสารประกอบพีเอเอชที่สามารถปนเปื้อนอยู่ในดินและถ่ายโอนสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons : PAHs)

สารประกอบแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นวงแหวน เมื่อเขียนสูตรโครงสร้างแบบเส้น พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมภายในวงแหวน จะเป็นพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ สารประกอบแอโรมาติกตัวแรกคือ เบนซีน (C_6H_6) ดังนั้น สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) คือสารประกอบที่มีวงแหวนเบนซีนหลายๆวงมาเชื่อมต่อกัน จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีอันตรายหากสะสมไว้ในสิ่งแวดล้อม (Jonker et al., 2008) โดยนิยามแล้วสารประกอบพีเอเอชจัดเป็นสารประกอบวงแหวนแอโรมาติก เบนซีนมากกว่าหนึ่งวงมารวมกัน แบบเส้นตรง แบบเชิงมุม หรือเป็นกลุ่มก็ได้ และมีค่าการละลายน้ำที่ต่ำมากๆ จึงจัดเป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Organic Compounds: HOCs) ส่วนมากเป็นของแข็งที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง และสลายตัวได้ยาก มีความดันไอของสารอยู่ในช่วง 10^{-3} ทอร์ (สำหรับโครงสร้างที่มีแอโรมาติก 3 วง) ถึง 10^{-2} ทอร์ (สำหรับโครงสร้างที่มีแอโรมาติก 7 วง) ที่ $25^\circ C$ และสามารถดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตร สารประกอบพีเอเอชเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบปนเปื้อนอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำ ดิน และอากาศ สารประกอบพีเอเอชเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ตามธรรมชาติ หรือจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในชีวิตประจำวัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ต่างๆ การประกอบอาหารในครีวเรือน และจากควันบุหรี่ รวมทั้งบริเวณแหล่งงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิต และใช้สารรักษาเนื้อไม้ เป็นต้น ทำให้พบการปนเปื้อนสารประกอบพีเอเอชในปริมาณสูง ซึ่งอาจตกค้างและสะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่เสถียร ในรูปของผลึกของแข็ง และละลายอยู่ในน้ำแต่น้อยมาก รวมทั้งถูกดูดซับกับสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สารประกอบพีเอเอชสลายตัวได้ช้ามาก สารประกอบพีเอเอชสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ โดยการสะสมอยู่ในพืชที่ขึ้นบนดินและน้ำที่ปนเปื้อนและเข้าสู่สัตว์ผ่านห่วงโซ่อาหารทำให้เข้าสู่มนุษย์ได้ในที่สุด โดยสารประกอบพีเอเอช

สามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ทั้งทางหายใจ รับประทาน และสัมผัสโดยตรงทางผิวหนัง (จิริทีปษ์ แสนรัก 2547)

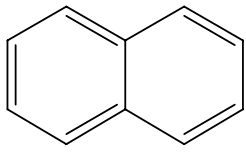
กระบวนการหลายอย่างที่เกี่ยวกับอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงและอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทำให้เกิดสารประกอบพีเอเอชได้ เช่น การผลิตและใช้แอสฟัลท์ (Asphalt Production and Use), การผลิตถ่านโค้ก (Coke Production) การทำน้ำมันดิบให้บริสุทธิ์และการกลั่น (Refining /Distillation of Crude Oil and Crude-Oil-Derived Product) การแตกสลายโมเลกุลด้วยคะตะลิสต์ (Catalytic Cracking) และอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท รวมทั้งได้จากน้ำทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทำยาง การสังเคราะห์สารอินทรีย์ โรงกลั่นน้ำมัน จากการใช้สารเคมีบางชนิด เช่น สารฆ่าแมลง และปราบศัตรูพืช การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Kleineidam et al.,2002) นอกจากนี้ยังพบในควันและเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงต่างๆ ทั้งเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเขม่าที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดได้จากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันหรือปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของเชื้อเพลิงด้วยลักษณะทางกายภาพที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวของเขม่าทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้บนพื้นผิวได้ ดังนั้นเมื่อสารประกอบพีเอเอชและเขม่าถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดจะเกิดการกระจายสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ทางอากาศ และเกี่ยวข้องกับการเกิดแก๊สเรือนกระจกอีกด้วย ซึ่งการกระจายตัวจะทำให้อนุภาคของสารเกิดการจับตัวและเกาะติดกับอนุภาคของสารแขวนลอยบางส่วนของอนุภาคจะจับตัวกันเกิดการตกตะกอนทับถมลงสู่พื้นดินและเนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้เล็กน้อยหรือไม่ละลายน้ำ สลายตัวได้ยากและสะสมอยู่ในดินได้ดีทำให้เกิดการถ่ายโอนสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ การถ่ายโอนของสารประกอบพีเอเอชจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบนั้น เช่น โครงสร้างของโมเลกุล, น้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการละลาย และคุณสมบัติทางสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน เป็นต้น การถ่ายโอนของสารประกอบพีเอเอช เหมาะสมที่จะใช้ในการหาค่าทางสิ่งแวดล้อมของสารประกอบ โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารประกอบสามารถใช้ลักษณะทางสิ่งแวดล้อมที่สารประกอบนั้นอาศัยอยู่ ตัวอย่างเช่นสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน (Soot – Water Partitioning Coefficient, K_{sw}) (Bucheli et al., 2000 และ Boving et al., 2004) ที่ใช้ในการอธิบายการกระจายตัวของสารประกอบพีเอเอชระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถช่วยในการทำนายแนวโน้มของสารประกอบพีเอเอชที่เคลื่อนที่ไปยังชั้นน้ำใต้ดินซึ่งมีผลต่อคุณภาพของน้ำและต่อสิ่งแวดล้อม

สารประกอบพีเอเอชมีทั้งหมด 16 ชนิด (จิริทีปษ์ แสนรัก 2547 และ ยุทธกร เข้าเนื่อง 2544) รวมกันเป็นสารก่อมลพิษที่สำคัญซึ่งทางหน่วยงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของ

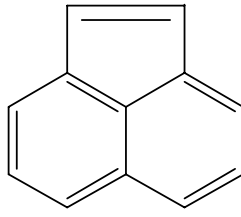
สหรัฐอเมริกา (The United State Environment Protection Agency, USEPA) จัดให้อยู่ในกลุ่มของสารก่อมลพิษที่ต้องกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อมอย่างเร่งด่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ สารพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight PAHs, LMW PAHs) ซึ่งเป็นสารที่มีวงแหวนเบนซีน (benzene ring) น้อยกว่า 4 วง และสารพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High Molecule Weight PAHs, HMW PAHs) ซึ่งมีวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 4 วงขึ้นไป จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าสารเหล่านี้มีความเป็นพิษแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิต เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ก่อการกลายพันธุ์ (mutagen) และทำให้ทารกในครรภ์มีรูปร่างผิดปกติ (teratogen) สารประกอบพีเอเอชที่เป็นสารพิษอันตราย (สารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง) ที่ควรให้ความสำคัญมี 16 ชนิด คือ แนฟทาลีน (Naphthalene), อะซีแนพทิลีน (Acenaphthylene), อะซีแนพทีน (Acenaphthene), ฟลูออรีน (Fluorene), ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene), แอนทราซีน (Anthracene), ฟลูออแรนทีน (Fluoranthene), ไพรีน (Pyrene), เบนโซ(เอ)แอนทราซีน (Benzo(a)anthracene), ไครซีน (Chrysene), เบนโซ(บี)ฟลูออแรนทีน (Benzo(b)fluoranthene), เบนโซ(เค)ฟลูออแรนทีน (Benzo(k)fluoranthene), เบนโซ(เอ)ไพรีน (Benzo(a)pyrene), ไดเบนโซ(เอ,เอช)แอนทราซีน (Dibenzo(a,h)anthracene), เบนโซ(จีเอชไอ)เพอริลีน (Benzo(ghi)perylene), อินดีโน(1,2,3-ดี)ไพรีน (Indeno(1,2,3,d)pyrene) การสะสมตัวของสารประกอบพีเอเอชสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการเหล่านี้จะมาจากในขั้นตอนการเก็บรักษา การขนส่ง กระบวนการผลิต การใช้และการจัดจำหน่าย ซึ่งเมื่อจากอุตสาหกรรมมากมายที่ทำให้เกิดสารประกอบพีเอเอชและความเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมแล้ว จึงสมควรเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการลดปริมาณ หรือบำบัดสารประกอบพีเอเอชที่สะสมในสิ่งแวดล้อมนี้ให้หมดไปหรือทำให้น้อยลงจนถึงระดับที่ไม่เป็นอันตรายในการบำบัดสารประกอบพีเอเอชที่สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมนี้

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

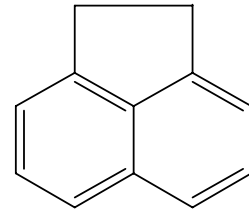
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง และละลายน้ำได้น้อยมากหรือไม่ละลายน้ำ ส่วนสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์และเป็นสารประกอบเดี่ยวจะกลายเป็นไอได้ที่ความดัน 10^{-4} ทอร์ (3 วงเบนซีน) – 10^{-12} ทอร์ (7 วงเบนซีน) สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-400 นาโนเมตร (จิราณีย์ ไชยปรววงศ์ 2544) ค่าลอการิทึมของค่าคงที่การละลายในน้ำ – ออกทานอลมีค่าระหว่าง 3 – 7 จุดเดือดมีค่าระหว่าง 150 – 325 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวมีค่าระหว่าง 101 – 438 องศาเซลเซียส ในสิ่งแวดล้อมมักเกาะกับอนุภาคหรือสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมต่างๆ



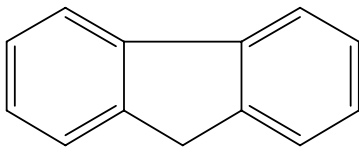
Naphthalene



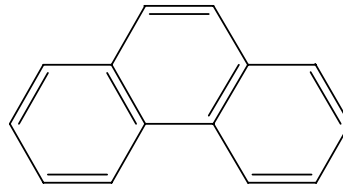
Acenaphthylene



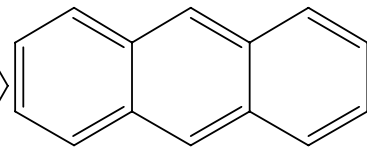
Acenaphthene



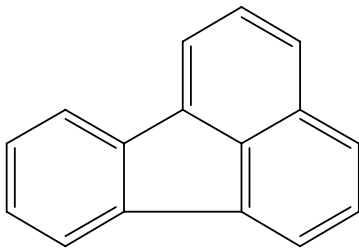
Fluorene



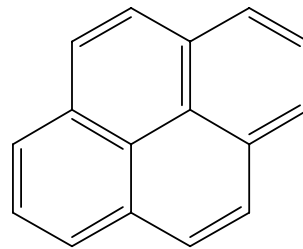
Phenanthrene



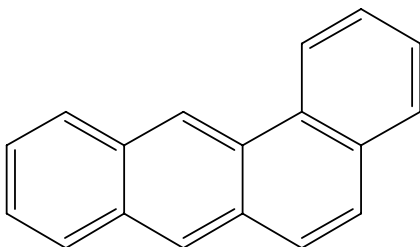
Anthracene



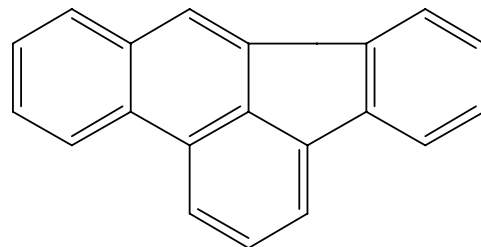
Fluoranthene



Pyrene

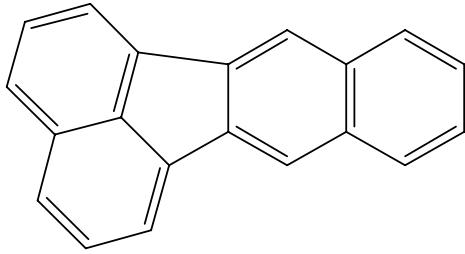


Benzo(a)anthracene

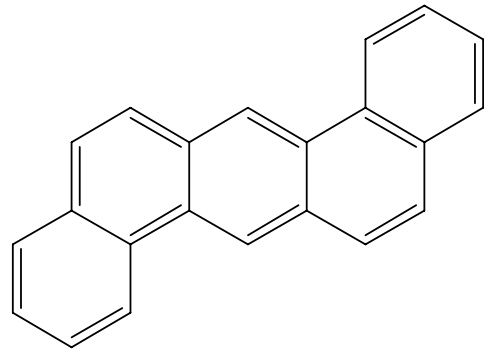


Benzo(b)fluoranthene

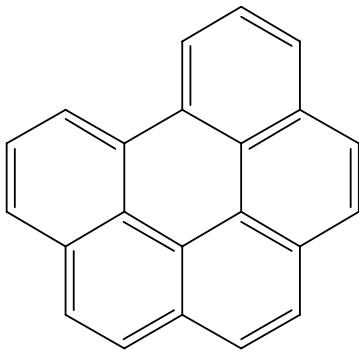
ภาพประกอบที่ 2.1 สารประกอบพีเอเอชที่กำหนดให้อยู่ในรายชื่อสารพิษของ U.S.E.P.A
(จิราณีย์ ไชยปรวงค์ 2544)



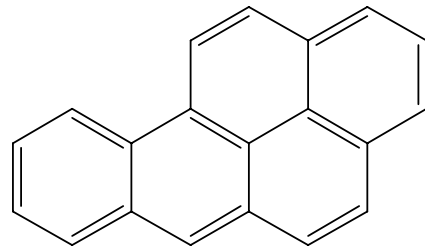
Benzo(k)fluoranthene



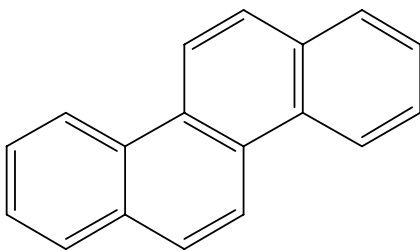
Dibenzo(ah)anthracene



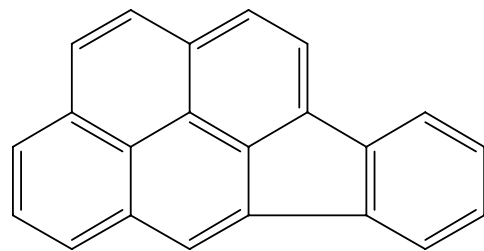
Benzo(ghi)perylene



Benzo(a)pyrene



Chrysene



Indeno(1,2,3,d)pyrene

ภาพประกอบที่ 2.1 สารประกอบพีเอเอชที่กำหนดให้อยู่ในรายชื่อสารพิษของ U.S.E.P.A (ต่อ)
(จราณีษ์ ไชยปรุงศ์ 2544)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

PAHs compound	จำนวนวงแหวน	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)	ความสามารถในการละลายน้ำ (mg/l)	log K _{ow}	ความดันไอ (torr at 20°C)
1. Naphthalene	2	80	218	30	3.37	4.9*10 ⁻²
2. Acenaphthylene	3	92	265	3.93	4.07	2.9*10 ⁻²
3. Acenaphthene	3	96	279	3.47	4.33	2.0*10 ⁻²
4. Fluorene	3	116	293	1.98	4.18	1.3*10 ⁻²
5. Phenanthrene	3	101	340	1.29	4.46	6.9*10 ⁻⁴
6. Anthracene	3	216	340	0.11	4.45	1.9*10 ⁻⁷
7. Fluoranthene	4	111	-	0.26	5.33	6.0*10 ⁻⁶
8. Pyrene	4	149	360	0.14	5.32	6.9*10 ⁻⁷
9. Benz(a)anthracene	4	158	400	0.014	5.61	5.0*10 ⁻⁹
10. Chrysene	4	255	-	0.002	5.61	6.3*10 ⁻⁷
11. Benzo(b)fluoranthene	5	167	-	1.2*10 ⁻³	6.57	5.0*10 ⁻⁷
12. Benzo(k)fluoranthene	5	217	480	5.5*10 ⁻⁴	6.84	5.0*10 ⁻⁷
13. Benzo(a)pyrene	5	179	496	3.8*10 ⁻³	6.04	5.0*10 ⁻⁷
14. Dibenzo(a,h)anthracene	5	262	-	5.0*10 ⁻⁴	5.97	1.0*10 ⁻¹⁰
15. Benzo(ghi)perylene	6	222	-	2.6*10 ⁻⁴	7.23	1.0*10 ⁻¹⁰
16. Ideno(1,2,3,-d)pyrene	6	163	-	0.062	7.66	1.0*10 ⁻¹⁰

ที่มา: จิราณีย์ ไชยปรวศ์ 2544

2.1.2 แหล่งกำเนิดและการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของสารประกอบพีเอเอช

สารประกอบพีเอเอชส่วนมากเกิดจากการที่สารอินทรีย์ได้รับความร้อนสูง แล้วโมเลกุลเกิดการเรียงตัวใหม่ได้โครงสร้างวงเบนซินแล้วรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นและเรียงตัวใหม่จนได้สารนี้หลายชนิดสุดท้ายเป็นเขม่าสีดำ ซึ่งสามารถพบได้จาก 2 แหล่งสำคัญคือ (จิริทีปณ์ แสนรัก 2547)

2.1.2.1 สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ

จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ หรือเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ภายใต้อุณหภูมิสูงของลาวาและแมกมาในใจกลางโลกที่ยังไม่เย็นตัว ซึ่งทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดไพโรไลซิสอย่างช้าๆ โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่จากสายไฮโดรคาร์บอนได้เป็นวงเบนซีนจาก 1 เป็น 2 และ 3 วงไปเรื่อยๆ จนทำให้เกิดน้ำมันดิบและถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้จากซากพืช ต้นไม้ในป่า รวมถึงปฏิกิริยาการสร้างสีในพืช และแบคทีเรีย บางชนิด

2.1.2.2 กิจกรรมของมนุษย์

การเผาทำลายสิ่งต่างๆ ของมนุษย์เอง เป็นต้นกำเนิดอันสำคัญของสารเหล่านี้ โดยเฉพาะการใช้ น้ำมันดิบ เชื้อเพลิงฟอสซิล การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากน้ำมันดิบ เช่น โคลทาร์ คาร์บอนแบล็ค โดยถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักของโลกปัจจุบัน รวมทั้งควันจากท่อไอเสียรถยนต์และควันบุหรี่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม การกลั่นน้ำมันดิบไอเสียรถยนต์ รวมถึงการเผาไหม้วัสดุต่างๆ เช่น ฐูป บูรีชีการ์ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้กรดอะมิโนฟีนิลอะลาซีนที่องค์ประกอบหลักในบูรีและชาที่ใช้ดื่ม ดังนั้นจึงสามารถตรวจพบพีเอเอชได้จากของเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับปิโตรเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นแหล่งผลิตสารประกอบพีเอเอชที่สำคัญ ซึ่งปล่อยสารพิษนี้ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด และการรั่วไหลของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจากการนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมรวมทั้งการขนส่ง การดูแลเก็บรักษา ตลอดจนการกำจัดกากของเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว โดยสรุปไว้ดังนี้

ไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ สารประกอบพีเอเอชที่พบในอากาศมาจากควันจากท่อไอเสียรถยนต์และเครื่องจักรกลเป็นส่วนใหญ่

การปนเปื้อนของน้ำมัน ปริมาณ สารประกอบพีเอเอชที่พบในดินและน้ำตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลมาจากการปนเปื้อนของน้ำมันที่ใช้ในเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมและเรือต่างๆ รวมทั้งน้ำมันเครื่องเก่าที่ผ่านการใช้แล้ว โดยพบปริมาณสูงในระยะใกล้ฝั่งและน้อยลงตามลำดับ เมื่อห่างฝั่งออกไป

กระบวนการแปรรูปและปรุงอาหาร การปรุงและการแปรรูปอาหารที่ทำให้เกิดสารประกอบพีเอเอชได้คือ การอบขนม การเคี่ยวน้ำตาลเป็นคาราเมล การคั่วกาแฟ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล หรือเกิดขึ้นระหว่างการหมักดอง เช่น ผักดองกิมจิ ซีอิ๊ว นอกจากนี้ การปรุงอาหารโดยการอบ ปิ้งย่าง ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เช่น ไส้กรอกรมควัน หมูปิ้ง ไก่ย่าง ที่ไหม้เกรียม ทำให้มีสารประกอบพีเอเอชปนเปื้อนในอาหารได้

กระบวนการแยกและแปรสภาพก๊าซธรรมชาติจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

การใช้แหล่งพลังงานและความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล
กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบ
กระบวนการการผลิตถ่านโค้ก
การผลิตและการใช้คาร์บอนแบล็ค
การผลิตและการใช้แอสฟัลท์
กระบวนการรักษาเนื้อไม้
การผลิตผลิตภัณฑ์ถนอมเนื้อไม้ที่ใช้คลอรีนไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก
การเก็บ การขนส่ง กระบวนการผลิต การใช้และการกำจัดน้ำมันเชื้อเพลิง
การกำจัดสิ่งปนเปื้อนโดยการฝังดิน
การเผาไหม้ของถ่านหินในระบบเปิด
การเผาสังเคราะห์
การซึมของน้ำมันดิบในธรรมชาติ
การรั่วไหลที่เกิดจากอุบัติเหตุจากเรือบรรทุกน้ำมันและเรือชนิดอื่น
การแพร่กระจายของน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

สารประกอบพีเอเอชจะกระจายสู่สิ่งแวดล้อมทั่วไปแล้วถูกสะสมในดิน แล้วเกิดการถ่ายโอนสู่ชั้นน้ำใต้ดินตะกอนบริเวณอ่าวทะเล บรรยากาศ ผุ่น ต้นไม้ ผัก และทุกสิ่งทุกอย่างที่สัมผัสกับสารเหล่านี้ได้ทั่วโลก รวมถึงสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นด้วย จะมีปริมาณมากหรือน้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆรวมด้วย

2.1.3 สาเหตุการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากแหล่งต่างๆ ข้างต้น หากมีการปนเปื้อนบริเวณผิวดินส่วนหนึ่งระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนหนึ่งยังปนเปื้อนอยู่ในดินและมีการแพร่กระจายในดินทั้งในแนวตั้งและแนวนอน เนื่องจากการชะของน้ำฝน สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านั้นจึงมีโอกาสนเคลื่อนลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน และทำให้น้ำใต้ดินมีการปนเปื้อนเนื่องจากคุณสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยทั่วไปมีความสามารถในการละลายได้น้อย ดังนั้น หากมีการปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินแล้ว จะทำให้มีการปนเปื้อนเป็นเวลานาน

2.1.3.1 สารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในดินและน้ำใต้ดิน

การปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดิน เป็นสิ่งที่มองไม่เห็นเพราะอยู่ใต้ดิน แตกต่างจากการปนเปื้อนในบรรยากาศและในแหล่งน้ำผิวดิน แต่เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าน้ำใต้ดิน หรือที่เรียกว่า น้ำบาดาล เป็นทรัพยากรน้ำแหล่งสำคัญของประชาชนชาวไทยสำหรับการอุปโภคบริโภค

ดังนั้นผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดิน จะไม่เป็นที่ตระหนักจนกระทั่งปรากฏผลต่อสุขภาพของประชาชนผู้ใช้น้ำใต้ดินในการอุปโภคบริโภค

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม

เมื่อสารประกอบพีเอเอชเข้าสู่สิ่งแวดล้อม อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. การย่อยสลายทางชีวภาพ โดยมีสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ได้แก่
 - แบคทีเรีย ในสภาวะที่มีออกซิเจน แบคทีเรียจะย่อยสลายสารประกอบพีเอเอช เริ่มจากการออกซิไดส์ ให้เป็น dihydrodiol จากนั้นจึงแตกวงออกจนได้สารตัวกลางในวัฏจักรเครปส์ และนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานได้ในที่สุด
 - เชื้อราบางกลุ่ม เช่น white rot fungi ย่อยสลายสารประกอบพีเอเอชโดยใช้ เอนไซม์ สำหรับย่อยสลายลิกนิน เช่น lignin peroxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่รากกลุ่มนี้ใช้ย่อยสลายเนื้อไม้ แต่เอนไซม์มีความจำเพาะต่ำจึงย่อยสลายสารประกอบพีเอเอชที่โครงสร้างคล้ายลิกนินได้ด้วย
2. การย่อยสลายโดยแสง สารประกอบพีเอเอชถูกออกซิไดส์ด้วยแสงได้
3. การแตกสลายด้วยน้ำ เกิดได้น้อยมาก
4. การรวมตัวกับดิน สารประกอบพีเอเอชเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ ค่าคงที่การละลายในน้ำ – ออกทานอลสูง จึงยึดเกาะกับอนุภาคของดินหรือดินตะกอนได้ดี จึงพบการปนเปื้อนในบริเวณดังกล่าวได้สูง การกระจายในชั้นดินต่างๆ ขึ้นกับขนาดโมเลกุล และชั้นดิน สารประกอบพีเอเอชที่มีวงแหวนเบนซีน 2 – 3 วง มีแนวโน้มจะพบมากในชั้นของทราย บริเวณน้ำใต้ดิน ส่วนสารประกอบพีเอเอชที่มีวงเบนซีน 5 – 6 วง มีแนวโน้มที่จะพบในชั้นของดินที่มีสารอินทรีย์มาก และสารประกอบพีเอเอชเหล่านี้มีแนวโน้มจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยากอีกด้วย

2.1.5 ความเป็นพิษของสารประกอบพีเอเอช

โดยทั่วไปสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ ในสิ่งมีชีวิตชั้นสูงจะพบความเป็นพิษเรื้อรัง การได้รับแบบเรื้อรังอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบต่างๆ ของร่างกายได้ แต่อาการไม่รุนแรงนัก ความเป็นพิษที่สำคัญ

ของสารประกอบพีเอเอช คือความสามารถในการก่อมะเร็งในอวัยวะหลายชนิด แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาของตัวอ่อน และพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต

2.1.5.1 การเข้าสู่ร่างกาย

สารประกอบพีเอเอช เข้าสู่ร่างกายได้หลายวิธี ทั้งโดยการกินอาหารที่มีการปนเปื้อนสารประกอบพีเอเอช สูดดมไอระเหย หรือควันเขม่าไฟที่มีสารประกอบพีเอเอชผสมอยู่ หรือโดยการสัมผัสทางผิวหนัง มีรายงานว่า สารประกอบพีเอเอชเข้าสู่ร่างกายโดยการสูดดม โดยพบเมตาบอลิต์ของเบนโซ(เอ)ไพรีนในปัสสาวะ ของอาสาสมัครชายที่สูบบุหรี่ 15 – 20 มวนต่อวัน เป็นเวลานานกว่า 10 ปี โดยเมตาบอลิต์ในปัสสาวะของอาสาสมัครที่ยังมีสุขภาพดี มีค่าสูงกว่าในอาสาสมัครที่เป็นมะเร็งปอด และในอาสาสมัครที่กินเนื้อย่างที่ปนเปื้อนเบนโซ(เอ)ไพรีน จะพบเบนโซ(เอ)ไพรีน ในอุจจาระแต่ไม่พบในอาสาสมัครที่กินเนื้อย่างที่ไม่ปนเปื้อน

การแพร่กระจายของสารประกอบพีเอเอช ในร่างกายของสัตว์ทดลอง พบว่าเมื่อได้รับ โดยการสูดดมและการกินจะแพร่ไปยังปอด ตับ ไต และทางเดินอาหาร หนูที่ได้รับเบนโซ(เอ)ไพรีน โดยการหยอดเข้าหลอดคอ พบว่าเบนโซ(เอ)ไพรีน จะกระจายไปยังปอด ตับ ทางเดินอาหาร และซาก โดยเมตาบอลิต์ ในลำไส้จะมากขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น แสดงว่ามีการขับออกทางน้ำดี และมีการหมุนเวียนระหว่างลำไส้และตับ และสามารถแพร่ไปยังลูกอ่อนในครรภ์ได้ แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับการแพร่กระจายหลังการสัมผัสทางผิวหนัง

2.1.5.2 ความเป็นพิษแบบอื่น

รบกวนระบบต่อมไร้ท่อในปลา และมีผลกระทบต่อสเตอรอยด์ฮอร์โมนในกลุ่มอาร์โททรพอดและมีผลต่อการลอกคราบของปู ครัสเตเชียนหลายชนิดที่สัมผัสกับน้ำมันดินมักมีการลอกคราบที่ผิดปกติ

รบกวนการสื่อสารระหว่างเซลล์

แนฟทาลิน (พบในลูกเหม็น) สามารถเข้าไปจับกับโมเลกุลของตับ ตับ ปอด ยับยั้งกระบวนการหายใจที่ไม่โตคอนเดรีย เป็นพิษต่อระบบประสาท ระคายเคืองต่อผิวหนังและตา ก่อให้เกิดการแพ้แสง และเป็นสารก่อภูมิแพ้ที่อ่อน นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่างโครโมโซมคู่เหมือนมากขึ้น ยับยั้งการส่งสัญญาณผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ ลดระดับอิมมูโนโกลบูลินเอและอิมมูโนโกลบูลินจีในระบบภูมิคุ้มกัน

สารประกอบพีเอเอช มีผลต่อโครงสร้างของจุลินทรีย์ในดิน โดยในดินที่มีการปนเปื้อนน้ำมันจะมีโครงสร้างจุลินทรีย์ต่างไปจากดินที่ไม่ปนเปื้อน

2.1.5.3 ความเสี่ยง

อาชีพที่มีความเสี่ยงที่ต้องสัมผัสกับสารประกอบฟิเอเอช ได้แก่ กระบวนการผลิต โครเมียม การถลุงแร่ที่มีนิกเกิล อุตสาหกรรมอะลูมิเนียม การหลอมเหล็ก การผลิตถ่านหิน งานพิมพ์ที่สัมผัสกับหมึกพิมพ์ งานที่ต้องสัมผัสเขม่าน้ำมัน เช่น ช่างซ่อมถนน ช่างอู่รถ วัสดุในโรงงาน ที่มีไอระเหยของสารประกอบฟิเอเอช ได้แก่ น้ำมันดิบจากถ่านหิน หรือยางมะตอย น้ำมันแร่ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ เขม่าจากการเผาไหม้ คาร์บอนไอเสีย ความเสี่ยงต่อมะเร็งปอดชัดเจน ได้แก่ อาชีพผลิตถ่านหิน และก๊าซถ่านหินซึ่งมีผลพลอยได้คือ ยางมะตอยใช้ทำถนน ส่วนอาชีพอื่นไม่ชัดเจน

2.1.6 การบำบัดสารประกอบฟิเอเอชในสิ่งแวดล้อม

เมื่อสารประกอบฟิเอเอชเข้าสู่สิ่งแวดล้อม มักจะสะสมอยู่ในดิน ตะกอนดิน น้ำ ฝุ่นละออง พืช และอากาศ โดยจะเกาะติดอยู่ในอนุภาคของดิน ตะกอนดิน หรือ ฝุ่น ซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้โดยกระบวนการต่างๆ ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟิเอเอชในสิ่งแวดล้อมได้หลายวิธีดังนี้

การกลายเป็นไอ (Volatilization)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแสง (Photooxidation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (Chemicaloxidation)

การสะสมอยู่ภายในสิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation)

การดูดซับโดยอนุภาคของดิน (Adsorption)

การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Microbial degradation)

โดยจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบฟิเอเอชนั้นๆ รวมทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมนั้น โดยรวมสามารถแยกได้ดังนี้

2.1.6.1 การบำบัดทางกายภาพ

2.1.6.1.1 การดูดซับ (Sorption)

เนื่องจากสารประกอบฟิเอเอชเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ จึงถูกดูดซับติดกับอนุภาคของดินหรือตะกอน (organic matter) ได้อย่างแน่นหนาในปริมาณมาก โดยความแน่นของการจับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นของสารประกอบฟิเอเอช ซึ่งขึ้นอยู่กับความไม่มีขั้วของสารประกอบฟิเอเอช ดังนั้น จึงทำให้สารประกอบฟิเอเอชที่มีมวลโมเลกุลสูงถูกเกาะติดแน่นเป็นเวลานานกว่าสารประกอบฟิเอเอชที่มีมวลโมเลกุลต่ำ จากข้อมูลดังกล่าว จึงมีงานวิจัยศึกษาการใช้สายใยจากต้นไม้เข้ามาช่วยในการดูดซับไว้ก่อนนำไปทำลาย เช่น

aspen wood fiber (*Populus tremula*) มาดูดซับไพรีนที่ละลายน้ำได้ (5 – 50 ไมโครกรัมต่อลิตร) ซึ่งสามารถดูดซับได้มากกว่า 50 % จนสายใยอิมตัวภายในเวลา 12.5 วัน โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับ (aspen wood – water sorption coefficient, K_{ww}) เท่ากับ 462 ± 7.9 (ไมโครกรัมต่อไมโครลิตร)(ไมโครกรัมต่อลิตร)⁻¹ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าลี้คของสัมประสิทธิ์การแบ่งละลายในน้ำกับออกทานอล (octanol – water partition coefficient, K_{ow} เท่ากับ 5.13 (โมลต่อลิตร) (โมลต่อลิตร)⁻¹) ซึ่งสามารถพัฒนาไปใช้บำบัดสารประกอบฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำต่างๆ ได้ (Boving et al., 2004)

2.1.6.1.2 การระเหย (Volatilization)

ส่วนใหญ่สารประกอบฟิเอเอช ที่ปนเปื้อนในดิน ระเหยได้ช้า และน้อยมาก เนื่องจากสารประกอบฟิเอเอชเกาะติดแน่นอยู่ในอนุภาคดิน การระเหยของสารประกอบฟิเอเอชเกิดจากการรวมตัวกับโครงสร้างของน้ำแล้วระเหยไป ซึ่งสารประกอบฟิเอเอช ที่ปนเปื้อนในน้ำและอยู่ผิวน้ำจะมีอัตราการระเหยสูงกว่าสารประกอบฟิเอเอช ที่อยู่ผิวดิน จากการศึกษาพบว่า สารประกอบฟิเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น แนฟทาลิน จะมีอัตราการระเหยได้สูงกว่าสารประกอบฟิเอเอชที่มีมวลโมเลกุลสูง

2.1.6.1.3 การแตกสลายจากแสง (Photochemical degradation)

การแตกสลายของสารประกอบฟิเอเอช โดยแสงนั้นเป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งจะมีออกซิเจนเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา กลไกการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ และปริมาณความเข้มข้นของแสง รวมถึงการใช้รังสีต่างๆ เช่น รังสีแกมมา เป็นต้น

2.1.6.2 การบำบัดทางเคมี

2.1.6.2.1 การใช้ก๊าซโอโซน

เพราะว่าโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง จึงนำมาใช้ในการแตกโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ พบว่าประสิทธิภาพยังไม่ดีนักลดได้เฉพาะสารประกอบฟิเอเอชที่มีโมเลกุลต่ำ แต่จะเป็นการดีหากใช้ร่วมกับการใช้จุลินทรีย์

2.1.6.2.2 การใช้สารเคมี

อนุพันธ์ของสารเคมีที่มีสมบัติเกิดไฮดรอกซีเรดิคัล (hydroxyl (OH) radicles) จะสามารถแตกสลายสารประกอบฟิเอเอชได้ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพียงอย่างเดียว หรือผสมกับเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) สามารถเปลี่ยนแอนทราซีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนได้ประมาณ 40% ซึ่งจะให้ดีกว่านี้ต้องเติมร่วมกับแบคทีเรียที่สามารถใช้สารเหล่านั้นได้ โดยพบว่ามีประสิทธิภาพเป็นอย่างดี

2.1.6.3 การบำบัดทางชีวภาพ

การบำบัดสิ่งแวดล้อมที่เป็นกระบวนการซึ่งใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ หรือมีการตัดแต่งทางพันธุกรรมแล้ว เช่น ยีสต์ รา แบคทีเรีย เพื่อให้เปลี่ยนโครงสร้างสารอินทรีย์อันตรายที่ปนเปื้อนให้เป็นสารพิษ น้อยลงหรือหมดพิษ โดยจุลินทรีย์ใช้สารปนเปื้อนเป็นแหล่งอาหาร คาร์บอน และพลังงาน เพื่อเจริญเติบโตและดำรงชีวิต ประโยชน์ของวิธีการนี้ คือเป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่ไม่เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม มีการทำลายสารปนเปื้อนตรงบริเวณที่ปนเปื้อนนั่น และมักจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการบำบัดอื่นๆ แต่มีข้อเสีย คือใช้เวลานาน

ในงานวิจัยนี้จะเลือกพิจารณาการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดิน เนื่องจากเมื่อสารประกอบพีเอเอชถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ก็มีการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชแพร่กระจายไปตามผิวน้ำซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินทำให้น้ำใต้ดินจะมีการปนเปื้อนสารประกอบพีเอเอชจากการซึมผ่านลงมาของสารประกอบพีเอเอชที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ฉะนั้นการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระยะยาว เนื่องจากมีการปลดปล่อยของสารประกอบพีเอเอชออกมาอย่างสม่ำเสมอและสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อมีสารประกอบพีเอเอชปนเปื้อนอยู่ในดินมากขึ้นก็อาจจะถูกชะล้างลงสู่ผิวน้ำใต้ดินได้ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ บางส่วนก็อาจจะซึมผ่านลงไปสู่ผิวน้ำใต้ดิน ทำให้เกิดความเสี่ยงในการที่จะนำมาใช้บริโภคอุปโภคได้ รวมทั้งประเทศไทยนั้นยังคงซึ่งอาชีพเกษตรกรรมอยู่ และในภาคใต้ของประเทศไทยมีการปลูกไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก เมื่อมีการเผาไหม้ของไม้ยางพาราก็จะเกิดเขม่าและสารประกอบพีเอเอชที่ปล่อยออกมาและเกิดการสะสมในดินและเกิดการถ่ายโอนสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ฉะนั้นในการสัมผัสกับสารประกอบพีเอเอชที่ปนเปื้อนในดินจึงมีโอกาสูงพอสมควร และถ้าปลูกพืชก็อาจจะดูดซึมเอาสารประกอบพีเอเอช เหล่านี้เข้าไปสะสมอยู่ ทำให้เกิดสารตกค้างอยู่ และจะเป็นอันตรายหากนำมาบริโภคได้

2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง (สุรชัย จอมสมุทรชัย 2537) โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

2.2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ เข้าหาตัวดูดซับ

2. โมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) ซึ่งตามปกติตัวดูดซับจะมีฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อต่างๆ
3. โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่เข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ และเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

2.2.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) สามารถแบ่งกระบวนการดูดซับ ได้เป็น 3 ประเภท

2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับ (Reversible Interaction) ของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับ ได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้ามีแรงดูดซับผิวน้อยการหลุดออก (Desorption) ของสารดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพนี้จะไม่มีความจำเพาะ (Specific site) กล่าวคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีความอิสระที่จะถูกดูดซับบนตำแหน่งใดๆก็ได้บนพื้นผิวสารดูดซับ (ธิดารัตน์ บุญศรี 2543)

2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้

ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible Interaction) และการดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น (ธิดารัตน์ บุญศรี 2543) ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง ด้วยกันคือ

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50 – 400 กิโลจูลต่อ โมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
6. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	monolayer และ multilayer	monolayer

ที่มา : <http://pradthana.wordpress.com/adsorption-process/>

2.2.2.3 การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption)

เป็นการดูดซับระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical attraction) ทำให้ไอออนของสารถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวสารดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดึงดูดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำๆและไอออนที่มีขนาดเล็ก

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

การดูดซับจะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ทั้งคุณสมบัติของสารดูดซับ สารถูกดูดซับ และปัจจัยภายนอกต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือ การแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำ เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการ

ดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.2.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.2.3.3 อุณหภูมิ

การดูดซับมักจะเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางที่น้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิต่ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ไปด้วย

2.2.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้ อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่าอย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

2.2.3.5 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดไพโรอิกและกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยัง

ส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

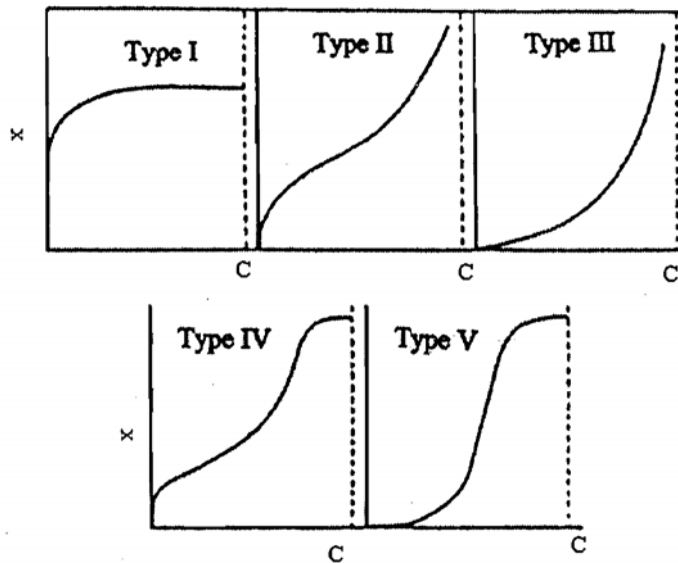
2.2.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับจากสารละลาย มีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่เกิดการดูดซับขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่ผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว (ชิคารัตน์ บุญศรี 2543) สมดุลนี้จึงเป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย พิเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ

2.2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับไปพลอตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นแนวโน้มที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ

รูปร่างของไอโซเทอมของการดูดซับจะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับแบ่งเป็น 5 แบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 โดยที่ X คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ และ C คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลาย ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ 1 เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



ภาพประกอบที่ 2.2 ไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 แบบ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทฤษฎี และผลจากการทดลอง แต่ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับมากที่สุดคือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิคซ์ (Freundlich's Adsorption Isotherm) สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's Adsorption Isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm)

2.2.5.1 สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิคซ์ (Freundlich's adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของฟรุนดลิคซ์ (Kleineidam et al., 2002 และ Long et al., 2008) จะอธิบายการดูดซับบนตัวดูดซับที่มีพื้นผิวของการดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ซึ่งฟรุนดลิคซ์ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับ ดังสมการ

$$C_s = K_F C_w^{1/n} \quad 2.1$$

โดยที่ C_s คือ ปริมาณสารประกอบพีเอเอชที่ดูดซับได้ต่อกรัมของเขม่า (Adsorbent) (ไมโครกรัมต่อกรัมเขม่า)

C_w คือ ความเข้มข้นที่สมดุล (ไมโครกรัมต่อลิตร)

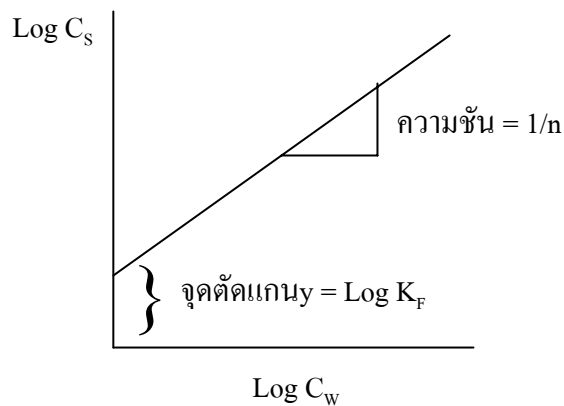
K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดลิคซ์

$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิว

เมื่อเขียนสมการที่ 2.1 ในรูปของสมการเชิงเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ 2.2 คือ

$$\log C_s = \log K_F + (1/n)\log C_w \quad 2.2$$

ตามสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (สมการที่ 2.2) ค่าคงที่ต่างๆ (K_F และ $1/n$) จะคำนวณหาได้จากการสร้างกราฟระหว่าง $\log C_s$ เป็นแกนยว กับ $\log C_w$ เป็นแกนเอกซ์ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนยว เท่ากับ $\log K_F$ เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก จะแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวการดูดซับแตกต่างกันมาก (heterogeneous) แต่เมื่อ $1/n$ เข้าใกล้ศูนย์ หรือมีความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะขนานกับแกนเอกซ์นั้นแสดงว่า ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวการดูดซับแตกต่างกันน้อย (homogeneous) อย่างไรก็ตามจากลักษณะของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สูงขึ้นไปเรื่อยๆ



ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงกราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช

2.2.5.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของแลงเมียร์ ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวโดยมีสมมติฐาน (เทพฤทธิ์ ปีติฤทธิ์ 2544) ของสมการว่า

1. ทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (adsorption site) มีลักษณะเหมือนกัน (homogenous)
2. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (monolayer)

3. ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ
5. โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน

จากสมมติฐานดังกล่าว ทำให้สามารถเขียนสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ได้ดังสมการที่ 2.3

$$C_s = \frac{Q_o K_L C_w}{1 + K_L C_w} \quad 2.3$$

โดยที่ Q_o คือ ปริมาณสูงสุดของตัวดูดซับที่สามารถถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_s คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่สามารถถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_w คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

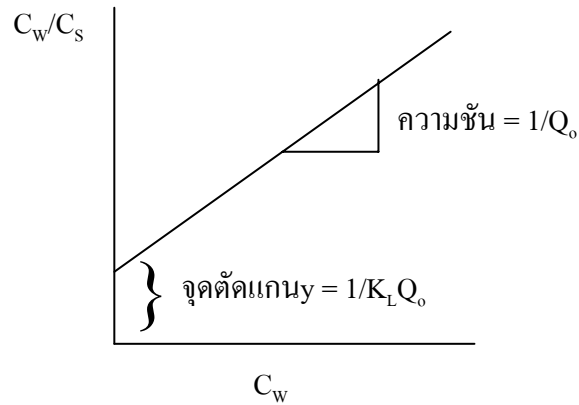
K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์

และสามารถนำมาเขียนในรูปสมการเชิงเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$\frac{C_w}{C_s} = \frac{1}{Q_o K_L} + \frac{C_w}{Q_o} \quad 2.4$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{K_L Q_o C_w} \quad 2.5$$

ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.4 จะได้ดังภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงกราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

2.2.5.3 สมการไอโซเทอมการดูดซับโพลานีย์ ดูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes, PDM adsorption isotherm)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความเป็นรูพรุนสามารถอธิบายได้โดยกลไกของการ Pore – filling ซึ่งเป็นกลไกการดูดซับที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของโพลานีย์ ดูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes, PDM) (Karapanagioti et al., 2007 และ Kleineidam et al., 2002) แสดงดังสมการ

$$C_S = V_o \rho_o \exp \left[\left(\frac{-RT \left(-\ln \frac{C_w}{S_{scl}} \right)}{E} \right) \right]^b \quad 2.6$$

เมื่อ C_S คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ [$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$]

V_o คือ ปริมาณสูงสุดของสารเคมีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$]

ρ_o คือ ความหนาแน่นของสารประกอบอินทรีย์ที่ดูดซับ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ [$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$]

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]

C_w/S_{scl} คือ ความเข้มข้นสมมูลในน้ำต่อความสามารถในการละลายของสารประกอบที่ subcooled liquid [-]

b คือ ตัวชี้กำลังเอมพิริคัลมีค่าเท่ากับ 2 (Kleineidam et al., 2002)

E คือ พลังงานอิสระของสารประกอบ [J.mol^{-1}]

พิจารณาค่า b จากสมการที่ 2.6 พบว่าค่า b นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารดูดซับ เช่น ซิลิกา เจล มีค่าเท่ากับ 1.5, XAD 4 มีค่าเท่ากับ 1 (Long et al., 2008) และเขม่า มีค่าเท่ากับ 2 (Kleineidam et al., 2002 และ Rockne et al., 2000) ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการกระจายตัวของเขม่า ทำให้สมการที่ 2.6 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.7

$$C_s = V_o \rho_o \exp \left[\left(\frac{-RT \left(-\ln \frac{C_w}{S_{scl}} \right)}{E} \right) \right]^2 \quad 2.7$$

สำหรับสารประกอบที่เป็นของแข็งที่ Ambient temperature และความดันบรรยากาศ ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility, S) นั้น จะใช้ความสามารถในการละลายน้ำที่ subcooled liquid (subcooled liquid solubility, S_{scl} (mgL^{-1})) (Kleineidam et al., 2002) ของสารประกอบ ดังนั้นจึงใช้ความสามารถในการละลายน้ำที่ subcooled liquid ที่สถานะอ้างอิง (reference state) ในการศึกษาการดูดซับหรือการกระจายตัวของสารประกอบฟิเออเอชจาก aqueous phase ไปยัง soot particle ที่เกิดขึ้นบน solid

2.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริตตา ไรจน์วีรุพห์ (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำทำโดยใช้วัสดุที่เป็นเส้นใยธรรมชาติจากพืช 2 ชนิด คือ เส้นใยธูปฤาษีและหนุ่น ซึ่งมีราคาถูกและหาง่ายในธรรมชาติ เปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์ โดยใช้สารประกอบฟิเออเอชคือ แนฟทาลีน อะซีแนฟทาลีน อะซีแนฟทีน ฟลูออรีน ฟรีแนนทริน

แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบพีเอเอชในการดูดซับทั้งหมดอยู่ระหว่าง 10% - 40% ของความสามารถในการละลายน้ำได้ของสารประกอบ จากนั้นทำการหาเวลาในการเข้าสู่สมดุล โดยทำการเก็บตัวอย่างระหว่างสารประกอบพีเอเอชและเส้นใย ทุกๆ 6 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลที่นานกว่าสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า และพบว่าขนาดโมเลกุล (configuration) ของโมเลกุลจะมีผลต่ออัตราการดูดซับ คือ โมเลกุลขนาดใหญ่จะมีอัตราการดูดซับที่ต่ำกว่าโมเลกุลเล็กกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับของตัวดูดซับสำหรับสารประกอบพีเอเอช พบว่าเส้นใยรูปทรงแปดเหลี่ยมจะแสดงค่าความจุของการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับอีกทั้ง 2 ชนิดและเมื่อพิจารณาค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (K_F) ของเส้นใยรูปทรงแปดเหลี่ยมจะมีค่าสูงที่สุดจากการทดสอบตัวดูดซับทั้งหมดเนื่องจากเส้นใยรูปทรงแปดเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าเส้นใยรูปทรงแปดเหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีที่สุดจากการทดสอบตัวดูดซับทั้งหมด ดังนั้นเส้นใยรูปทรงแปดเหลี่ยมมีความสามารถในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบพีเอเอชออกจากน้ำทำได้ และผลจากการคายซับสารประกอบพีเอเอช พบว่าอะซีแนฟทีนจะเกิดการคายซับได้ดีกว่าสารประกอบพีเอเอชอื่นๆ และแนฟทาลีนซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กนั้น (2 วงเบนซีน) จะเกิดการเข้าไปอยู่ในรูพรุนขนาดเล็กของเส้นใยได้ดี การคายซับของสารประกอบพีเอเอชจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายซับเพิ่มขึ้นและผลจากการคายซับของตัวดูดซับทั้งหมดพบว่าอัตราการคายซับของสารประกอบพีเอเอชเกือบทั้งหมดบนเส้นใยนั้นจะเกิดการคายซับได้ดีกว่าบนตัวดูดซับอีกทั้งสองชนิด

Boving and Wei (2004) ทำการศึกษาสารประกอบพีเอเอช ที่ได้จาก roadway runoff ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน โดยใช้ aspen wood ซึ่งหาได้ง่ายและราคาไม่แพงสามารถเคลื่อนย้ายสารประกอบพีเอเอชจากสารละลายพีเอเอชเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้มากกว่า 95% ในการศึกษาถึงการดูดซับ (sorption isotherm) ของสารประกอบพีเอเอชที่ละลายน้ำได้ทั้ง 4 ชนิด คือ แนฟทาลีน ฟลูออรีน แอนทราซีนและไพรีน แล้วทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายพีเอเอชโดยไพรีน แอนทราซีนและฟลูออรีน ตรวจวัดด้วยเครื่อง fluorescence spectrophotometer ส่วนความเข้มข้นของสารละลายแนฟทาลีน จะใช้เครื่อง uv-vis spectrophotometer พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายพีเอเอชที่ใช้ aspen wood ในการดูดซับใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 168, 192, 296 และ 296 ชั่วโมง สำหรับ แนฟทาลีน ไพรีน แอนทราซีน และฟลูออรีน ตามลำดับ และพบว่าค่า $\log K_{ow}$, K_{ww} และ K_{lignin} จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบ (molecular weight, MW) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการทดลองใช้สารละลายที่มีค่าความเข้มข้นในช่วงระหว่าง 2 $\mu\text{g/l}$ ถึง 50 $\mu\text{g/l}$ ปริมาตร 200 ml แล้วเติม aspen

wood จำนวน 2 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 100 rpm อุณหภูมิคงที่ 24 °C จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายอิมัลชัน 1 ml เพื่อนำไปวิเคราะห์ซึ่งการทดลองการดูดซับระหว่างสารพีเอเอชและไม้ (Wood-PAHs sorption experiment) จะสิ้นสุดเมื่อความเข้มข้นของสารพีเอเอชในเฟสสารละลายที่เหลืออยู่มีค่าคงที่ จากการทดลองพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับของสารละลายโดยใช้ aspen wood fiber พบว่าสารแอนทราซีนจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลระหว่าง 250 และ 296 ชั่วโมง ตามลำดับ สารฟลูออรีนและสารแนฟทาลีนใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 168 ชั่วโมง สารไพรีนใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 192 ชั่วโมง ตามลำดับ PAHs - aspen wood interaction จะถูกประเมินค่าได้โดยการพลอตกราฟระหว่างเวลาในการดูดซับ (sorption time) กับ normalized PAH mass sorbed พบว่า การดูดซับของสารละลายพีเอเอชจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาเริ่มต้นของการทดสอบ ไอโซเทอมและอัตราการดูดซับจะช้าลงและค่อยๆเข้าสู่สมดุลซึ่งอัตราการดูดซับที่ปรากฏจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายพีเอเอชแต่ช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษาอาจไม่เพียงพอที่จะสังเกตความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งการสังเกต PAH – wood interaction ที่ปรากฏจะควบคุมโดย

- (I) การเกิดเร็ว กระบวนการดูดซับเริ่มต้นที่ตำแหน่งของผิวหน้าของไม้
- (II) การเกิดช้า เกิดการแพร่ และการเคลื่อนย้ายสารประกอบพีเอเอชไปยัง wood matrix และจากการทดลองพบว่าการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชโดย aspen wood นั้นจะเป็นฟังก์ชันของ compound's hydrophobicity พบว่าสารพีเอเอชที่ไม่ชอบน้ำน้อยที่สุด จะเกิดการดูดซับของ aspen wood น้อยที่สุด และพบว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายของ aspen wood จะเพิ่มขึ้นเมื่อ PAH hydrophobicity มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Bowman, et al. (2002) จากการศึกษาพบว่าการดูดซับของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาค และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon content) และพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคตะกอน (sediment particles) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับสารปนเปื้อนที่มีความไม่ชอบน้ำสูง เช่น เบนโซ(เอ)ไพรีน จะเกิดการดูดซับบน sediment และในการดูดซับของสารนั้นก็อาจจะเกิดการคายซับออกจาก sediment ด้วยเช่นกัน การคายซับของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนจาก sediment นั้นจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันกับ potential remobilisation ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีน การคายซับหรือการปล่อยออกของสาร persistent organic pollutants (POPs) จาก sediment มีความสามารถที่จะเป็นไปได้ และในการเปรียบเทียบกลไกการดูดซับนี้พบว่ากลไกการคายซับจะเกิดขึ้นได้น้อยกว่ากลไกการดูดซับของสารมลพิษของการคายซับของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนบน sediment นั้นพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นบน sediment จะลดลงและความเข้มข้นในส่วน of สารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการทดลอง(30วัน) อัตราการคายซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน

ช่วงแรกคือ $0.94 \mu\text{g l}^{-1} \text{h}^{-1}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพีแนนทริน (2.63 และ $13.78 \mu\text{g l}^{-1} \text{h}^{-1}$) และไครซีน (2.04 และ $3.91 \mu\text{g l}^{-1} \text{h}^{-1}$) ซึ่งสารเบนโซ (เอ)ไพรีนจะเกิดการดูดซับบน sediment ก่อน จากนั้น sediment ที่ดูดซับเอาสารไว้ก็จะเกิดการคายซับหรือปล่อยออกมาซึ่งเกิดจากการกระทำของ potential source ที่อยู่รอบๆ น้ำ

Jonker (2007) ทำการทดสอบการดูดซับสารประกอบพีเอเอชด้วยเซลลูโลส โดยการตรวจวัดไอโซเทอมซับการดูดของสารพีเอเอชจำนวน 13 ชนิด ในช่วงการกระจายตัวของสารไม่ชอบน้ำ ซึ่งผลจะแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารพีเอเอชด้วยเซลลูโลสนี้ จะเป็นกระบวนการพาร์ทิชันแบบเชิงเส้น (linear partition process) และพบว่าเซลลูโลสอาจจะนำไปใช้ในการดูดซับสารที่มีโครงสร้างไม่ใหญ่มากนักทางสิ่งแวดล้อม โดยทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสารพีเอเอช 7 ระดับ จากนั้นเติมเซลลูโลสที่แห้งแล้ว $0.1 - 1.5 \text{ g}$ แล้วทำการดึงส่วนของสารละลายด้านบนมา 10 ml . จากนั้นใส่ SPME fiber ลงไป $5, 10, 15$ หรือ 20 cm จากนั้นเติมลงไปในการละลายผสมของสารพีเอเอชทั้ง 13 ชนิด จากนั้นทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 rpm ที่อุณหภูมิ $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเข้มข้นของสารประกอบพีเอเอชในการสกัดเส้นใยจะวิเคราะห์ด้วย HPLC โดยใช้เมทานอลและน้ำเป็นเฟสเคลื่อนที่ ความเข้มข้นของสารพีเอเอชในเซลลูโลส (C_{cellu}) คำนวณได้โดยการหาค่าเฉลี่ย และไอโซเทอมการดูดซับของแบบจำลองของฟรุนดลิช คือ $\log C_{\text{cellu}} = n \log C_w + \log K_f$ การดูดซับสารประกอบพีเอเอชด้วยเซลลูโลสจะง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนและสามารถคำนวณหาค่า K_f ได้จากสมการ และพบว่าค่า $\log K_f$ และ $\log K_{\text{cellu}}$ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีค่าสูงขึ้น โดยไอโซเทอมของการดูดซับแบบเชิงเส้นสำหรับสารพีเอเอชที่ดูดซับนี้จะขึ้นอยู่กับ molecular volume ของสาร โดยสารที่มี molecular volume ขนาดใหญ่ จะมีการขัดขวางโมเลกุลในการแทรกซึมหรือการขยายตัวของสารภายในโครงสร้างของเซลลูโลส โดยมีค่า $\log K_f$ อยู่ในช่วง $3.80-5.64$ และค่า $\log K_{\text{cellu}}$ อยู่ในช่วง $2.23-4.47$

Karapangioti (2007) ทำการทดลองเกี่ยวกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารละลายพีแนนทรินจากสารละลายน้ำเค็ม เพื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น $3-200 \mu\text{g/l}$ พบว่ามีค่า V_0 เท่ากับ $224 \text{ cm}^3/\text{kg}$ และมีค่า E เท่ากับ 12.7 kJ/mol สำหรับในสารละลายน้ำจืด และมีค่า V_0 เท่ากับ $246 \text{ cm}^3/\text{kg}$ และมีค่า E เท่ากับ 12.0 kJ/mol สำหรับในสารละลายน้ำเค็ม และพบว่าในช่วงความเข้มข้นมีค่าสูงนั้น ($50-200 \mu\text{g/l}$) การดูดซับของถ่านกัมมันต์ในน้ำเค็มจะมีค่าสูงกว่าในสารละลายน้ำจืด และในช่วงความเข้มข้นมีค่าต่ำนั้น ($3-10 \mu\text{g/l}$) การดูดซับของถ่านกัมมันต์ในน้ำเค็มจะมีค่าต่ำกว่าในสารละลายน้ำจืด เนื่องจากการมี salinity ที่เพิ่มขึ้นในการดูดซับในช่วงความเข้มข้นของพีแนนทรินเข้าใกล้ความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบ ($180 \mu\text{g/l}$)

Long, et al. (2008) ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายเนฟทาไลน์ (Naphthalene) บนตัวดูดซับพอลิเมอร์ (polymeric adsorbents) 3 ชนิดคือ NDA-150, XAD-4 และ NDA-1600 ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของรูพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งลำดับของพื้นที่ผิวจำเพาะคือ XAD-4 > NDA-150 > NDA-1600 และลำดับของปริมาตร micropore คือ NDA-150 > XAD-4 > NDA-1600 โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับคือ แบบจำลองของ Freundlich, Langmuir และ Polanyi-Dubinin-Manes (PDM) ในการอธิบายการดูดซับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าไอโซเทอมการดูดซับของเนฟทาไลน์บนตัวดูดซับทั้งหมดนั้น การดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสมดุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และแบบจำลอง PDM เหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายกระบวนการดูดซับของเนฟทาไลน์บนตัวดูดซับพอลิเมอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตร micropore (V_{micro}) คือตัวดูดซับที่มีปริมาตร micropore มากกว่า (NDA-150) จะสามารถดูดซับสารละลายเอาไว้ได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีปริมาตร micropore น้อยกว่า (NDA-1600) และ micropore filling จะมีอิทธิพลมากกว่าการดูดซับบนพื้นผิว (surface adsorption) ในการอธิบายถึงกลไกการดูดซับ (sorption mechanism)

Sun and Zhou (2008) ทำการศึกษาการดูดซับสารประกอบพีเอเอช 3 ชนิดคือ พีแนนทริน (PHE) แอนทราซีน (ANT) และไพรีน (PYR) บน charcoal ซึ่ง charcoal ได้มาจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C ในเวลาที่แตกต่างกัน คือ PC1 (0.5 ชั่วโมง) PC2 (4 ชั่วโมง) และ PC3 (8 ชั่วโมง) เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางเคมี และจากการศึกษาองค์ประกอบพบว่าโดยส่วนใหญ่ charcoal จะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ในการทดสอบการดูดซับใช้ปริมาตรสารละลายที่ทดสอบ 40 มิลลิลิตร ที่มีแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (เพื่อควบคุมความแรงไอออนิกให้มีค่าคงที่) และโซเดียมแอสไซด์เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นใส่ charcoal จำนวน 5 มิลลิกรัมลงไป ในสารละลายที่ทดสอบ จากนั้นนำไปเขย่าที่อุณหภูมิคงที่ (20 ± 0.5 °C) ที่ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 20 วัน ความเข้มข้นของสารประกอบพีเอเอชจะวิเคราะห์โดยใช้ HPLC ไอโซเทอมที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือไอโซเทอมการดูดซับของ Polanyi – Dubinin – Manes (PDM) ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) สำหรับตัวดูดซับที่มีความเป็นรูพรุนซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกลไกการ pore-filling และกลไกการดูดซับบนพื้นผิว (surface – adsorption – mechanism) ผลการทดลองพบว่า การดูดซับจะเกิดบน PC3 (พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $26.8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) มากกว่า PC1 (พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $15.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) และ PC2 (พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $25.9 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะ สำหรับการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบน charcoal พบว่าสารไพรีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สุดจึงเกิดการดูดซับได้น้อยที่สุด และสารพีแนนทรินจะมี molecular

volume ที่เล็กกว่าจึงมีความสามารถในการเข้าไปอยู่ในรูพรุนของ charcoal ในกระบวนการ pore – filling ดังนั้นลำดับการดูดซับสารประกอบพีเอเอชคือ $PHE > ANT \geq PYR$ และลำดับความจุของการดูดซับสารที่สูงที่สุด $PC3 > PC2 > PC1$ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิกซ์ ความแตกต่างทางโครงสร้างของ charcoals ทั้ง 3 ชนิด จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับและพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของฟรอนคลิกซ์ (K_F) บน PC3 จะมีค่ามากที่สุดแสดงให้เห็นได้ว่า PC3 สามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้มากที่สุดและพบว่าสารพีแนนทรินมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของฟรอนคลิกซ์ (K_F) สูงที่สุดแสดงว่าสารพีแนนทรินจะเกิดการดูดซับบน charcoal ได้มากที่สุด ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับไอโซเทอมการดูดซับของ PDM

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

เขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (เขม่าดีเซล) เก็บจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้แปรงล้างขวดเขม่าออกจากท่อไอเสีย ส่วนเขม่าจากเชื้อเพลิงชีวมวล (เขม่าเตาฟืน) เก็บจากเตาเผาฟืนในโรงงานอบไม้ยางพารา โดยใช้แปรงล้างขวดเขม่าออกจากปล่องควัน (Jonker et al., 2002)

3.2 สารเคมี

3.2.1 สารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมาตรฐาน (A.R. Grade: Fluka, U.S.A)

- แอนทราซีน (Anthracene)
- ไพรีน (Pyrene)
- เบนโซ(เอ)ไพรีน (Benzo (a) pyrene)

3.2.2 สารเคมีทั่วไปที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์

- เมทานอล (Methanol, Lab Scan, Thailand)

3.2.3 สารเคมีอื่นๆที่ใช้เป็น Laboratory Chemical

- แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2)
- โซเดียมแอไซด์ (Sodium azide, NaN_3)
- ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องหมุนเหวี่ยง
- ชุดอุปกรณ์การสกัดซอกซ์เลต (Soxhlet apparatus)
- ตู้อบ
- เครื่องชั่ง
- เครื่องเขย่าที่ปรับอุณหภูมิได้
- เครื่อง BET Surface Area Analyzer (SA 3100)

- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC-FID SHIMADZU GC - 14B) 1.5%BBBT uniport HP 100/120 ss คอลัมน์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 2 เมตร

3.4 วิธีการวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเขม่า

1. นำเขม่าจากทั้ง 2 แหล่ง มาแช่น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (Jonker et al., 2002) เอาเฉพาะส่วนที่จมน้ำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่มีความเร็วรอบ 2600 rpm เป็นเวลา 20 นาที เทน้ำและเขม่าที่ลอยทิ้ง เขม่าส่วนที่จมน้ำใช้สำหรับหาค่าความสามารถในการดูดซับ

2. นำเขม่าจมน้ำที่ได้ไปแช่น้ำกลั่น (ที่มีเฉพาะไอออนจากเกลือ CaCl_2 ละลายอยู่ 0.01 M^* เพื่อควบคุมความแรงไอออนิกของน้ำให้ใกล้เคียงกับสภาพของน้ำใต้ดิน) แช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

* ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ หนัก 1.4702 กรัม ละลายในน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

3. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากเขม่า จากนั้นนำเขม่าที่ได้ไปอบในตู้อบเพื่อระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 80°C ภายใต้อากาศเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

4. สกัดแยกเอาสารประกอบพีเอช และสารอื่นๆที่อาจตกค้างออกด้วยอุปกรณ์ซอกซ์เลตใช้ตัวสกัดคือ โทลูอินผสมกับเมทานอล (Jonker et al., 2002) ในอัตราส่วน 1:6 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร สกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำเขม่าที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเขม่า

1. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (%CHN) โดยใช้เครื่อง CHNS – 001

2. ศึกษาภาพถ่ายขยายระดับไมครอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

3. ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่อง BET Surface Area Analyzer (SA 3100) โดยวิธี Brunauer – Emmet – Teller: BET

4. วิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเขม่าโดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer

3.4.3 ศึกษาเวลาการเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time)

ทดลองหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ชนิด ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. การเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์
ซิงโครเนียมแอสไซด์ (NaN_3) หนัก 0.025 กรัม ในแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร ด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานของสารประกอบพีเอเอชเข้มข้น 100 mg/l ในเมทานอล 100 ml
3. เจือจางสารละลายมาตรฐานของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ ให้มีความเข้มข้น 10, 25, 50, 75 และ 100 $\mu\text{g/l}$ ปริมาตร 250 ml
4. นำเขม่าแต่ละชนิดหนัก 0.2000 g เติมลงในสารละลายของสารประกอบพีเอเอชในแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 250 ml ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายอิมตัวปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ จนถึงสุดที่เวลา 10 วัน (สำหรับสารแอนทราซีน) และ ที่เวลา 12 วัน (สำหรับสารไพรีนและเบนโซ(เอ)ไพรีน)
5. ทำการทดลองตามขั้นตอนดังกล่าว 3 ซ้ำสำหรับเขม่าแต่ละชนิด
6. ทำการทดลองตามขั้นตอน 1 ถึง 3 โดยไม่ใส่เขม่า เพื่อใช้เป็นตัวควบคุม
7. นำส่วนของสารละลายอิมตัวไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC/FID; SHIMADZU GC-14B, BBOT 1.5% Uniport HP 100/120 SUS 2m. x 3mm. I.D.column) เงื่อนไขการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิคอลัมน์ 210 °C (สำหรับสารละลายแอนทราซีนและไพรีน) และ 240 °C (สำหรับสารละลายเบนโซ(เอ)ไพรีน), อุณหภูมิอินเจกเตอร์ 240 °C และอุณหภูมิดีเทกเตอร์ 240 °C
8. คำนวณปริมาณของสารประกอบพีเอเอชในวัฏภาคของสารละลาย (C_w) และวัฏภาคของเขม่า (C_s) ที่เวลาต่างๆ และวิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการดูดซับของเขม่าแต่ละชนิดจากค่าที่คำนวณได้และจากค่าลักษณะจำเพาะที่ตรวจสอบไว้ในกิจกรรมที่ 1

ผลจากการทดลองที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารพีเอเอชที่ถูกดูดซับได้ต่อปริมาณเขม่ากับเวลา จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เพื่อพิจารณาสมการที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการทดลอง

3.4.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_s และ C_w สามารถหาได้โดยการนำค่า C_s และ C_w ไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เวลาสมดุลของการดูดซับ โดยให้ C_s อยู่ในแกนแนวตั้งและ C_w อยู่ในแกนเอกซ์ ซึ่งเรียกกราฟนี้ว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 3.4.3 จะนำไปทำการถดถอยแบบเชิงเส้นกับสมการ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิช แลงเมียร์ และ โพลานีย์ คูบินิน เมนส์ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าทั้ง 2 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ในการบ่งบอกถึงสมการที่เหมาะสมสำหรับผลการทดลอง

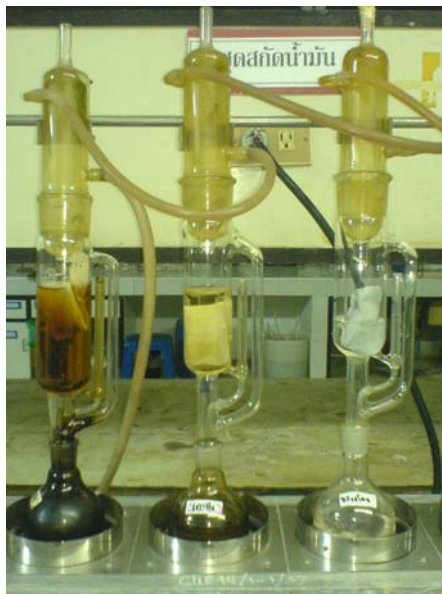
3.4.5 ศึกษาการคายซับ (Desorption Test)

1. นำเขม่าที่แต่ละความเข้มข้นของสารประกอบพีเอเอช ที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ เดิมลงในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ไม่มีสารประกอบพีเอเอช ปริมาตร 250 ml. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายอิมตัวปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง

2. ทำการทดลองตามขั้นตอนดังกล่าว 3 ซ้ำสำหรับเขม่าแต่ละชนิด

3. ทำการวิเคราะห์ตามการทดลองที่ 3.4.3 ข้อ 7

ผลจากการทดลองที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการคายซับของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดได้



ภาพประกอบที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การสกัดซอกซ์เลต (Soxhlet Apparatus)



ภาพประกอบที่ 3.2 เครื่อง BET Surface Area Analyzer (SA 3100)



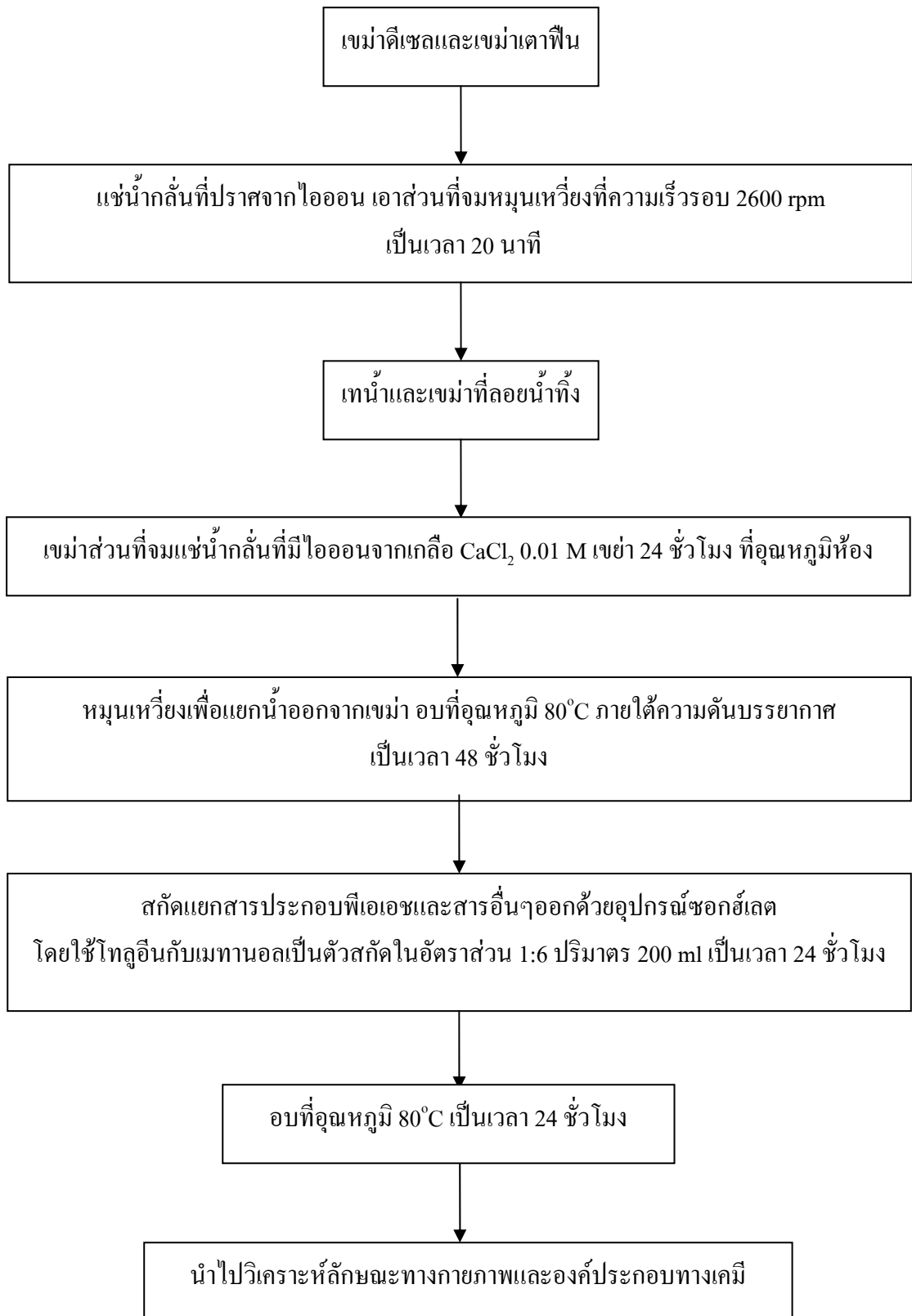
ภาพประกอบที่ 3.3 เครื่อง Particle Size Analyzer



ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงเครื่องเขย่า



ภาพประกอบที่ 3.5 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี SHIMADZU GC-14 B



ภาพประกอบที่ 3.6 แผนผังวิธีการเตรียมตัวอย่างเขม่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การศึกษาการดูดซับของสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า เพื่อหาสถานะสมดุลระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน เพื่อหาค่าไอโซเทอมการดูดซับนั้น ในงานวิจัยนี้สารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (สารประกอบพีเอเอช) ที่ใช้ทดสอบ 3 ชนิด คือ สารแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ (เอ)ไพรีน โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือชนิดของเขม่า โดยใช้เขม่า 2 ชนิด คือ เขม่าดีเซล และเขม่าเตาฟืน และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเขม่า

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเขม่า

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (%CHN) ของเขม่า

ตัวอย่างเขม่า	%ธาตุ		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
เขม่าดีเซล	64.43	2.63	น้อยกว่า0.01
เขม่าเตาฟืน	22.40	1.51	น้อยกว่า0.01

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าองค์ประกอบของเขม่าแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยอุปกรณ์ซอกส์เลตจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเขม่าคือ ธาตุคาร์บอน และมีปริมาณของธาตุไนโตรเจนและไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อยโดยเขม่าแต่ละชนิดจะมีปริมาณธาตุคาร์บอนที่แตกต่างเนื่องจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันของเขม่า

4.1.2 การศึกษาภาพถ่ายขยายระดับไมครอน

ลักษณะของเขม่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล ที่นำมาใช้ในการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.1 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของเขม่าจะเป็นสีดำและมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมครอน และเมื่อทำการศึกษาภาพถ่ายขยายระดับไมครอน แสดงดังภาพประกอบที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบเขม่าเตาฟืนและเขม่าดีเซล ลักษณะของอนุภาคเขม่าเป็นทรงกลมจับกันเป็นกลุ่มก้อน เขม่าดีเซลจะมีการจับตัวกันระหว่างอนุภาคที่หนาแน่นกว่าและมีลักษณะเป็นข้อส่วนเขม่าเตาฟืนนั้นลักษณะเขม่าจะมีความหยาบมากกว่าและอนุภาคมีขนาดเล็กกว่ามีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Jonker et al.,2002) ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีและแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.1 ลักษณะเขม่า (ก) เขม่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (เขม่าดีเซล)

(ข) เขม่าเชื้อเพลิงชีวมวล (เขม่าเตาฟืน)

4.1.3 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Brunauer – Emmet – Teller (BET)

พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนของเขม่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณการดูดซับสารประกอบฟิเออเชบนเขม่า แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยเฉพาะปริมาตร Micropore (Micropore volume) ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าเขม่าทั้งสองชนิดไม่มีปริมาตร Micropore จึงพิจารณาปริมาตร Mesopore (Mesopore volume) พบว่าเขม่าเตาฟืนมีปริมาตร Mesopore มากกว่าเขม่าดีเซล ดังนั้นเขม่าที่มีปริมาตร Mesopore มากกว่าจึงน่าจะมีความจุในการดูดซับสารประกอบเอาไว้ได้ดีกว่า

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าแต่ละชนิด

	เขม่าดีเซล	เขม่าเตาฟืน
BET surface area (m ² /g)	4.850	6.090
Micropore volume(ml/g)	0.00000	0.00000
Mesopore volume(ml/g)	0.01464	0.01889
Macropore volume(ml/g)	0.00851	0.00660

พิจารณา Nitrogen adsorption isotherm ของเขม่าทั้งสองชนิดคือเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืน แสดงดังภาพประกอบที่ ข.3 ในภาคผนวก ข จะเห็นได้ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับนั้น มีลักษณะไอโซเทอมคือ Type II ของ IUPAC classification (Donohue et al.,1998) ของวัสดุที่มีความเป็นรูพรุน ซึ่งอธิบายการดูดซับสารประกอบบน mixed mesoporous และ macroporous (Long et al.,2008) ในส่วนเริ่มต้นของไอโซเทอมการดูดซับนั้นที่ relative pressure (P_s/P_0) มีค่าต่ำๆ nitrogen จะค่อยๆเกิดการดูดซับได้เพิ่มขึ้น และจะเกิดการดูดซับได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อ relative pressure มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งชี้ให้เห็นถึงกระบวนการดูดซับบน solid เกี่ยวกับโครงสร้างของ mesopore และ macropore (Li et al., 2004) ซึ่งเป็นกลไกในการ pore filling รวมทั้งแสดงให้เห็นถึง multilayer adsorption ที่เกิดขึ้นบน mesopore และ macropore surface อีกด้วย

4.1.4 การศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเขม่า

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าแต่ละชนิดในช่วงขนาดอนุภาคต่างๆ

ช่วงขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สัดส่วน โดยปริมาตร(เปอร์เซ็นต์)	
	เขม่าดีเซล	เขม่าเตาฟืน
0-300	2.15	41.15
300-700	62.75	33.42
700-1000	33.20	24.30

เมื่อใช้เครื่องวัดการกระจายตัวขนาดอนุภาควิเคราะห์ร้อยละ โดยปริมาตรของเขม่าแต่ละชนิด (หน่วยไมโครเมตร) พบว่าเขม่าเตาฟืนมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่

ในช่วง 0-300 ไมโครเมตร ส่วนเขม่าดีเซลมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า คือมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 300-700 ไมโครเมตร

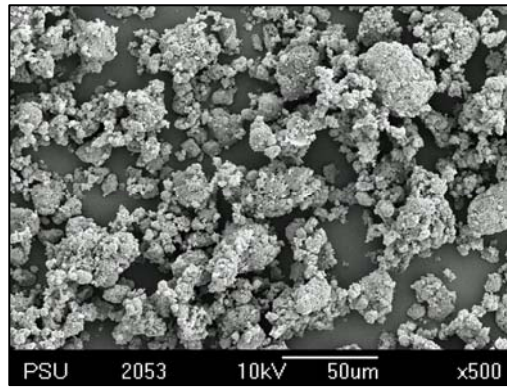
4.2 การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (สารพีเอเอช) ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล

4.2.1 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับและสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า

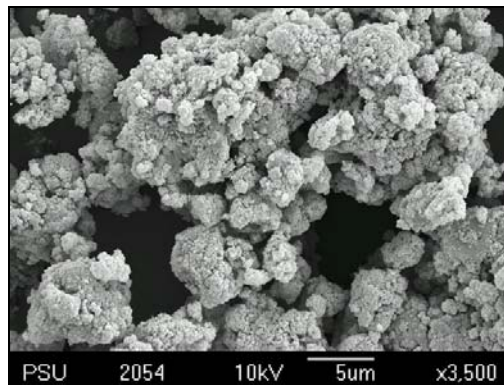
ผลการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าทั้งสองชนิด ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 10-100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณเขม่าที่ใช้ 0.200 กรัม เพื่อหาเวลาในการเข้าสู่สมดุล พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับสารพีเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิด แสดงดังภาพประกอบที่ 4.4 ถึง 4.6 ซึ่งสารละลายแอนทราซีนใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลที่เวลา 240 ชั่วโมง (Boving et al., 2004) ส่วนสารละลายไพรีนและเบนโซ(เอ)ไพรีนนั้นใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลที่เวลา 288 ชั่วโมง ตามลำดับ สารไพรีนและเบนโซ(เอ)ไพรีนจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลได้นานกว่า เนื่องจากมีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าสารแอนทราซีน สามารถสรุปเวลาในการเข้าสู่สมดุลได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืน

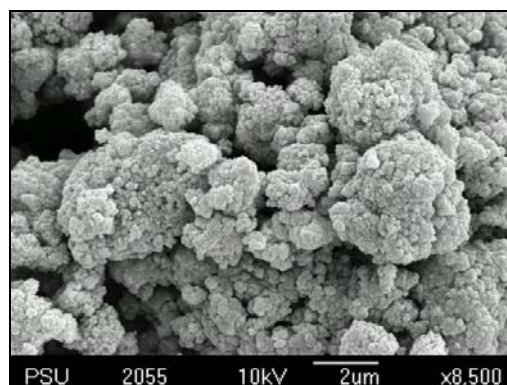
สารพีเอเอช	น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อ โมล)	เวลาในการเข้าสู่สมดุล(ชั่วโมง)	
		เขม่าดีเซล	เขม่าเตาฟืน
แอนทราซีน	178.29	240	240
ไพรีน	202.25	288	288
เบนโซ(เอ)ไพรีน	252.31	288	288



500x

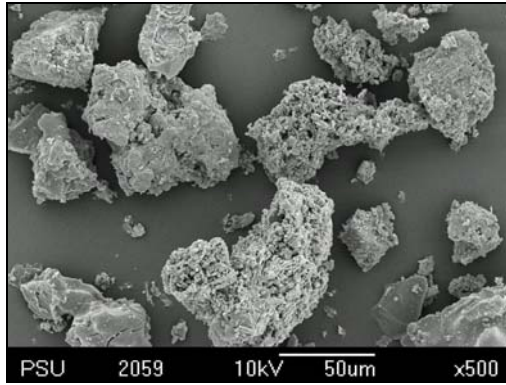


3500x

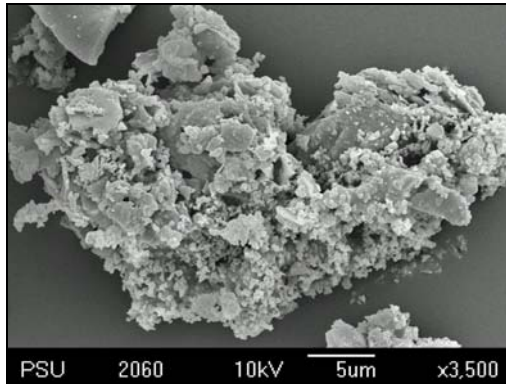


8500x

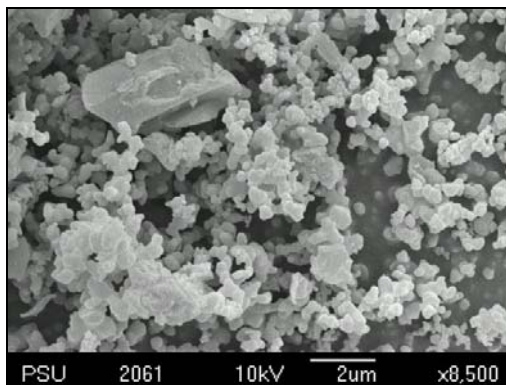
ภาพประกอบที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายระดับไมครอนของเมมอดิเซลที่กำลังขยาย 500 3500 8500 เท่า



500x

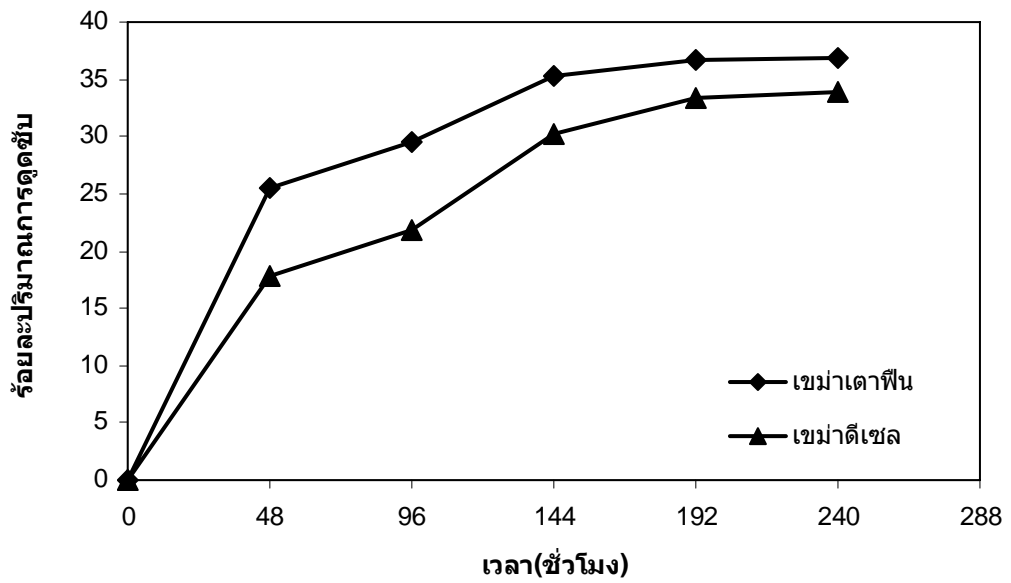


3500x

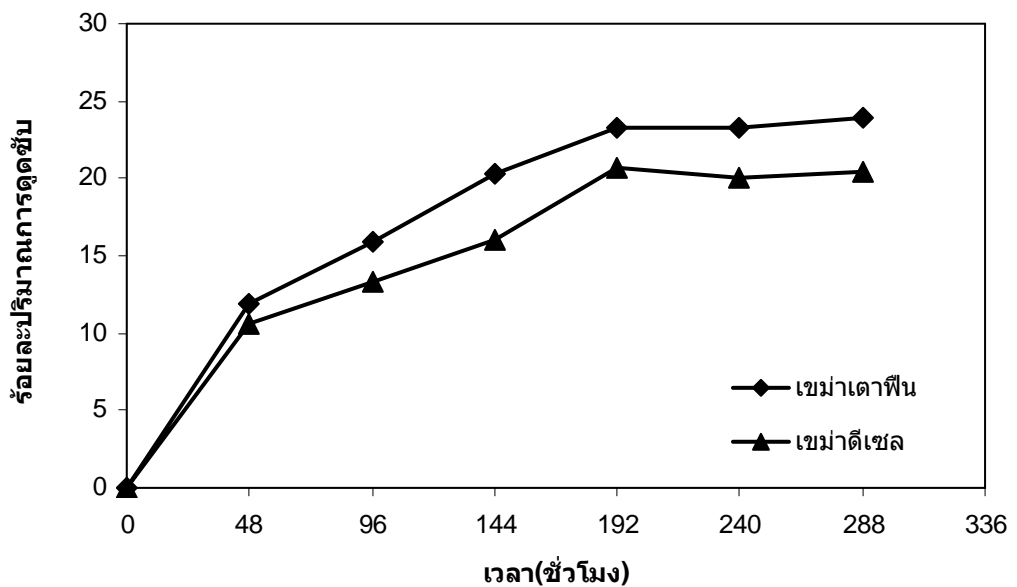


8500x

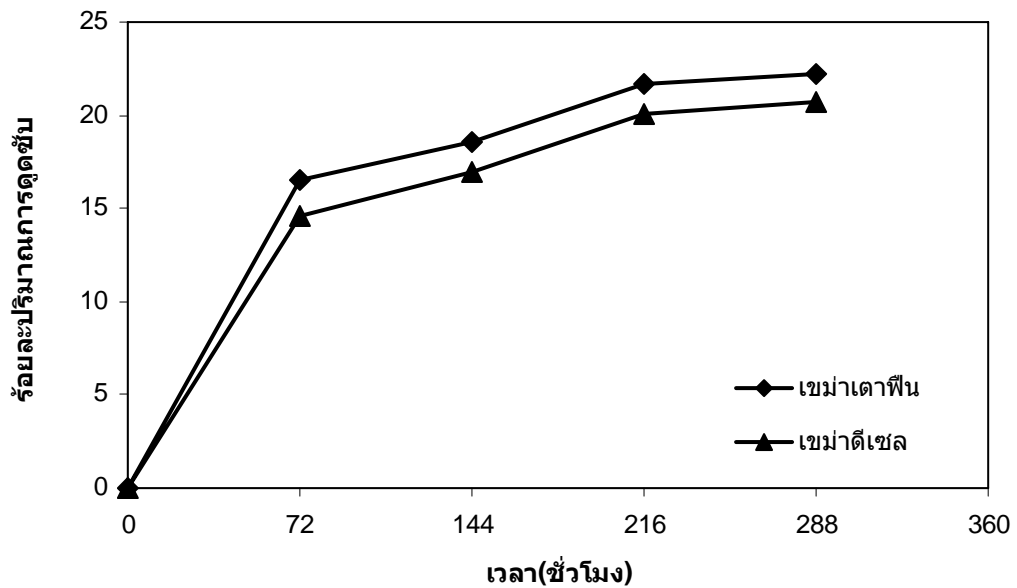
ภาพประกอบที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายระดับไมครอนของเขม่าเตาฟืนที่กำลังขยาย 500 3500 8500 เท่า



ภาพประกอบที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารแอนทราซีนบนเขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ



ภาพประกอบที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารไพรีนบนเขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ



ภาพประกอบที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการดูดซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบน
 เขม่าแต่ละชนิดกับระยะเวลาในการดูดซับ

สำหรับการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน (Soot-water partitioning coefficient, K_{sw} ($\mu\text{g}_{\text{sorbed}}\text{g}^{-1}/\mu\text{g}^{-1}$)) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถช่วยทำนาย
 แนวโน้มและอธิบายการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชที่เคลื่อนที่ไปยังชั้นน้ำใต้ดินได้ แสดงดัง
 สมการที่ 4.1

$$C_s = K_{sw} C_w \quad 4.1$$

เมื่อ C_w = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (μg^{-1})

C_s = ปริมาณสารประกอบพีเอเอชที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเขม่า ($\mu\text{g}_{\text{sorbed}}\text{g}^{-1}$)

จากภาพประกอบภาคผนวก จ พบว่าค่า K_{sw} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำพาร์
 ทิชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการกระจายตัวของสารประกอบพีเอเอชที่อยู่ในน้ำใต้ดินเกิดการแทรกซึม
 เข้าไปอยู่ในโมเลกุลของเขม่าได้ ทำให้ปริมาณสารประกอบพีเอเอชในเขม่าที่ได้แสดงแนวโน้มที่
 เพิ่มขึ้น (Bucheli et al., 2000) โดยค่า K_{sw} จากสมการที่ 4.1 แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าเขม่าเตาฟืน
 สามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซล

ตารางที่ 4.5 ค่า K_{SW} ของการดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้า

ชนิดขี้เถ้า	สารฟีนอล	K_{SW} ($\mu\text{g}_{\text{sorbed}}\text{g}^{-1}_{\text{soot}}/\mu\text{g}\text{l}^{-1}$)
ขี้เถ้าดีเซล	แอนทราซีน	0.6601
	ไพรีน	0.3746
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.3292
ขี้เถ้าเตาฟืน	แอนทราซีน	0.7772
	ไพรีน	0.4107
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.4000

4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

จากการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสารประกอบฟีนอลบนขี้เถ้าทั้งสองชนิด จากนั้นทำการคำนวณหาปริมาณของสารฟีนอลในวัฏภาคของสารละลายและวัฏภาคของขี้เถ้า แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าขี้เถ้าเตาฟืนสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิดเอาไว้ได้ดีกว่าขี้เถ้าดีเซล แสดงดังภาพประกอบที่ 4.7 ถึง 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาสมดุล (C_w) และปริมาณสารฟีนอลที่ดูดซับได้ต่อน้ำหนักของขี้เถ้า (C_s) จะเห็นได้ว่าปริมาณการดูดซับสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นที่สมดุลเพิ่มขึ้น

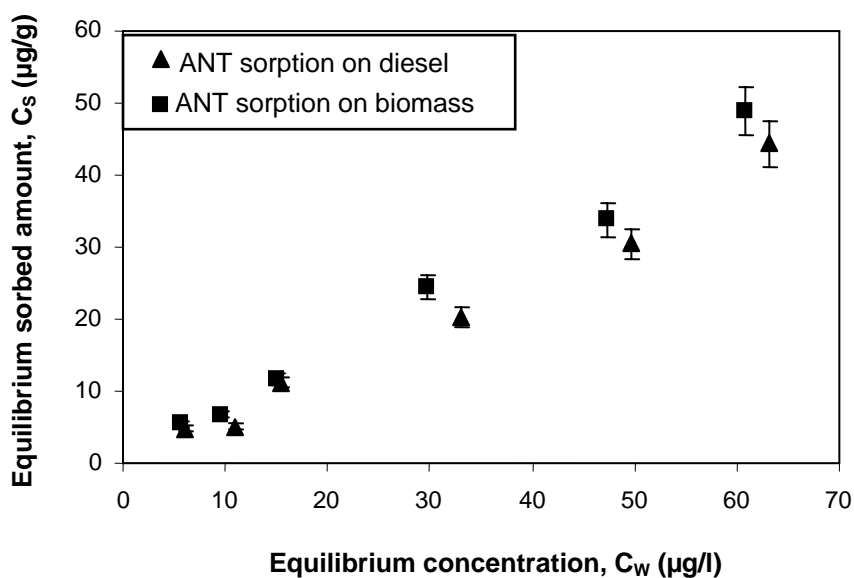
จากตารางที่ 4.6 สำหรับขี้เถ้าแต่ละชนิดที่ใช้ในการดูดซับสามารถที่จะบอกได้ว่าความจุของการดูดซับ (Adsorption capacity) สารประกอบฟีนอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น คือที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 – 100 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าขี้เถ้าดีเซลจำนวน 0.200 กรัม สามารถเคลื่อนย้ายปริมาณสารแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนได้เท่ากับ 0.969 – 8.887, 0.714 – 5.716 และ 0.705 – 5.060 ไมโครกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ขี้เถ้าเตาฟืนจำนวน 0.200 กรัม สามารถเคลื่อนย้ายปริมาณสารแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนได้เท่ากับ 1.096 – 9.786, 0.717 – 6.160 และ 0.801 – 6.254 ไมโครกรัม ตามลำดับ

ลักษณะการดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนทั้งสองชนิดที่ได้จากการทดลองนั้น สามารถอธิบายลักษณะความแตกต่างกันของการดูดซับได้ด้วยไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งเป็นเทอมที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแอกติวิตีหรือความเข้มข้นของการดูดซับที่สมดุลและปริมาณของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนพื้นผิวที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมที่นำมาใช้

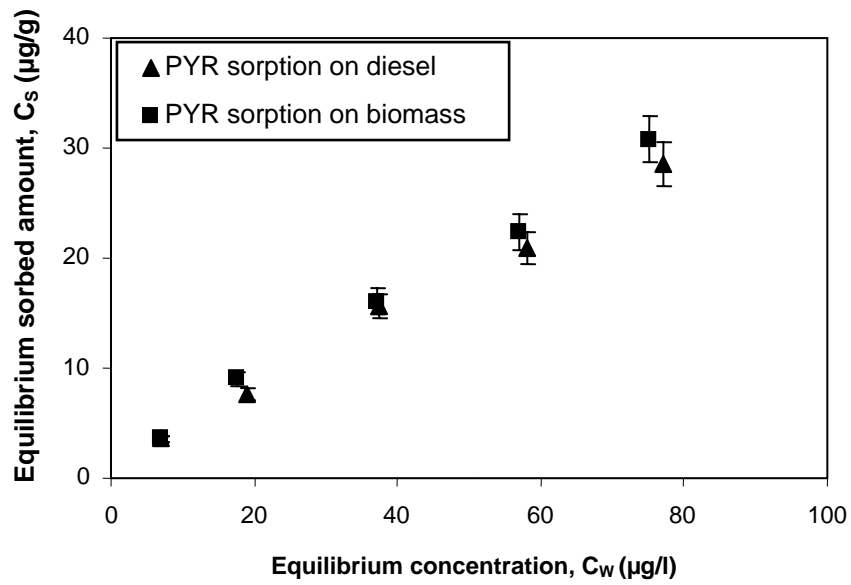
ในการอธิบายการดูดซับคือ ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิคซ์ (Freundlich Adsorption Isotherm) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และ ไอโซเทอมแบบโพลานีย์ ดุบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดที่เวลาสมดุล

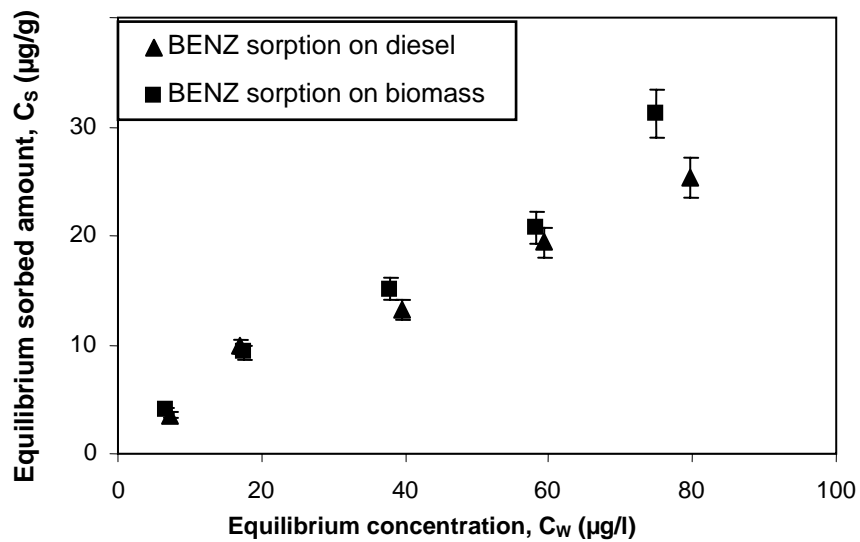
ชนิดเขม่า	สารฟิเอเอช	Mass sorbed amount ($\mu\text{g/g}$ of soot)
เขม่าดีเซล	แอนทราซีน	4.845-44.352
	ไพรีน	3.568-28.558
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	3.526-25.299
เขม่าเตาฟืน	แอนทราซีน	5.479-48.930
	ไพรีน	3.587-30.798
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	4.006-31.269



ภาพประกอบที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับของสารแอนทราซีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมดุล



ภาพประกอบที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับของสารไพรีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมมูล



ภาพประกอบที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืนที่เวลาสมมูล

ไอโซเทอมของฟรูนดลิคซ์ (Freundlich Adsorption Isotherm) มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) (อรวรรณ รัตนวงษ์ 2549) โดยมักใช้เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับของสารประกอบที่มีการกระจายตัวระหว่างภูมิภาคของพื้นผิวและภูมิภาคของสารละลาย ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2

สมการของฟรูนดลิคซ์ :

$$C_s = K_F C_w^{1/n} \quad 4.2$$

หรือ

$$\log C_s = \log K_F + (1/n) \log C_w \quad 4.3$$

ค่า K_F และ $1/n$ สามารถหาได้จากจุดตัดและความชันในการพล็อตกราฟระหว่าง $\log C_s$ และ $\log C_w$

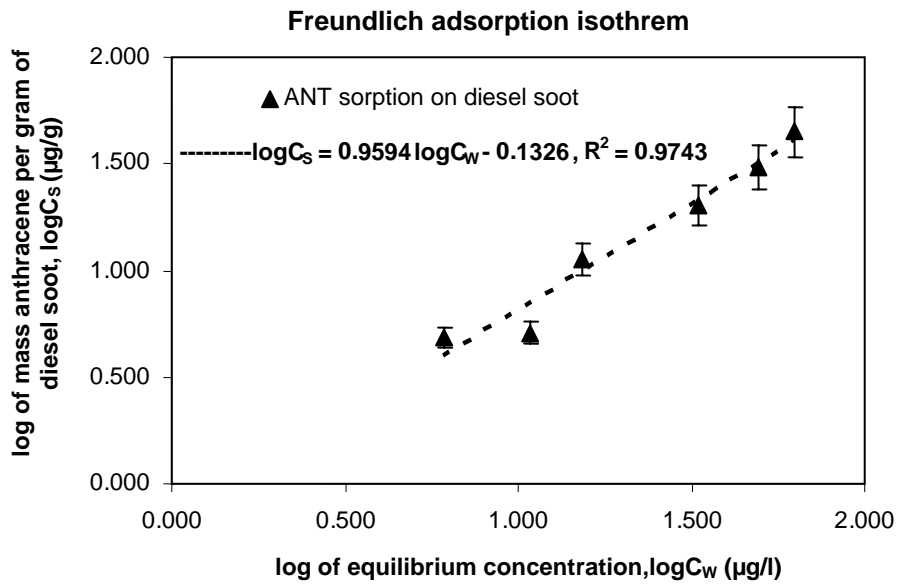
โดยที่ C_s = ปริมาณสารประกอบฟิเอเอชที่ดูดซับได้น้ำหนักของเขม่า (Adsorbent) (ไมโครกรัมต่อกรัมเขม่า)

C_w = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (ไมโครกรัมต่อลิตร)

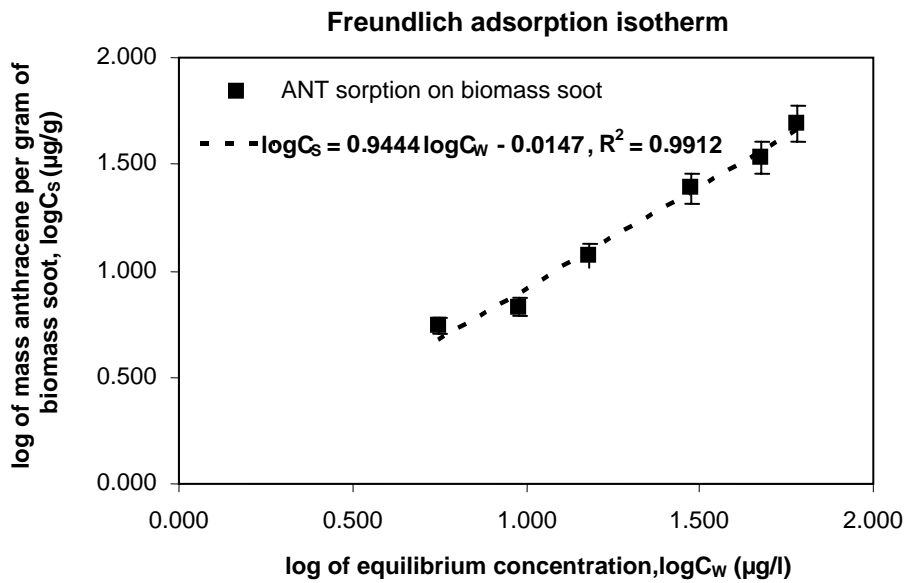
K_F = ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรูนดลิคซ์

$1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงความถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวไอโซเทอมของฟรูนดลิคซ์

Freundlich Adsorption Isotherm ของการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าแต่ละชนิด โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Freundlich แสดงในตารางที่ 4.7 และสามารถใช้อสมการไอโซเทอมของฟรูนดลิคซ์ ในการทำนายผลการทดลองได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 ถึง 4.12

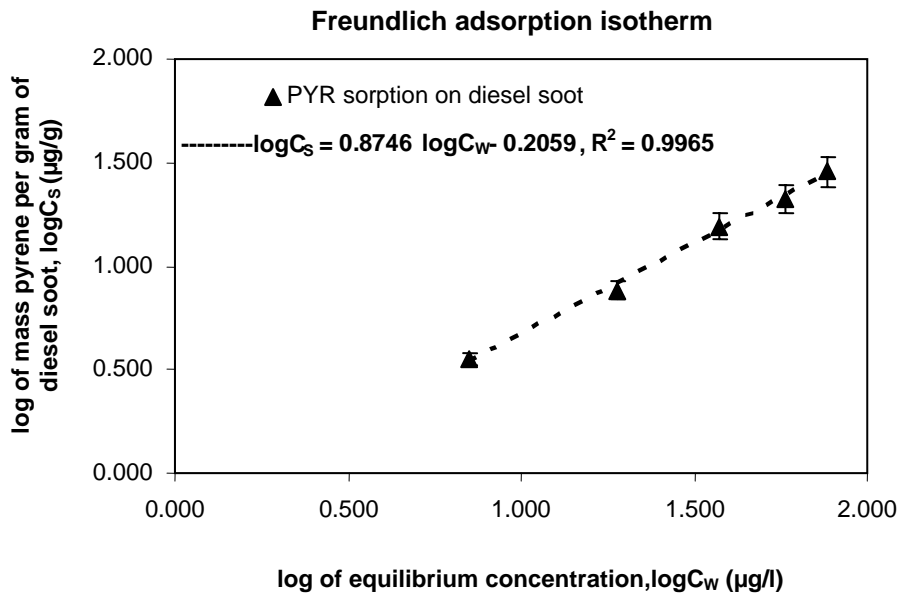


(ก)

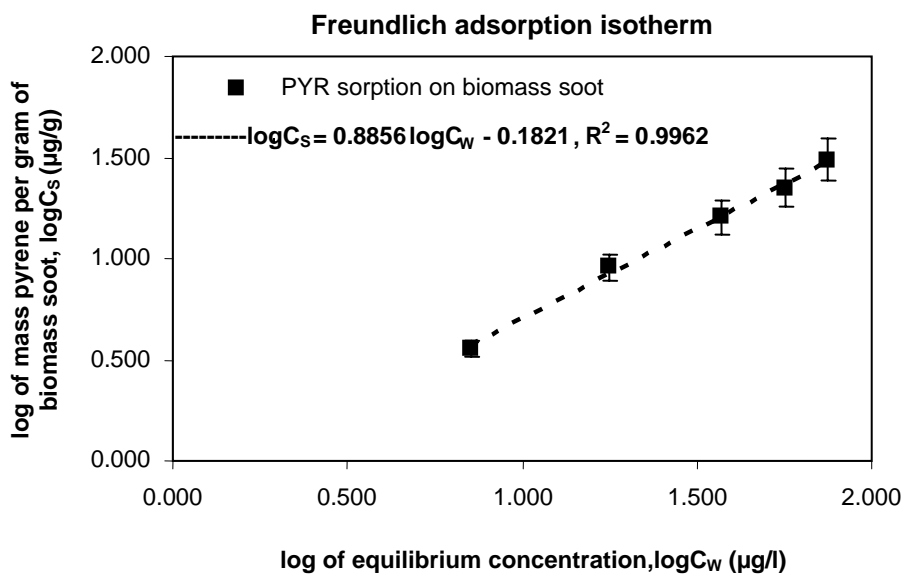


(ข)

ภาพประกอบที่ 4.10 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่า (ก) เขม่าดีเซล (ข) เขม่าเตาฟืน

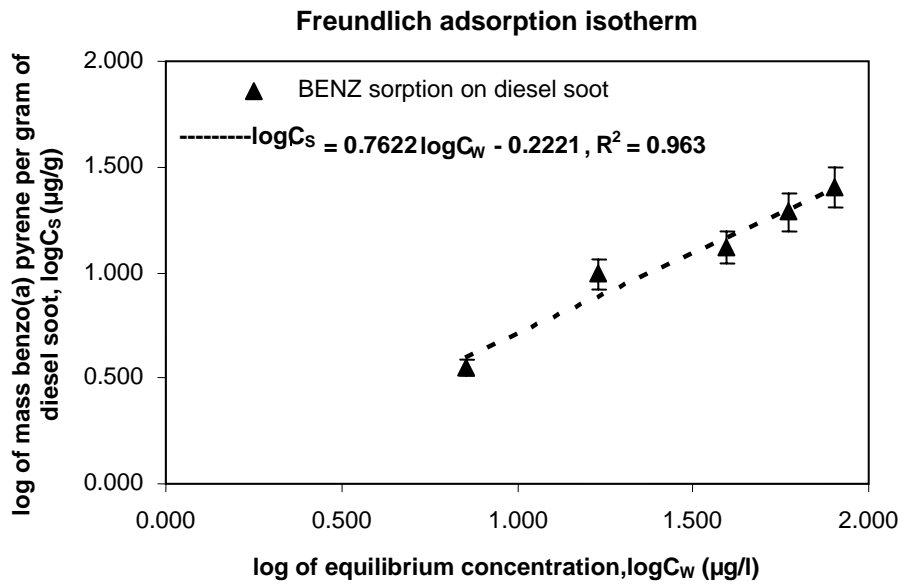


(ก)

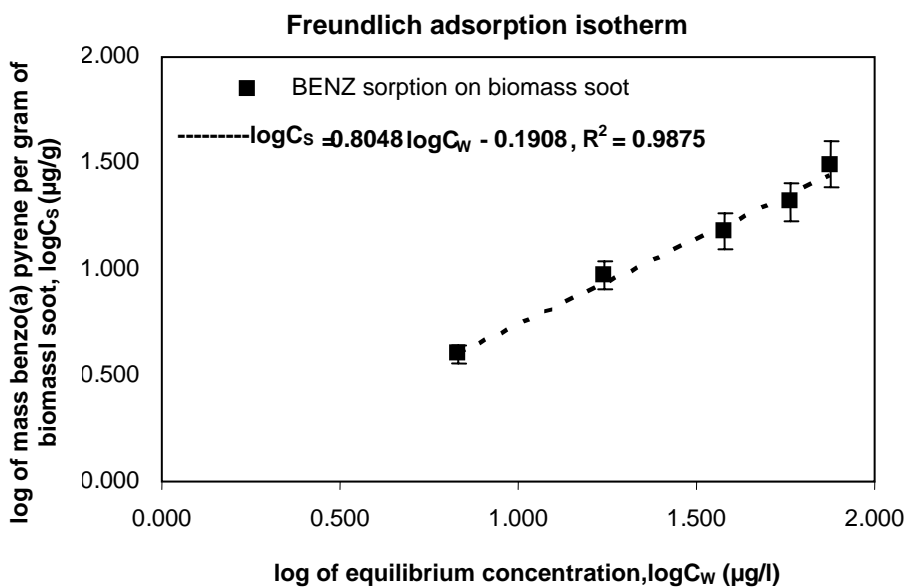


(ข)

ภาพประกอบที่ 4.11 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนขม่า (ก) ขม่าดีเซล (ข) ขม่าเตาฟืน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.12 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
 สังกะระหับนเขม่า (ก) เขม่าดีเซล (ข) เขม่าเตาฟืน

ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยสมมติให้การดูดซับเกิดบนผิวเอกพันธ์ (Homogeneous) สมการแลงเมียร์แสดงดังสมการ 4.4 หรือ 4.5

สมการแลงเมียร์ :

$$\frac{C_w}{C_s} = \frac{1}{Q_o K_L} + \frac{C_w}{Q_o} \quad 4.4$$

หรือ

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{K_L Q_o C_w} \quad 4.5$$

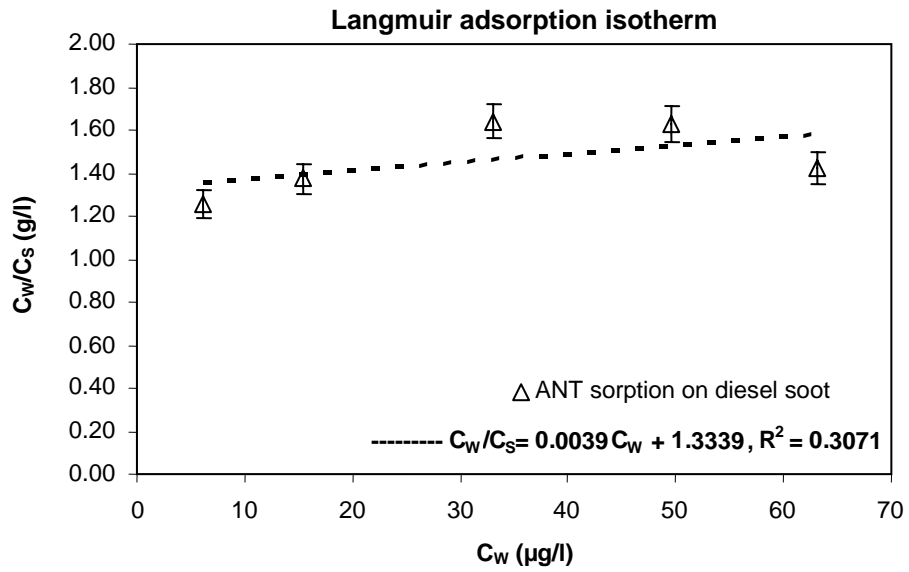
โดยที่ C_w = ความเข้มข้นที่สมดุล (ไมโครกรัมต่อลิตร)

C_s = ปริมาณสารประกอบฟิเอเอชที่ดูดซับได้ (ไมโครกรัมต่อกรัมเขม่า)

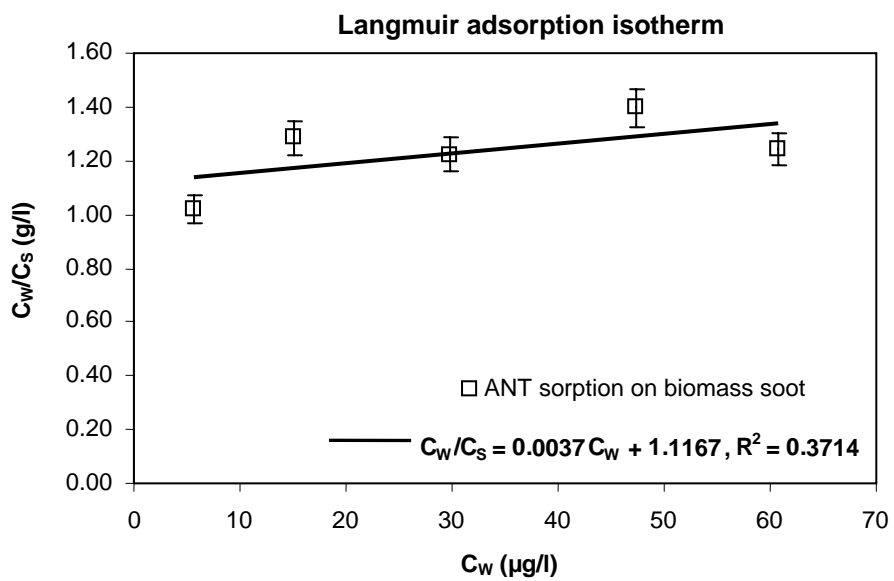
K_L = ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์

Q_o = ปริมาณสารประกอบฟิเอเอชที่ดูดซับได้สูงสุด (ไมโครกรัมต่อกรัมเขม่า)

Langmuir Adsorption Isotherm ของการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชในน้ำได้ดินสังเคราะห์บนเขม่าแต่ละชนิด โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir แสดงในตารางที่ 4.7 และสามารถใส่สมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ ในการทำนายผลการทดลองได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.13 ถึง 4.15

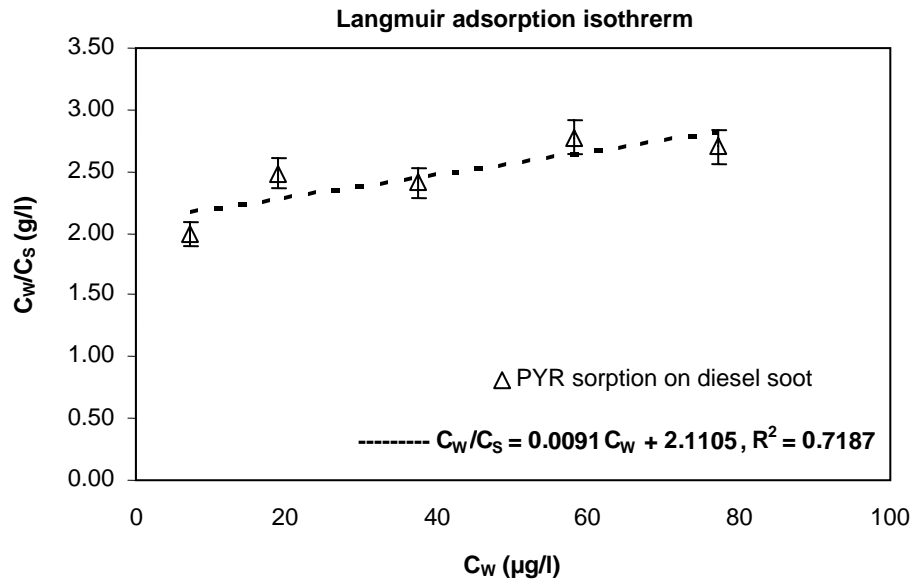


(ก)

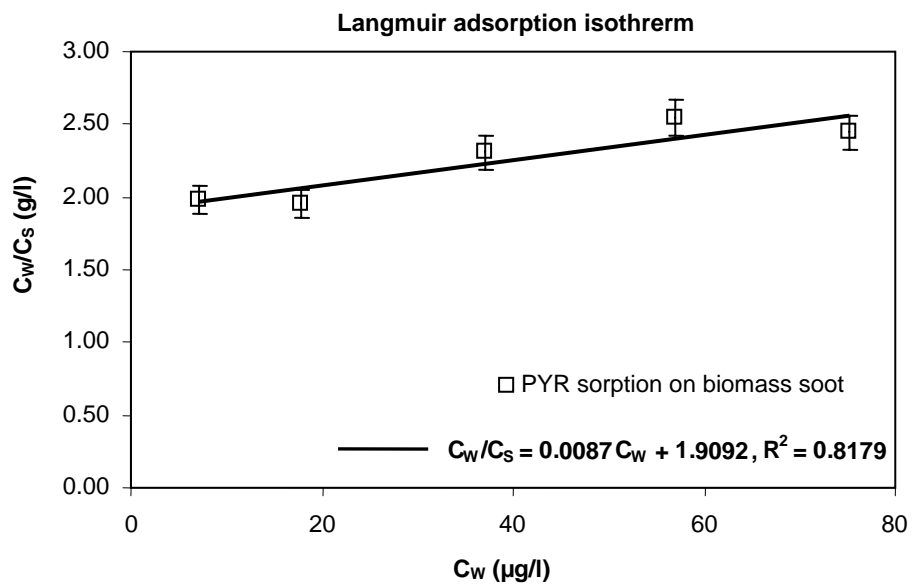


(ข)

ภาพประกอบที่ 4.13 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ บนเขม่า (ก) เขม่าดีเซล (ข) เขม่าเตาฟืน

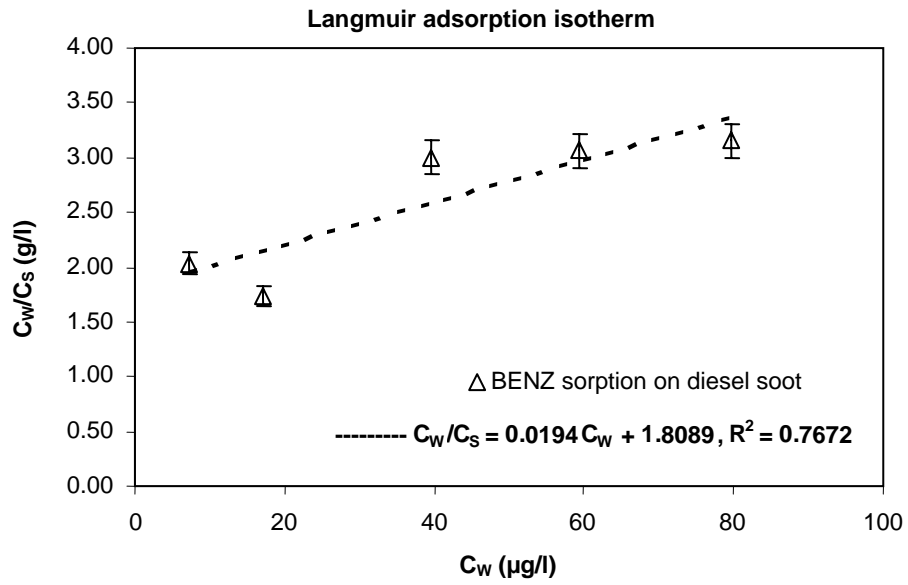


(ก)

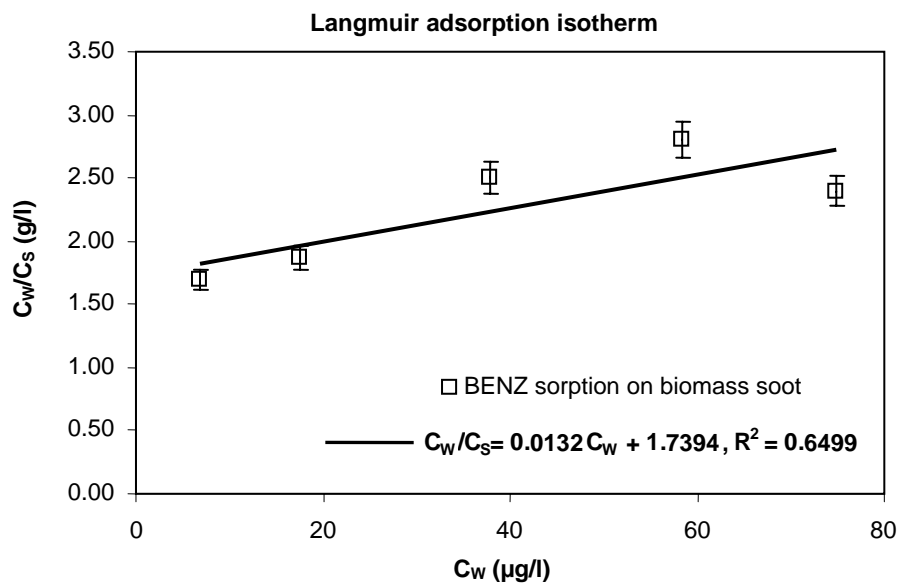


(ข)

ภาพประกอบที่ 4.14 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินถังกระดาษ
บนเขม่า (ก) เขม่าดีเซล (ข) เขม่าเตาฟืน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.15 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
 สังกะระหับนเขม่า (ก) เขม่าดีเซล (ข) เขม่าเตาฟืน

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสมการฟรุนดลิคซ์และสมการแลงเมียร์สำหรับการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้า

ชนิดขี้เถ้า	สารฟิเอเอช	Freundlich isotherm			Langmuir isotherm		
		K_F	$1/n$	R^2	Q_0	K_L	R^2
ขี้เถ้าดีเซล	แอนทราซีน	0.737	0.959	0.974	256.41	0.0029	0.307
	ไพรีน	0.622	0.875	0.996	109.89	0.0043	0.719
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.600	0.762	0.963	51.546	0.0107	0.767
ขี้เถ้าเตาฟืน	แอนทราซีน	0.967	1.041	0.991	270.27	0.0033	0.371
	ไพรีน	0.658	0.886	0.996	114.94	0.0046	0.818
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.644	0.805	0.988	75.76	0.0076	0.650

เมื่อพิจารณาจากการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) และค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ต่างๆ ในตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิคซ์ และสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกให้ทราบว่าข้อมูลจากการทดลองเข้ากับแบบจำลองได้มากเพียงใด โดยถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองเข้ากับสมการแบบจำลองนั้นได้ดี จากผลการทดลองจะพบว่า สมการไอโซเทอมของฟรุนดลิคซ์จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ใกล้เคียง 1 มากกว่าสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ จึงแสดงได้ว่า สมการไอโซเทอมของฟรุนดลิคซ์จะสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้าได้ดีกว่าสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์

เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแตกต่างกันของตำแหน่งดูดซับ (adsorption site) บนตัวดูดซับ (เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ 2544) ค่า $1/n$ ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก จะแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวการดูดซับแตกต่างกันมาก (heterogeneous) ทำให้ตำแหน่งดูดซับแต่ละแห่งมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้ดี นั่นแสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี (ชฎาภรณ์ บุญแท้ 2545) จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ค่า $1/n$ บนขี้เถ้าเตาฟืนมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าบนขี้เถ้าดีเซล และสารละลายแอนทราซีนมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสารละลายฟิเอเอชอีกสองชนิดแสดงให้เห็นได้ว่าสารแอนทราซีนที่มีขนาดและโครงสร้างโมเลกุลที่เล็ก (3วง) สามารถเกิดการกระจาย

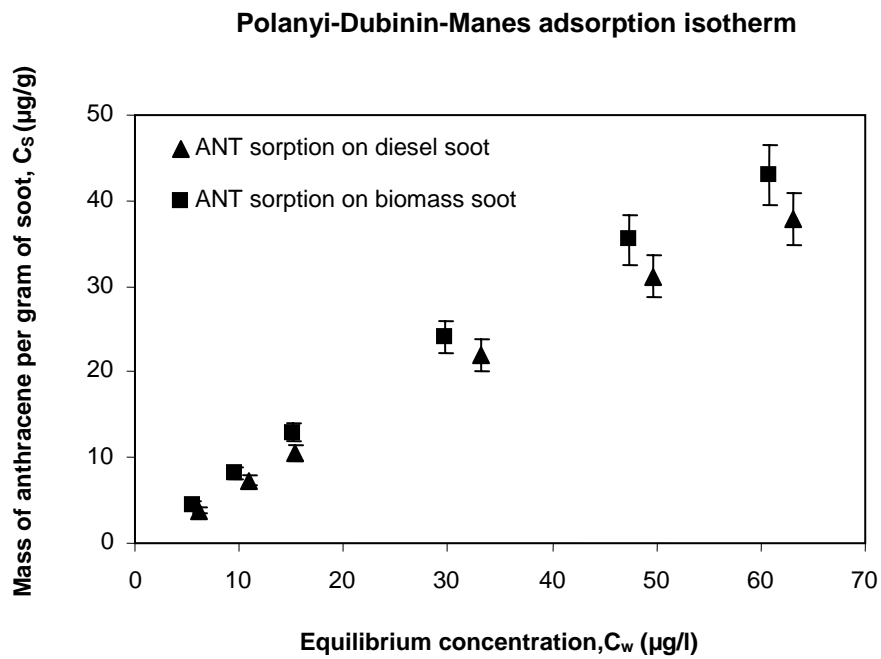
ตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างรูพรุนของเขม่าเตาฟืนและเขม่าดีเซลได้มากกว่าสารไพรีน(4วง) และสารเบนโซ(เอ)ไพรีน (5วง) ซึ่งการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชนี้จะขึ้นอยู่กับ molecular volumes ของสาร (ปริตดา โรจน์วิรุฬห์ 2547) โดยสารประกอบที่มี molecular volumes ขนาดใหญ่จะมีการขัดขวางของโมเลกุลในการแทรกซึมหรือการกระจายตัวของสารภายใน โครงสร้างโมเลกุลของเขม่าได้ (Jonker 2007)

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของฟรอนด์ลิคซ์ (K_F) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับ จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.7 พบว่าค่า K_F ของเขม่าเตาฟืนมีค่าสูงกว่าเขม่าดีเซลในการทดสอบการดูดซับสารละลายแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าเตาฟืนตามลำดับ จากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเขม่าเตาฟืนมีค่าความจุการดูดซับสารประกอบพีเอเอชได้ดีกว่าเขม่าดีเซลในช่วงการศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับค่า $1/n$ ที่ได้ และเมื่อพิจารณาค่า Q_0 จากสมการของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณสารประกอบพีเอเอชที่ดูดซับได้สูงสุดบนเขม่า พบว่าเขม่าเตาฟืนจะมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่า และสารแอนทราซีนจะเกิดการดูดซับบนเขม่าได้ดีกว่าสารไพรีนและสารเบนโซ(เอ)ไพรีน ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิคซ์ โดยค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าของเขม่าเตาฟืนนี้เนื่องจากกลไกการดูดซับจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างพื้นที่ผิวของเขม่าและโมเลกุลของสารละลาย และคุณสมบัติทางเคมี รวมทั้งลักษณะทางกายภาพและพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนของเขม่าเตาฟืนที่สูงกว่าเขม่าดีเซล ซึ่งตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากย่อมดูดซับโมเลกุลของสารประกอบพีเอเอชได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย ดังนั้นสารประกอบพีเอเอชสามารถกระจายตัวเข้าไปอยู่ใน โครงสร้างของเขม่าเตาฟืนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับได้มากกว่าเขม่าดีเซล ก็จะช่วยสนับสนุนข้อมูลที่ว่าเขม่าเตาฟืนสามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซล อย่างไรก็ตามจากลักษณะของสมการไอโซเทอมของฟรอนด์ลิคซ์ จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สูงขึ้นไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.10 ถึง 4.12 และจากตารางที่ 4.7 ค่า K_F ของสารละลายแอนทราซีนบนเขม่าทั้งสองชนิดจะมีค่าสูงกว่าสารละลายไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนเนื่องจากลักษณะความเป็นรูพรุนของเขม่าทำให้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนเกิดการดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

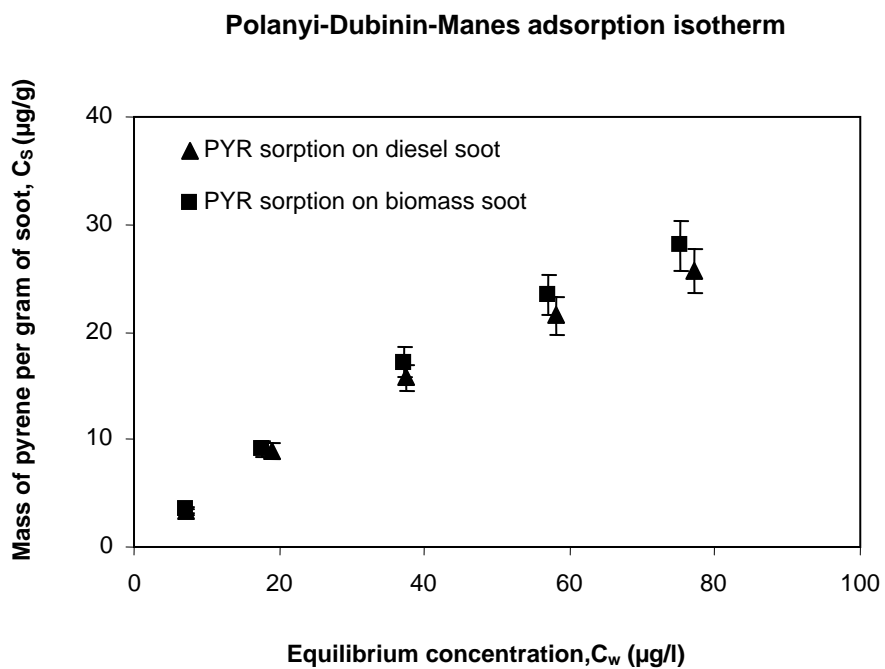
ไอโซเทอมแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ (Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm) จะประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการดูดซับของสารประกอบบนวัสดุที่มีความเป็นรูพรุน (Sun et al., 2008) พฤติกรรมการดูดซับที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อส่วนของการดูดซับหรือการ pore – filling เป็นกระบวนการที่มีส่วนสำคัญ เพื่อนำมาประมาณค่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity) โดยการนำความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นมาพิจารณา สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ เป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับทำนายปริมาณการดูดซับที่แปรเปลี่ยน อุณหภูมิ ชนิดของสารดูดซับ และความเข้มข้น ซึ่งใช้ได้ดีในสารดูดซับชนิดที่มีความเป็นรูพรุน และสามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าพลังงานการคายความร้อน (E) ได้ และเพื่อให้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น จึงต้องมีการตั้งสมมติฐานคือ ที่สถานะของการดูดซับอุณหภูมิมีค่าคงที่ และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพเท่านั้น (พัชรวิระ พจนานันท์ 2543) ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6

$$C_s = V_o \rho_o \exp \left[\left(\frac{-RT \left(-\ln \frac{C_w}{S_{scl}} \right)}{E} \right)^2 \right] \quad 4.6$$

Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm ของการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าแต่ละชนิด โดยค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ แสดงในตารางที่ 4.8 และสามารถนำสมการ Polanyi – Dubinin – Manes ในการทำนายผลการทดลองได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.16 ถึง 4.18

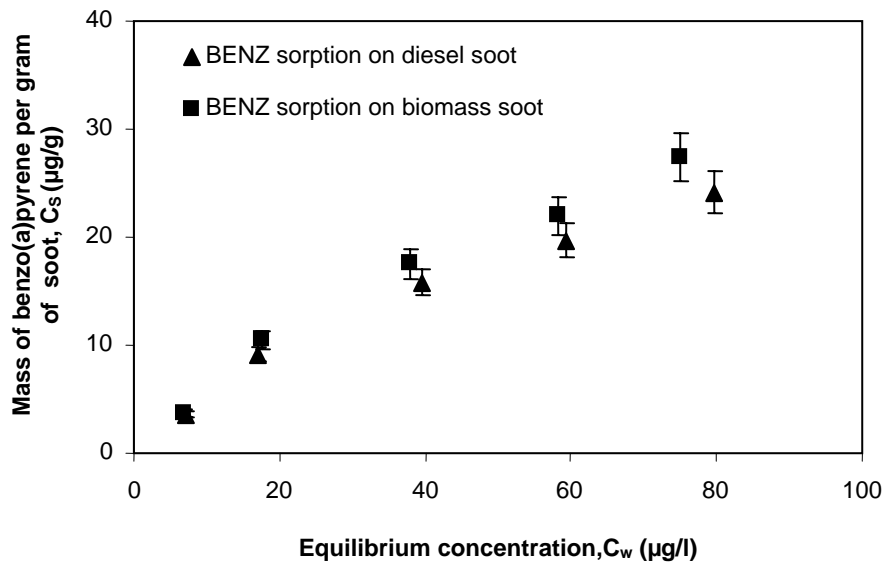


ภาพประกอบที่ 4.16 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้า



ภาพประกอบที่ 4.17 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้า

Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm



ภาพประกอบที่ 4.18 Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารเบนโซ(เอ)ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า

พิจารณาค่า V_0 เป็นค่าคงที่ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของรูพรุนหรือเป็นปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (cm^3/g) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ (พัชรี วีระพจนานนท์ 2543) พบว่าค่า V_0 ของสารแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าเตาฟืนมีค่าสูงกว่าบนเขม่าดีเซล ดังนั้นการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าเตาฟืนจะเกิดขึ้นได้มากกว่าบนเขม่าดีเซลเนื่องจากลักษณะทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้าง และผลอภิป്രายมาก่อนนี้

สำหรับการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าทั้งสองชนิดพบว่าลำดับในการดูดซับคือ แอนทราซีน > ไพรีน > เบนโซ(เอ)ไพรีน เนื่องจากสารเบนโซ(เอ)ไพรีน มีขนาดโมเลกุลใหญ่ที่สุดจึงเกิดการดูดซับบนเขม่าได้น้อยที่สุด (Sun et al., 2008) ในส่วนของปริมาตร mesopore ซึ่งมีส่วนสำคัญในการอธิบายการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่านั้น พบว่าค่า V_0 ที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กันกับปริมาตร mesopore ที่เพิ่มขึ้นด้วย (Long et al., 2008) และจากค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 จะแสดงได้ว่าทฤษฎีไอโซเทอมการดูดซับของโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ มีประโยชน์ที่จะใช้ในการอธิบายถึงกลไกการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าและการ pore-filling จะมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่า

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์และค่า R² ของสมการโพลานีย์ คูบินิน เมนส์

ชนิดเขม่า	สารฟิเอเอช	S [*] _{scl} (µg/l)	V _o (cm ³ /g)	E (J/mol)	R ²
เขม่าดีเซล	แอนทราซีน	6905.61	187.78	-8615.24	0.95
	ไพรีน	1100.95	44.66	-7449.93	0.98
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	120.38	17.79	-5199.98	0.96
เขม่าเตาฟืน	แอนทราซีน	6905.61	200.29	-8839.33	0.97
	ไพรีน	1100.95	50.07	-7394.12	0.99
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	120.38	20.01	-5201.11	0.94

* Subcooled liquid solubility, calculate from solubility data for 25^oC

$$S_w^{(liquid)} = F_{sl} S_w^{(solid)} \text{ and } \text{Log}F_{sl} = \frac{\Delta H_f (T_m - T)}{2.303RT_m}$$

พิจารณาถึงค่าพลังงานการคายความร้อน (E) หรือพลังงานอิสระ (free-energy) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ พบว่าค่าพลังงานการคายความร้อน (E) ที่จะใช้ในการ sorptive uptake ของสารประกอบฟิเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืนมีค่าสูงกว่าเขม่าดีเซลเล็กน้อย จึงทำให้สารประกอบฟิเอเอชที่ถูกดูดซับสามารถเกาะและแทรกซึมอยู่บนเขม่าเตาฟืนได้ดีกว่าและเกิดการหลุดออกของสารประกอบฟิเอเอชได้ยากกว่าเขม่าดีเซลที่มีค่าพลังงานการคายความร้อนต่ำกว่า (Long et al., 2008) และพบว่าค่าพลังงานการคายความร้อน (E) คือ 8 – 19 kJ/mol. ที่ใช้ในการ sorptive uptake ของสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic compounds) จากน้ำ (Kleineidam et al., 2002) และค่าพลังงานการคายความร้อน คือ 10 – 13 kJ/mol. สำหรับการดูดซับของเบนซีนจากน้ำบนถ่านกัมมันต์ (activated carbons) ตามลำดับ

โดยทั่วไปพบว่าตัวดูดซับ (adsorbent) จะมีลักษณะทางโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าจะสามารถดูดซับปริมาณสารประกอบฟิเอเอช (adsorbate) ได้มากกว่า (Long et al., 2008) และพบว่าสารแอนทราซีนจะเกิดการดูดซับบนเขม่าได้ดีกว่า เนื่องจากสารแอนทราซีนมีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถกระจายตัวเข้าไปในโครงสร้างเขม่าได้มากกว่าสารไพรีนและสารเบนโซ(เอ)ไพรีน ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิกซ์ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะ ($6.090 \text{ m}^2/\text{g}$) และปริมาตร mesopore ของเขม่าเตาพื้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าดีเซล ($4.850 \text{ m}^2/\text{g}$) ดังนั้น ความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชบนเขม่าทั้งสองชนิดสำหรับสารแอนทราซีน ไพรีน และเบนโซ(เอ)ไพรีน สามารถอธิบายได้เกี่ยวกับความแตกต่างกันของพื้นที่ผิวจำเพาะและความแตกต่างทางโครงสร้างของเขม่าแต่ละชนิดจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟิเอเอช

เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า Freundlich Adsorption Isotherm และ Polanyi – Dubinin – Manes Adsorption Isotherm เหมาะสำหรับการทำนายการดูดซับสารประกอบฟิเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าแต่ละชนิด แสดงดังภาพประกอบที่ ๓.15 ถึง ๓.20 ในภาคผนวก ๓

4.2.3 การคายซับสารประกอบฟิเอเอชบนเขม่าแต่ละชนิดในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

การศึกษาคายซับของสารประกอบฟิเอเอชจากเขม่าที่ส่วนใหญ่จะมีความเกี่ยวข้องกับทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่างๆ รวมทั้งความเป็นพิษและมีผลต่อสิ่งมีชีวิต กลไกการคายซับ (desorption) หรือการปล่อยออก (release) ของสารประกอบฟิเอเอชจะเกิดขึ้นได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลไกการดูดซับ จากภาพประกอบที่ 4.19 และ 4.20 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันที่ลดลงกับเวลา โดยที่สารประกอบจะถูกคายซับออกจากเขม่าทำให้ความเข้มข้นในเขม่าลดลงและความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในน้ำและในเขม่าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กระบวนการคายซับและกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง (Bowman et al., 2002) ผลของการคายซับนั้นสารประกอบฟิเอเอชจะเกิดกระบวนการดูดซับบนเขม่าก่อน แล้วเขม่าจะเกิดกระบวนการคายซับสารประกอบฟิเอเอชตามมาเนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้จึงสามารถเกิดการคายซับออกมา

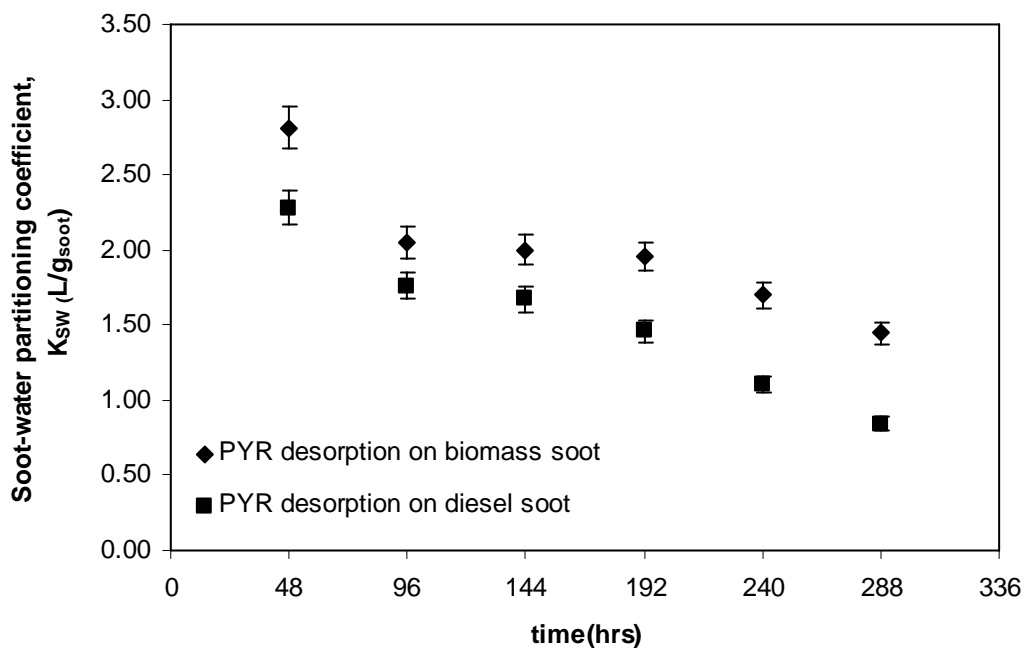
ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนการคายซับของสารไพรีนบนเขม่า

ชนิดเขม่า	เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g/l}$)	ความเข้มข้นหลังการ คายซับ ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณการคายซับ ต่อกรัมเขม่า ($\mu\text{g/g}$)
เขม่าดีเซล	10	2.555	3.178
	25	5.299	6.569
	50	7.627	9.472
	75	9.451	11.743
	100	13.175	16.400
เขม่าเตาฟืน	10	1.481	1.835
	25	3.615	4.485
	50	6.747	8.391
	75	7.871	9.804
	100	11.168	13.920

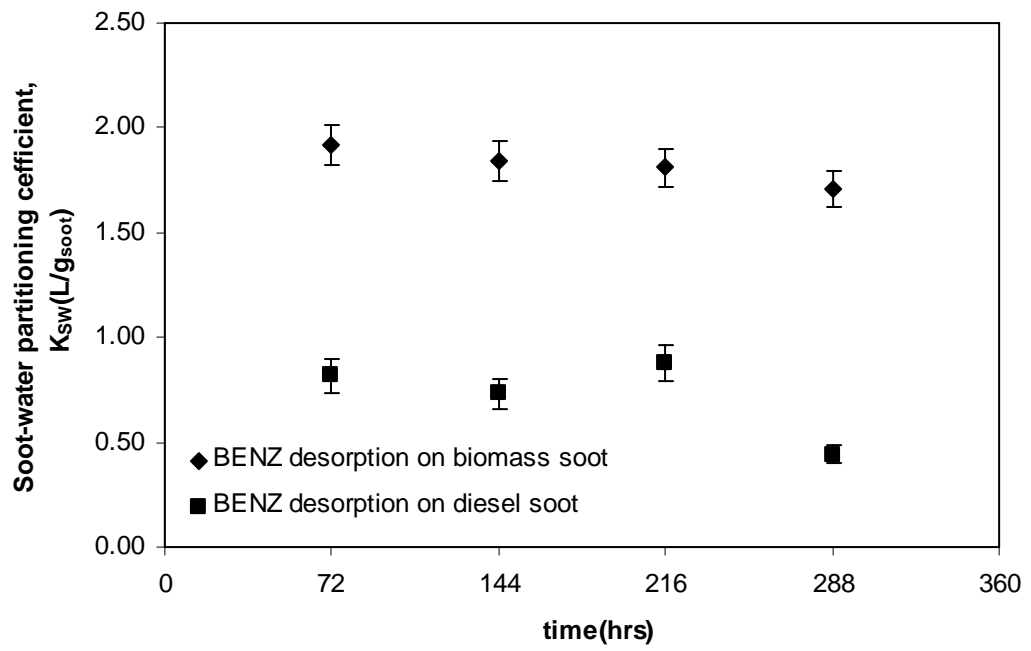
ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนการคายซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่า

ชนิดเขม่า	เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g/l}$)	ความเข้มข้นหลังการ คายซับ ($\mu\text{g/l}$)	ปริมาณการคายซับ ต่อกรัมเขม่า ($\mu\text{g/g}$)
เขม่าดีเซล	10	2.252	2.812
	25	5.666	7.064
	50	7.453	9.295
	75	11.362	15.188
	100	15.242	19.022
เขม่าเตาฟืน	10	2.123	2.649
	25	3.333	4.157
	50	6.333	7.911
	75	7.200	8.999
	100	9.381	11.722

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าปริมาณการคายซับของสารละลายพีเอเอชบนเขม่าดีเซลจะมีปริมาณการคายซับที่สูงกว่าบนเขม่าเตาฟืน ซึ่งการคายซับของสารปริมาณสารไพรีนและเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าดีเซลมีเท่ากับ 0.63-3.28 ไมโครกรัม และ 0.56-3.80 ไมโครกรัมตามลำดับ ในขณะที่การคายซับปริมาณสารไพรีนและเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าเตาฟืนเท่ากับ 0.36-2.78 ไมโครกรัม และ 0.52-2.34 ไมโครกรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการคายซับสารประกอบพีเอเอชระหว่างสารไพรีนและสารเบนโซ(เอ)ไพรีนพบว่าลักษณะการคายซับมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน สารไพรีนจะมีปริมาณการคายซับที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลของสารไพรีนมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของสารเบนโซ(เอ)ไพรีน จึงทำให้สารไพรีนเกาะกับอนุภาคของเขม่าได้ดีกว่าจึงเกิดการคายซับออกมาได้น้อยกว่า และสารแอนทราซีนจะไม่เกิดการคายซับบนเขม่าทั้งสองชนิด เนื่องจากโมเลกุลของสารแอนทราซีนมีขนาดเล็ก (3วงเบนซีน) จึงทำให้เกิดการแทรกซึมเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเขม่าได้ดี



ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงการคายซับของสารไพรีนบนเขม่าระหว่าง soot-water partitioning coefficient กับเวลา



ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงการคายซับของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าระหว่าง soot-water partitioning coefficient กับเวลา

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน(สารพีเอเอช) ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า ได้ทำการศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของเขม่า รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของสารประกอบ เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในสภาวะสมดุลนั้น จากการศึกษาพบว่า

1. เขม่าเตาฟืนและเขม่าดีเซลมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุคาร์บอน และมีลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเป็นทรงกลมจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เขม่าเตาฟืนจะมีช่วงขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะรวมทั้งปริมาตร mesopore ที่สูงกว่า จึงมีความสามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซล

2. การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ พบว่าสารประกอบพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่สมดุล และสามารถเกาะติดกับสิ่งแวดล้อมได้นานกว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีปริมาณการดูดซับต่ำกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เนื่องจากสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถผ่านเข้าสู่รูพรุนของเขม่าได้ดี

3. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานีย์ คูบินิน เมนส์ สามารถอธิบายลักษณะของข้อมูลการทดลองการดูดซับสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าได้ดี ซึ่งค่า K_F และ ค่า V_0 ที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารประกอบ พบว่า เขม่าเตาฟืนจะมีค่า K_F และ ค่า V_0 ที่สูงกว่าเขม่าดีเซล แสดงให้เห็นได้ว่าเขม่าเตาฟืนมีความจุในการดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซลในช่วงการศึกษา ซึ่งสอดคล้องกันกับการทดลองในการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพ คือเขม่าเตาฟืนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและมีปริมาตร mesopore ที่สูงกว่าเขม่าดีเซล ทำให้มีความจุในการดูดซับปริมาณสารประกอบพีเอเอชได้ดีกว่า

4. การดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพและเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ คือสามารถเกิดการคายซับหรือหลุดออก ซึ่งจากการทดลองการคายซับพบว่า สารเบนโซ (เอ) ไพรีนที่มีค่าพลังงานการคายความร้อน (E) น้อยสามารถเกิดการหลุดออกได้ง่ายกว่าสารที่มีค่า

พลังงานการคายความร้อนที่สูงกว่า และสารแอนทราซีนไม่เกิดการคายซับออกเนื่องจากมีค่าพลังงานการคายความร้อนที่สูงและโมเลกุลมีขนาดเล็กจึงแทรกซึมเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเขม่าได้ดี

5. การดูดซับของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่าเตาฟืนที่สามารถดูดซับปริมาณสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซลนั้น แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ที่มีจำนวนมากนั้น สารประกอบพีเอเอชสามารถเกาะติดอยู่บนเขม่าหรือสิ่งแวดล้อมอื่นๆได้ ซึ่งการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในน้ำใต้ดินนี้มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระยะยาวเนื่องจากการปลดปล่อยของสารประกอบพีเอเอชและเขม่าออกมาอย่างสม่ำเสมอ และสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นผลการทดลองนี้อาจใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการติดตามผลของการดูดซับหรือการเคลื่อนที่ของสารประกอบพีเอเอชที่สามารถเคลื่อนที่สู่ชั้นน้ำใต้ดินทำให้มีผลต่อคุณภาพของน้ำและสิ่งแวดล้อมอื่นๆได้

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาถึงการดูดซับสารประกอบพีเอเอชสามารถทดสอบและแปรผันตัวแปรอื่นๆได้ เช่น ชนิดของตัวดูดซับ ขนาดของอนุภาค ความเร็วในการเขย่า อุณหภูมิ รวมทั้งทำการศึกษาถึงจลนศาสตร์การดูดซับ เพื่อหาอัตราของการดูดซับหรืออัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับเพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการกระจายตัวและประสิทธิภาพในการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จินตนา สายวรรณ. 2541. การศึกษาสารโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากอนุภาคไอเสียรถยนต์ที่อยู่ในอากาศในกทม., รายงานฉบับสมบูรณ์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเลียมเคมีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิริทีปณ์ แสนรัก. 2547. การย่อยสลายไพรินและสารประกอบโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นโดยกลุ่มแบคทีเรียที่แยกได้จากใบพืชตระกูลถั่ว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราณีย์ ไชยปรุวงศ์. 2544. การสะสมของสารโพลีไซคลิกเอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในตะกอนบริเวณเอสทูรีแม่น้ำท่าจีน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. 2544. การกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟในสารละลายสีข้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธิดารัตน์ บุญศรี. 2543. การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปรีตดา โรจน์วิรุฬห์. 2547. การกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำทำ
โดยใช้เส้นใยธรรมชาติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการ
สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัชรี วีระพจนานันท์. 2543. ผลของความชื้นต่อการดูดซับไฮระเหยสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์,
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ยุทธกร เข้าเถือง. 2544. การแยกและการหาปริมาณสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติก
ไฮโดรคาร์บอนในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยวิธีรีเวอร์สเฟสลิควิดโครมาโทกราฟี,
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุรัชย์ จอมสมุทรชัย. 2537. การศึกษาการดูดซับ, รายงานการศึกษาปัญหาพิเศษ. สาขาวิชา
เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี.

อรรวรรณ รัตนวงศ์. 2549. การปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยจากทะลายปาล์มเปล่าเพื่อเพิ่มการดูด
ซับสารไม่มีขั้ว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Boving, T.B. and Wei, Z. 2004. "Removal of Aqueous-Phase Polynuclear Aromatic
Hydrocarbons using Aspen Wood Fibers". Chemosphere. 54. 831 - 839.

Bowman, J.C. Zhou, J.L. and Readman, J.W. 2002. "Sorption and Desorption of Benzo(a)pyrene
in Aquatic Systems". J. Environ. Monit. 4. 761-766.

Bucheli, T.D. and Gustafsson, O. 2000. "Quantification of the Soot-Water Distribution Coefficient
of PAHs Provides Necganistic Basis for Enhanced Sorption Observation".
Environmental Science Technology. 34. 5144-5151.

- Chiou, C. T. Schmedding, D. W. and Manes, M. 2005. "Improved Prediction of Octanol-Water Partition Coefficients from Liquid- Solute Water Solubilities and Molar Volumes". Environmental Science Technology. 39. 8840-8846.
- Donohue, M.D. and Aranovich, G.L. 1998. "Classification of Gibbs adsorption isotherms". Advances in Colloid and Interface Science. 76-77. 137-152
- Grathwohl, P. and Rahman, M. M. 2002. "Partitioning and Pore-Filling: Solubility-Normalized Sorption Isotherms of Nonionic Organic Contaminants in Soils and Sediments". Israel Journal of Chemistry. 42. 67-75.
- Jonker, M.T.O. 2007 "Absorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Cellulose". Chemosphere. 70. 778-782.
- Jonker, M.T.O. and Koelmans, A. A. 2002. "Sorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Biphenyls to Soot and Soot-like Materials in the Aqueous Environment: Mechanistic Considerations". Environmental Science Technology. 36. 3725-3734.
- Karapanagioti, H.K. 2007. "Removal of Phenanthrene from Saltwater Solutions using Activated Carbon". Desalination. 210. 274-280.
- Karašek, P. Planeta, J. and Roth, M . 2006. "Solubility of Solid Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Pressurized Hot Water at Temperatures from 313 K to the Melting Point". J. Chem. Eng. Data. 51. 616-622.
- Kleineidam, S. Schuth, C. and Grathwohl, P. 2002. "Solubility-Normalized Combined Adsorption-Partitioning Sorption Isotherms for Organic Pollutants". Environmental Science Technology. 36. 4689-4697.

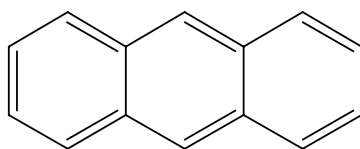
- Li, Z. Pan, Z. and Dai, S. 2004. "Nitrogen Adsorption Characterization of Aligned Multiwalled Carbon Nanotubes and their Acid Modification". Journal of Colloid and Interface Science. 277. 35-42.
- Long, C. Li, A. Wu, H. Liu, F. and Zhang, Q. 2008. "Polanyi-based Models for the Adsorption of Naphthalene from Aqueous Solutions onto Nonpolar Polymeric Adsorbents". Journal of Colloid and Interface Science. 319. 12-18.
- Long, C. Lua, J. D. Li, A. Hub, D. Liu, F. and Zhang, Q.2008. "Adsorption of Naphthalene onto the Carbon Adsorbent from Waste Ion Exchange Resin: Equilibrium and Kinetic Characteristics". Journal of Hazardous Materials. 150. 656–661.
- Mackay, D. Shiu, W.Y. Ma, K.C. and Lee, S.C. 2000 "Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals". Vol.I.
- Rockne, K. J. Taghon, G.L. and Kosson, D. S. 2000. "Pore Structure of Soot Deposits from Several Combustion Sources". Chemosphere . 41 . 1125-1135.
- Sun, H. and Zhou, Z. 2008. "Impact of Charcoal Characteristics on Sorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons". Chemosphere. 71. 2113 - 2120.
- <http://pradthana.wordpress.com/adsorption-process/> (accessed May 5, 2009)

ภาคผนวก ก

โครงสร้างและคุณสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

โครงสร้างและคุณสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ศึกษา 3 ชนิด

1. แอนทราซีน (Anthracene) (Mackay et al., 2000)



Molecular Formular: $C_{14}H_{10}$

Molecular Weight (g/mol): 178.229

Melting Point ($^{\circ}C$): 215.76

Boiling Point ($^{\circ}C$): 339.90

Density (g/cm^3 at $25^{\circ}C$): 1.28

Molar Volume (cm^3/mol): 139

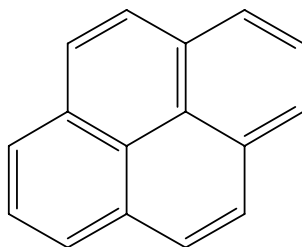
Enthalpy of Fusion, ΔH_{fus} (kJ/mol) : 29.37

Entropy of Fusion, ΔS_{fus} (J/mol K) : 58.99

Water Solubility (g/m^3 or mg/L at $25^{\circ}C$): 0.112

Octanal/Water Partition Coefficient, $\log K_{ow}$: 4.45

2. ไพรีน (Pyrene) (Mackay et al., 2000)



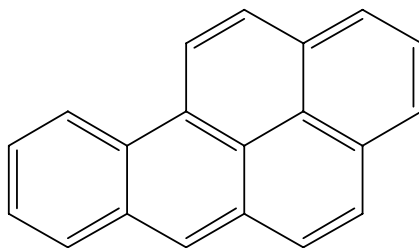
Molecular Formular: $C_{16}H_{10}$

Molecular Weight (g/mol): 202.250

Melting Point ($^{\circ}C$): 150.62

Boiling Point (°C): 404.00
 Density (g/cm³ at 25°C): 1.271
 Molar Volume (cm³/mol): 159
 Enthalpy of Fusion, ΔH_{fus} (kJ/mol): 17.36
 Entropy of Fusion, ΔS_{fus} (J/mol K): 35.98
 Water Solubility (g/m³ or mg/L at 25°C): 0.140
 Octanal/Water Partition Coefficient, $\log K_{\text{ow}}$: 5.32

3. เบนโซ(เอ)ไพรีน (Benzo(a)pyrene) (Mackay et al., 2000)



Molecular Formula: C₂₀H₁₂
 Molecular Weight (g/mol): 252.309
 Melting Point (°C): 181.10
 Boiling Point (°C): 495.00
 Density (g/cm³ at 25°C): 1.24
 Molar Volume (cm³/mol): 222.8
 Enthalpy of Fusion, ΔH_{fus} (kJ/mol): 25.61
 Entropy of Fusion, ΔS_{fus} (J/mol K): 38.20
 Water Solubility (g/m³ or mg/L at 25°C): 3.8×10^{-3}
 Octanal/Water Partition Coefficient, $\log K_{\text{ow}}$: 6.04

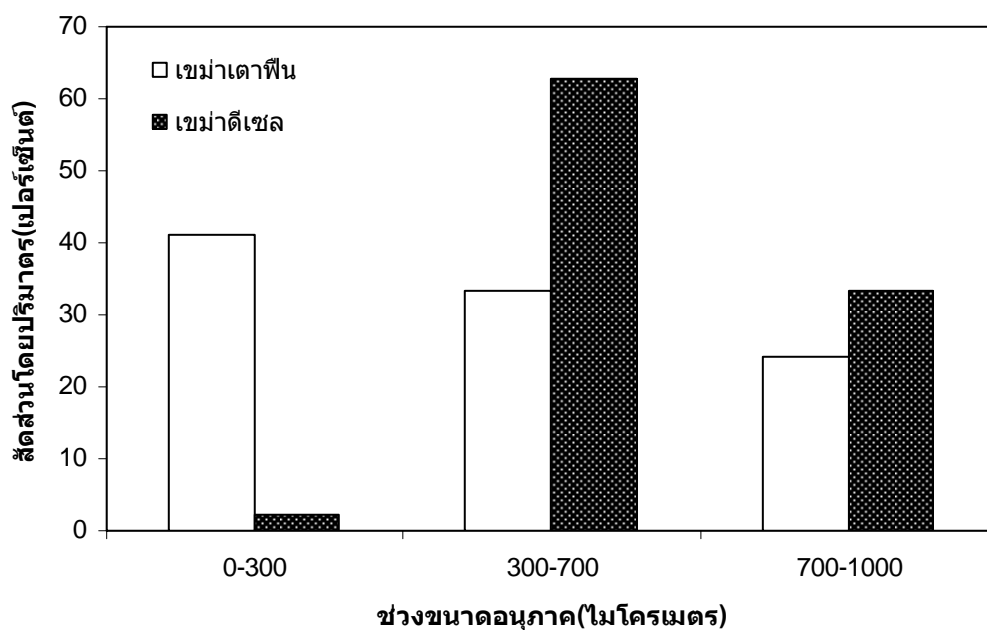
ภาคผนวก ข

คุณสมบัติทางกายภาพ

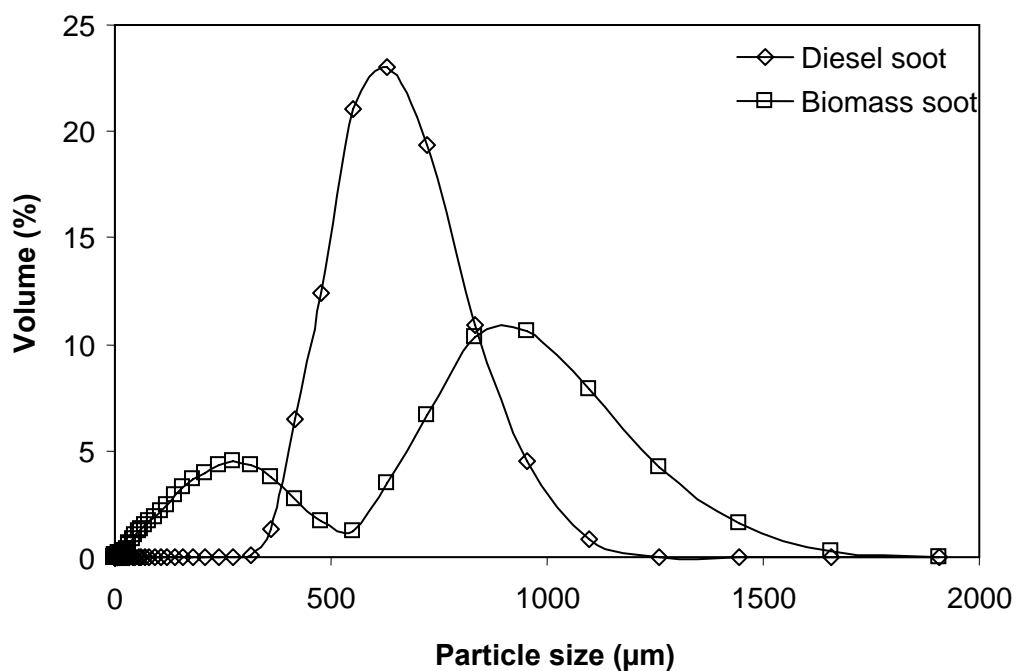
1. การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเขม่า

ตาราง ข.1 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่าในช่วงขนาดอนุภาคต่างๆ

ช่วงขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สัดส่วนโดยปริมาตร(เปอร์เซ็นต์)	
	เขม่าดีเซล	เขม่าเตาฟืน
0-300	2.15	41.15
300-700	62.75	33.42
700-1000	33.20	24.30



ภาพประกอบที่ ข.1 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงปริมาตรของเขม่า

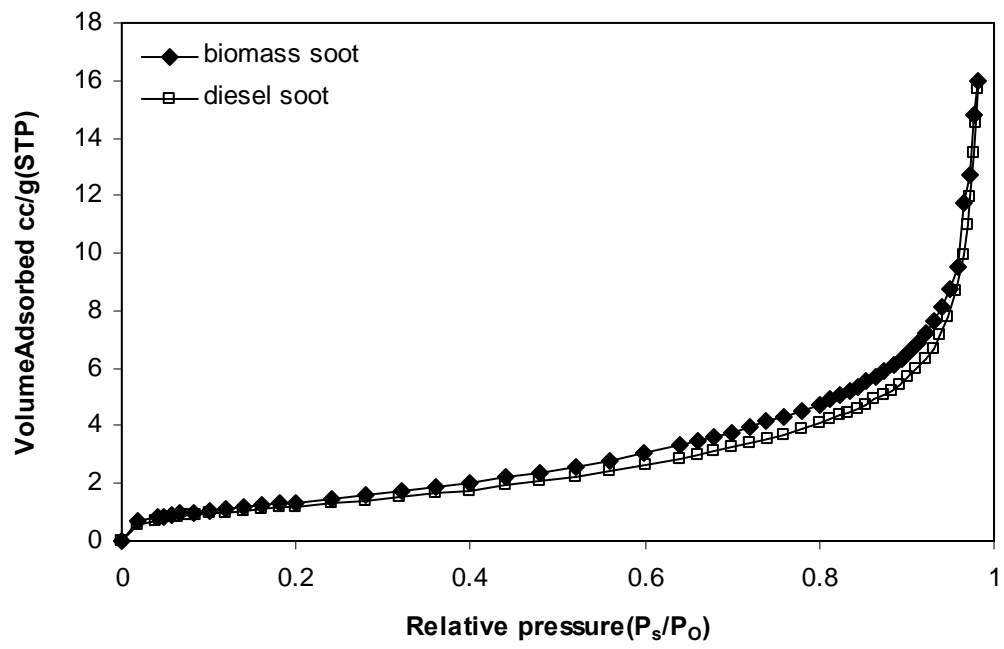


ภาพประกอบที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับสัดส่วนเชิงปริมาตรเปรียบเทียบระหว่างเขม่าดีเซลและเขม่าเตาฟืน

2. พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Brunauer – Emmet – Teller (BET)

ตาราง ข.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าแต่ละชนิด

	เขม่าดีเซล	เขม่าเตาฟืน
BET surface area (m ² /g)	4.850	6.090
Micropore volume(ml/g)	0.00000	0.00000
Mesopore volume(ml/g)	0.01464	0.01889
Macropore volume(ml/g)	0.00851	0.00660



ภาพประกอบที่ ๓.3 N₂ adsorption isotherms of diesel soot and biomass soot.

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก.1 ผลการดูดซับสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 µg/l ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าเตาฟืนจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (µg/l)	C_w (µg/l)	C_s (µg/g)	K_{sw} [(µg/g)/(µg/l)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{scf}	$[\text{LN}(C_w/S_{scf})]^2$
48hrs.	10	8.760	1.549	0.176	0.943	0.190	0.125	4.319	0.001	44.487
	15	13.481	1.897	0.140	1.130	0.278	0.193	2.713	0.002	38.921
	25	20.451	5.686	0.278	1.311	0.755	0.292	1.514	0.003	33.896
	50	37.692	15.385	0.408	1.576	1.187	0.538	0.383	0.005	27.151
	75	55.899	23.875	0.427	1.747	1.378	0.799	0.050	0.008	23.199
	100	63.194	46.007	0.728	1.801	1.663	0.903	0.010	0.009	22.032
96hrs.	10	7.510	3.106	0.413	0.876	0.492	0.107	4.983	0.001	46.565
	15	11.996	3.747	0.312	1.079	0.574	0.171	3.111	0.002	40.392
	25	18.733	7.747	0.413	1.273	0.889	0.268	1.737	0.003	34.925
	50	36.980	16.239	0.439	1.568	1.211	0.528	0.407	0.005	27.349
	75	52.906	27.467	0.519	1.724	1.439	0.756	0.078	0.007	23.732
	100	61.619	47.897	0.777	1.790	1.680	0.880	0.016	0.009	22.2701
144hrs.	10	6.440	4.433	0.688	0.809	0.647	0.092	5.692	0.001	48.686
	15	10.863	5.152	0.474	1.036	0.712	0.155	3.471	0.001	41.663
	25	16.778	9.996	0.595	1.225	1.000	0.240	2.040	0.002	36.240

ตาราง ก.1 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{scl}	$[\text{LN}(C_w/S_{scl})]^2$
	50	32.593	21.284	0.653	1.513	1.328	0.466	0.584	0.004	28.686
	75	48.545	32.482	0.669	1.686	1.512	0.694	0.133	0.007	24.577
	100	60.230	49.495	0.821	1.780	1.695	0.860	0.022	0.008	22.485
192hrs.	10	5.605	5.464	0.975	0.749	0.738	0.080	6.375	0.001	50.644
	15	9.908	6.332	0.639	0.996	0.802	0.142	3.822	0.001	42.860
	25	15.369	11.545	0.751	1.187	1.062	0.220	2.298	0.002	37.304
	50	30.312	23.794	0.785	1.482	1.376	0.433	0.700	0.004	29.469
	75	47.544	33.584	0.706	1.677	1.526	0.679	0.149	0.006	24.784
	100	59.778	49.992	0.836	1.777	1.699	0.854	0.024	0.008	22.557
240hrs.	10	5.593	5.479	0.979	0.748	0.739	0.080	6.385	0.001	50.674
	15	9.581	6.733	0.702	0.981	0.828	0.137	3.954	0.001	43.299
	25	15.138	11.788	0.778	1.180	1.071	0.216	2.344	0.002	37.489
	50	29.781	24.351	0.817	1.474	1.387	0.425	0.730	0.004	29.661
	75	47.295	33.845	0.715	1.675	1.529	0.676	0.153	0.006	24.837
	100	60.790	48.929	0.804	1.784	1.690	0.868	0.019	0.008	22.398

ตาราง ค.2 ผลการดูดซับสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g/l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บน เมมเบรนเซลจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	$C_w(\mu\text{g/l})$	$C_s(\mu\text{g/g})$	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
48hrs.	10	8.741	1.573	0.180	0.941	0.196	0.124	4.328	0.001	44.515
	15	13.639	1.701	0.124	1.134	0.230	0.194	2.675	0.002	38.777
	25	22.207	3.491	0.157	1.346	0.543	0.317	1.318	0.003	32.943
	50	42.674	9.157	0.214	1.630	0.961	0.609	0.244	0.006	25.872
	75	61.573	16.783	0.272	1.789	1.224	0.879	0.016	0.008	22.277
	100	80.909	23.863	0.294	1.908	1.377	1.155	0.021	0.012	19.773
96hrs.	10	8.036	2.450	0.304	0.905	0.389	0.114	4.684	0.001	45.644
	15	12.680	2.894	0.228	1.103	0.461	0.181	2.918	0.002	39.690
	25	21.466	4.379	0.204	1.331	0.641	0.306	1.397	0.003	33.334
	50	38.931	13.649	0.350	1.590	1.135	0.556	0.344	0.005	26.814
	75	58.642	20.300	0.346	1.768	1.307	0.837	0.031	0.008	22.739
	100	72.698	33.716	0.463	1.861	1.527	1.038	0.001	0.010	20.736
144hrs.	10	7.887	2.636	0.334	0.896	0.421	0.112	4.766	0.001	45.898
	15	11.733	4.068	0.346	1.069	0.609	0.167	3.189	0.002	40.673
	25	18.349	7.964	0.434	1.263	0.901	0.262	1.792	0.003	35.170

ตาราง ก.2 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{scl}	$[\text{LN}(C_w/S_{scl})]^2$
	50	35.299	17.825	0.505	1.547	1.251	0.504	0.468	0.005	27.838
	75	53.315	26.427	0.495	1.726	1.422	0.761	0.074	0.007	23.657
	100	68.598	38.431	0.560	1.836	1.584	0.980	0.004	0.009	21.268
192hrs.	10	6.677	4.130	0.618	0.824	0.616	0.095	5.521	0.001	48.182
	15	11.206	4.719	0.421	1.049	0.673	0.160	3.356	0.002	41.262
	25	15.909	10.649	0.669	1.201	1.027	0.227	2.195	0.002	36.883
	50	34.347	18.872	0.549	1.535	1.275	0.490	0.506	0.005	28.127
	75	50.025	30.046	0.600	1.699	1.477	0.714	0.112	0.007	24.280
	100	64.379	43.072	0.669	1.808	1.634	0.919	0.007	0.009	21.858
240hrs.	10	6.095	4.845	0.794	0.785	0.685	0.087	5.957	0.001	49.455
	15	10.897	5.099	0.467	1.037	0.707	0.155	3.459	0.002	41.622
	25	15.381	11.203	0.728	1.187	1.049	0.219	2.296	0.002	37.294
	50	33.105	20.177	0.609	1.519	1.304	0.472	0.560	0.004	28.519
	75	49.594	30.498	0.615	1.695	1.484	0.708	0.118	0.007	24.366
	100	63.161	44.351	0.702	1.800	1.646	0.902	0.010	0.009	22.037

ตาราง ค.3 ผลการดูดซับสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g/l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่า
เตาฟืนจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	$C_w(\mu\text{g/l})$	$C_s(\mu\text{g/g})$	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
48hrs.	10	9.101	1.123	0.123	0.959	0.050	0.065	7.470	0.008	22.997
	25	21.754	4.057	0.186	1.337	0.608	0.155	3.466	0.019	15.398
	50	44.902	6.372	0.141	1.652	0.804	0.320	1.293	0.040	10.236
	75	65.445	11.943	0.182	1.815	1.077	0.467	0.578	0.059	7.967
	100	89.634	12.957	0.144	1.952	1.112	0.640	0.198	0.081	6.291
96hrs.	10	8.736	1.577	0.180	0.941	0.198	0.062	7.695	0.007	23.391
	25	18.194	8.489	0.466	1.259	0.928	0.130	4.163	0.016	16.837
	50	43.010	8.727	0.202	1.633	0.940	0.307	1.392	0.039	10.513
	75	63.118	14.839	0.235	1.800	1.171	0.450	0.634	0.057	8.1736
	100	84.509	19.337	0.228	1.926	1.286	0.603	0.254	0.076	6.589
144hrs.	10	8.511	1.856	0.218	0.930	0.268	0.060	7.841	0.007	23.643
	25	18.873	7.647	0.405	1.275	0.883	0.134	4.015	0.017	16.533
	50	38.741	14.021	0.361	1.588	1.146	0.276	1.650	0.035	11.202
	75	59.762	19.001	0.318	1.776	1.278	0.426	0.724	0.054	8.488
	100	79.537	25.502	0.320	1.900	1.406	0.568	0.319	0.072	6.904

ตาราง ก.3 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (µg/l)	C_w (µg/l)	C_s (µg/g)	K_{sw} [(µg/g)/(µg/l)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
192hrs.	10	8.242	2.188	0.265	0.916	0.340	0.058	8.022	0.007	23.957
	25	18.747	7.803	0.416	1.272	0.892	0.133	4.042	0.017	16.588
	50	37.611	15.416	0.409	1.575	1.188	0.268	1.727	0.034	11.401
	75	57.569	21.709	0.377	1.760	1.336	0.411	0.789	0.052	8.708
	100	77.142	28.461	0.368	1.887	1.454	0.551	0.355	0.070	7.066
240hrs.	10	7.615	2.959	0.388	0.881	0.471	0.054	8.476	0.006	24.737
	25	17.861	8.893	0.497	1.251	0.949	0.127	4.239	0.016	16.985
	50	37.013	16.152	0.436	1.568	1.208	0.264	1.769	0.033	11.510
	75	57.517	21.773	0.378	1.759	1.337	0.410	0.791	0.052	8.713
	100	76.359	29.423	0.385	1.882	1.468	0.545	0.367	0.069	7.120
288hrs.	10	7.103	3.587	0.505	0.851	0.554	0.050	8.886	0.006	25.435
	25	17.724	9.060	0.511	1.248	0.957	0.126	4.271	0.016	17.048
	50	37.087	16.061	0.433	1.569	1.205	0.264	1.765	0.033	11.496
	75	57.023	22.378	0.392	1.756	1.349	0.407	0.806	0.051	8.764
	100	75.237	30.798	0.409	1.876	1.4885	0.537	0.385	0.068	7.199

ตาราง ก.4 ผลการดูดซับสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 $\mu\text{g/l}$ ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่า
ดีเซลจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
48hrs.	10	9.030	1.211	0.134	0.955	0.083	0.064	7.513	0.008	23.077
	25	20.951	5.060	0.241	1.321	0.704	0.149	3.607	0.019	15.699
	50	42.139	9.825	0.233	1.624	0.992	0.301	1.441	0.038	10.646
	75	62.489	15.638	0.250	1.795	1.194	0.446	0.650	0.056	8.230
	100	83.072	21.159	0.254	1.919	1.325	0.593	0.272	0.075	6.6781
96hrs.	10	8.924	1.344	0.150	0.950	0.128	0.063	7.578	0.008	23.185
	25	21.053	4.933	0.234	1.323	0.693	0.150	3.589	0.019	15.656
	50	42.439	9.452	0.222	1.627	0.975	0.303	1.424	0.038	10.600
	75	60.410	18.226	0.301	1.781	1.260	0.431	0.706	0.054	8.426
	100	81.449	23.179	0.284	1.910	1.365	0.581	0.293	0.073	6.7805
144hrs.	10	8.101	2.364	0.291	0.908	0.373	0.057	8.120	0.007	24.126
	25	19.849	6.431	0.324	1.297	0.808	0.141	3.816	0.018	16.126
	50	40.183	12.249	0.304	1.604	1.088	0.287	1.557	0.036	10.959
	75	60.360	18.288	0.303	1.780	1.262	0.431	0.707	0.054	8.430
	100	78.759	26.516	0.336	1.896	1.423	0.562	0.331	0.071	6.956

ตาราง ก.4 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
192hrs.	10	7.838	2.6894	0.343	0.894	0.429	0.056	8.309	0.007	24.455
	25	19.550	6.795	0.347	1.291	0.832	0.139	3.875	0.017	16.248
	50	39.110	13.574	0.347	1.592	1.132	0.274	1.626	0.035	11.139
	75	59.480	19.375	0.325	1.774	1.287	0.424	0.732	0.054	8.516
	100	77.953	27.511	0.352	1.891	1.439	0.556	0.342	0.070	7.010
240hrs.	10	7.686	2.876	0.374	0.885	0.458	0.054	8.422	0.006	24.645
	25	19.331	7.065	0.365	1.286	0.849	0.138	3.920	0.017	16.339
	50	39.276	13.370	0.340	1.594	1.126	0.280	1.615	0.035	11.110
	75	59.920	18.834	0.314	1.777	1.274	0.428	0.720	0.054	8.473
	100	77.932	27.536	0.353	1.891	1.439	0.556	0.343	0.070	7.012
288hrs.	10	7.121	3.568	0.501	0.852	0.552	0.050	8.871	0.006	25.409
	25	18.890	7.605	0.402	1.276	0.881	0.134	4.011	0.015	16.526
	50	37.490	15.559	0.415	1.573	1.192	0.267	1.735	0.034	11.423
	75	58.178	20.968	0.360	1.764	1.321	0.415	0.771	0.052	8.646
	100	77.098	28.558	0.370	1.887	1.455	0.550	0.355	0.070	7.070

ตาราง ก.5 ผลการดูดซับสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 µg/l ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าเตาฟืนจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (µg/l)	C_w (µg/l)	C_s (µg/g)	K_{sw} [(µg/g)/(µg/l)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
72hrs.	10	8.991	1.261	0.140	0.954	0.101	2.366	0.741	0.074	6.730
	25	23.235	2.206	0.095	1.366	0.344	6.114	3.278	0.193	2.706
	50	45.776	5.279	0.115	1.661	0.723	12.046	6.193	0.380	0.934
	75	66.364	10.795	0.162	1.822	1.033	17.464	8.180	0.551	0.354
	100	90.813	11.483	0.126	1.958	1.060	23.898	10.073	0.754	0.079
144hrs.	10	7.318	3.344	0.456	0.864	0.524	1.926	0.429	0.060	7.841
	25	21.399	4.493	0.210	1.330	0.653	5.631	2.987	0.177	2.983
	50	38.310	14.576	0.380	1.583	1.164	10.081	5.339	0.318	1.310
	75	62.551	15.542	0.248	1.796	1.192	16.461	7.845	0.519	0.428
	100	79.950	25.008	0.312	1.903	1.398	21.039	9.280	0.664	0.167
216hrs.	10	6.825	3.955	0.579	0.834	0.597	1.796	0.342	0.056	8.237
	25	17.650	9.141	0.517	1.247	0.961	4.645	2.358	0.146	3.686
	50	38.315	14.570	0.380	1.583	1.163	10.083	5.339	0.318	1.310
	75	58.744	20.263	0.344	1.769	1.307	15.459	7.497	0.487	0.514
	100	75.761	30.203	0.398	1.879	1.480	19.937	8.956	0.629	0.214

ตาราง ก.5 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
288hrs.	10	6.784	4.006	0.590	0.831	0.603	1.785	0.335	0.056	8.272
	25	17.491	9.337	0.533	1.243	0.970	4.603	2.330	0.145	3.720
	50	37.867	15.122	0.399	1.578	1.180	9.965	5.285	0.314	1.337
	75	58.311	20.797	0.356	1.766	1.318	15.345	7.457	0.484	0.525
	100	74.897	31.269	0.417	1.874	1.495	19.710	8.887	0.622	0.225

ตาราง ก.6 ผลการดูดซับสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 10 - 100 µg/l ที่ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 250 มิลลิลิตร บนเขม่าดีเซลจำนวน 0.200 กรัม

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (µg/l)	C_w (µg/l)	C_s (µg/g)	K_{sw} [(µg/g)/(µg/l)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sel}	$[\text{LN}(C_w/S_{sel})]^2$
72hrs.	10	9.054	1.183	0.130	0.957	0.073	2.383	0.753	0.075	6.695
	25	23.262	2.173	0.093	1.367	0.337	6.122	3.282	0.193	2.702
	50	43.474	8.158	0.187	1.638	0.912	11.440	5.939	0.361	1.038
	75	63.642	14.198	0.223	1.804	1.152	16.748	7.942	0.528	0.406
	100	84.388	19.515	0.231	1.926	1.290	22.207	9.619	0.701	0.126
144hrs.	10	7.716	2.848	0.369	0.887	0.455	2.031	0.501	0.064	7.547
	25	21.930	3.831	0.174	1.341	0.583	5.771	3.072	0.182	2.899
	50	43.402	8.248	0.190	1.638	0.916	11.422	5.931	0.360	1.040
	75	60.819	17.713	0.291	1.784	1.248	16.005	7.688	0.505	0.466
	100	81.246	23.426	0.288	1.910	1.370	21.381	9.378	0.674	0.154
216hrs.	10	7.263	3.411	0.469	0.861	0.533	1.911	0.419	0.060	7.884
	25	19.739	6.547	0.331	1.295	0.816	5.195	2.714	0.163	3.269
	50	39.925	12.559	0.314	1.601	1.099	10.507	5.531	0.331	1.2180
	75	59.921	18.825	0.314	1.778	1.275	15.769	7.606	0.497	0.486
	100	79.959	25.023	0.312	1.903	1.398	21.042	9.281	0.664	0.167

ตาราง ก.6 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ($\mu\text{g/l}$)	C_w ($\mu\text{g/l}$)	C_s ($\mu\text{g/g}$)	K_{sw} [($\mu\text{g/g}$)/($\mu\text{g/l}$)]	$\log C_w$	$\log C_s$	C_w/S_w	$[\text{LN}(C_w/S_w)]^2$	C_w/S_{sc1}	$[\text{LN}(C_w/S_{sc1})]^2$
288hrs.	10	7.169	3.526	0.491	0.855	0.547	1.887	0.402	0.059	7.957
	25	17.073	9.840	0.576	1.232	0.993	4.493	2.257	0.141	3.814
	50	39.459	13.134	0.332	1.596	1.118	10.384	5.476	0.327	1.244
	75	59.460	19.395	0.326	1.774	1.288	15.647	7.564	0.498	0.497
	100	79.736	25.299	0.317	1.902	1.403	20.983	9.264	0.662	0.169

ภาคผนวก ง

รายละเอียดการคำนวณ

1.1 การคำนวณค่า subcooled liquid solubilities, S_{sl}

สำหรับ Solid compounds ที่อุณหภูมิ 25 °C, ค่า S_w ที่ subcooled liquid คำนวณได้จาก solid solubilities โดยใช้ thermodynamic conversion factor, F_{sl} (dimensionless)

$$S_w^{(liquid)} = F_{sl} S_w^{(solid)}$$

$$\text{Log}F_{sl} = \frac{\Delta H_f (T_m - T)}{2.303RT_m}$$

เมื่อ ΔH_f = compound' s molar heat of fusion (J/mol)

T_m = melting point (K)

T = system temperature (K) = 300.15K

R = gas constant (8.3144 J/mol.K)

ตาราง ง.1 แสดงการคำนวณค่า subcooled liquid solubilities ของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

PAHs compound	Δh_2^{fus} (J.mol ⁻¹) ^a	T _m (K) ^a	Aqueous solubility (25°C, µg/l) ^b	logF _{sl} $=\Delta h_2^{\text{fus}}(T_m-T)/(2.303RT_mT)^c$	F _{sl}	S _w ^(liquid) = F _{sl} S _w ^(solid) (µg/l) ^d
naphthalene	19100	353.39	30000.00	0.5195	3.308	99226.379
biphenyl	18576	342.09	-	0.4152	2.601	-
acenaphthene	21460	366.56	3470.00	0.6969	4.976	17266.956
fluorene	19580	387.94	1980.00	0.7886	6.146	12168.119
anthracene	29370*	488.93	70.00	1.9941	98.652	6905.609
phenanthrene	18000	372.38	1290.00	0.6243	4.211	5431.663
pyrene	17360*	423.81	140.00	0.8956	7.864	1100.950
fluoranthene	18728	383.36	260.00	0.7243	5.301	1378.153
chrysene	26150	531.40	2.00	1.9972	99.366	198.731
1,2-benzanthracene	21380	430.05	-	1.1410	13.836	-
2,3-benzanthracene	31800	630.15	-	2.9153	822.756	-

ตาราง ง.1 แสดงการคำนวณค่า subcooled liquid solubilities ของสารประกอบโพลีไซคลิกเฮโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ต่อ)

PAHs compound	Δh_2^{fus} (J.mol ⁻¹) ^a	T _m (K) ^a	Aqueous solubility (25 ^o C, µg/l) ^b	logF _{sl} = $\Delta h_2^{\text{fus}}(T_m - T)/(2.303RT_m T)$ ^c	F _{sl}	S _w ^(liquid) = F _{sl} S _w ^(solid) (µg/l) ^d
triphenylene	24740	471.01	-	1.5799	38.008	-
benzo[a]pyrene	25610*	449.55	3.80	1.5008	31.679	120.381
dibenz[a,h]anthracene	31160	543.15	0.50	2.4457	279.055	139.528
perylene	32580	550.15	-	2.5967	395.129	-
benzo[g,h,i]perylene	17370	554.20	0.26	1.3964	24.913	6.477
coronene	19200	710.50	-	1.9389	86.881	-

* Compound 's molar heat of fusion (ΔH_f) from Handbook of Physical – Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemical (Mackay et al., 2000)

^a compound 's molar heat of fusion (ΔH_f), melting point temperature (T_m) from Kara'sek et al., 2006

^b ข้อมูลจาก จิราณีชัย ไชยปรุวงศ์, 2544

^c calculate from Choui et al., 2005 using molar heat of fusion value (ΔH_f)

^d water solubility data for subcooled liquid, calculate from solubility data for 25^o

1.2 การคำนวณค่าคงที่ต่างๆสำหรับไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิคซ์ ของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่า

สมการของฟรอนด์ลิคซ์ :

$$C_s = K_F C_w^{1/n} \quad (1)$$

หรือ

$$\log C_s = \log K_F + 1/n \log C_w \quad (2)$$

ใช้ข้อมูลในตารางภาคผนวก ค มาพล็อตกราฟจะได้ค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ต่างๆดังแสดงในตาราง ง.2

ตาราง ง.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิคซ์ของสารประกอบพีเอเอชบนเขม่า

ชนิดเขม่า	สารพีเอเอช	Freundlich isotherm		
		K_F	$1/n$	R^2
เขม่าดีเซล	แอนทราซีน	0.737	0.9594	0.974
	ไพรีน	0.622	0.8746	0.996
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.600	0.7622	0.963
เขม่าเตาฟืน	แอนทราซีน	0.967	0.9444	0.991
	ไพรีน	0.658	0.8856	0.996
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.644	0.8048	0.987

1.3 การคำนวณค่าคงที่ต่างๆสำหรับไอโซเทอมการดูดซับของโพลานี๋ย คูบินิน เมนส์ ของสารประกอบฟิเออเชบนเขม่า

จากสมการ

$$C_s = V_o \rho_o \exp \left[\left(\frac{-RT \left(-\ln \frac{C_w}{S_{scl}} \right)}{E} \right) \right]^2 \quad (3)$$

เมื่อ V_o คือ ปริมาณสูงสุดของสารประกอบฟิเออเชที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของเขม่า (cm^3/g)

E คือ พลังงานการคายความร้อนหรือพลังงานอิสระของสารประกอบฟิเออเช (J/mol) สามารถคำนวณค่า V_o และ E ของประกอบฟิเออเชบนเขม่าแต่ละชนิดได้โดยการพล็อตกราฟจากข้อมูลในตารางภาคผนวก ค ซึ่งผลการคำนวณแสดงในตาราง ง.3

ตาราง ง.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากไอโซเทอมการดูดซับแบบโพลานี๋ย คูบินิน เมนส์ ของสารประกอบฟิเออเชบนเขม่า

ชนิดเขม่า	สารฟิเออเช	Subcooled liquid solubility (S_{scl}^* , $\mu\text{g/l}$)	V_o (cm^3/g)	E (J/mol)	R^2
เขม่าดีเซล	แอนทราซีน	6905.61	187.78	-8615.24	0.95
	ไพรีน	1110.95	44.66	-7449.93	0.98
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	120.38	17.79	-5199.98	0.96
เขม่าเตาฟืน	แอนทราซีน	6905.61	200.29	-8839.33	0.97
	ไพรีน	1110.95	50.07	-7394.12	0.99
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	120.38	20.01	-5201.11	0.94

ภาคผนวก จ

สัมประสิทธิ์การพัวพันระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน

สัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันระหว่างเขม่าและน้ำใต้ดิน (Soot-water partitioning coefficient, K_{sw}) เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถช่วยทำนายแนวโน้มและอธิบายการดูดซับของสารประกอบพีเอเอชที่เคลื่อนที่ไปยังชั้นน้ำใต้ดินได้ แสดงดังสมการที่ 1

Soot-water partitioning coefficient, K_{sw} ($\mu\text{g}_{\text{sorbed}}\text{g}^{-1}_{\text{soot}}/\mu\text{g}\text{l}^{-1}$)

$$C_s = K_{sw} C_w \quad (1)$$

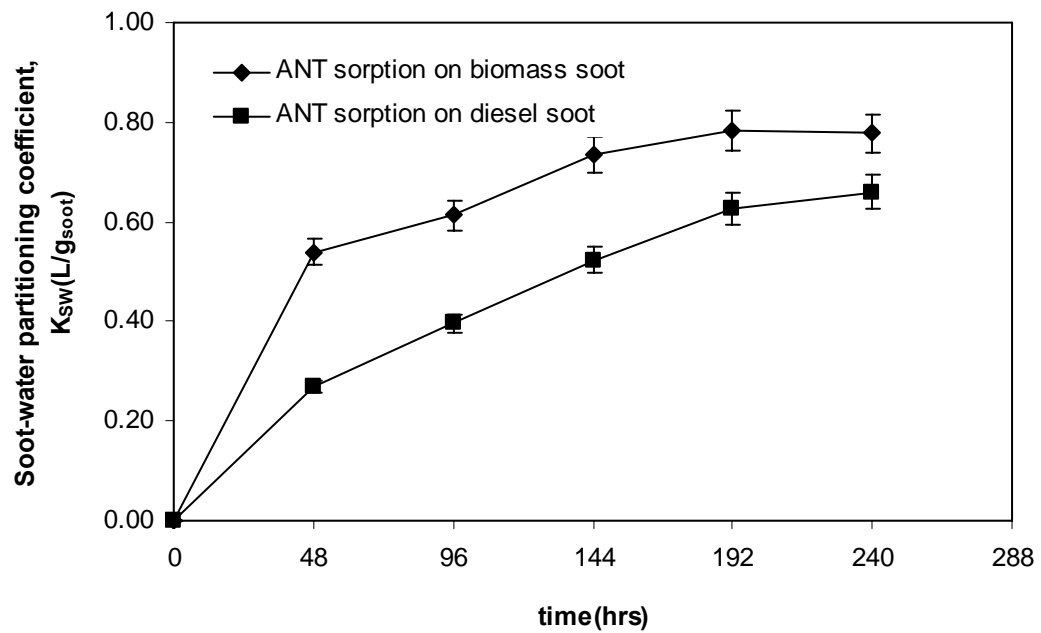
เมื่อ C_w = ความเข้มข้นสมมูลของสารละลาย ($\mu\text{g}\text{l}^{-1}$)

C_s = ปริมาณสารประกอบพีเอเอชที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเขม่า ($\mu\text{g}_{\text{sorbed}}\text{g}^{-1}_{\text{soot}}$)

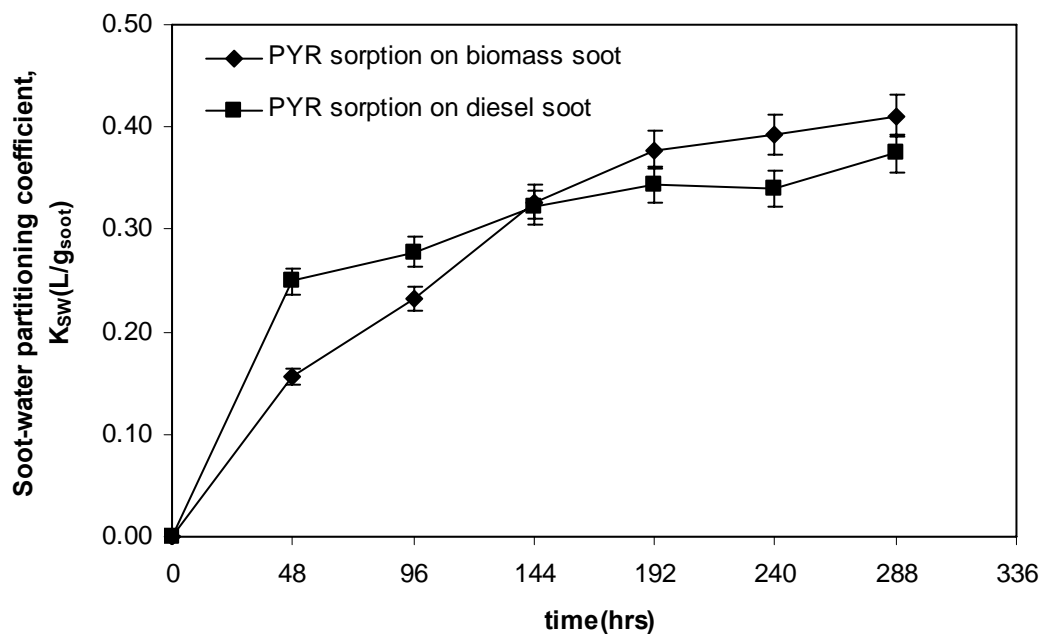
จากภาพประกอบที่ จ.1 ถึง จ.3 พบว่าค่า K_{sw} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำพาร์ทิชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของสารประกอบพีเอเอชที่อยู่ในน้ำใต้ดินจะเกิดการแทรกซึมเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของเขม่าได้ ทำให้ปริมาณสารประกอบพีเอเอชในเขม่าที่ได้แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และพบว่าเขม่าเตาฟืนจะสามารถดูดซับสารประกอบพีเอเอชเอาไว้ได้ดีกว่าเขม่าดีเซล แสดงดังภาพประกอบที่ จ.4 ถึง จ.6 และตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 Soot-water partitioning coefficient, K_{sw} ที่อธิบายการดูดซับสารประกอบพีเอเอชบนเขม่า

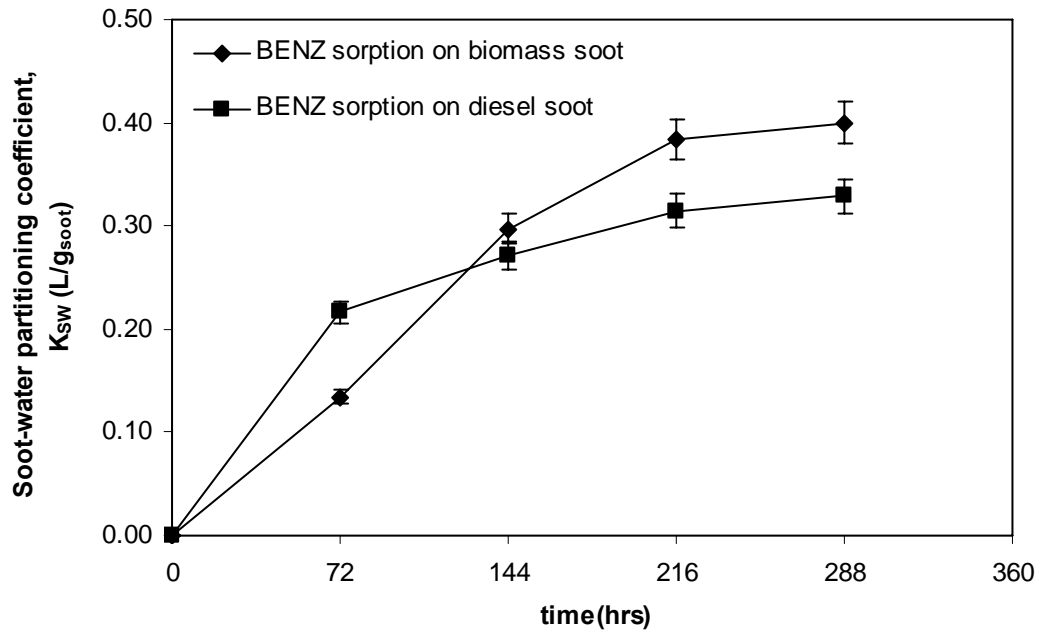
ชนิดเขม่า	สารพีเอเอช	K_{sw} ($\text{L}/\text{g}_{\text{soot}}$)
เขม่าดีเซล	แอนทราซีน	0.6601
	ไพรีน	0.3746
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.3292
เขม่าเตาฟืน	แอนทราซีน	0.7772
	ไพรีน	0.4107
	เบนโซ(เอ)ไพรีน	0.4000



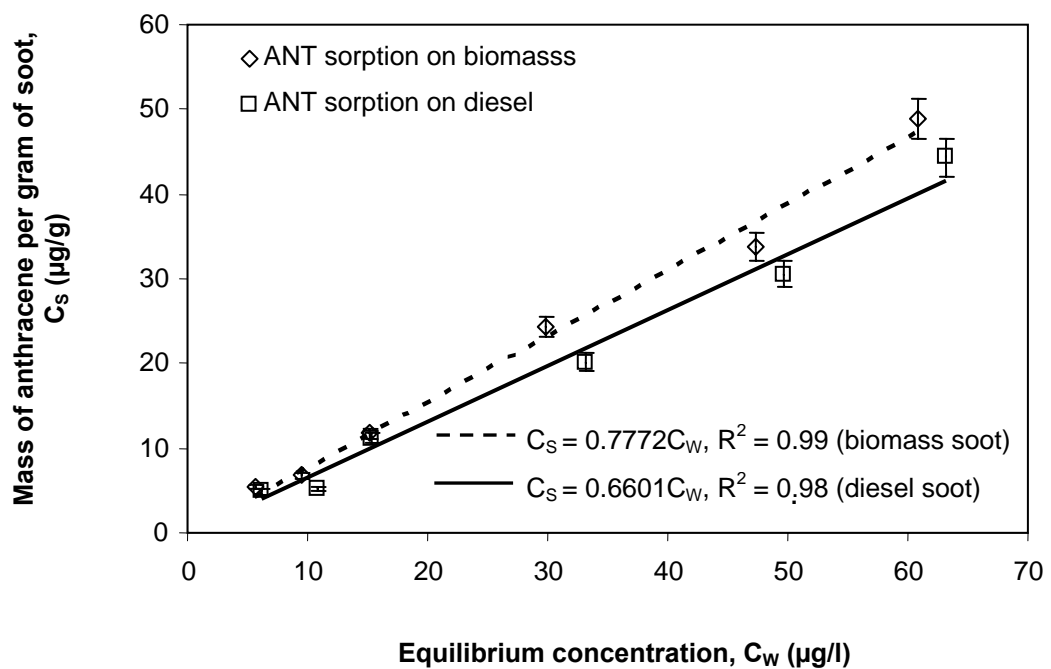
ภาพประกอบที่ จ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารแอนทราซีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำปาร์ทิชัน



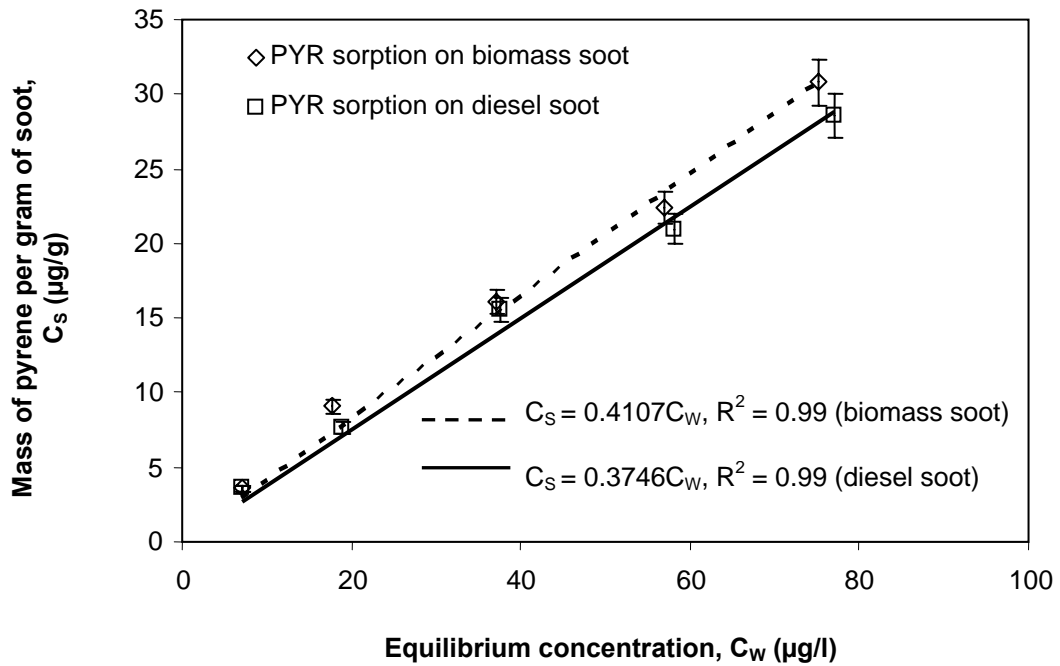
ภาพประกอบที่ จ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารไพรีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำปาร์ทิชัน



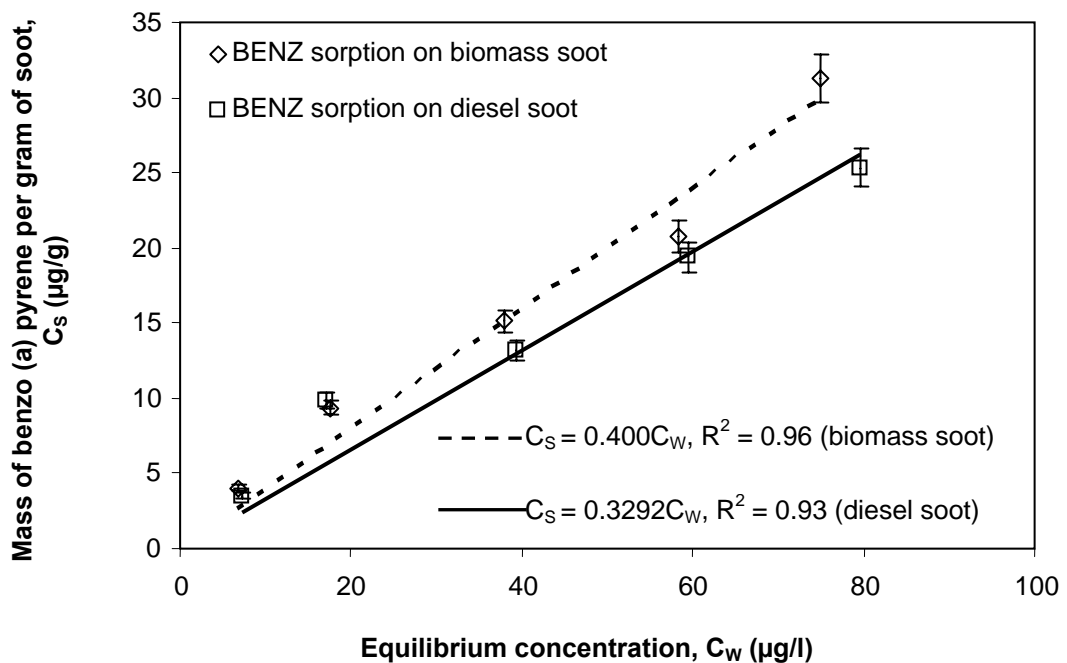
ภาพประกอบที่ ๓.๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Soot-water partitioning coefficient ของสารเบนโซ(เอ)ไพรีนบนเขม่าและเวลาที่ใช้ในการทำปาร์ทิชัน



ภาพประกอบที่ ๓.๔ แสดง sorption isotherm data ของสารแอนทราซีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล



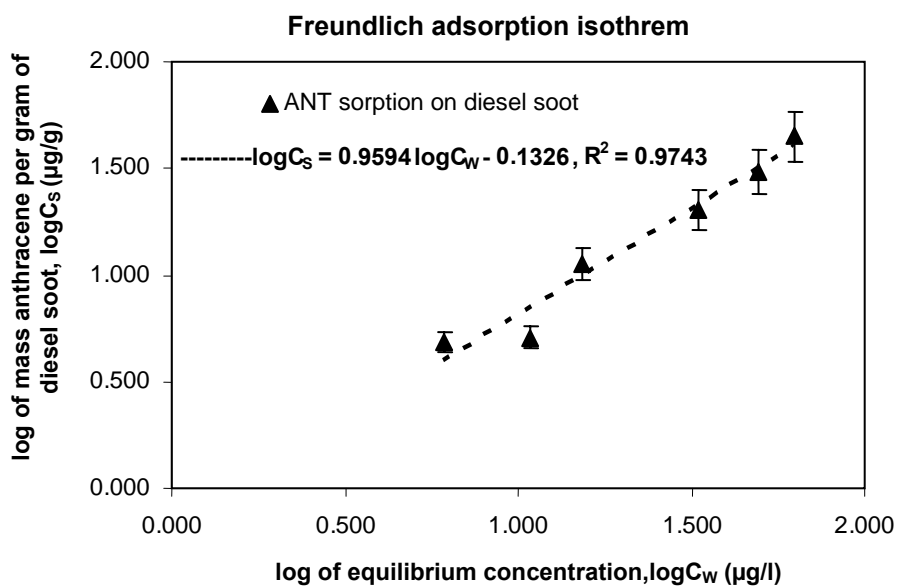
ภาพประกอบที่ ๕.5 แสดง sorption isotherm data ของสารไพรีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล



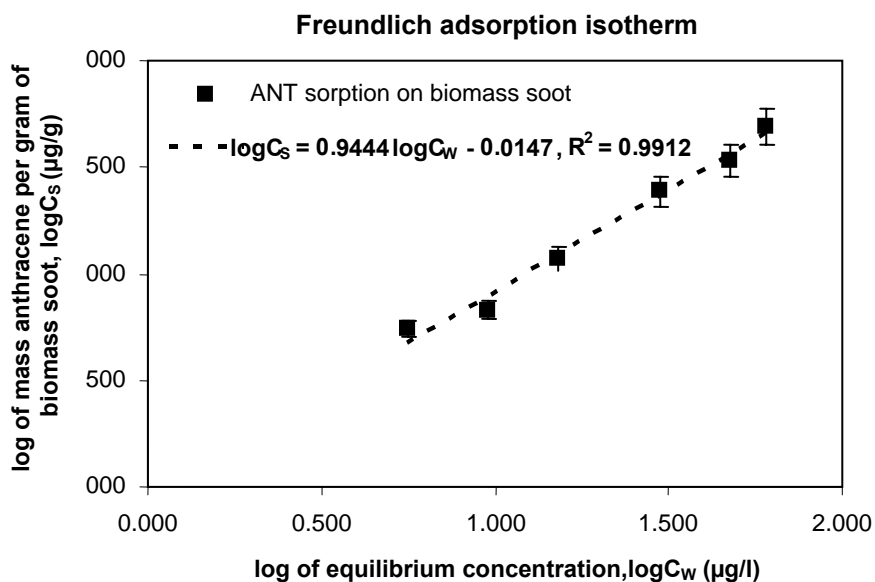
ภาพประกอบที่ ๕.6 แสดง sorption isotherm data ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าที่เวลาสมดุล

ภาคผนวก จ

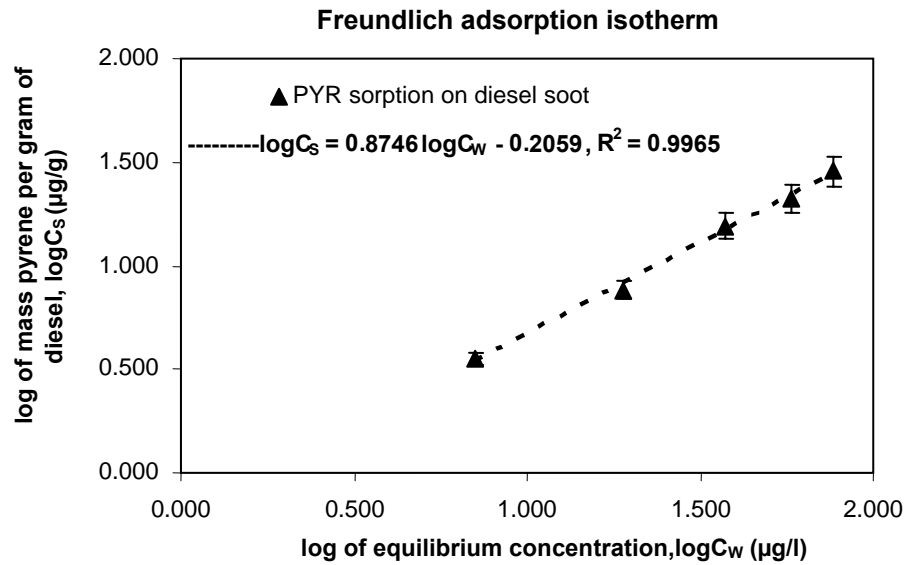
ไอโซเทอมของการดูดซับ



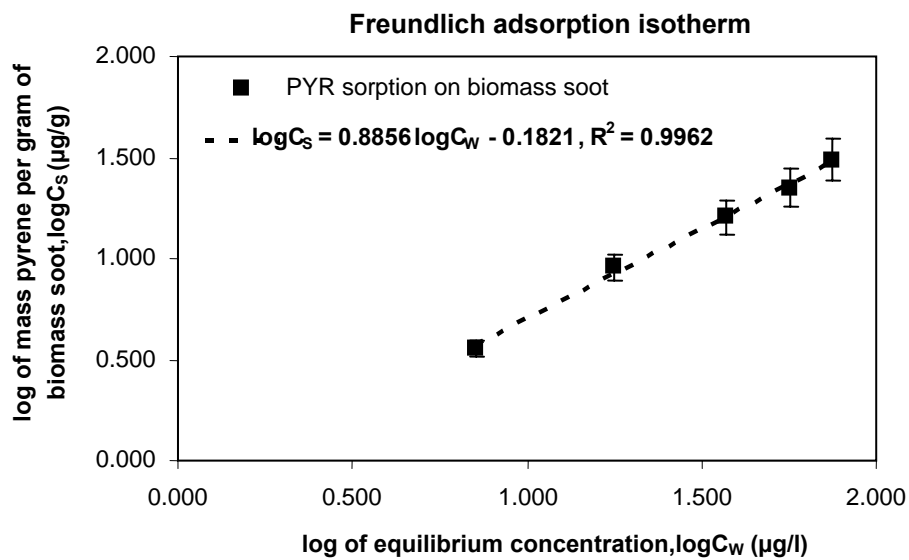
ภาพประกอบที่ ๑.1 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



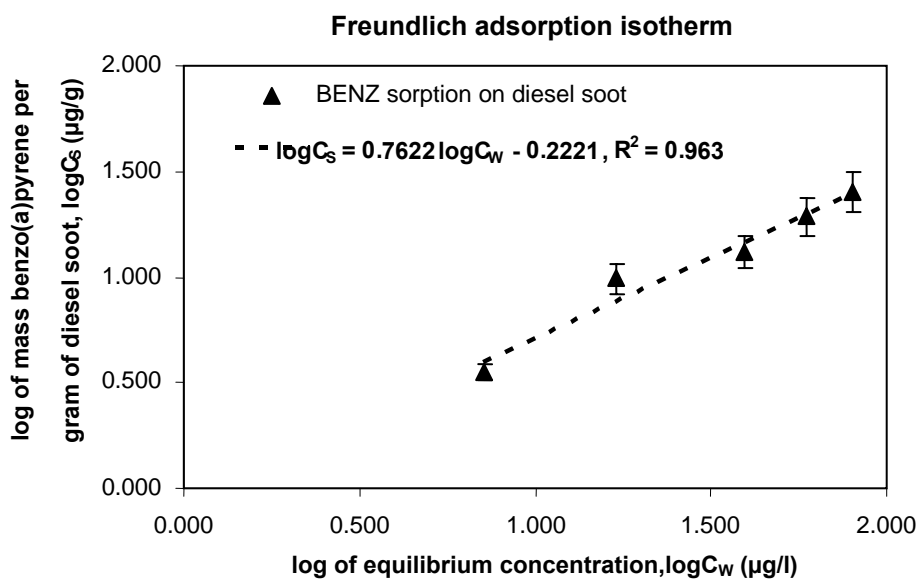
ภาพประกอบที่ ๑.2 Freundlich adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



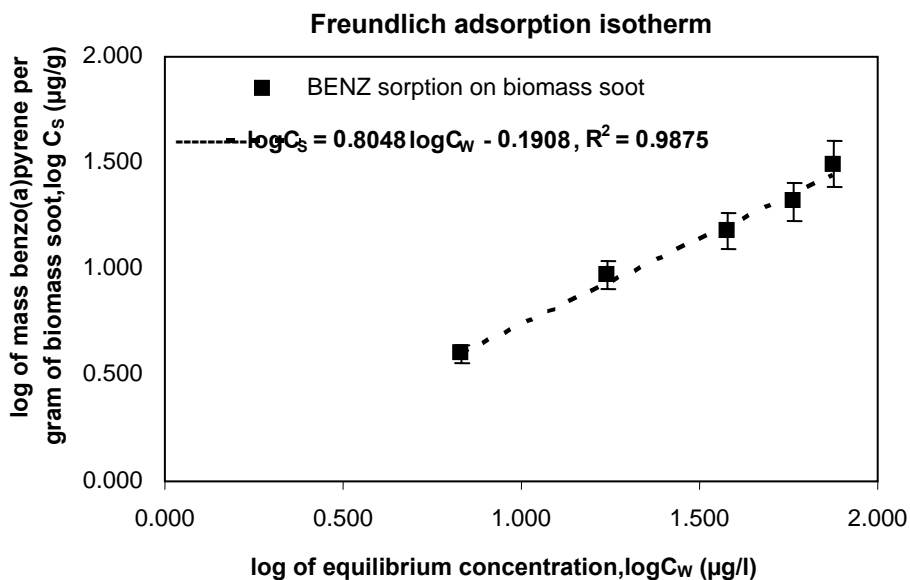
ภาพประกอบที่ ๓.3 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



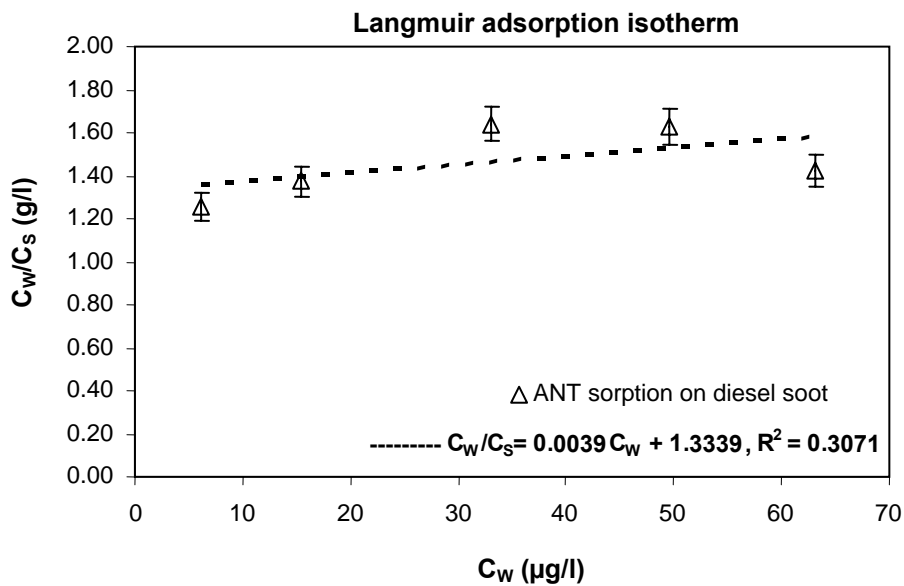
ภาพประกอบที่ ๓.4 Freundlich adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



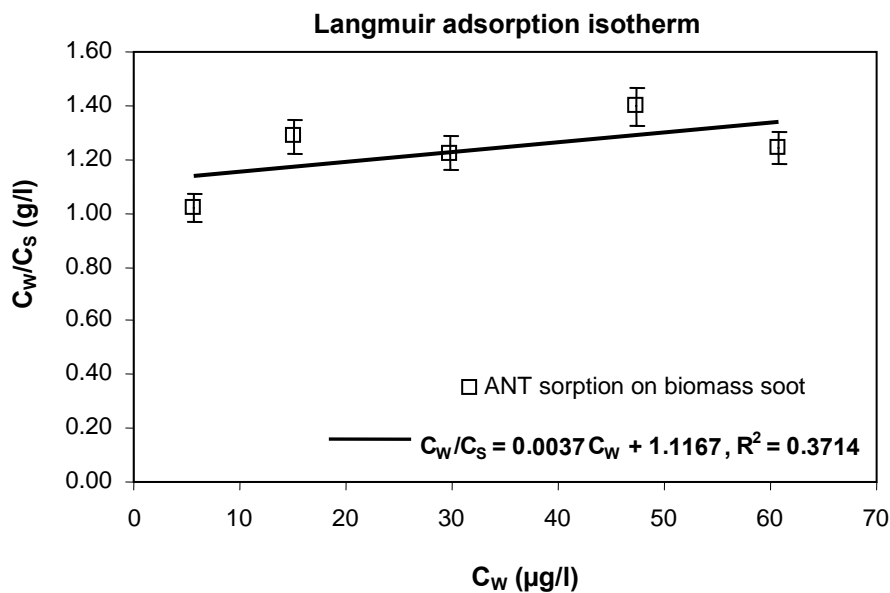
ภาพประกอบที่ ๑.5 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



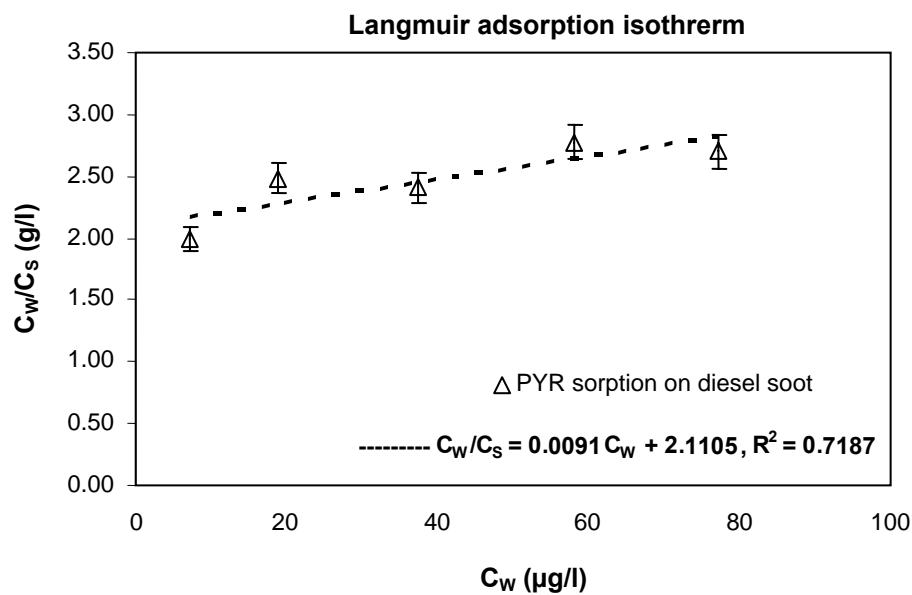
ภาพประกอบที่ ๑.6 Freundlich adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



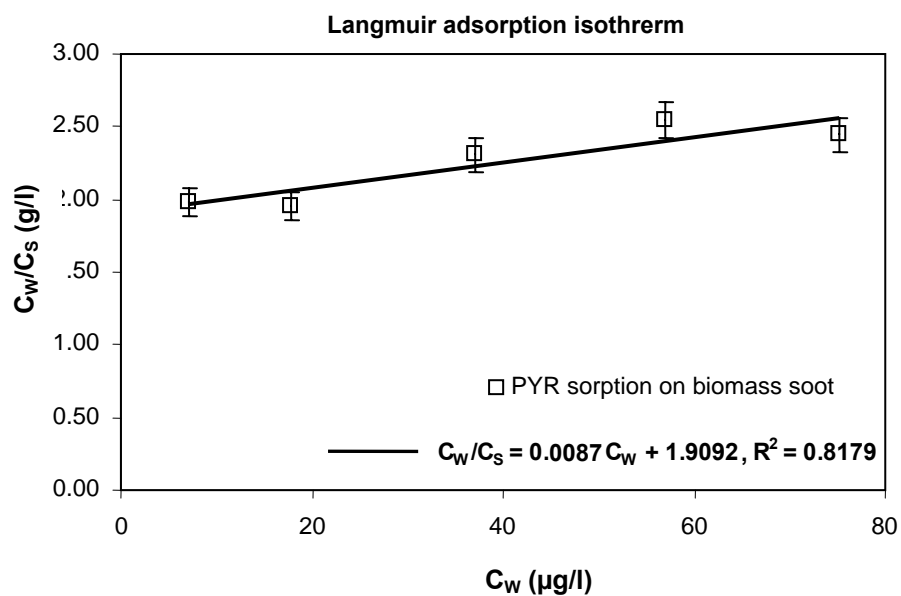
ภาพประกอบที่ ๗.7 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



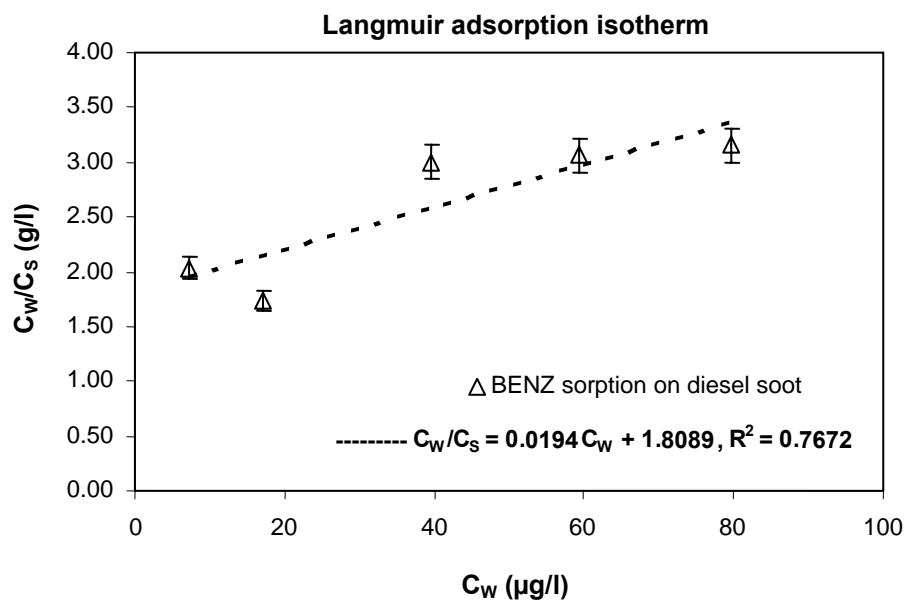
ภาพประกอบที่ ๗.8 Langmuir adsorption isotherm ของสารแอนทราซีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



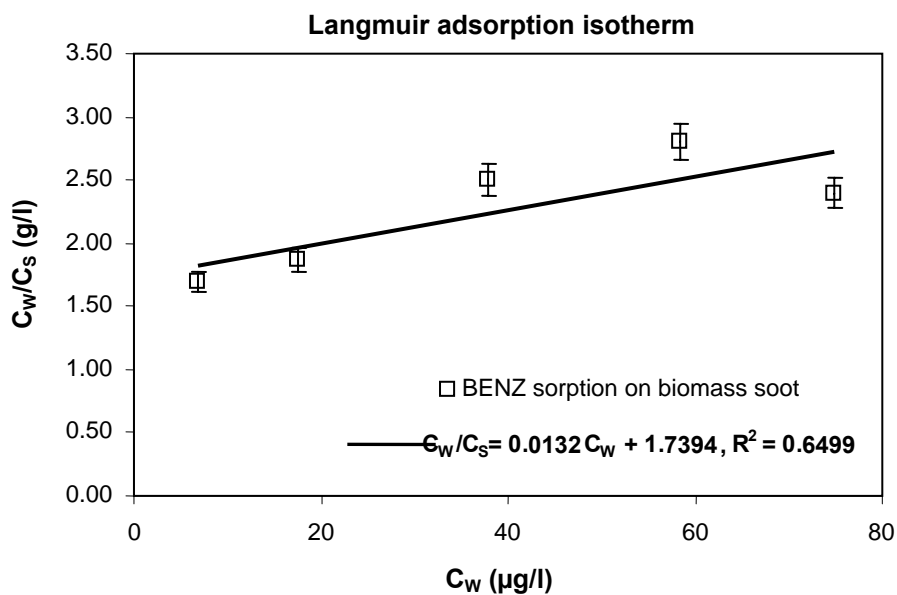
ภาพประกอบที่ ๙.9 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



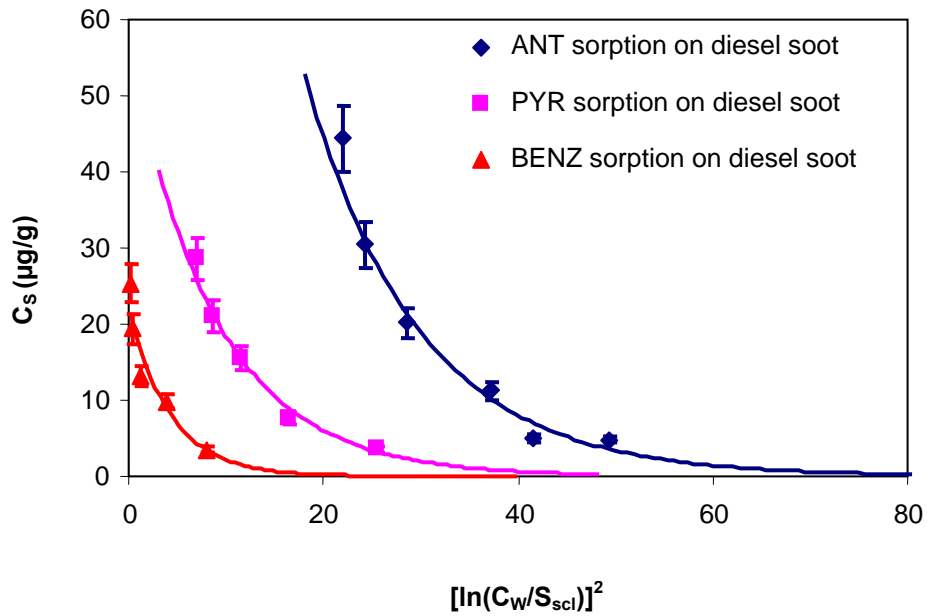
ภาพประกอบที่ ๙.10 Langmuir adsorption isotherm ของสารไพรีนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



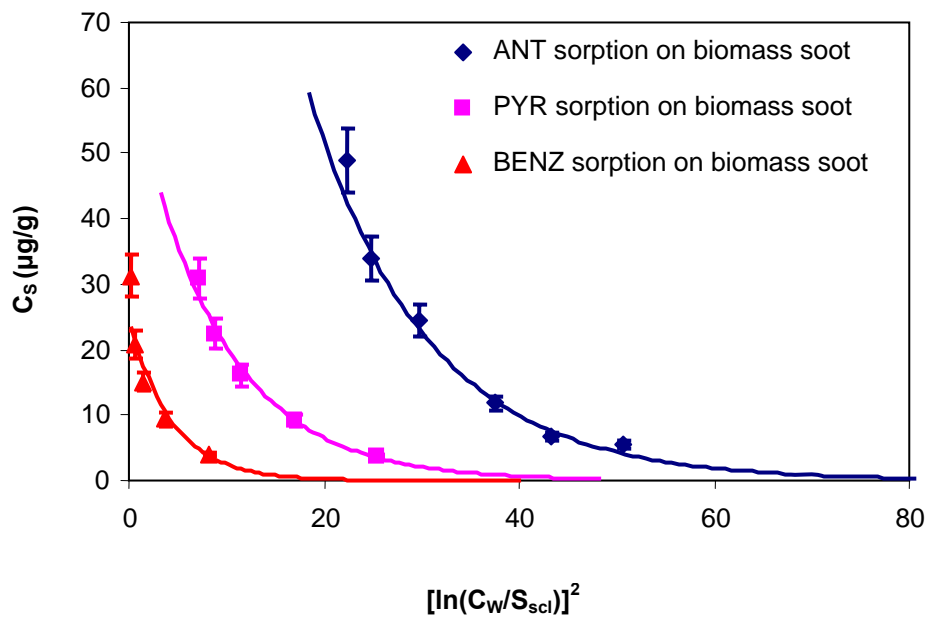
ภาพประกอบที่ ๑.11 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



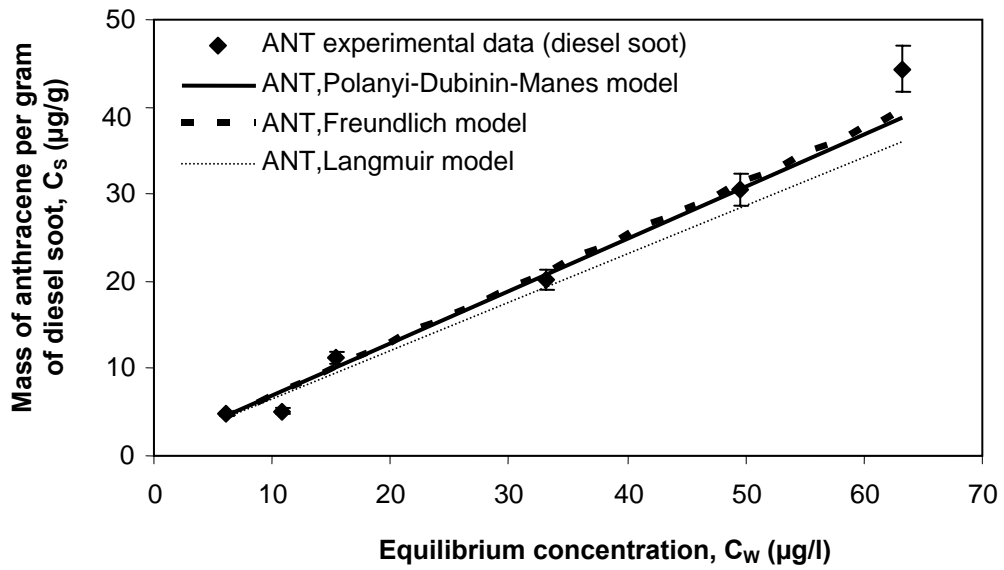
ภาพประกอบที่ ๑.12 Langmuir adsorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



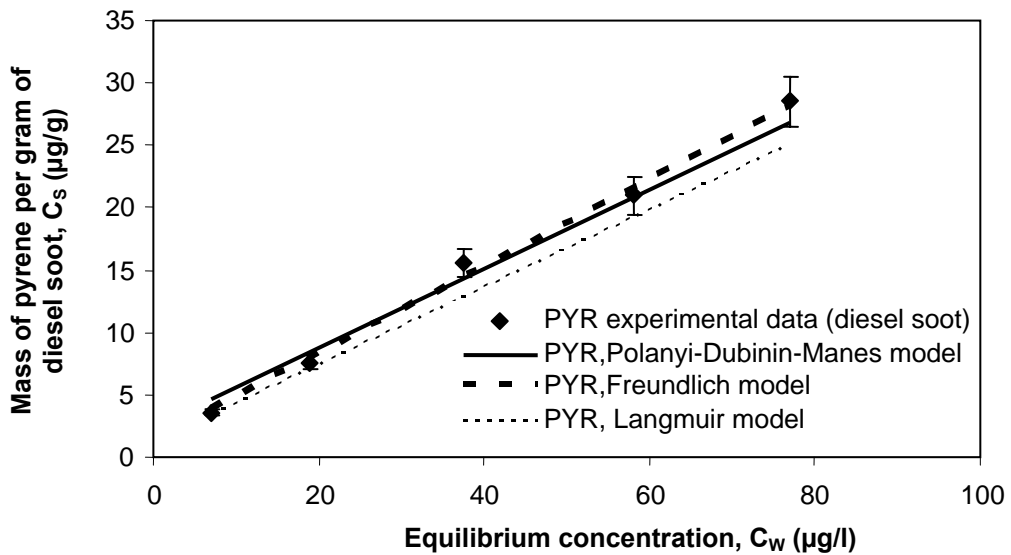
ภาพประกอบที่ ๑.๑๓ Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



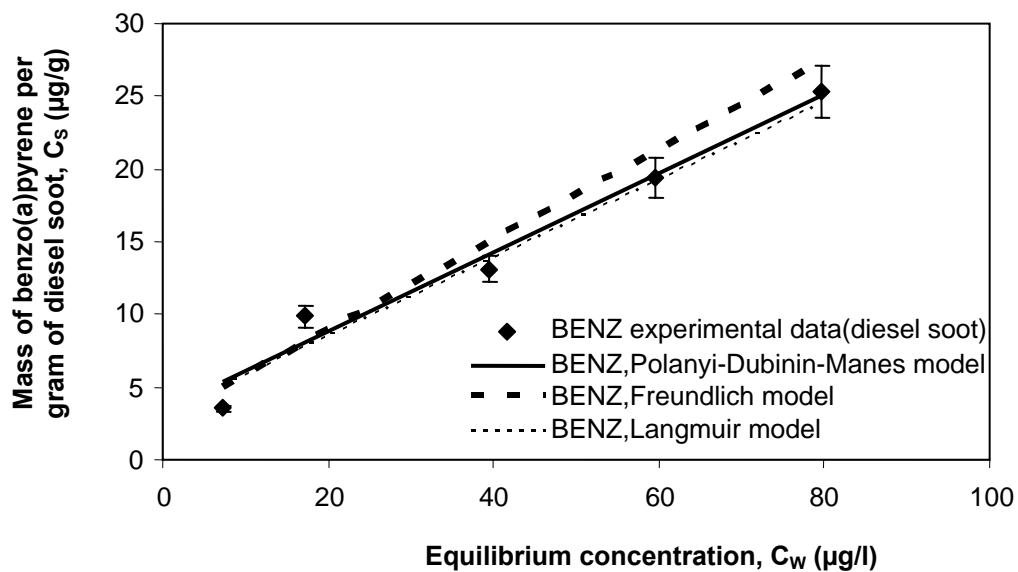
ภาพประกอบที่ ๑.๑๔ Polanyi-Dubinin-Manes adsorption isotherm สำหรับการดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



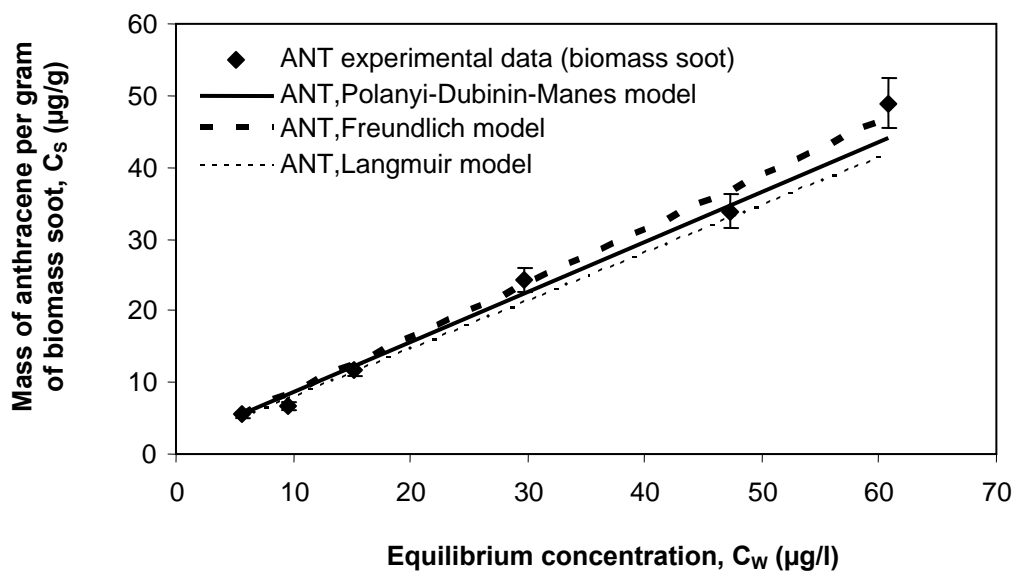
ภาพประกอบที่ ๑.15 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน
 สังกะระหับนเขม่าดีเซล



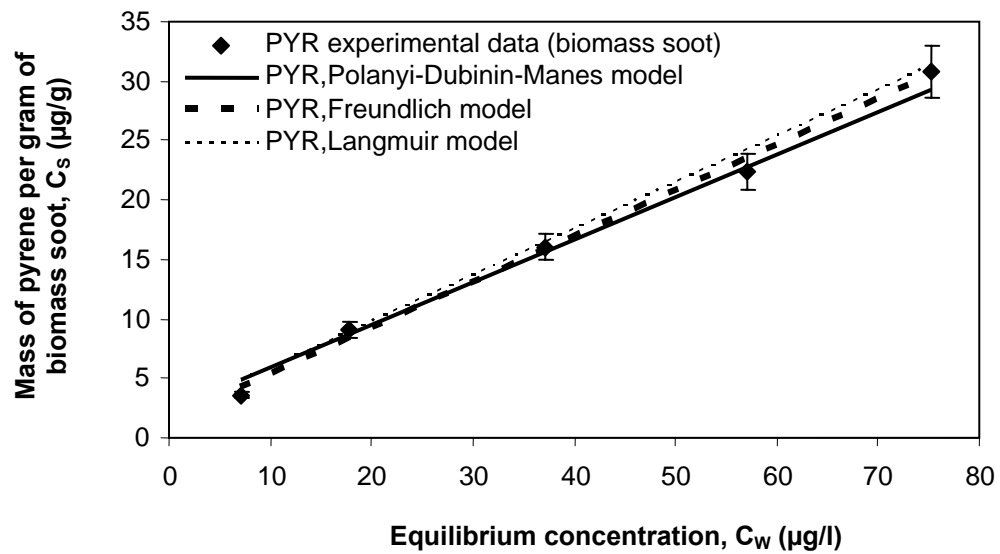
ภาพประกอบที่ ๑.16 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดิน
 สังกะระหับนเขม่าดีเซล



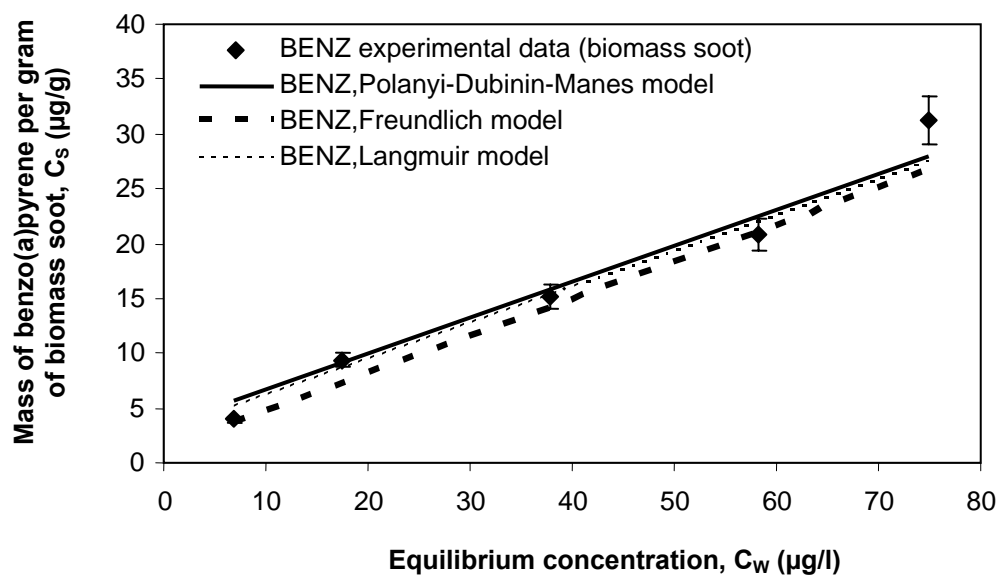
ภาพประกอบที่ ๑.17 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำ
ใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่าดีเซล



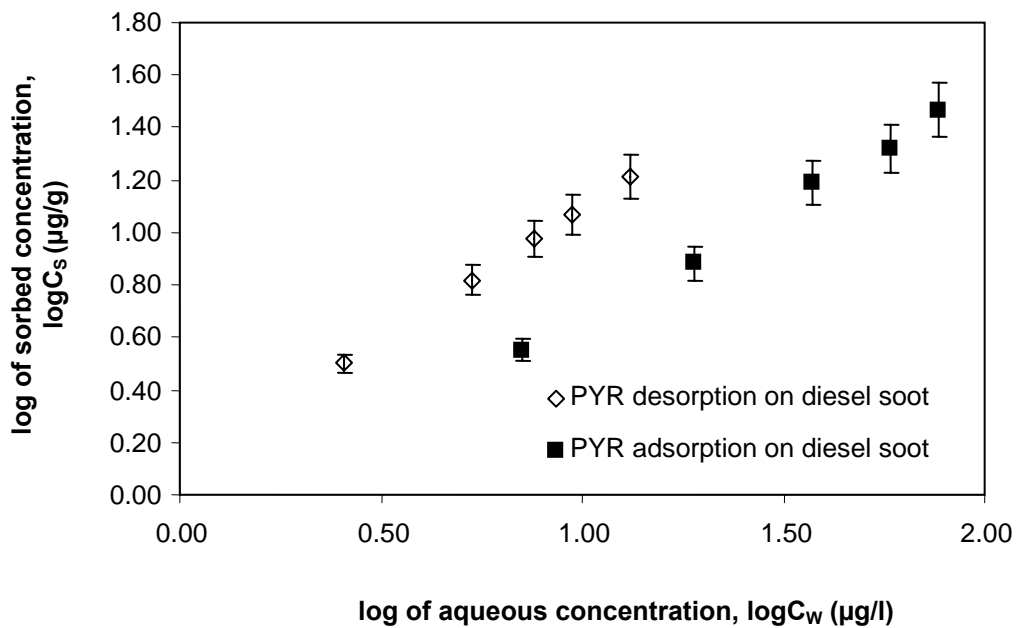
ภาพประกอบที่ ๑.18 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายแอนทราซีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนเขม่าเตาฟืน



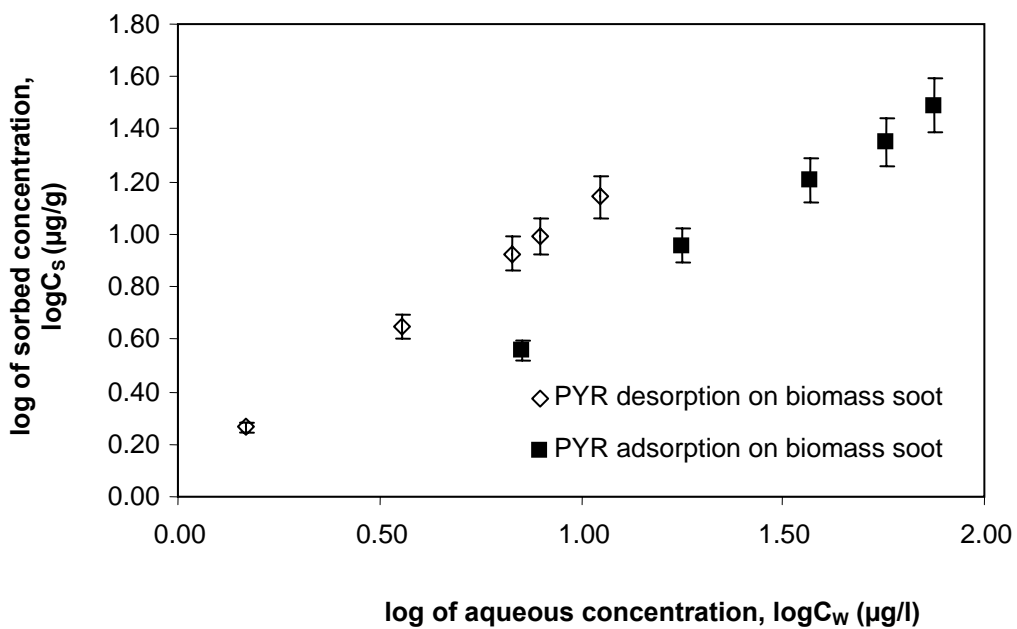
ภาพประกอบที่ ๑.19 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายไพรีนในน้ำใต้ดิน
สังเคราะห์บนขี้เถ้าเตาฟืน



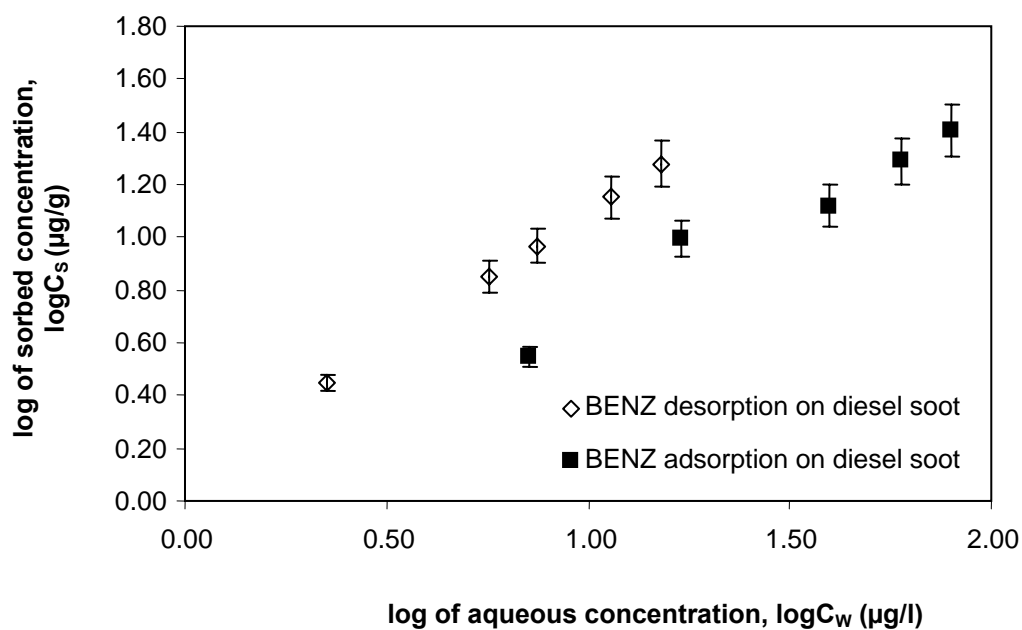
ภาพประกอบที่ ๑.20 Equilibrium adsorption isotherm ของสารละลายเบนโซ (เอ) ไพรีนในน้ำ
ใต้ดินสังเคราะห์บนขี้เถ้าเตาฟืน



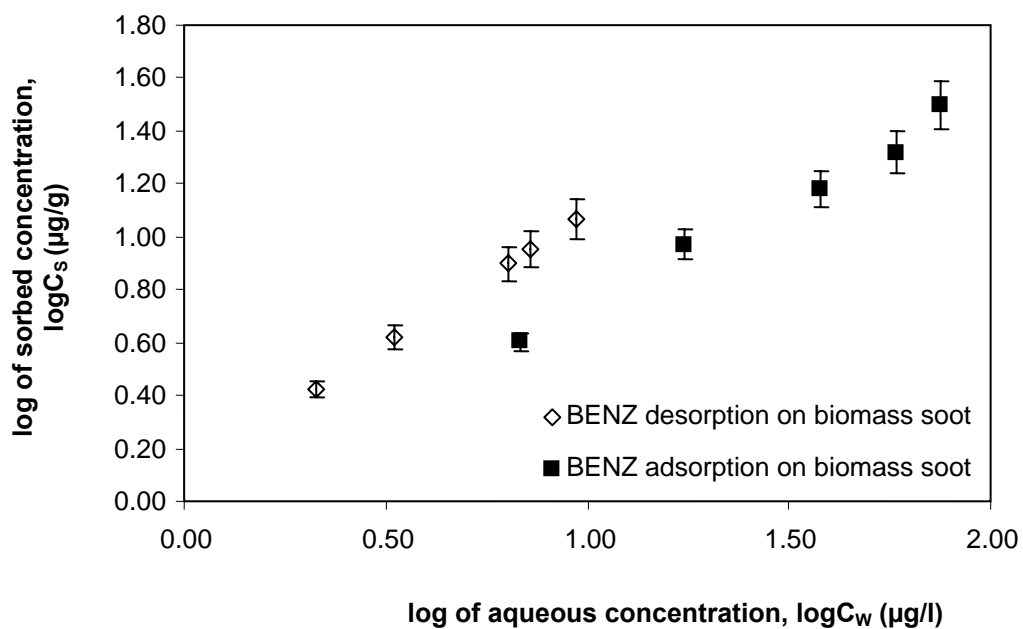
ภาพประกอบที่ ๑.21 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารไพรีนบนเขม่าดีเซล



ภาพประกอบที่ ๑.22 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารไพรีน



ภาพประกอบที่ ๓.23 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ)ไพรีน บนเขม่าดีเซล



ภาพประกอบที่ ๓.24 แสดง Adsorption-desorption isotherm ของสารเบนโซ (เอ)ไพรีน บนเขม่าเตาฟืน

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการคายน้ำ

ตาราง ข.1 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าเตาฟืน

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1} \text{soot}$)
10 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	3.587
	48	0.219	3.313
	96	0.604	2.834
	144	0.659	2.766
	192	1.129	2.186
	240	1.446	1.795
	288	1.481	1.752
	25 $\mu\text{g/l}$	0	0.000
48		1.637	7.014
96		2.033	6.521
144		2.195	6.319
192		2.339	6.141
240		2.811	5.562
288		3.616	4.575

ตาราง ข.1 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าเทาพื้น (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับ ได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
50 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	16.062
	48	4.464	10.481
	96	4.910	9.926
	144	4.970	9.852
	192	5.027	9.781
	240	5.701	8.952
	288	6.747	7.670
	75 $\mu\text{g/l}$	0	0.000
48		5.492	15.513
96		6.334	14.465
144		6.377	14.411
192		6.526	14.227
240		7.489	13.043
288		7.871	12.575

ตาราง ข.1 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าเตาฟืน (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
100 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	30.800
	48	7.448	21.490
	96	9.792	18.571
	144	9.963	18.359
	192	10.016	18.294
	240	10.441	17.771
	288	11.168	16.880

ตาราง ข.2 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าดีเซล

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1} \text{ soot}$)
10 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	3.568
	48	1.141	2.142
	96	1.975	1.103
	144	1.978	1.100
	192	2.073	0.982
	240	2.309	0.692
	288	2.556	0.390
	25 $\mu\text{g/l}$	0	0.000
48		1.960	5.156
96		2.304	4.728
144		3.246	3.560
192		3.953	2.687
240		3.889	2.765
288		5.299	1.037

ตาราง ข.2 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าดีเซล (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
50 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	15.559
	48	3.860	10.734
	96	4.824	9.534
	144	5.149	9.130
	192	5.439	8.772
	240	6.337	7.668
	288	7.627	6.087
	75 $\mu\text{g/l}$	0	0.000
48		5.747	13.785
96		6.254	13.154
144		6.332	13.056
192		6.992	12.241
240		7.484	11.636
288		9.452	9.226

ตาราง ข.2 แสดงการคายซับสารไพรีนบนเขม่าดีเซล (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
100 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	28.559
	48	8.491	17.945
	96	10.005	16.060
	144	10.040	16.016
	192	10.637	15.278
	240	12.815	12.600
	288	13.176	12.158

ตาราง ข.3 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าตาฟีน

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
10 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	4.006
	72	1.531	2.092
	144	1.886	1.650
	216	1.918	1.611
	288	2.123	1.357
25 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	9.337
	72	2.617	6.065
	144	2.641	6.036
	216	2.947	5.657
	288	3.333	5.180
50 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	15.122
	72	5.713	7.980
	144	6.084	7.519
	216	6.085	7.517
	288	6.333	7.211

ตาราง ข.3 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าเตาฟืน (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1}\text{soot}$)
75 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	20.797
	72	6.993	12.056
	144	7.061	11.971
	216	7.182	11.821
	288	7.200	11.798
100 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	31.269
	72	8.997	20.023
	144	9.038	19.972
	216	9.052	19.954
	288	9.381	19.547

ตาราง ข.4 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซล

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้น หลังการดูดซับ ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1} \text{ soot}$)
10 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	3.526
	72	1.822	1.248
	144	2.181	0.802
	216	2.187	0.794
	288	2.252	0.714
25 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	9.840
	72	4.162	4.638
	144	4.236	4.546
	216	4.727	3.936
	288	5.667	2.776
50 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	13.134
	72	5.748	5.949
	144	6.081	5.534
	216	6.245	5.331
	288	7.453	3.839

ตาราง ข.4 แสดงการคายซับสารเบนโซ (เอ) ไพรีนบนเขม่าดีเซล (ต่อ)

เขม่าจากความเข้มข้นเริ่มต้นหลัง การดูดซับ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการคายซับได้ ($C_w, \mu\text{g.l}^{-1}$)	ปริมาณสารที่เหลือหลังคายซับ ($C_s, \mu\text{g.g}^{-1} \text{soot}$)
75 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	19.395
	72	9.669	7.309
	144	10.223	6.619
	216	11.177	5.436
	288	11.362	5.207
100 $\mu\text{g/l}$	0	0.000	25.298
	72	12.465	9.717
	144	12.841	9.248
	216	14.222	7.535
	288	15.242	6.276

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวนันทมนวล มานพ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812032		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2547

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนยกเว้นค่าเล่าเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ. 2548-2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

นันทมนวล มานพ, ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ. 2551. ไอโซโทมการดูดซับของฟรอนคลิซของสารแอนทราซีนและเบนโซ (เอ) ไพรีนระหว่างน้ำใต้ดินและเขม่า: เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากไม้ยางพาราและเขม่าดีเซล: การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่ 18. โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช ชลบุรี, 20-21 ตุลาคม 2551.