

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

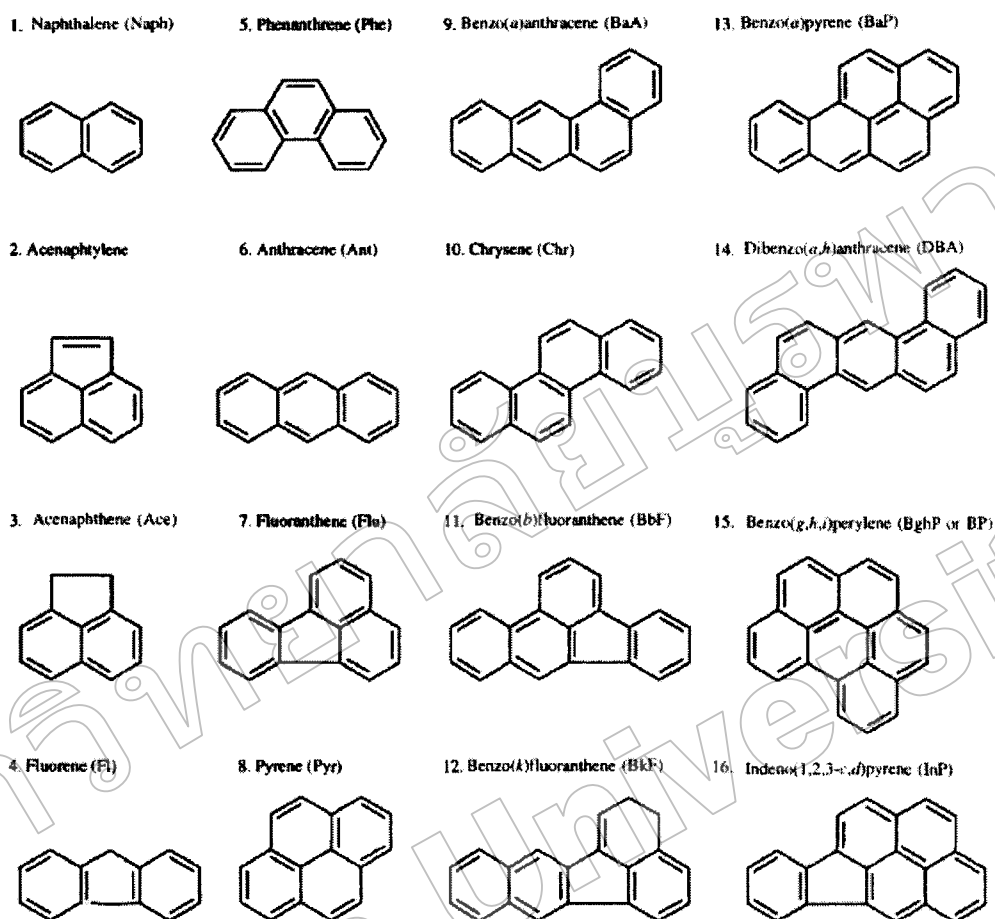
สารประกอบโพลีซัลฟิดอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

โดยทั่วไปก็จะหมายถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กลุ่มหนึ่งที่พบเป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหิน น้ำมันทุกชนิด เช่น น้ำมันดิบ น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา เป็นต้น ไม่ว่าจะเกิดจากการสะสมกันของสารอินทรีย์ทั้งพืช และสัตว์ภายใต้พื้นผิวโลกเป็นระยะเวลาหลายล้านปี โดยมีธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนองค์ประกอบที่เหลือเป็นออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และโลหะต่าง ๆ องค์ประกอบ และลักษณะของปิโตรเลียมจะแตกต่างกันไปตามแหล่งต่าง ๆ ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (จรรยา สารินทร์, 2537)

สารประกอบฟิเอเอชเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เป็นสารกลุ่มที่สะสมได้ดีในไขมัน สารกลุ่มนี้ชนิดที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด คือ แนพทาลิน ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยวงแหวนเบนซินเชื่อมต่อกัน (Fused) 2 วง (อรรณณ วัฒน, 2542)

1. คุณสมบัติทางเคมี ในโมเลกุลของสารประกอบฟิเอเอชประกอบด้วย วงแหวนเบนซินเชื่อมต่อกัน (Fused) ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป โดยมีการเรียงตัวแบบเส้นตรง (Linear) เป็นมุม (Angular) หรือเป็นกลุ่ม (Cluster) ดังแสดงในภาพที่ 1 คุณสมบัติทางด้านโครงสร้าง และการเรียงตัวของวงแหวนเบนซินภายในโมเลกุลของสารประกอบฟิเอเอช มีผลต่อความทนทานในการสลายตัว หรือการย่อยสลาย เช่น โมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะถูกย่อยสลายได้มากกว่าโมเลกุลที่เป็นมุม ส่วนโมเลกุลที่ประกอบด้วย วงแหวนเบนซินที่อยู่กันเป็นกลุ่มจะมีความทนทานมากที่สุด (Wilson & Jones, 1993)

2. คุณสมบัติทางกายภาพ สารประกอบฟิเอเอชเป็นสารประกอบประเภทไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) จึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำมาก (Cerniglia, 1992) สารประกอบฟิเอเอช ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูงจะมีความสามารถในการละลายน้ำก็จะลดลงทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายได้มากขึ้น แต่มันสามารถละลายได้ดีในไขมัน หรือเอทานอล (Ethanol) ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า ซึ่งดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการละลายใน Ethanol/ Water (K_{ow}) ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบฟิเอเอชบางชนิดที่พบโดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อม
(Witt, 1995)

3. คุณสมบัติทางชีวภาพ สารประกอบฟิเอเอชจัดเป็นสารก่อมลพิษที่มีอันตรายสูง พบว่าบางชนิดก่อให้เกิดความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันซึ่งก่อให้เกิดการตายของสิ่งมีชีวิตอย่างรวดเร็ว (Acute Effect) และการเกิดการเป็นพิษอย่างเรื้อรัง (Chronic Effect) (Narro, Cerniglia, Balen, & Gibson, 1992) ได้แก่ การก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผิดปกติ และเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenicity) เนื่องจากมีความเป็นพิษที่มีผลกับ Endocrine System ในร่างกาย แสดงในตารางที่ 1 แนวโน้มการเป็นพิษอย่างเฉียบพลันจะเกิดในสารประกอบฟิเอเอชที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ส่วนการเป็นพิษเรื้อรังจะเกิดในสารประกอบฟิเอเอชที่มีมวลโมเลกุลสูง (Ashok & Saxena, 1995)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของสารประกอบพีเอเอช
(ดัดแปลงจาก Ashok & Saxena, 1995; Chen et al., 2004)

PAHs	MW	S_w , mg/L (25°C)	V_p , N/m ² (at 20°C)	K_{ow}	Sorption Coefficient	WDL	SDL	Acute Toxicity	Carcinogenic/ Mutagenic
Naphthalene (C ₁₀ H ₈)	128	31.700	6056		1300			+	- / -
Phenanthrene (C ₁₄ H ₁₀)	178	1.290	9.07×10^{-2}	2.9×10^4	2300	17.14	1.829	+	- / -
Anthracene (C ₁₄ H ₁₀)	178	0.073	2.61×10^{-2}	2.8×10^4	2600	11.65	1.243	?	- / -
Fluoranthrene (C ₁₆ H ₁₀)	202	0.135	8.00×10^{-4}	3.4×10^5	8400	22.39	2.388	?	- / -
Pyrene (C ₁₆ H ₁₀)	202	0.260	9.11×10^{-5}	2×10^5	100000	24.29	2.591	+	- / +
Benzo(a) anthracene (C ₁₈ H ₂₂)	228	0.040	6.67×10^{-7}	4×10^5	260000	15.46	1.649	?	+ / +
Chrysene (C ₁₈ H ₂₂)	228	0.002	8.40×10^{-5}	4×10^5	200000	10.66	1.137	?	+ / +
Benzo(a) pyrene (C ₁₈ H ₂₂)	252	0.004	6.67×10^{-5}	10^6	690000	33.52	3.575	++	+++ / +

(WDL: Determination Limits in Water, ng/L; SDL: Determination Limits in Solid, ng/g)

+ หมายถึง Relative Degree of Effect on Organism, - หมายถึง No Effect, ? หมายถึง Unknow

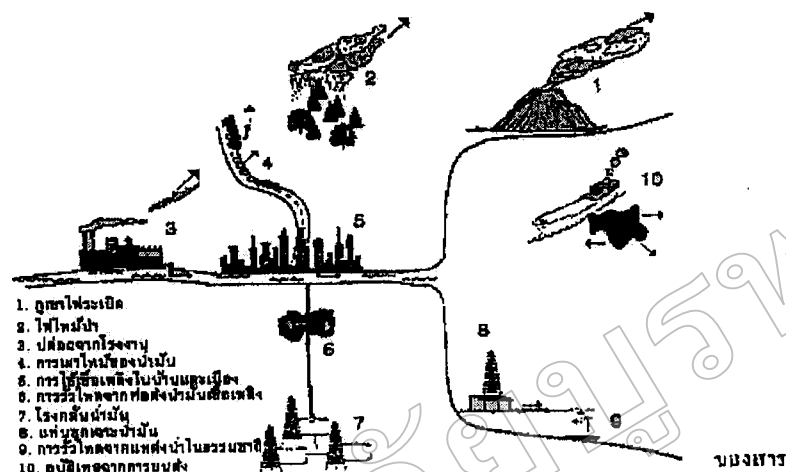
Effect, 1 atm = 101325 N/m²

แหล่งกำเนิดของสารประกอบพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม

สารประกอบพีเอเอชมีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม สามารถปนเปื้อนได้ในทุก ๆ แหล่งทั้งในอากาศ แหล่งน้ำ ดิน และตะกอน ดังแสดงในภาพที่ 2 สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. Pyrogenic Source เกิดขึ้นได้จากการกระทำของมนุษย์เป็นสำคัญ เช่น การเผาไหม้ชนิดไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ และน้ำมันเชื้อเพลิง การใช้น้ำมันเบนซิน และดีเซล การเผาไหม้กระดาษ ยางรถยนต์ การบั้ง ย่าง ร่มคว้น หรือขบวนการเผาไหม้ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม การเผาป่า เผาขยะ เป็นต้น

2. Petrogenic Source เกิดขึ้นได้จากธรรมชาติ เช่น การเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมดิบที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่า เป็นต้น



ภาพที่ 2 แหล่งที่มาของสารประกอบฟีนอลในสิ่งแวดล้อมโดยมีลูกศรแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ (มะลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)

ผลกระทบของน้ำมัน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่อคน มนุษย์ยังมีความเสี่ยงต่อการสัมผัสกับสารประกอบฟีนอล ซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการกิน และโดยการหายใจ มีรายงานการเกิดโรคมะเร็ง เนื่องจากสารเคมีในสิ่งแวดล้อมเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2318 โดย Dr.Percival Potts เขาพิสูจน์ให้เห็นว่า เขม่าที่เกิดจากควันไฟของการเผาไหม้ และฟีน ที่เกาะอยู่ตามผนังภายในของปล่องควัน ในบ้านของคนอังกฤษ เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคมะเร็งผิวหนัง ในเด็ก คนงานที่มีอาชีพรับจ้างทำความสะอาดของปล่องควันไฟ สารมะเร็งที่ถูกพบในเวลาต่อมา ก็คือ สารเบนโซ-เอ-ไพรีน อยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอล สารเหล่านี้สามารถซึมผ่านเซลล์เมมเบรนผิวหนังของคนงานที่ได้เป็นประจำ เมื่อนำเหล่านี้ไปทาบนผิวหนังของหนูทดลองจะเกิดมะเร็งผิวหนังได้ เป็นต้น สารประกอบฟีนอลในดินน้ำมัน หรือเขม่าไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ทำให้เกิดมะเร็งของปอด กระเพาะปัสสาวะ ช่องปาก ตับอ่อน และไตได้

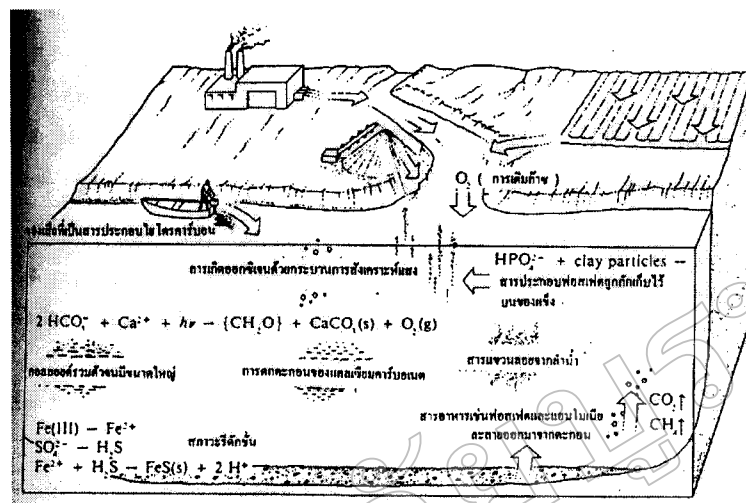
จากการศึกษา พบว่า สารประกอบฟีนอล ที่มีจุดเดือดต่ำ ๆ จะเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ดีที่สุด นั่นคือ จะมีความเป็นพิษสูง เช่น เบนซีน (Benzene), ทูลูอิน (Toluene), แนพทาเลน (Naphthalene) และฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) สารพวกนี้มีผลในการยับยั้งการสร้างเม็ดเลือดมีผลต่อระบบหายใจ กระดูก หรือกดประสาทส่วนกลางในสัตว์ และยังเป็นสารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) และเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) อีกด้วย (กัลยา วัฒนการ, 2530)

ผลกระทบของน้ำมัน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่อแหล่งน้ำ น้ำมันที่รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่รุนแรงมากกว่าผลกระทบที่เกิดจากน้ำมันรั่วไหล

ลงบนดิน เนื่องจากแหล่งน้ำไม่ว่าจะเป็นทะเล หรือแม่น้ำจะมีทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวข้องกันอย่างมากมาย ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น น้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำจะบดบัง หรือกั้นแสงอาทิตย์ไม่ให้ส่องผ่านลงไปในน้ำได้สะดวก ลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำได้ เนื่องจากน้ำมันจะทำหน้าที่คล้ายกับแผ่น หรือเกาะก้ำบัง (Physical Barrier) ระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งจะมีผลทำให้ก๊าซออกซิเจนจากอากาศไม่สามารถละลายลงสู่น้ำได้ น้ำมันทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นน้ำมันดิบ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือชนิดอื่น ๆ จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยซึ่งสารละลายไฮโดรคาร์บอนนี้เมื่อละลายลงสู่แหล่งน้ำย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจำพวกพืช และสัตว์น้ำได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนที่ละลายในน้ำในปริมาณมากจะทำให้อัตราการเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชพืชน้ำลดลงประมาณ 50% เซลล์เมมเบรนของสาหร่ายถูกทำลาย และเกิดการสูญเสียโปรตีนเซลล์ และเมมเบรนออกจากเซลล์ เป็นต้น (ชรัตน์ รุ่งเรืองศิลป์, 2533) การรั่วไหลของน้ำมันไม่ว่าจะโดยอุบัติเหตุ หรือการลักลอบทิ้ง จะทำให้เกิดการเปื้อน มีผลต่อสมดุลระบบนิเวศที่บริเวณชายฝั่ง เป็นการทำลายที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ และเป็นสาเหตุในการตายของสัตว์น้ำ และพืชนานานมาก อีกทั้งสิ่งมีชีวิตเหล่านี้บางชนิด หรือส่วนใหญ่เป็นอาหารของสัตว์ชนิดอื่นอีกหลายสปีชีส์ การตายของสัตว์เหล่านี้อาจทำให้ห่วงโซ่อาหารขาดลง หรือบางทีอาจมีการสะสมสารพิษเพิ่มมากขึ้นไปตามลำดับห่วงโซ่อาหาร (กัลยา วัฒนการ, 2530)

การปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ

สารประกอบฟิเอเอชจากแหล่งกำเนิดต่างกันจะมีองค์ประกอบที่ต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันดิบ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือน้ำมันชนิดอื่น ๆ จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยย่อมส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ ดังที่กล่าวมาข้างต้น การปนเปื้อนของสารประกอบ ฟิเอเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียมที่เกิดการรั่วไหลระหว่างขนส่ง การเกิดอุบัติเหตุทางน้ำ การลักลอบทิ้ง เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2 ลักษณะของการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชส่วนใหญ่ เกิดจากการดูดซับบนอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ และตกตะกอนรวมตัวกันสะสมในดินตะกอนที่พื้นท้องน้ำในที่สุด (IPCS, 1998) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความเป็นไปของสารประกอบฟิเอเอชที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ (นัทธีรา สรรมณี, 2541)

ตารางที่ 2 สถิติการรั่วไหลของน้ำมันชนิดต่างๆ ในปี 2516-2548 (กรมควบคุมมลพิษ, ม.ป.ป.)

วัน/เดือน/ปี	ชนิดของน้ำมัน	ปริมาณ	สถานที่เกิดเหตุ	สาเหตุ
10 เม.ย. 16	ดีเซล	น้ำมันเตา ๑.๕.๔	ปากแม่น้ำเจ้าพระยา	เรือบรรทุกน้ำมัน "วิสาหกิจ"ชนกับเรือสินค้า "ตาตุ๊ก"
- - 16	เจ.พี.4	ไม่ทราบ	ศรีราชา จ.ชลบุรี	เพลิงไหม้เรือบรรทุกน้ำมัน "จิตตะกอง"
29 พ.ค. 20	ไม่ทราบ	300 ตัน	ปากแม่น้ำเจ้าพระยา	เรือบรรทุกน้ำมัน "วชิร"ชนเรือสินค้าของญี่ปุ่น
- - 22	น้ำมันเตา	300 ตัน	เกาะสีชัง จ.ชลบุรี	เพลิงไหม้เรือ "ซันเฟลาเวอร์"
13 พ.ย. 28	น้ำมันเตา	ไม่ทราบ	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณคลังสรรพากรอาหารเรือบางนา	ไม่ทราบ
5 ก.พ. 29	น้ำมันดิบ	ไม่ทราบ	บนชายหาดแหลมฉบัง จ.ชลบุรี	ไม่ทราบ
22 เม.ย. 30	น้ำมันเตา	1,000 ลิตร	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณ ท่าเรือ ปตท. บางจาก	ท่อส่งน้ำมันรั่ว
8 ก.ค. 31	น้ำมันเตา	10 ตัน	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณประแดง จ.สมุทรปราการ	เรือบรรทุกสารเคมี "Shintaku" ชนกับเรือสินค้า "Huan-Jiang"
6 มี.ค. 33	น้ำมันดีเซล	7,000 ลิตร	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณท่าเทียบเรือหมายเลข 26 B ของบริษัทเอสไอ	น้ำมันต้นถังขณะขนถ่ายลงเรือ "โจคอนันต์สมุทร 3"
4 ส.ค. 34	น้ำมันเตา	ไม่ทราบ	ช่องนนทรี	น้ำมันต้นถังขณะสูบลำน้ำมันลงเรือ "ฉัฐนิภา"
14 ม.ค. 35	น้ำมันเชื้อเพลิง	1,000 ลิตร	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณท่าเรือ บ. บางจากปิโตรเลียม	เรือจมดู 4 เกยตื้นน้ำ
25 เม.ย. 35	น้ำมันเตา	1 หมันลิตร	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณทุ่งไฟที่ 25-27	เรือ "ฉัฐนิภา" 8" จม
19 ก.ค. 35	น้ำมันจากท่อเรือ	4 ตัน	แม่น้ำเจ้าพระยาริเวณปากคลองลาดหลวง	ไปะบรรทุกน้ำมันของอยู่ยงน้ำมัน ไหลออกมา
12 ก.พ. 36	น้ำมันเตา	200 ลิตร	หน้าท้องของ บ.เชลล์ ชองนนทรี	เรือรำน้ำมันเตา โคลงขณะรับน้ำมันเตา
31 ส.ค. 36	น้ำมันเตา	300 ลิตร	หน้าท่า 37 A องค์การคลังสินค้า	น้ำมันต้นถังขณะขนถ่ายจากเรือบรรทุกน้ำมัน 6 ลงเรือได้วัน
13 ต.ค. 36	น้ำมันเครื่อง	ไม่ทราบ	หน้าสถานีตำรวจนครบาลบางคอแหลม	การลัดลอบ
6 มี.ค. 37	น้ำมันดีเซล	4 หมันลิตร	เกาะสีชัง จ.ชลบุรี	เรือบรรทุกน้ำมันวิสาหกิจ 5 ถูกเรือบรรทุกสินค้าของปานามาชน
24 มี.ค. 37	น้ำมันเตาและโซล่า	3,000 ลิตร	เกาะลิดโปะ จ.สตูล	เรือโรงงานปลาแป้นเกิดไฟไหม้แล้วจมลง
19 เม.ย. 37	น้ำมันเครื่อง	300 ลิตร	แม่น้ำเจ้าพระยา	การลัดลอบปล่อยทิ้ง

ตารางที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ชนิดของน้ำมัน	ปริมาณ	สถานที่เกิดเหตุ	สาเหตุ
25 ก.ค. 38	น้ำมันปาล์ม	200 ลิตร	แหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต	เรือ sunsine 1 สัญชาติปานามาจมเพราะคลื่นลมแรง
15 ธ.ค. 38	น้ำมันเตา	300 ลิตร	คลองตาหู จ.ระยอง	เกิดการรั่วไหลระหว่างการล้างถังกักเก็บน้ำมันของบริษัททุนเท็กซ์
30 ต.ค. 39	น้ำมันดิบ	1 แสนลิตร	สถานีส่งน้ำมันดิบบริเวณนอกชายฝั่ง จ.ระยอง	ปีโตรเลียม
4 พ.ค. 40	น้ำมันเตา	7,000 ลิตร	ใกล้เกาะพีพี จ.กระบี่	เกิดการรั่วไหลจากการขนถ่ายน้ำมันดิบ
5 พ.ย. 40	น้ำมันเตาเหลว	4,000 ลิตร	ใกล้สถานีส่งน้ำมันดิบบริเวณนอกชายฝั่ง จ.ระยอง	เรือคิงส์ครุยเซอร์ ชนหินโสโครกอับปาง
18 ธ.ค. 41	น้ำมันดิบ	50 บาร์เรล	อ่าวอุดม อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	เรือ MOSQUEEN ไม่ทราบสาเหตุการรั่วไหล
26 มี.ค. 42	น้ำมันดีเซล	ไม่ทราบ	ทำเรืออ่าวคลอง อ.เมือง จ.ภูเก็ต ห่างจากชายฝั่งประมาณ 1 ไมล์	ถักลอยปล่อยทิ้งจากเรือ
1 เม.ย. 42	น้ำมันเตา	2,000 ลิตร	ทำเรืออ่าวคลอง อ.เมือง จ.ภูเก็ต ห่างจากชายฝั่งประมาณ 1 ไมล์	เรือยอร์ชเคทีเรนเกิดเพลิงไหม้และจมลง
27 เม.ย. 42	น้ำมันดิบ	1 ตัน	บริเวณจุดจอดเรือทางตอนเหนือของเกาะสีชัง	ถักลอยปล่อยทิ้งจากเรือสัญชาติเวียดนาม
13 ก.ย. 42	น้ำมันเบนซิน	2 ตัน	บริเวณท่าเรือบริษัทปิโตรเคมีกลีปไทย จำกัด จ.ระยอง	ข้อผิดพลาดในการขนถ่ายน้ำมันระหว่างเรือ “อรพิน โกรบัต” กับท่าเรือ
12 ต.ค. 42	ไม่ทราบ	ไม่ทราบ	บริเวณเกาะสีชัง อ.เกาะสีชัง จ.ชลบุรี	ถักลอยปล่อยทิ้ง
18 ม.ค. 43	น้ำมันดิบ	ไม่ทราบ	แม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณหลังคูเรือบางหัวเสือ	ถักลอยปล่อยทิ้ง
14 ก.ย. 43	น้ำมันดีเซล	2,000 ลิตร	หาดพิเณรหาด หาดแสงจันทร์ จ.ระยอง	ไม่ทราบ
1 ม.ค. 44	น้ำมันเตา	2,000 ตัน	บริเวณนอกฝั่ง จ.ชลบุรี	เรือบรรทุกสินค้าชื่อ Heron ชนเรือบรรทุกน้ำมัน play boy3
17 ส.ค. 44	น้ำมันดิบ	ไม่ทราบ	ท่าเทียบเรือบริษัทอุตสาหกรรมเคมีกลีปไทย จำกัด จ.ระยอง	เรือจม
15 ม.ค. 45	น้ำมันเตา	ไม่ทราบ	บริเวณหาดไม้ขาว จ.ภูเก็ต	ถักลอยปล่อยทิ้ง
26 ธ.ค. 47	น้ำมันเตา	243 ตัน	นอกฝั่ง อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	เรือ EASTERN FORTITUDE ชนหินฉลาม
20 พ.ย. 48	น้ำมันดิบ	150 ตัน	เกาะครก จ.ชลบุรี	เรือ Dragon 1 ชนหินโสโครก
		2 หมื่นลิตร	ท่ารับน้ำมัน (SBM) ไทยออยล์ จ.ชลบุรี	

Chen, Zhu and Zhou (2006) ศึกษาเพื่อดูการสะสมของสารประกอบฟิเอเอชในน้ำ และดินตะกอนจากแม่น้ำเคียนตัน (Qiantang River) ที่น้ำไหลมาลงที่แม่น้ำแยงซี (Yanxi River) ในประเทศจีน เป็นแม่น้ำที่ไหลผ่านเขตชุมชนเมืองบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม และเขตชุมชน หรือชนบทบริเวณที่มีการทำการเกษตร เป็นแม่น้ำสายสำคัญสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม, เมษายน, กรกฎาคม และตุลาคม ในปี 2005 ตัวอย่างที่เก็บ คือ ตัวอย่างน้ำ และตัวอย่างดินตะกอน ความเข้มข้นของสารประกอบฟิเอเอชในน้ำ ที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วง 70.3-1844.4 นาโนกรัมต่อลิตร เฉลี่ยประมาณ 283.3 นาโนกรัมต่อลิตร ส่วนใหญ่จะเป็นพวกที่มีวงเบนซีน 2-3 วง เช่น แนพทาลิน (Naphthalene), อะซีแนฟทีน (Acenaphthene), ฟลูออรีน (Fluorene), ฟิแนนทรีน (Phenanthrene) เป็นต้น ส่วนความเข้มข้นของสารประกอบฟิเอเอชในดินตะกอน อยู่ในช่วง 91.3-614.4 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เฉลี่ยประมาณ 313.3 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนใหญ่จะเป็นพวกที่มีวงเบนซีน 3-4 วง เช่น ไพรีน (Pyrene), ฟลูออแรนทรีน (Fluoranthene), เบนโซ-เอ-แอนทราซีน (Benzo-A-Anthracene) เป็นต้น สารประกอบฟิเอเอชในน้ำ และดินตะกอนจากแม่น้ำเคียนตัน (Qiantang River) ที่ตรวจพบในเขตชุมชนเมืองสูงมากกว่าในเขตชุมชน หรือชนบท เนื่องจากแม่น้ำเคียนตัน (Qiantang River) ในเขตชุมชน หรือชนบท ถือเป็นแม่น้ำสายสำคัญในการประกอบอาชีพการจับสัตว์น้ำ และบางครั้งก็นำน้ำมาดื่ม ประชาชนที่อาศัย ในบริเวณดังกล่าวจึงเสี่ยงต่อการได้รับสารพิษเหล่านี้เป็นอย่างมาก

วรรณวิมล ภัทรศิริวงศ์ และชวนพิศ บุญย้อย (2545) ศึกษาการแพร่กระจายตัวของสารประกอบฟิเอเอช 3 ชนิด ได้แก่ เบนโซ-เอ-ไพรีน (Benzo-A-Pyrene: BaP), เบนโซ-เค-ฟลูออแรนทรีน (Benzo-K-Fluoranthene: BkF) และเบนโซ-จี เอช ไอ-เพอริรีน (Benzo-G.H.I-Perlyrene: BghiP) ในแหล่งน้ำเขตกรุงเทพ และเขตปริมณฑล 3 จังหวัด คือ จังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ โดยเก็บตัวอย่างน้ำ และดินตะกอนระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-มีนาคม ในปี 2538 ผลการวิเคราะห์ คือ พบสาร BkF เพียงชนิดเดียว ระดับความเข้มข้น < 2-4.9 นาโนกรัมต่อลิตร ส่วนในดินตะกอนสามารถ พบได้ทั้ง 3 ชนิด คือ BaP ระดับความเข้มข้น < 20-89.6 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม, BkF ระดับความเข้มข้น < 15-66.1 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ BghiP ระดับความเข้มข้น < 100-282.5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าสาเหตุในการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำเขตกรุงเทพ และจังหวัดใกล้เคียงนั้นน่าจะมาจากการจราจรเป็นหลัก แม้ว่าสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำที่ตรวจพบยังไม่อยู่ในระดับวิกฤตก็ตาม แต่เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับสารเหล่านี้ จึงถือว่าเป็นเรื่องน่าตกใจที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำ

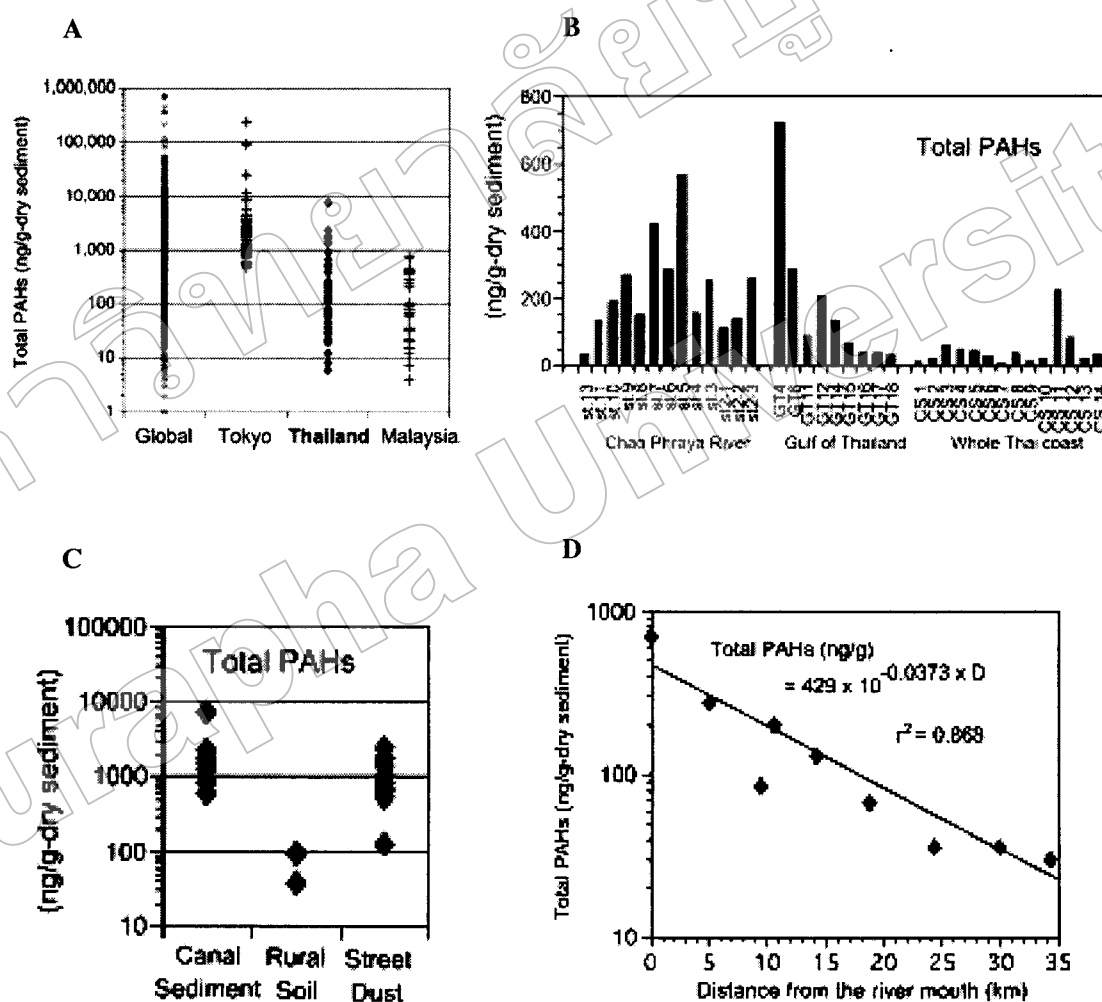
ตารางที่ 3 การปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลในน้ำ และดินตะกอนในประเทศต่าง ๆ
(Chen et al., 2006)

แหล่งที่ศึกษา	แม่น้ำ / ประเทศ	ผลรวมของสารประกอบฟีนอล	
		ค่าเฉลี่ย	ช่วงของการสะสม
น้ำ	Quiantang River, China	283.3 ng/L	70.3-1644.4 ng/L
	Gao-ping River, China	430 ng/L	10-940 ng/L
	Tianjing River, China	174 ng/L	45.8-1272 ng/L
	Minjiang River, China	72400 ng/L	9900-474000 ng/L
	Seine River, France	20 ng/L	4-36 ng/L
	Yellow River, China		185-2182 ng/L
ดินตะกอน	Quiantang River, China	313.3 ng/g	91.3-614.4 ng/g
	Athabasca River, Canada		10-34700 ng/g
	Kishon River, Israel	153.2 ng/g	59.5-298.9 ng/g
	Yellow River, China	76.8 ng/g	31-133 ng/g
	Minjiang River, China	433 ng/g	122-877 ng/g
	River in Thailand	263±174 ng/g	787-1943000 ng/g
	Pear River, China	4892 ng/g	
	Tianjing River, China	10980 ng/g	1434-10811 ng/g

รุจยา บุญยทุมานนท์ และสุทิพย์ ศรีลาชัย (2547) ศึกษาการแพร่กระจายตัวของสารประกอบฟีนอลเพื่อประเมินสถานการณ์การปนเปื้อนในดินตะกอน บริเวณที่เชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยา ตั้งแต่ปากแม่น้ำอยุธยาถึงปากแม่น้ำจังหวัดสมุทรปราการ และบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MC) พบว่า ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในดินตะกอนมีค่าอยู่ระหว่าง 6-3899 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยบริเวณคลอง แม่น้ำเจ้าพระยา ปากแม่น้ำ และชายฝั่งดังนี้ 2554, 226, 325 และ 62 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

Boonyatumanond, Wattayakorn, Togo, and Takada (2006) ศึกษาการแพร่กระจายตัวของสารประกอบฟีนอลในแม่น้ำ, ปากแม่น้ำ และดินตะกอนในทะเลของประเทศไทยในปี 2003 และตรวจวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลกลุ่มที่มีวงอะโรมาติก (Aromatic Ring) 3-7 วง ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) พบว่า ความเข้มข้นของสารประกอบ

พีเอช มีค่าอยู่ระหว่าง 6-8399 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยบริเวณ คลอง, แม่น้ำ, ปากแม่น้ำ และชายฝั่ง ดังนี้ $2,290 \pm 2,556$, 263 ± 174 , 179 ± 222 และ 50 ± 56 นาโนกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดินตะกอนจากคลองบริเวณชุมชนเขตกรุงเทพมหานครมีการปนเปื้อน ของสารประกอบพีเอชมากที่สุด ส่วนใหญ่มาจากแหล่ง Petrogenic เช่นเดียวกันกับดินตะกอน จากคลองเขตชุมชน หรือชนบท อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอช ในดินตะกอน ถือว่ายังอยู่ในระดับที่ไม่สูง หรือไม่อยู่ในระดับวิกฤต



ภาพที่ 4 สารประกอบพีเอชในดินตะกอนที่ประเทศต่าง ๆ (A), สารประกอบพีเอชในดินตะกอนที่บริเวณต่างในประเทศไทย (B), สารประกอบพีเอชในดินตะกอน (C) และสารประกอบพีเอชในดินตะกอนจากปากแม่น้ำ (D)

การได้รับสารประกอบฟิเอเอชของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

สารประกอบฟิเอเอช หรือสารประกอบละลายไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้เมื่อละลายลงสู่แหล่งน้ำย่อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจำพวกพืช และสัตว์น้ำได้ เช่น สัตว์ที่ดำรงชีพโดยการกรอง (Filter Feeding) เช่น หอยเป็นสัตว์ที่กินอาหารโดยการกรองสารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้นจึงกรองเอาสารพิษต่าง ๆ ที่แขวนลอยกับน้ำนั้นเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกาย นอกจากนี้ก็ยังมีสัตว์น้ำที่อาศัยและหากินบริเวณหน้าดิน บนผิวน้ำ บริเวณกลางน้ำ และพื้นท้องน้ำ ก็อาจได้รับอันตรายจากสารพิษต่าง ๆ เหล่านี้ได้เช่นกัน สิ่งมีชีวิตจะได้รับสารพิษในกลุ่มสารประกอบฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วยวิธีการต่าง ๆ กันตามลักษณะการดำรงชีวิต และอาจทำให้เกิดการถ่ายทอดสู่ห่วงโซ่อาหารต่อไป (วรวิทย์ ชีวาพร, 2547)

รุจยา บุญขุมานนท์ และสุเทียบ ศรีลาชัย (2547) ติดตามตรวจสอบสารพิษตกค้างในกลุ่มสารประกอบฟิเอเอช บริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย โดยใช้หอยตัวอย่างเป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพ ตรวจวัดระหว่างปี 2542-2543 พบสารประกอบฟิเอเอชในกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (Low Molecular Weight) มากกว่าพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (High Molecular Weight) และพบการสะสมของสารประกอบฟิเอเอชในหอยแมลงภู่ ซึ่งสารประกอบฟิเอเอชที่สะสมมีทั้งแหล่งที่มาจากการเผาไหม้ (Pyrogenic) และจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petrogenic)

โดยเฉพาะปลาซึ่งเป็นสัตว์น้ำที่มีความเสี่ยงสูงมากในการได้รับสารพิษจากสารประกอบฟิเอเอช เนื่องจากเป็นสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำ และมีจำนวนมากหลายชนิด แต่ละชนิดมีการดำรงชีวิตที่แตกต่างกันออกไป ปลายังเป็นสัตว์น้ำที่ประชาชนส่วนใหญ่ทั้งไทยและต่างประเทศนิยมนำมารับประทาน เนื่องจากมีสารอาหาร และมีคุณประโยชน์มากมาย เมื่อปลาได้รับสารพิษเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายแล้ว จะเกิดการสะสมความเป็นพิษมากขึ้น สารพิษเหล่านี้ก็จะสามารถถ่ายทอดผ่านมาถึงมนุษย์ทำให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ปลาจึงเป็นสัตว์น้ำที่ได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาในเรื่องการปนเปื้อนของสารประกอบกลุ่มฟิเอเอช ปลาเมื่อได้รับสารพิษจากกลุ่มฟิเอเอชเข้าสู่ร่างกาย ก็จะผ่านระบบทางเดินอาหาร และมีอวัยวะสำคัญที่ทำหน้าที่ในระบบย่อยอาหาร โดยเฉพาะอาหารประเภทไขมัน คือ ตับ และถุงน้ำดี (สุภาพร สุกสีเหลือง, 2543)

1. **ถุงน้ำดี (Gall Bladder หรือ Bile Sac)** เป็นอวัยวะที่มีหน้าที่ในการจับถ่าย หรือนำพาของเสียมีลักษณะที่เป็นอวัยวะที่มีผนังบางทำหน้าที่สะสมน้ำดี และจะมีท่อที่ เรียกว่า คอมมอนไบเล็คค (Common Bile Duct) นำน้ำดีไปสู่ส่วนต้นของลำไส้ช่วยย่อยอาหารประเภทไขมัน (วิมล เหมะจันทร์, 2528) น้ำดีประกอบด้วยสารสีไบริเวอร์ดิน (Biliverdin) และไบลิรูบิน (Bilirubin) ที่ได้จากการสลายตัวของเซลล์เม็ดเลือด และฮีโมโกลบิน และยังประกอบด้วยเกลือ

ของไขมันที่ไม่ละลาย ทำหน้าที่ปรับสภาพความเป็นกรดในลำไส้เล็กให้เป็นกลาง และเป็นอิมัลซิไฟคิง เอเจนต์ (Emulsifying Agent) น้ำดีจากตับจะช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของไขมัน กลายเป็นอนุภาคเล็ก ๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของไขมันก่อน ทำให้การย่อยเกิดขึ้นได้เร็ว (สุภาพร สุกสีเหลือง, 2543)

2. ตับ (Liver) ทำหน้าที่สำคัญหลายประการด้วยกัน คือ

2.1 ทำหน้าที่เมตาบอลิซึมสารอาหารชนิดต่าง คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน

2.2 ทำหน้าที่ในการสร้างโปรตีนของพลาสมา

2.3 ทำหน้าที่ทำลายสิ่งแปลกปลอมทั้งจุลชีพ สารพิษ และสารโปรตีนแปลกปลอม รวมทั้งสารแอมโมเนียในพลาสมา

2.4 ทำหน้าที่ขับสารพิษ และของเสียออกทางน้ำดีและ

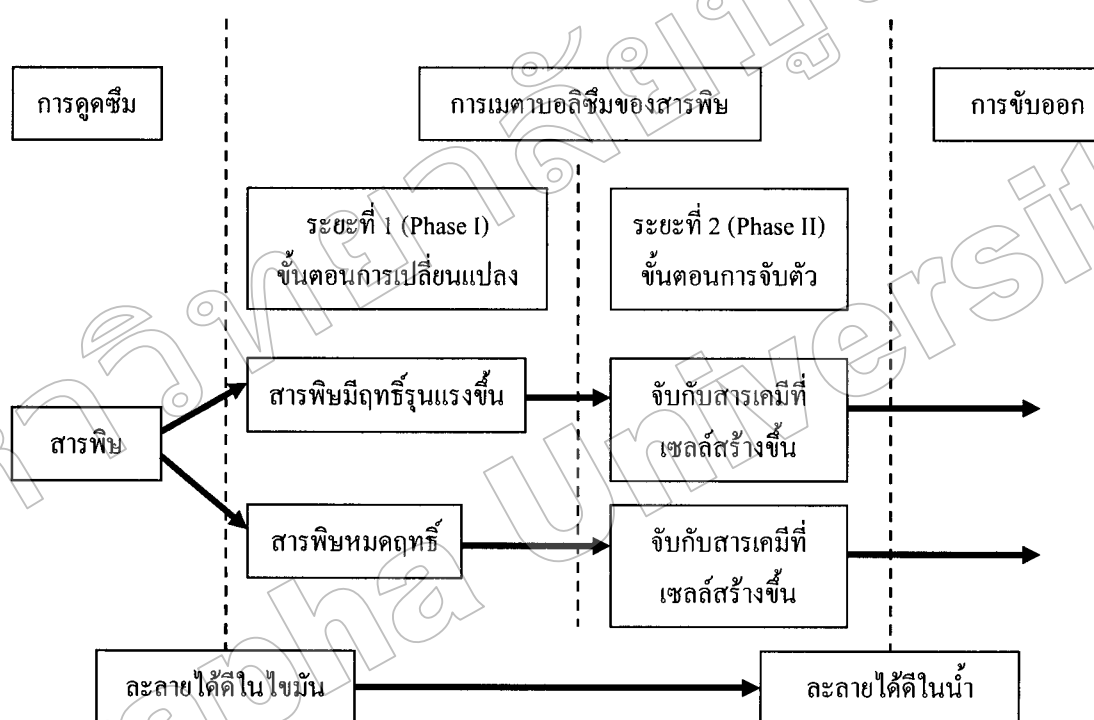
2.5 ทำหน้าที่ในการสร้างน้ำดีเพื่อช่วยในการย่อยไขมัน

ตับพัฒนามาจากการยื่นออกมา (Evagination) จากส่วนท้องของลำไส้เล็กในระยะตัวอ่อนส่วนหน้าที่ยื่นออกมานี้จะพัฒนาไปเป็นตับ และส่วนท้ายจะพัฒนาไปเป็นถุงน้ำดี (Gall Bladder) และท่อน้ำดี (Bile Duct) (สุภาพร สุกสีเหลือง, 2543) ดังแสดงในภาพที่ 5

นอกจากนี้ยังเป็นอวัยวะที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารพิษ และจับถ่ายสารพิษออกจากร่างกายกลไกของตับในการดูดซึมสารพิษจากกระแสเลือด เมื่อสารพิษเข้าสู่ตับแล้วก็จะจับกับ โปรตีนภายในเซลล์ สารพิษที่เข้าสู่ร่างกายแล้วนอกจากตับจะเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปไม่เป็นพิษ และขับออกจากร่างกายได้ แต่ก็ยังมีสารพิษบางชนิดที่ตับไม่สามารถขับออกนอกร่างกายได้ และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษมากขึ้นได้แล้วไปทำให้เกิดเป็นพิษต่อระบบต่าง ๆ (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว, ธีระยุทธ กลิ่นสุคนธ์ และปัญญา เต็มเจริญ, 2539)

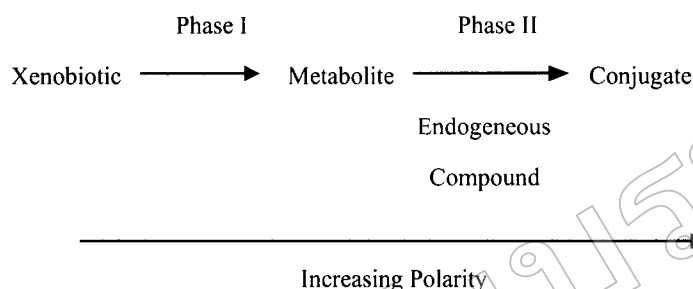
การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารประกอบฟิเอเอชในสิ่งมีชีวิต

สารพิษส่วนใหญ่ที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายนั้นจะอยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน โดยเฉพาะสารพิษในกลุ่มของสารประกอบฟิเอเอช ซึ่งสามารถละลายได้ดีในไขมันทำให้ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ง่าย และรวดเร็ว หลังจากดูดซึมเข้ากระแสโลหิตแล้วจะเข้าไปยังเซลล์ของตับ ไต ปอด และเยื่อผิวของทางเดินอาหาร จากนั้นจะมีขบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพ (Biotransformation) เกิดขึ้น ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพของสารพิษก่อนถูกขับออกจากร่างกาย (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว และคณะ, 2539)

กล่าวโดยสรุปของปฏิกิริยาเมตาบอไลต์ (Timbrell, 1999)



ขบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพ หรือการเมตาบอไลต์ของสารประกอบฟิเอเอช เกิดขึ้นได้ในอวัยวะหลายชนิด ได้แก่ ตับ ปอด ผิวหนังเยื่อทางเดินหายใจ และเยื่อทางเดินอาหาร แต่ส่วนใหญ่เมตาบอไลต์ของสารประกอบฟิเอเอช จะเกิดขึ้นในตับ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง และมีความจำเพาะต่อเมตาบอไลต์ของสารประกอบฟิเอเอช คือ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรเลส (Aromatic Hydrocarbon Hydroxylase: AHH) ซึ่งเป็นไซโครโครม พี 450

ไมโครโซมอลเอนไซม์ (Cytochrome P-450 Microsomal Enzyme)

ปฏิกิริยาแรกของเมตาบอไลต์ของสารประกอบฟิเอเอช คือ ออกซิเดชันโดยเอนไซม์

AHH ได้เอพอกไซด์ (Epoxide) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนต่อไปได้หลายวิธี คือ

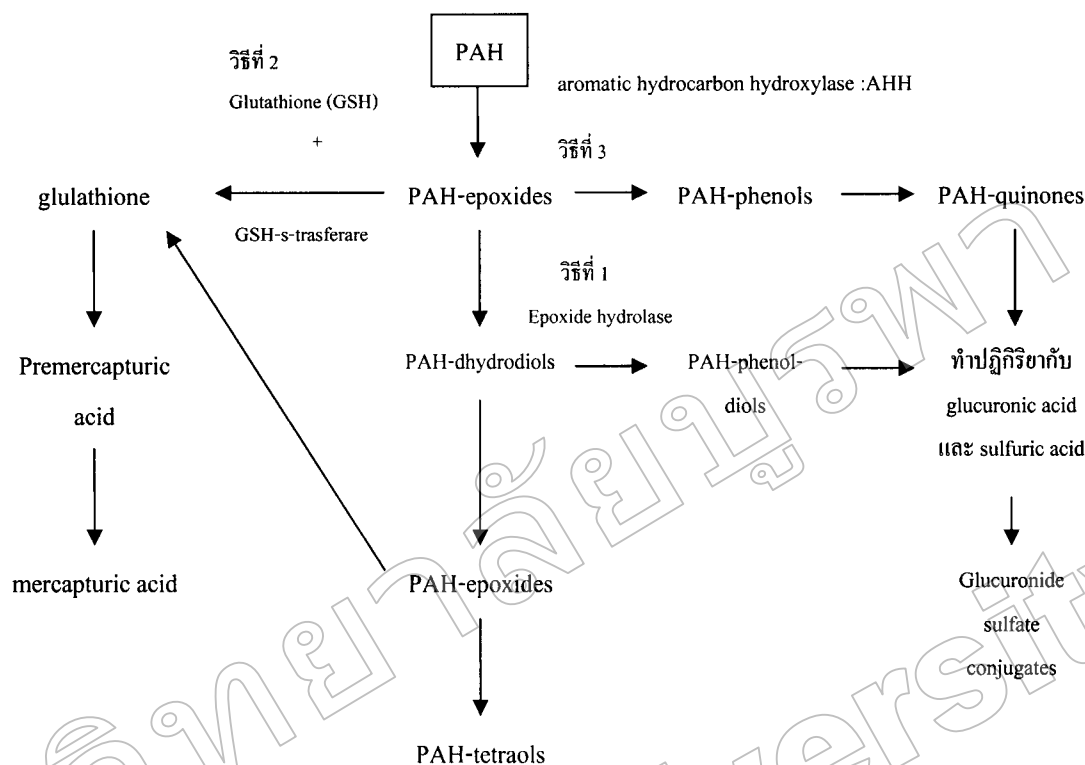
วิธีที่ 1 เอพอกไซด์ ถูกเปลี่ยนไปเป็นไดไฮโดรไดออล (Dihydrodiol) โดยเอนไซม์ เอพอกไซด์ ไฮโดรเลส (Epoxide Hydrolase) แล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกครั้งโดย AHH

ได้เป็นไดไฮโดรไดออลเอพอกไซด์ (Dihydrodiol Epoxide) ซึ่งไดไฮโดรไดออลเอพอกไซด์ ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้ 2 วิธี คือ ถูกเปลี่ยนไปเป็นเตตระโอล (Tetraols) หรือทำ

ปฏิกิริยากับ Glutathione (GSH) โดยเอนไซม์ Glutathione-S-Transferase ได้เป็น Glutathione Conjugate ซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงต่อไปหลายขั้นตอนจนได้เป็น Mercapturic Acid และถูกขับออกจากร่างกาย

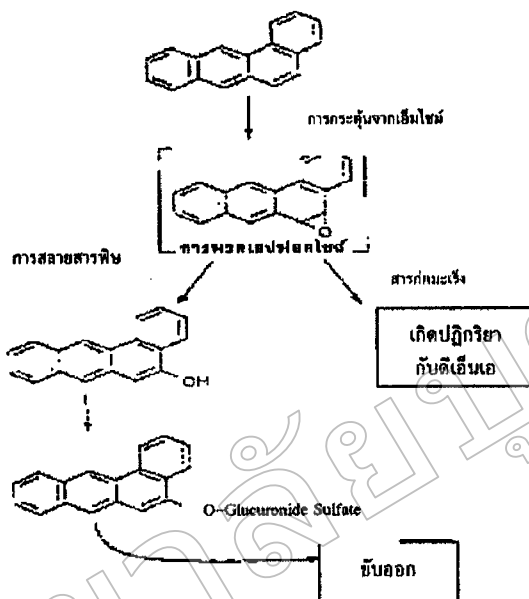
วิธีที่ 2 เอพอกไซด์ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ Glutathione-S-Transferase แล้วถูกขับออกในรูป Mercapturic Acid

วิธีที่ 3 เอพอกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็น Phenol, Quinine และ Diols ซึ่งเมตาบอไลต์ ทั้ง 3 วิธี สามารถทำปฏิกิริยากับ Glucuronic และ Sulfuric Acid ได้เป็น Glucuronide และ Sulfate Conjugates และถูกขับออกจากร่างกาย (U.S. DHHS, 1995) ดังแสดงในภาพที่ 7



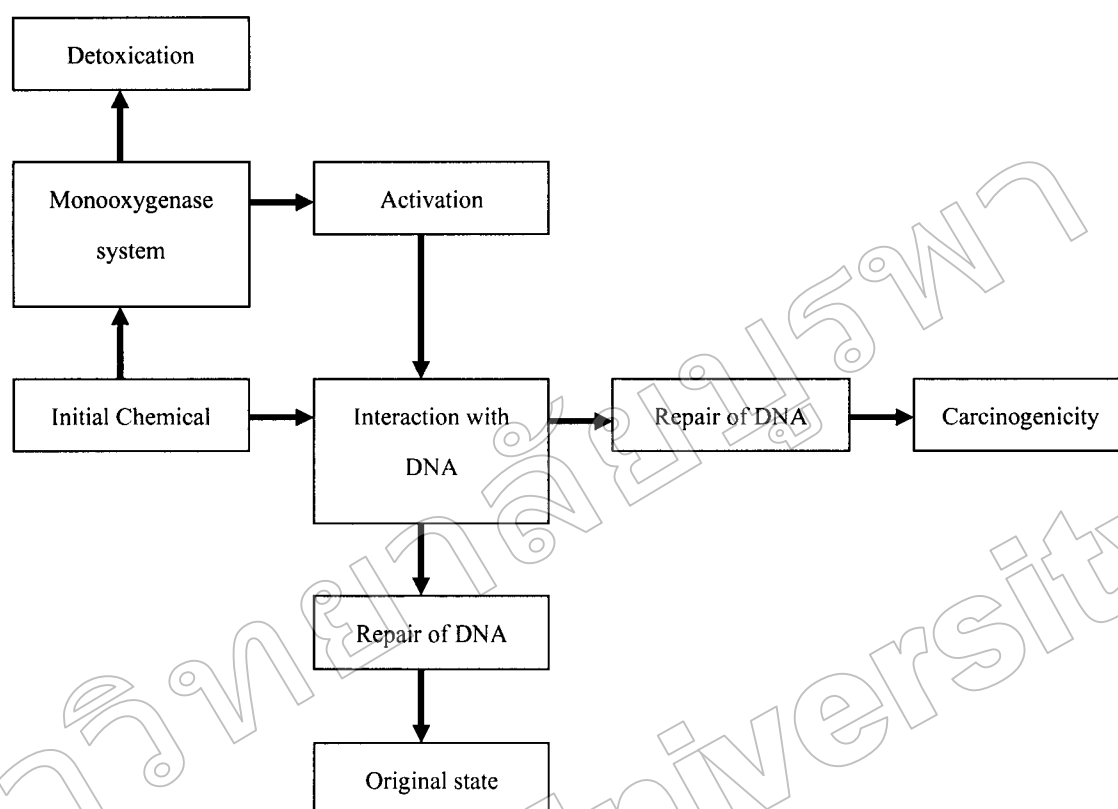
ภาพที่ 7 เมตาบอไลต์ของสารประกอบพีเอเอชในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม คัดแปลงจากเมตาบอไลต์ของเบนโซ-เอ-ไพรีน (U.S. DHHS, 1995)

กลไกการก่อมะเร็งของสารประกอบพีเอเอช เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเมตาบอไลต์ไปเป็นสารพวกเอปออกไซด์ อินเตอร์มีเดียต (Epoxide Intermediate) สารเอปออกไซด์บางรูปอาจถูกย่อยสลายต่อไปเป็นอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol) ซึ่งถูกจับโดยกรด กลูโคโลนิก เอซิด (Glucuronic Acid) ในตับกลายเป็นสารประกอบในรูปกลูโคโลนิกซัลเฟต (Glucuronidesulfate) ซึ่งละลายน้ำได้ดี และถูกขับออกได้ทางปัสสาวะ



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนรูปของสารประกอบฟิโคมก่อนถูกขับออกจากร่างกาย (U.S.DHHS, 1995)

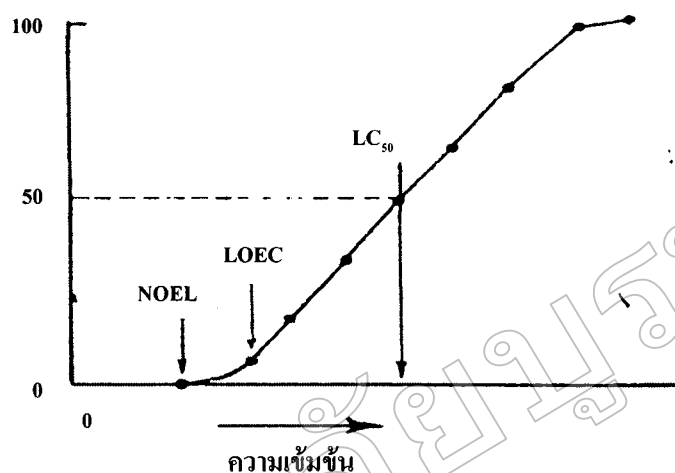
สารพิษเหล่านี้เมื่อผ่านขบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพในตับแล้ว สารใหม่ที่เกิดขึ้นจะถูกขับไปที่น้ำดี แต่กระบวนการในการขนส่งสารจากตับไปน้ำดียังไม่ทราบชัดเจน บางส่วนถูกขับออกจากร่างกาย แต่บางส่วนเมื่อผ่านขบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพแล้ว มีความเป็นพิษสูงขึ้น และจะสะสมอยู่ในส่วนของไขมันที่เป็นกลางในร่างกาย (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว และคณะ, 2539) บางชนิดเกิดเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน (Acute Effect) ซึ่งก่อให้เกิดการตายของสิ่งมีชีวิตอย่างรวดเร็ว และการเกิดการเป็นพิษอย่างเรื้อรัง (Chronic Effect) (Narro, Cerniglia, Balen, & Gibson, 1992) ได้แก่ การก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenicity) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผิดปกติ และเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenicity) เนื่องจากมีความเป็นพิษที่มีผลกับ Endocrine System ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนรูปของสารพิษก่อนถูกขับออกจากร่างกาย (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว และคณะ, 2539)

การศึกษาระดับความเป็นพิษของสารประกอบพีเอเอช

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ร่างกายได้รับกับอาการตอบสนองต่อสารพิษนั้น ทำโดยการนำสัตว์ทดลองมาสัมผัสกับสารพิษเพื่อดูว่าสัตว์ทดลองนั้นมีอาการตอบสนองต่อสารพิษอย่างไร การศึกษานั้นเริ่มต้นจากการวัดค่า LD_{50} (Mean Lethal Dose) หรือ LC_{50} (Mean Lethal Concentration) หมายถึง ปริมาณของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50% ของสัตว์ทดลองที่ใช้ทั้งหมด โดยได้รับการฉีดเข้าไปโดยตรง (LD_{50}) หรือได้รับการหายใจหรือสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำ (LC_{50}) ซึ่งจะต้องบอกถึงระยะเวลาในการได้รับสารของสัตว์ทดลองด้วย เนื่องจากสารพิษแต่ละชนิดเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมไม่เท่ากัน ทั้งอาการที่ตอบสนองต่อสารพิษก็แตกต่างกัน และอาจมีการตอบสนองได้หลายลักษณะ ในการศึกษาต้องใช้สัตว์ทดลองไม่ต่ำกว่า 10 ตัวต่อกลุ่ม ขนาด หรือปริมาณของสารเคมีจะต้องมากกว่า 3 ขนาด ซึ่งจะทำให้สัตว์ทดลองตายหมด ทำให้สัตว์ทดลองตายบางส่วน และไม่ทำให้สัตว์ทดลองตาย (มะลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)



ภาพที่ 10 ความเข้มข้นของสารที่เป็น LC₅₀, LOEL และ NOEL จากการทดลอง Dose Response Relationship (มะลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)

จากภาพที่ 10 นอกจากจะทำให้ทราบถึงปริมาณสารที่ทำให้สัตว์ทดลองมีอาการตอบสนองแล้ว สามารถประเมินความเป็นพิษเบื้องต้นของสารนั้น ๆ ได้ และหากนำสารพิษชนิดต่าง ๆ มาศึกษาเปรียบเทียบกันจากค่า LD₅₀ หรือ LC₅₀ ของสารแต่ละตัวจะทำให้ประเมินได้ว่าสารใดน่าจะเป็นพิษต่อสัตว์ทดลองมากกว่ากัน สามารถกำหนดปริมาณสารต่ำสุดที่สัตว์ทดลองได้รับแล้วไม่เป็นอันตราย ระดับความเข้มข้นของสารที่สัตว์ทดลองได้รับแล้วไม่ปรากฏอาการให้เห็น เป็นต้น

No Observed Effect Level (NOEL) หมายถึง ระดับความเข้มข้นของสารที่สัตว์ทดลองได้รับโดยไม่ปรากฏอาการให้เห็น หรือความเข้มข้นของสารพิษสูงที่สุดเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับแล้วไม่ทำให้ตาย หรือไม่เกิดแสดงอาการเป็นพิษ (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว และคณะ, 2539)

Lowest Observed Effect Level (LOEL) หมายถึง ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองแสดงอาการตอบสนอง (มะลิวรรณ บุญเสนอ, 2545)

ในการศึกษาระดับความเป็นพิษของสาร เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ (มะลิวรรณ บุญเสนอ, 2545) เช่น คุณสมบัติของน้ำ อวัยวะทดสอบ เส้นทางการสัมผัส ชนิดของสัตว์ทดลอง ตลอดจนอายุของสัตว์ทดลอง ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้ระดับความเป็นพิษของสารไม่เท่ากัน ดังการศึกษาต่อไปนี้

Montizaan (1989) ทำการศึกษาระดับความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (LC₅₀-24 hr) ของเบนโซ-เอ-ไพรีน ในปลา *Poeciliopsis lucida* พบว่า LC₅₀-24 hr มีค่าเท่ากับ 1.2-3.7 มิลลิกรัม

ต่อลิตร

Jones (1971) ทำการศึกษาระดับความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (LC_{50} -24 hr) และกึ่งเฉียบพลัน (LC_{50} -96 hr) ของเนพทาไลน์ ในปลา Mosquito พบว่า LC_{50} -24 hr และ LC_{50} -96 hr มีค่าเท่ากับ 220 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Wellen (1957) ทำการศึกษาระดับความเป็นพิษแบบกึ่งเฉียบพลัน (LC_{50} -96 hr) ของเนพทาไลน์ ในปลา Pink Salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) และกุ้ง (*Pandalus goniurus*) ในน้ำเค็ม ที่อุณหภูมิ 4, 8 และ 12 องศาเซลเซียส พบว่า LC_{50} -96 hr ในปลา Pink Salmon มีค่าเท่ากับ 1.4, 1.8 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ LC_{50} -96 hr ในกุ้ง (*Pandalus goniurus*) มีค่าเท่ากับ 2.2, 1.02 และ 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Lipnick (1998) ทำการศึกษาระดับความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (LC_{50} -24 hr) และกึ่งเฉียบพลัน (LC_{50} -96 hr) ของเนพทาไลน์ ในปลา *Pimephales promelas* พบว่า LC_{50} -24 hr และ LC_{50} -96 hr มีค่าเท่ากับ 8 และ 6.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Pickering (1989) ทำการศึกษาระดับความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (LC_{50} -24 hr) ของไพรีน ในปลา *Pimephales promelas* พบว่า LC_{50} -24 hr มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดัชนีชี้วัดของสารประกอบฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในสิ่งมีชีวิต

การศึกษาถึงชนิด และปริมาณของสารประกอบฟิเอเอชในสัตว์น้ำโดยเฉพาะปลา เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดสารประกอบฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โดยศึกษาจากตับ และน้ำดีของปลา ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

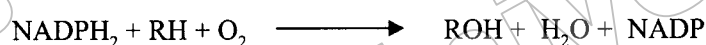
1. การเมตาบอไลต์ในน้ำดี (Bile Metabolites) คือ เมื่อปลาสัมผัสกับสารมลพิษในกลุ่มสารประกอบฟิเอเอช ร่างกายของปลาจะมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพ เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อกำจัดของเสียในกลุ่มของสารประกอบฟิเอเอช เหล่านี้ออกนอกร่างกาย บางส่วนถูกขับออกมา แต่บางส่วนถูกเก็บไว้ในถุงน้ำดี (Aas, Beyer, & Goksoyr, 1998) น้ำดีที่อยู่ในถุงน้ำดีจึงใช้เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการสัมผัสกับสารประกอบฟิเอเอชของปลา และยังสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดของสารประกอบฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้

2. ระดับปฏิกิริยา Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) เป็นวิธีการหนึ่งในการตรวจวัดเอนไซม์ไซโตโครม พี 450 (Cytochrome P-450) ซึ่งเอนไซม์เฝ้าเกิดขึ้นมาพร้อมกับสิ่งมีชีวิต พบมากที่บริเวณตับ เป็น Monooxygenase ในกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) สารแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย มีหน้าที่สำคัญต่อกระบวนการเมตาบอไลต์ในกระบวนการกำจัดสารพิษออกนอกร่างกาย คือ เมื่อมีสารแปลกปลอม (Xenobiotic) เข้าสู่ร่างกาย เช่น กลุ่มของ

สารประกอบพีเอเอช, ยาฆ่าแมลง (Pesticides), อะโรมาติก เอมีน (Aromatic Amines) เป็นต้น ร่างกายก็จะชักนำให้เกิดการสังเคราะห์เอนไซม์ไซโตโครม พี 450 อย่างรวดเร็ว ทำให้สารแปลกปลอมเหล่านี้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง สามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการป้องกัน หรือขับสารพิษที่เข้าสู่ร่างกายตามปกติ ทำให้สามารถกำจัดสารพิษเหล่านี้ออกจากร่างกายได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามมันก็ยังมีสารเคมีบางตัวที่เอนไซม์ไซโตโครม พี 450 เปลี่ยนสารพิษให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษมากขึ้นได้เช่นกัน ทำให้เกิดเป็นพิษต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย (Walker, Hopkin, Sibly, & Peakall, 2001)

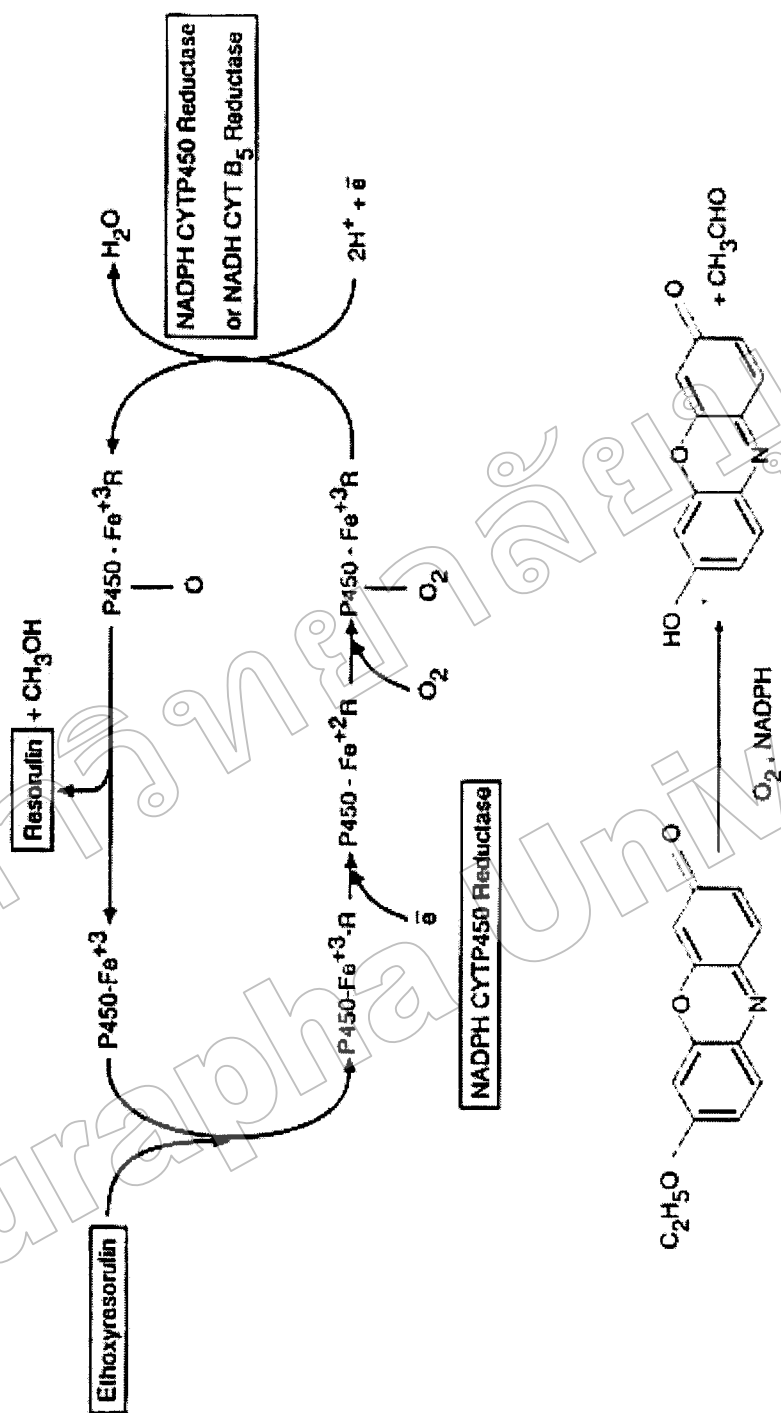
เอนไซม์ไซโตโครม พี 450 ในสิ่งมีชีวิตมีมากมายหลายชนิด เช่น เอนไซม์ไซโตโครม พี 450 พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม, เอนไซม์ไซโตโครมพี 450 1A พบในปลา เป็นต้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสิ่งมีชีวิต เราสามารถตรวจวัดระดับเอนไซม์ไซโตโครม พี 450 หรือระดับปฏิกิริยา EROD ได้ในระดับของสิ่งมีชีวิต

ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสารพิษ คือ



RH = Xenobiotics (สารพิษ)

การศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาระดับปฏิกิริยา EROD ซึ่งเป็นการตรวจวัดเพื่อประเมินผลการตอบสนองของปลานิลที่สัมผัสกับสารแปลกปลอมในกลุ่มของสารประกอบพีเอเอช เมื่อปลาได้รับสารประกอบพีเอเอช ร่างกายก็จะชักนำให้เกิดการสังเคราะห์เอนไซม์ไซโตโครม พี 450 1A (Cytochrome P-450 1A: CPY P450 1A) อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงการสเปซิฟิไอโซฟอร์ม (Specificisoform) ของโปรตีนชนิดนี้มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของสารแปลกปลอม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของสเปซิฟิไอโซฟอร์ม หรือไซโตโครม พี 450 1A จะเป็นหลักฐานการชักนำให้เกิดขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในร่างกาย (Walker et al., 2001)



ภาพที่ 11 ปฏิกริยา Ethoxyresorufin-O-Deethylase (EROD) (Stagg & McIntosh, 1998)

สารประกอบฟิเอเอชหลังจากผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพแล้ว จะมีลักษณะพิเศษ คือ มีรูปร่างแข็งแรงและสามารถเรืองแสงได้ (Aas, Beyer, & Goksoyr, 1998) ฉะนั้นจึงนำเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดจากการเรืองแสง โดยสามารถทำการตรวจวัดได้ทั้งในน้ำดี และตับ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชมากที่สุด ดังที่กล่าวข้างต้น

เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเมตาบอไลต์ในน้ำดี และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ เป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว และมีราคาถูก (Aas et al., 1998) โดยใช้หลักการตรวจวัดจากการเรืองแสง ซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นแบบความยาวคลื่นคู่ นั่นคือ ความยาวคลื่นหนึ่งใช้ในการกระตุ้น (Excitation) และอีกความยาวคลื่นหนึ่งใช้ในการดูดซับ (Emission) การเรืองแสงที่เกิดขึ้น เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

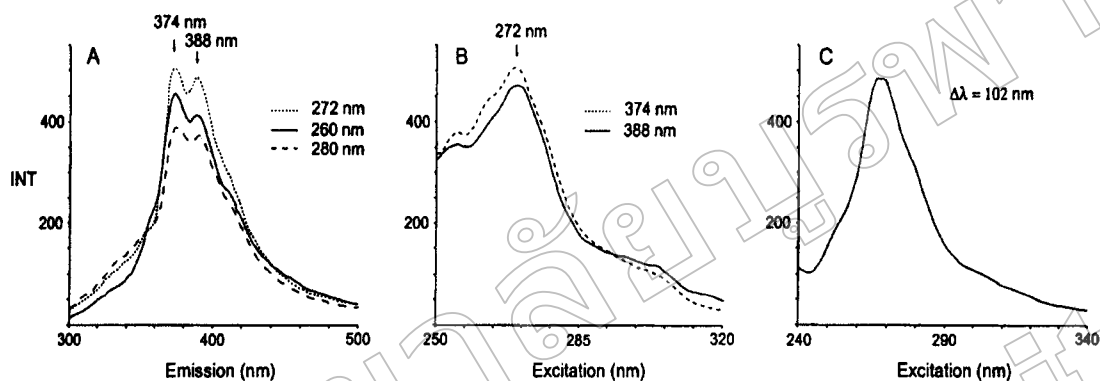
1. กำหนดค่า หรือจำเพาะเจาะจงเฉพาะความยาวคลื่นคู่ที่ตรงกับสารประกอบฟิเอเอชชนิดต่าง ๆ ที่ต้องการตรวจวัด เรียกการตรวจวัดแบบนี้ว่า Fixed Wavelength Fluorescence (FF) เหมาะสำหรับกรณีที่เราทราบความยาวคู่ที่จำเพาะกับสารประกอบกลุ่มฟิเอเอช เช่น ตรวจวัดเนพทาลินเมตาบอไลต์ ที่ Em 290/ Ex 335 นาโนเมตร, ไพรีนเมตาบอไลต์ ที่ Ex 341/ Em 383 นาโนเมตร และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ ที่ Ex 380/ Em 430 นาโนเมตร (Lin, Cormier, & Torsella, 1996)

2. กำหนดค่า หรือช่วงความยาวคลื่นคู่ ($\Delta\lambda$) แต่ไม่ได้จำเพาะเจาะจงความยาวคลื่นคู่ จะแสดงผลออกมาเป็นพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด ช่วงความคลื่นที่กำหนดเป็นมาตรฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์อยู่ที่ประมาณ 200-600 นาโนเมตร เรียกการตรวจวัดแบบนี้ว่า Synchronous Fluorescence Spectrophotometry (SFS)

การตรวจวัดระดับการเรืองแสง (Fluorescence) จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Fluorometric หรือ Fluorescence Spectrophotometer สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ Cuvette ซึ่งเป็นแบบทั่วไปใช้สำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ตัวอย่าง เหมาะกับการตรวจวัดระดับการเรืองแสงของเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา ที่ความยาวคลื่นคู่ต่าง ๆ และแบบ Plate Reader (48, 96-Well เป็นต้น) สำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสงได้หลายตัวอย่างพร้อม ๆ กัน และสามารถแสดงผลออกมาได้พร้อมกันทั้งหมด เหมาะกับการตรวจวัดระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา

Jonsson, Sundt, Aas, and Beyer (2004) ใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ สกรีนนิ่ง (Fluorescence Screening) เพื่อหาความยาวคลื่นคู่ที่เหมาะสมในการตรวจวัดระดับการเรืองแสง

ของโครซินเมตาบอไลต์ในน้ำคิของปลา Atlantic Cod (*Gadus morhua* L.) ที่สัมผัสกับโครซิน (Chrysene) พบว่า ความยาวคลื่นคู่ Ex 272/ Em 374 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นคู่ที่สามารถตรวจวัดโครซินเมตาบอไลต์ (Chrysene Metabolites) ได้มากที่สุด



ภาพที่ 12 การฟลูออเรสเซนซ์ สกรีนนิ่ง Emission Scan และ Fixed Excitation Wavelengths (a), Excitation Scan และ Fixed Emission Wavelengths (b) และ SFS $\Delta\lambda$ 102 นาโนเมตร (c) (Jonsson et al., 2004)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถใช้เทคนิค และวิธีการดังกล่าวในการตรวจสอบเบื้องต้นได้ว่าในร่างกายของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะปลาว่ามีการสะสมของสารประกอบพีเอเอชที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ หรือไม่ โดยการตรวจวัดจากระดับการเรืองแสงของเมตาบอไลต์ในน้ำคิ และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา หลังจากผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในแหล่งน้ำ การศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาในปลา เนื่องจากเป็นสัตว์น้ำมีความเสี่ยงสูงในการสัมผัสสารประกอบเหล่านี้ ปลาที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ คือ ปลานิล

ปลานิล (Nile Tilapia)

Phylum Chordata

Class Actinopterygii

Order Perciformes

Family Cichlidae

Genus *Oreochromis*

Species *Oreochromis niloticus*



ภาพที่ 13 ปลานิล (*Oreochromis niloticus*)

ปลานิล มีชื่อสามัญ Nile Tilapia และชื่อวิทยาศาสตร์ *Oreochromis niloticus* เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่ง อยู่ในตระกูล Cichlidae ถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกา มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับปลาหมอเทศ (*Tilapia mossambica*) ลักษณะพิเศษของปลานิลนั้น มีริมฝีปากบน และล่างเสมอกัน มีเกล็ด 4 แถวตรงบริเวณแก้ม และจะมีลายพาดขวางลำตัวประมาณ 9-10 แถบ เป็นปลาจำพวกกินพืช มีนิสัยชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงพบทั่วไปในแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง และทะเลสาบ เป็นปลาที่อยู่ได้ทั้งน้ำจืด และน้ำกร่อย มีความอดทน และสามารถปรับปรุงตัวให้เข้ากับธรรมชาติได้ง่าย เลี้ยงง่าย มีรสดี ออกลูกคกเจริญเติบโตได้รวดเร็ว และมีราคาถูก จึงมีผู้สนใจนิยมเลี้ยง และบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ปลาที่จะดูลักษณะเพศได้ชัดเจนนั้น ต้องมีขนาดยาวตั้งแต่ 10 เซนติเมตร

ปลานิลเป็นปลาที่กินอาหารได้ทุกชนิด ทั้งประเภทพืช และเนื้อสัตว์ โดยเฉพาะพวกอาหารธรรมชาติที่มีอยู่ในบ่อ ลูกปลานขนาดเล็ก จะกินอาหารพวกแพลงก์ตอน ตัวอ่อนแมลง ไรน้ำ ตะไคร่น้ำ และอินทรีย์วัตถุที่สลายตัวอยู่บริเวณก้นบ่อ ปลานขนาดใหญ่ จะกินพวก พืชชั้นสูง จำพวก

สาหร่าย และแห่น นับว่าเป็นการควบคุมการเจริญเติบโตของวัชพืชได้ทางหนึ่ง การเลี้ยงปลานิลในบ่อนิยมให้อาหารที่มีส่วนผสมของ ปลาป่น รำ ปลาขี้ขาว กากถั่ว และพืชจำพวก แห่น และใบกระถินแห้ง รวมทั้งเศษอาหาร และมูลสัตว์

ปลานิลเป็นปลาที่สามารถแพร่พันธุ์วางไข่ได้เร็ว กล่าวคือ ในภาวะปกติปลาที่มีอายุประมาณ 3-4 เดือน ความยาว ประมาณ 11 เซนติเมตร แม่ปลาจะเจริญเติบโตเต็มที่ และสามารถวางไข่ โดยวางไข่ได้ปีละ 8 – 11 ครั้ง ในแต่ละครั้ง จะวางไข่ประมาณ 75-250 ฟอง หลังจากปลาเพศเมียวางไข่แล้วจะอมไข่ไว้ในปากเพื่อให้ปลาเพศผู้ปล่อยน้ำเชื้อเข้าผสม ไข่ที่ผสมกับน้ำเชื้อจะฟักออกเป็นตัวภายในปากของแม่ปลา ใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน และแม่ปลาจะดูแลป้องกันภัยโดยการอมลูกไว้ในช่องปาก อีก 10-14 วัน จึงจะปล่อยออกมาภายนอก แต่เมื่อมีภัยอันตรายเกิดขึ้น ลูกปลาเหล่านี้ก็จะว่ายน้ำหลบเข้าปากแม่ ปลาชนิดนี้จึงเป็นปลาที่ให้ผลผลิตสูง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lin, Cormier, and Torsella (1996) ศึกษาเปรียบเทียบเทคนิค FF กับเทคนิค High-Performance Liquid Chromatography – Fluorescence (HPLC-F) ในการตรวจวัดเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ และเนพทาลินเมตาบอไลต์ ในน้ำดีของปลา Brown Bullhead, White Sucker และ Common Carp การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า เบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ และเนพทาลินเมตาบอไลต์ ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค FF และ HPLC-F มีค่าสัมประสิทธิ์การประเมิณ (r^2) อยู่ที่ 0.89 และ 1.00 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับสูง นั่นคือ เทคนิค HPLC-F และเทคนิค FF สามารถตรวจวัดเมตาบอไลต์ ในน้ำดีของปลาได้ สามารถเลือกใช้เทคนิคใดก็ได้ในการประเมินค่าการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอช

สถาบัน Marine Research (1996) ศึกษาผลกระทบของบริเวณ Statfjord, Oseberg และ Brent ในทะเลเหนือ ที่ใกล้ชิดกับแหล่งที่มีการผลิตน้ำมัน โดยใช้บริเวณ Egersundbanken เป็นแหล่งน้ำอ้างอิง ศึกษาในปลา 3 ชนิด คือ Atlantic Cod (*Gadus morhua*), Haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) และ Long Rough Dad (*Hippoglossoides platessoides*) จากแหล่งน้ำดังกล่าว และผ่าเอาเนื้อออกมาเจือจางที่ 1:1600 ใน 48% Ethanol ตรวจวัดระดับการเรืองแสงของเนพทาลินเมตาบอไลต์, ไพรีนเมตาบอไลต์ และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF พบว่า ปลาที่จับมาจากบริเวณที่ใกล้ชิดกับแหล่งผลิตน้ำมัน ตรวจวัดระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ได้สูงกว่าบริเวณอ้างอิง

Aas and Klunghoyr (1998) ศึกษาต่อจากสถาบัน Marine Research โดยตรวจวัดระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา Turbot และปลา Cod จับจากบริเวณที่ใกล้ชิด

กับแหล่งผลิตน้ำมันมาเปรียบเทียบกับปลารักรวมชาติทั่วไปที่อาศัยอยู่ในทะเลเหนือ ด้วยเทคนิค SFS ($\Delta\lambda 42$ นาโนเมตร) พบว่า ปลาที่ใกล้ชิดกับแหล่งผลิตน้ำมันมีระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์สูงกว่าปลารักรวมชาติทั่วไปที่อาศัยอยู่ในทะเลเหนือ นั่นคือ มีการสะสมของสารประกอบฟิเอเอชในปลาจากบริเวณ Statfjord ที่ใกล้ชิดกับแหล่งผลิตน้ำมัน

Aas, Baussant, Balk, and Liewenborg (2000) ศึกษาการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา Juvenile Cod ที่สัมผัสกับน้ำมันดิบ (Crude Oil) จากลูกสูบของเครื่องจักร (EIF Petroleum, Norway) เข้มข้น 1, 0.25 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร บันทึกผลที่ 12 และ 24 ชั่วโมง 3, 16 และ 30 วัน พบว่า ระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา มีระดับเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นที่ใช้ในการสัมผัสสูงขึ้น และมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 30 วัน

Escartin and Porte (1999) ประเมินค่าการปนเปื้อนของมลพิษในกลุ่มของสารประกอบฟิเอเอช บริเวณชายฝั่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียน (Mediterranean) ตรวจวัดระดับการเรืองแสงของสารประกอบอะโรมาติก (Fluorescence Aromatic Compound: FACs) ในน้ำดีของปลา Red Mullet (*Mullus barbatus*) และ Sea Comber (*Serranus cabrilla*) ด้วยเทคนิค Liquid Chromatography Fluorescence (LC-F) และเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) ทำการตรวจวัดระดับการเรืองแสงของเนฟทาไลน์เมตาบอไลต์, ไพรีนเมตาบอไลต์ และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี พบว่า ระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค LC-F และ GC-MS ได้ผลการศึกษาเหมือนกัน นั่นคือ ระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี ที่ตรวจวัดได้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริเวณที่เก็บตัวอย่าง คือ บริเวณเขตเมืองอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะมีระดับสูงมากกว่าบริเวณชุมชน หรือบริเวณที่ทำการเกษตร สามารถนำเทคนิค LC-F และเทคนิค GC-MS มาใช้ในการสำรวจหรือประเมินค่าการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชบริเวณชายฝั่งทะเลในเบื้องต้นได้

Yang and Baumann (2005) สำรวจการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในดินตะกอน บริเวณแม่น้ำบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม คือ Detroit, Ottawa, Black และ Cuyahoga จากแม่น้ำบริเวณต้นน้ำ คือ Ashtabula, Buffalo และ Niagara และสุดท้ายจากแม่น้ำบริเวณที่ไม่มีโรงงานอุตสาหกรรม คือ Old Woman Creek ในทะเลสาบ Erie Tributaries โดยศึกษาจากระดับการเรืองแสงของเนฟทาไลน์เมตาบอไลต์, ไพรีนเมตาบอไลต์ และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลาบริเวณพื้นท้องน้ำ (Benthic Fish) และปลา Brown Bullhead (*Ameiurus nebulosus*) จากแม่น้ำบริเวณดังกล่าว ด้วยเทคนิค FF ระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีที่

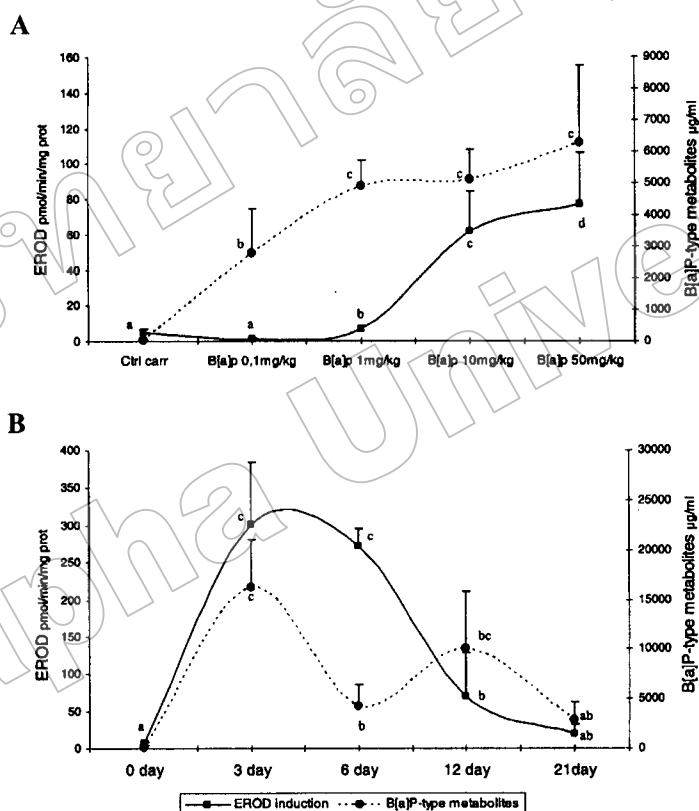
ตรวจวัดได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในดิน ตะกอนบริเวณแม่น้ำต่าง ๆ นั่นคือ แม่น้ำบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม> แม่น้ำบริเวณต้นน้ำ> แม่น้ำบริเวณที่ไม่มีโรงงานอุตสาหกรรม จากการศึกษาสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแม่น้ำ

Dissanayake and Galloway (2004) ศึกษาการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแม่น้ำ Southampton บริเวณที่มีโรงงานกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมตั้งอยู่ใกล้เคียง โดยศึกษาจากระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา Shore Crabs (*Carcinus maenas*) ที่อาศัยในบริเวณดังกล่าว ด้วยเทคนิค FF และ SFS สามารถตรวจวัดระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีได้ จากการศึกษาสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจติดตามทางชีวภาพเพื่อทราบถึงผลกระทบ และความเสียหายที่เกิดจากการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำได้

Camus, Aas, and Borseth (1998) ศึกษาถึงผลกระทบระยะยาวของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสัมผัส โดยการตรวจวัดการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF และตรวจวัดไซโตรโครม พี-450 หรือระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา Juvenile Turbot (*Scophthalmus maximus*) ที่สัมผัสกับน้ำมันดิบ เข้มข้น 0.125, 0.5 และ 2.0 มิลลิลิตรต่อลิตร พบว่า ระดับการเรืองแสงของไฟรินเมตาบอไลต์ในน้ำดี สามารถตรวจวัดได้มากเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง-4 วัน และค่อย ๆ ลดลงหลังจากสัมผัสนาน 4 วัน ส่วนการตรวจวัดไซโตรโครม พี-450 หรือระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ ค่าที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกำจัดสารพิษออกจากร่างกายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ตับ และในขณะเดียวกันร่างกายก็สามารถสะสมสารพิษไว้ได้เช่นกัน โดยเฉพาะที่ตับ การศึกษาระดับปฏิกิริยา EROD เหมาะกับการศึกษาถึงผลกระทบในระยะยาว จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพ (Biomarker) การแพร่กระจายของน้ำมันในทะเล

Gorbi and Regoli (2004) ศึกษาถึงการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติในแต่ละฤดูกาล โดยการตรวจวัดการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา European Eel (*Anguilla anguilla*) ที่จับในเดือนมกราคม, เมษายน, สิงหาคม และตุลาคม พบว่า ระดับปฏิกิริยา EROD ในตับสูงมากในเดือนสิงหาคม และตุลาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน นั่นคือ กระบวนการต่าง ๆ ในร่างกายทำงานได้น้อย การกำจัดสารพิษออกจากร่างกายเป็นไปได้ยาก สารพิษเหล่านี้จึงสะสมในร่างกายได้มาก โดยเฉพาะที่ตับ ส่วนในช่วงฤดูร้อนร่างกายมีการทำงานเป็นปกติเนื่องจากมีความร้อนมากกระตุ้นระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ จึงไม่เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่า อุณหภูมิอาจมีผลต่อระดับปฏิกิริยา EROD

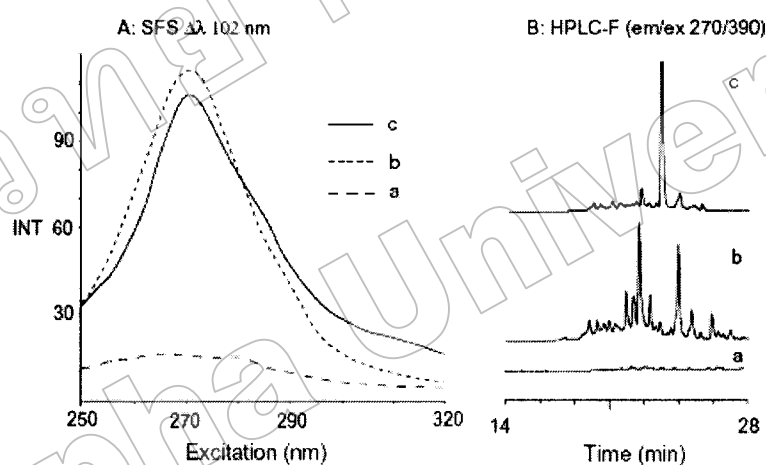
ในตับ จากนั้นทำการศึกษาต่อในห้องแล็บ โดยการฉีดเบนโซ-เอ-ไพรีน ที่ละลายด้วยน้ำมันข้าวโพด ความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร บันทึกข้อมูลในวันที่ 7 พบว่า ระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ ที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น และศึกษาต่อไปอีกโดยการฉีดเบนโซ-เอ-ไพรีน ที่ละลายด้วยน้ำมันข้าวโพด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร บันทึกข้อมูลในวันที่ 0, 3, 6, 12 และ 21 พบว่า ระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี และระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ ที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง-4 วัน และค่อย ๆ ลดลงตั้งแต่วันที่ 4



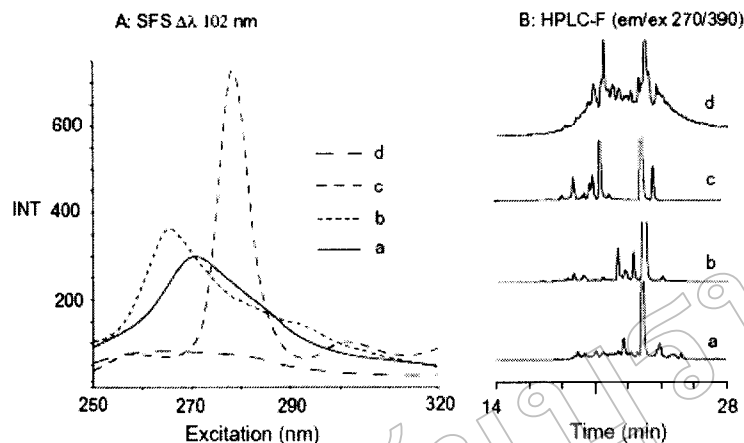
ภาพที่ 14 ระดับปฏิกิริยา EROD และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี การสัมผัสกับเบนโซ-เอ-ไพรีน ความเข้มข้นที่ระดับต่าง ๆ (A) และเบนโซ-เอ-ไพรีน ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (B) (Gorbi & Regoli, 2004)

Jonsson, Sundt, Aas, and Beyer (2004) ตรวจวัดโครซีนเมตาบอไลต์ (Chrysene Metabolites) ในน้ำดี ของปลา 4 ชนิด คือ Atlantic Cod (*Gadus morhua* L.), Flounder (*Platichthys flesus*), Plaice (*Pleuronectes platessa*) และ Sheepshead Minnow (*Cyprinodon variegatus*) ที่แช่ใน

ไครซีน (Chrysene) ที่ละลายในเป็นอะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) จากนั้นนำน้ำดีของปลามาเจือจางด้วย 50% เมทานอล อัตราส่วน 1:100 และตรวจวัดระดับการเรืองแสงของไครซีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิค SFS ($\Delta\lambda$ 102 นาโนเมตร) และเทคนิค HPLC-F ที่ Ex 270/Em 390 นาโนเมตร ทั้ง 2 วิธีสามารถตรวจวัดระดับการเรืองแสงของไครซีนเมตาบอไลต์ในน้ำดีได้ และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 15 จากนั้นทำการศึกษาต่อในปลาที่แช่ด้วย เบนโซ-เอ-แอนทราซีน (Benzo-A-Anthracene), ไพรีน (Pyrene) และฟลูออแรนทีน (Fluoranthene) และตรวจวัดระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี ด้วยเทคนิคดังกล่าว พบว่า สามารถตรวจวัดระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีได้ และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 16



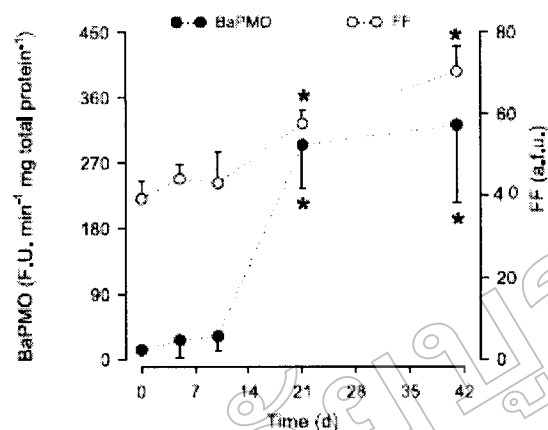
ภาพที่ 15 เทคนิค SFS (A) และเทคนิค HPLC-F (B) ปลา Atlantic Cod ที่ไม่ได้รับสารพิษ (a), ปลา Sheepshead Minnow ได้รับไครซีน (b) และปลา Atlantic Cod ได้รับไครซีน (c) (Jonsson et al., 2004)



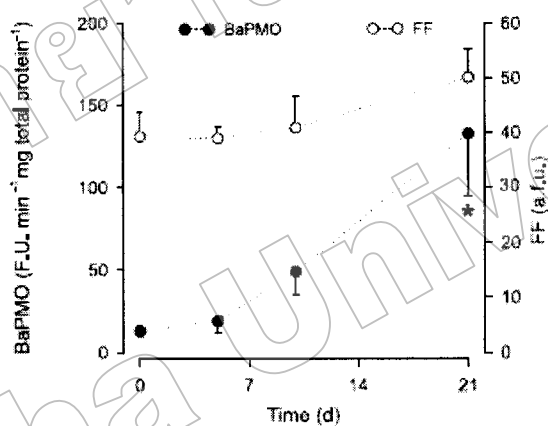
ภาพที่ 16 แสดง (A) เทคนิค SFS และ (B) เทคนิค HPLC-F ปลาที่ได้รับโครซิน (a), ปลาที่ได้รับเบน โซ-เอ-แอนทราซีน (b), ปลาที่ได้รับไพรีน (c) และ ปลาที่ได้รับฟลูออเรนอิน (d) (Jonsson et al., 2004)

Barra, Sanchez-Hernandez, Orrego, Parra, and Gavilan (2001) ศึกษาการสะสมของสารประกอบฟิเอเอซในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแม่น้ำไบร โอไบร โอ (Biobio) ประเทศชิลี (Chile) ศึกษาในภาคสนามโดยการสร้างกระชังไว้บริเวณลาโมชิตา (La Mochita) ของแม่น้ำไบร โอไบร โอ (Biobio) แล้วนำปลา Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) ลงเลี้ยงในกระชัง และศึกษาในห้องแลปโดยนำน้ำ และปลา Rainbow Trout จากบริเวณเดียวกันมาเลี้ยงในห้องแลป เปลี่ยนถ่ายน้ำ ทุก ๆ 2 วัน ทำการตรวจวัดระดับการเรืองแสงทั้งหมดของฟิเอเอซเมตาบอไลต์ (Total Biliary Fluorescence: TBF) ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF ที่ Ex 365/ Em 520 นาโนเมตร และระดับปฏิกิริยา Monooxygenase (MFO) ในตับ พบว่า ค่าที่ตรวจวัดได้จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไป มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ($r^2 = 0.68$; $p < 0.05$) เทคนิคทั้ง 2 สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามสารประกอบฟิเอเอซที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

A



B



ภาพที่ 17 การตรวจวัดระดับการเรืองแสงทั้งหมดของพีเอเอซเมตาบอไลต์ในน้ำดี และระดับปฏิกิริยา Monooxygenase (MFO) ในตับ การศึกษาในภาคสนาม (A) และการศึกษาในห้องทดลอง (B) (Barra et al., 2001)

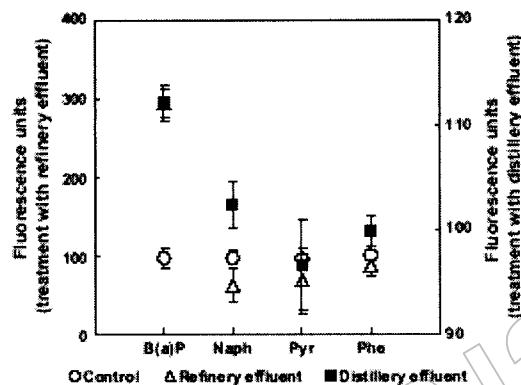
Fuentes-Rios, Orrego, Rudolph, Mendoza, Gavilan, and Barra (2005) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ และระดับการเรืองแสงของเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา *Schroederichthys chilensis* (Guichenot 1848) โดยตรวจวัดด้วยเทคนิค FF เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพของสารประกอบพีเอเอซที่ปนเปื้อนบริเวณชายฝั่งทะเลของเมือง Chilean โดยศึกษาใน 3 บริเวณ ที่มีระดับของมลพิษต่างกัน คือ 1. Dichato เป็นบริเวณที่มีการปล่อยของเสียน้อยมาก จึงใช้เป็นบริเวณอ้างอิง, 2. Cerro Verde เป็นบริเวณที่มีมลพิษมาจากโรงงานผลิตปลาป่น ของเสียจากการจับถ่าย และปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน และ 3. Lenga เป็นบริเวณที่มีมลพิษมากที่สุดมาจากโรงงานทำเหล็ก โรงงานผลิตปลาป่น และโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ รวมทั้งของเสีย

จากการจับถ่าย และปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน การศึกษาพบว่า ระดับปฏิกิริยา EROD ในตับของปลา ในแต่ละบริเวณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามระดับของมลพิษ ส่วน Liver Somatic Index (LSI) เพิ่มขึ้นที่บริเวณ Cerro, Verde และ Lenga แตกต่างอย่างมีนัย สำคัญกับบริเวณอ้างอิง ส่วนระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี พบมากที่บริเวณ Lenga ระดับการเรืองแสงของแนพทาリンเมตาบอไลต์ในน้ำดี ที่ตรวจวัดได้ไม่แตกต่างกันในทุกบริเวณ และสุดท้ายตรวจวัดระดับการเรืองแสงทั้งหมดของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี พบมากที่บริเวณ Lenga จากการศึกษาเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ และระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลาจะแปรผันตรงกับมลพิษที่ปนเปื้อนบริเวณต่าง ๆ ของชายฝั่งทะเล

Inzunza, Orrego, Penalosa, Gavilan, and Barra (2006) ศึกษาการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในตะกอนดินของแม่น้ำไบร โอไบร โอ บริเวณใจกลางประเทศชิลี เริ่มการศึกษาโดยนำตะกอนดินจากแม่น้ำไบร โอไบร โอ บริเวณโรงงานงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แบ่งเป็น 4 สถานี คือ สถานีที่ 1 เป็นบริเวณที่อยู่เหนือจากสถานีที่ 2 (Upstream) ประมาณ 700 เมตร, สถานีที่ 2 เป็นบริเวณที่มีการปล่อยของเสียโดยตรง, สถานีที่ 3 เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำจากสถานีที่ 2 (Downstream) ประมาณ 600 เมตร, สถานีที่ 4 เป็นบริเวณที่อยู่เหนือจากสถานีที่ 2 (Downstream) ประมาณ 2 กิโลเมตร และสถานีที่ 5 เป็นสถานีควบคุมใช้ดินตะกอนจากแม่น้ำ Itata ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากโรงงานอุตสาหกรรม ตรวจวัดสารประกอบพีเอเอชในดินตะกอนด้วยเครื่อง GC (FID) ของสถานีที่ 2 และ 3 เนื่องจากเป็นสถานีที่มีการปนเปื้อนของมลพิษมากที่สุด พบในช่วง 2000-7000 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของดินตะกอน และตรวจวัด %Organic Carbon ในสถานีที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 คือ 0.090, 0.810, 2.460, 0.135 และ 0.015 ตามลำดับ ในสถานีที่ 2, 3 และ 4 จะพบ Organic Carbon มากเนื่องจากเป็นบริเวณน้ำไหล และมีการพัดพาเอาดินตะกอนไปทับถม จากนั้นนำดินตะกอนจาก 5 สถานี มาใส่ในตู้กระจกที่เลี้ยงปลา Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) เอาไว้ซึ่งเป็นปลาที่อาศัยอยู่ในแม่น้ำ Biobio ประมาณ 5 กิโลกรัม สูงขึ้นมาจากพื้นตู้ ประมาณ 4-5 เซนติเมตร ในตู้กระจกบรรจุน้ำประมาณ 60 ลิตร เก็บข้อมูลที่ 0 และ 21 วัน เปลี่ยนน้ำ ทุก ๆ 7 วัน ตรวจวัดระดับเอนไซม์ไซโตโครม พี 450 1A หรือระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ และระดับการเรืองแสงทั้งหมดของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา Rainbow Trout ด้วยเทคนิค FF ค่าที่ตรวจวัดได้ พบมากในสถานีที่ 3, 4, 2 และ 1 ตามลำดับ ศึกษาการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชสามารถศึกษาได้จากสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ๆ และสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพในการปนเปื้อนของสารประกอบพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม

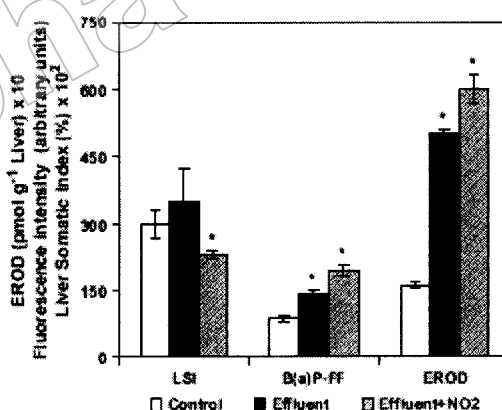
Vuorinen et al. (2006) การศึกษาเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดทางชีวภาพการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชในทะเล Baltic จากน้ำดีของปลา 3 ชนิด ใน 4 บริเวณ คือ ปลา Flounder (*Platichthys flesus*) จากบริเวณ Lithuanian Coast, Wismar Bay และ The Gulf of Gdansk, ปลา Perch (*Perca Fluviatilis*) จากบริเวณ Kvadofjarden และปลา Eelpout (*Zoarces viviparus*) จากบริเวณ Kvadofjarden, Wismar Bay, The Gulf of Gdansk และ Kvadofjarden จากนั้นนำปลาแต่ละชนิดมารวมกันแล้วแยกเป็นบริเวณ 4 บริเวณ และรวมทั้งแยกเพศ ตรวจวัด 1-OH Pyrene ในน้ำดี ด้วยเทคนิค HPLC และระดับการเรืองแสงทั้งหมดของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF พบว่า ค่าที่ตรวจวัดจากเทคนิค HPLC และเทคนิค FF เหมือนกัน คือ ในปลาเพศผู้มีระดับการเรืองแสงทั้งหมดของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดี มากกว่าในปลาเพศเมีย ในปลา Perch (*Perca Fluviatilis*) และปลา Eelpout (*Zoarces viviparus*) มีระดับการเรืองแสงทั้งหมดของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำดีเท่ากัน แต่พบน้อยที่สุดในปลา Flounder (*Platichthys flesus*) บริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟิเอเอชมากที่สุด คือ Wismar Bay, The Gulf of Gdansk, Lithuanian Coast และ Kvadofjarden (บริเวณอ้างอิง) ตามลำดับ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เทคนิค HPLC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน และเทคนิค FF ซึ่งเป็นเทคนิคแบบใหม่ นั้นคือ ทั้ง 2 เทคนิค สามารถตรวจวัดระดับการเรืองแสงของเมตาบอไลต์ในน้ำดีของปลา ที่สัมผัสกับสารประกอบฟิเอเอชได้ แต่เพศอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้แตกต่างกัน

Shailaja, Rajamanickam, and Wahidulla (2006) ศึกษาถึงผลกระทบของไนโตรเจน (NO_2) ต่อกระบวนการเมตาบอไลต์ของสารประกอบฟิเอเอชในปลา Euryhaline Fish (*Oreochromis mossambicus*) เริ่มจากนำน้ำมาเติมอากาศเพื่อไล่ไนโตรเจนออกไปให้หมด ปล่อยปลาลงไปเลี้ยงประมาณ 1 อาทิตย์ จากนั้นนำปลาไปแช่น้ำจากโรงงานกลั่นน้ำมัน (1%) และน้ำจากโรงงานสุรา (0.1%) ซึ่งเป็นน้ำที่มีไนโตรเจนผสมอยู่นาน 14 วัน ตรวจวัดระดับการเรืองแสงของเนพทาไลน์ เมตาบอไลต์, ฟิเนนทรินเมตาบอไลต์, ไพรีนเมตาบอไลต์ และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ ในน้ำดี ด้วยเทคนิค FF พบระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ทั้ง 4 ชนิด มากที่สุดในปลาที่แช่น้ำจากโรงงานสุรา (0.1%) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ระดับการเรืองแสงของพีเอเอชเมตาบอไลต์ในน้ำคี้ของปลา (Shailaja et al., 2006)

จากนั้นทำการศึกษาคือโดยนำน้ำที่ผ่านการเติมอากาศมาแล้วแบ่งออกเป็น 3 บ่อ โดยบ่อที่ 1 เติมน้ำในไตรท์ 1 มิลลิลิตร (กลุ่มควบคุม) บ่อที่ 2 เติมน้ำจากโรงงานกลั่นน้ำมัน (1%) และบ่อที่ 3 เติมน้ำในไตรท์ 1 มิลลิลิตร เพื่อให้มีโซเดียมในไตรท์ 1 ไมโครลิตร และเติมน้ำจากโรงงานสุรา (0.1%) พบว่า ระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำคี้, ระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ ในบ่อที่ 2 และ 3 และสัดส่วนระหว่างน้ำหนักตับต่อน้ำหนักตัวสูงสุดในบ่อที่ 2 ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ระดับการเรืองแสงของเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำคี้, ระดับปฏิกิริยา EROD ในตับ และสัดส่วนระหว่างน้ำหนักตับต่อน้ำหนักตัวของปลา (Shailaja et al., 2006)

Ferreira, Moradas-Ferreira, and Reis-Henriques (2006) ศึกษาถึงผลกระทบในระยะยาว และความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางชีวภาพของปลา Grey Mullet (*Mugil cephalus*) ที่สัมผัสกับสารประกอบฟิเอเอช บริเวณปากแม่น้ำ Douro ประเทศ Portugal เริ่มการศึกษาโดยจับปลาในเดือนพฤษภาคม ในปี 2001, เดือนมิถุนายน ในปี 2001, เดือนมกราคม ในปี 2002, เดือนพฤษภาคม ในปี 2002 และเดือนเมษายน ในปี 2003 แล้ววิเคราะห์ระดับการเรืองแสงของแนพทาไลน์เมตาบอไลต์, ฟิแนนทรินเมตาบอไลต์, ไพรีนเมตาบอไลต์ และเบนโซ-เอ-ไพรีนเมตาบอไลต์ในน้ำดี (นำระดับการเรืองแสงของฟิเอเอชเมตาบอไลต์ทั้งหมดมารวมกัน), ระดับปฏิกิริยา EROD (Phase I) และระดับปฏิกิริยา GST (Phase II) ในตับ และสัดส่วนระหว่างน้ำหนักตับต่อน้ำหนักตัวในทันที (Group I) จากนั้นนำปลาที่จับมาในแต่ละเดือน แช่ในน้ำสะอาดหลังจากนั้นบันทึกข้อมูลที่ 1 (Group II), 4 (Group III) และ 8 (Group VIII) เดือน จากการศึกษาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าที่ตรวจวัดได้จะลดลงเมื่อแช่ในน้ำสะอาด และมีระดับลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาในการแช่ในน้ำสะอาดมากขึ้น