



บทที่ 2

ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม : แหล่งน้ำ

ลักษณะสมบัติของปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า น้ำมันดิบ (crude oil) นั้น เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจากการทับถมกันของซากอินทรีย์ภายใต้พื้นผิวโลกเป็นเวลานานหลายล้านปี มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ จากการศึกษาถึงองค์ประกอบในน้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ พบว่าโดยทั่วไปแล้วในน้ำมันดิบจะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 83.9-86.8 % โดยน้ำหนัก และมีไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 11.0-14.0 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบ กำมะถัน, ออกซิเจน และไนโตรเจน รวมทั้งโลหะจำพวกนิกเกิลและวาเนเดียมปนอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย

ปิโตรเลียม หรือ น้ำมันดิบที่ขุดขึ้นมาจากแหล่งต่างๆ จะมีลักษณะแตกต่างกัน บางแหล่งเป็นของเหลวใสสีเหลือง สีเขียวเข้มจนถึงสีดำก็มี และมีกลิ่นกำมะถัน บางแหล่งมีลักษณะข้นเหนียวคล้ายแป้งเปียก ค่าความหนืดที่พบในน้ำมันดิบมีตั้งแต่ 0.7 จนถึงมากกว่า 42,000 เซนติพอยส์ การที่น้ำมันมีลักษณะต่างกันเนื่องจากมีองค์ประกอบแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม น้ำมันดิบจากหลุมต่างๆ มักจะมีองค์ประกอบของ gasoline (C_5-C_{10}) อยู่ประมาณ 30 % kerosene ($C_{11}-C_{15}$) ประมาณ 10 % , light distillate oil ($C_{13}-C_{20}$) ประมาณ 15 % , heavy distillate oil ($C_{20}-C_{40}$) ประมาณ 20 % และ asphaltic bitumen ($>C_{40}$) ประมาณ 25 % โดยเฉลี่ย (Yen, 1975) องค์ประกอบแต่ละชนิดนี้จะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับแหล่งของน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมีของปิโตรเลียม

เนื่องจากไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันดิบ มีนับร้อยนับพันชนิด เพื่อความสะดวกในการศึกษาจึงได้จำแนกไฮโดรคาร์บอนออกเป็นกลุ่มๆ ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีดังนี้

1) อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbons) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่โครงสร้างอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นห่วงโซ่เปิด อาจเป็นแบบโซ่ตรงหรือมีกิ่งก้าน สารกลุ่มนี้ได้แก่ อัลเคน น้ำมันดิบที่มีองค์ประกอบของสารกลุ่มนี้มากจะเรียกว่า Paraffinbase crude oil

2) อะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic hydrocarbons) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่อะตอมของคาร์บอนจับตัวกันเป็นวง มีสูตรทั่วไปคือ C_nH_{2n} น้ำมันดิบที่มีสารกลุ่มนี้มากเรียกว่า Naphthene base crude oil



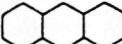
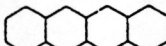
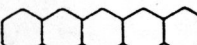
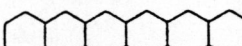






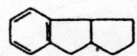
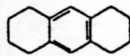

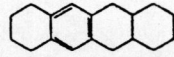

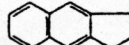

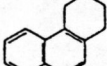
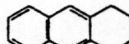
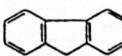

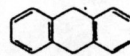
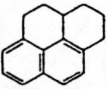
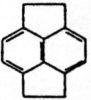
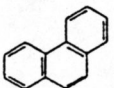
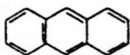

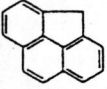

3) โอลิฟินิกไฮโดรคาร์บอน (Olefinic hydrocarbons) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่อะตอมคาร์บอนต่อกันเป็นห่วงโซ่เปิด เป็นพวกที่มีพันธะสอง (double bond) หรือพันธะสาม (triple bond) อยู่ สารกลุ่มนี้ไม่พบในน้ำมันดิบ แต่พบในผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมัน และเรียกกลุ่มนี้ว่า Aliphatic unsaturated hydrocarbons

4) อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbons) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวและมีวงแหวนเบนซีน (benzene ring) เป็นองค์ประกอบ กลุ่มนี้รวมถึงสารพวกโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ด้วย ซึ่งนับว่าเป็นกลุ่มที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากกว่ากลุ่มอื่นๆ เนื่องจากเชื่อว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogenic hydrocarbon) กลุ่มหนึ่ง บางครั้งเรียกลักษณะนี้ว่า Unsaturated cyclic hydrocarbons)

โครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนบางชนิดแสดงในรูปที่ 2.1

แหล่งกำเนิดมลภาวะจากน้ำมันในแหล่งน้ำ

น้ำมันที่เหลือจากการใช้งานในกิจกรรมต่างๆ จัดเป็นสิ่งปฏิกูลชนิดหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดความเสียหาย และอาจนำอันตรายมาสู่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำได้ โดยเฉพาะบริเวณที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น และมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาก ย่อมต้องการใช้น้ำมันในกิจกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก ผลกระทบจากน้ำมันที่เหลือใช้ต่อสภาพแหล่งน้ำก็มากขึ้นตามลำดับ ด้วย เนื่องจากการระบายน้ำทิ้งที่มีน้ำมันเจือปนอยู่ลงสู่แม่น้ำลำคลอง สำหรับการปนเปื้อนของน้ำมันในทะเลและมหาสมุทร มีสาเหตุสำคัญหลายประการ อาทิเช่น อุบัติเหตุจากการชนกันของเรือบรรทุกน้ำมัน การรั่วของน้ำมันตามเส้นทางการขนส่งน้ำมัน การสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในน่านน้ำต่างๆ รวมถึงความมั่งง่ายของมนุษย์อย่างเช่น เทน้ำมันที่ใช้แล้วทิ้งลงในแหล่งน้ำ

Compound types	Typical structures	General formula
Paraffins	$\text{CH}_3\text{-R-CH}_3$	$\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$
Monocycloparaffins		C_nH_{2n}
Dicycloparaffins		$\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$
Tricycloparaffins		$\text{C}_n\text{H}_{2n-4}$
Tetracycloparaffins		$\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$
Pentacycloparaffins		$\text{C}_n\text{H}_{2n-8}$
Hexacycloparaffins		$\text{C}_n\text{H}_{2n-10}$
Akylbenzenes		$\text{C}_2\text{H}_{2n-6}$
Benzocycloparaffins	 tetralins  indans	$\text{C}_n\text{H}_{2n-8}$
Benzdicycloparaffins	 dihydro-naphthalenes  indenes	$\text{C}_2\text{H}_{2n-10}$
Naphthalenes	 tetrahydro-acenaphthenes  cyclopentindenes  dinaphthenebenzenes	$\text{C}_n\text{H}_{2n-12}$
	 naphthalenes  trinaphthenebenzenes	
Acenaphthenes	 acenaphthenes  benzindans  perinaphthenes	$\text{C}_n\text{H}_{2n-14}$
	 tetrahydro-phenanthrenes  tetrahydro-anthracenes	
Fluorenes	 fluorenes  acenaphthalenes  dihydroanthracenes	$\text{C}_n\text{H}_{2n-16}$
	 hexahydropyrenes  tetrahydrocyclopentacenaphthylenes	
Phenanthrenes	 phenanthrenes  anthracenes  dihydrocyclopentacenaphthalenes	$\text{C}_n\text{H}_{2n-18}$
Cyclopentaphenalenes	 cyclopenta-phenalenes  cyclopentacenaphthylenes	$\text{C}_n\text{H}_{2n-20}$

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางชนิด

การล้างทำความสะอาดถังน้ำมันหรือคราบน้ำมันบนเรือลงแหล่งน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศ ที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก็อาจเข้าสู่แหล่งน้ำได้จากการชะล้างโดยฝน หรือจากการตกลงมาเอง (fallout)

ได้มีการประมาณปริมาณน้ำมันที่ลงสู่ทะเลและมหาสมุทร พบว่าในปีหนึ่งๆจะมีน้ำมันรั่วไหลลงสู่ทะเลถึง 3.2 ล้านเมตริกตัน (ค่าโดยประมาณ) หรือประมาณในช่วง 1.7-8.8 ล้านเมตริกตัน โดยมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญมาจากน้ำทิ้งจากบ้านเรือนที่ไหลลงมากับแม่น้ำอยู่ถึงประมาณ 0.7 ล้านเมตริกตัน หรือประมาณร้อยละ 21.88 ส่วนที่เหลือจะมาจากกิจกรรมต่างๆ เช่น การขนส่งน้ำมัน การขุดเจาะและสำรวจหาน้ำมัน และอุบัติเหตุ เป็นต้น รวมทั้งกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.1 และในรูปที่ 2.2) (N.A.S., 1985 อ้างถึงใน IOC/UNESCO, 1989)

โดยสรุปแล้ว อาจกล่าวได้ว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในแหล่งน้ำมาจากกิจกรรมต่างๆ ดังนี้

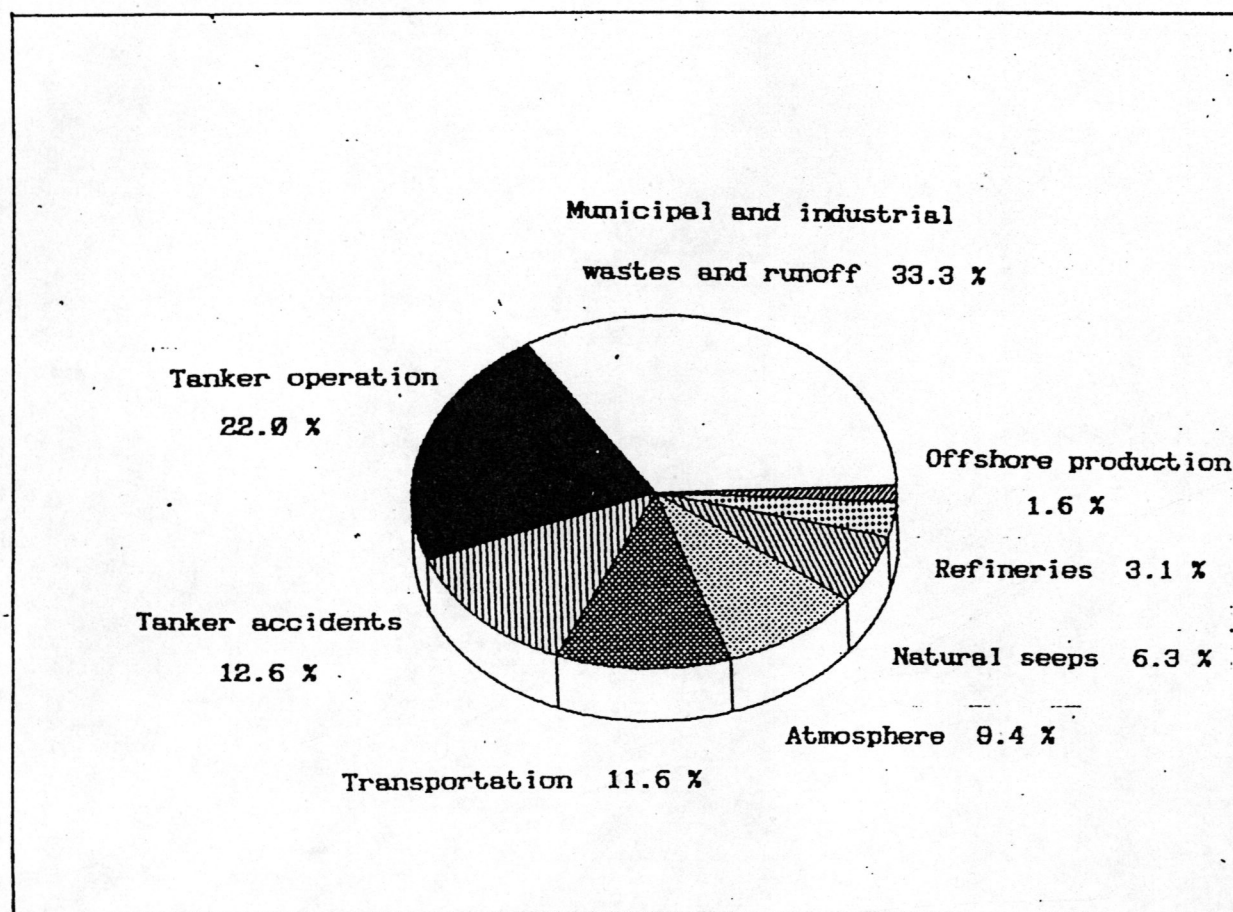
- 1) จากการขนส่งโดยเรือบรรทุกน้ำมัน ซึ่งมีโอกาสสูญเสียน้ำมันในขณะขนถ่าย
- 2) จากอุบัติเหตุเรือบรรทุกน้ำมันชนหรืออับปาง รวมทั้งการรั่วของถังน้ำมัน
- 3) การปฏิบัติการนอกชายฝั่ง เช่น การขุดเจาะน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ การแตกหรือรั่วชำรุดของท่อส่งน้ำมันใต้ทะเล
- 4) จากโรงกลั่นน้ำมัน น้ำทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมันซึ่งมีคราบน้ำมันบางส่วนปนอยู่หรือกรณีถังน้ำมันสำรองบนบกบริเวณชายฝั่งเกิดชำรุด หรือเกิดอุบัติเหตุทำให้มีน้ำมันรั่วไหลออกมา
- 5) จากการล้างทำความสะอาดถังน้ำมัน
- 6) น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่ง
- 7) น้ำทิ้งจากชุมชน รวมทั้งจากการชะล้างคราบน้ำมันบนถนนหนทางในเขตเมือง
- 8) จากบรรยากาศ
- 9) จากกระบวนการซึมผ่านตามธรรมชาติ (seepage)

มีการศึกษาพบว่าไฮโดรคาร์บอนที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อม นอกจากจะมีสาเหตุมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ดังกล่าวแล้ว ในกระบวนการตามธรรมชาติที่มีการสร้างไฮโดรคาร์บอนได้เองด้วย เช่น จากการสังเคราะห์ของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ อาทิเช่น แบคทีเรีย และไฟโตแพลงตอนบางชนิด สามารถสังเคราะห์อัลเคนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอน C_{15} , C_{17} , C_{19} และ C_{21} ได้ (Farrington, 1975; Risebrough, 1983) หรือการสังเคราะห์อัลเคน

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ลงสู่ทะเลและมหาสมุทร (ล้านเมตริกตันต่อปี)

แหล่งกำเนิด	ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน	ค่าเฉลี่ย
แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ		
การซึมผ่านตามธรรมชาติ	0.02-2.0	0.2
การพังทลายของชั้นดิน (ปริมาณรวม)	0.005-0.5 (0.025-2.5)	0.05 (0.25)
การปฏิบัติการนอกชายฝั่ง	0.04-0.06	0.05
การคมนาคมและการขนส่งทางเรือ		
การขนส่งน้ำมัน	0.4-1.5	0.7
กิจการเรือ	0.02-0.05	0.03
ท่าเทียบเรือ	0.01-0.03	0.02
น้ำมันจากท้องเรือ	0.2-0.6	0.3
อุบัติเหตุจากเรือบรรทุกน้ำมัน	0.3-0.4	0.4
อุบัติเหตุทางน้ำที่ไม่ใช่เรือบรรทุกน้ำมัน (ปริมาณรวม)	0.02-0.04 (0.95-2.62)	0.02 (1.47)
บรรยากาศ	0.05-0.5	0.3
น้ำทิ้งจากชุมชนและอุตสาหกรรม		
น้ำทิ้งจากชุมชน	0.4-1.5	0.7
โรงกลั่นน้ำมัน	0.06-0.6	0.1
โรงงานอุตสาหกรรม ที่ไม่ใช่โรงกลั่นน้ำมัน	0.1-0.3	0.2
น้ำทิ้งจากบ้านเรือน	0.01-0.2	0.12
จากแม่น้ำ	0.01-0.5	0.04
จากการทิ้งลงทะเล (ปริมาณรวม)	0.005-0.02 (0.585-3.12)	0.02 (1.18)
ปริมาณรวมทั้งหมด	1.7-8.8	3.2

ที่มา : N.A.S., 1985 อ้างถึงใน IOC/UNESCO, 1989.



รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากแหล่งต่างๆ ที่ลงสู่ทะเล

ที่มา : N.A.S., 1985 อ้างถึงใน IOC/UNESCO, 1989

ในกลุ่ม C_{25} , C_{27} , C_{29} และ C_{31} ของพืชบกจำพวก marsh grasses (Jones, 1983; Risebrough, 1983, Readman, 1986; Ajayi, 1987) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในทะเลและพืชบกบางชนิดยังสามารถสังเคราะห์สารพวกโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนบางตัวได้อีกด้วย (Farrington, 1975)

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาถึงการปนเปื้อนของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในสภาพแวดล้อม อาจให้ข้อสังเกตบางประการเกี่ยวกับความแตกต่างระหว่างไฮโดรคาร์บอนจากปิโตรเลียมและจากธรรมชาติเป็นส่วนประกอบในการวิเคราะห์ดังนี้ (Ocean Affairs Board, 1975)

1) ปิโตรเลียมจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างของโมเลกุลในช่วงกว้าง และยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจสังเกตได้จากการมี hump ปรากฏในโครมาโตแกรม ซึ่งเป็นลักษณะของสารประกอบพวก UCM

2) ไฮโดรคาร์บอนจากปิโตรเลียมจะประกอบด้วย จำนวนคาร์บอนอะตอมที่เรียงติดต่อกันไป (homologous series) และมีความเข้มข้นของสารนอร์มัลอัลเคนแต่ละตัวใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนเลขคู่และเลขคี่มีค่าเป็นหนึ่ง หรือใกล้เคียงหนึ่ง ในขณะที่ไฮโดรคาร์บอนในธรรมชาติจะแสดงลักษณะของคาร์บอนเลขคี่มีปริมาณสูงกว่าคาร์บอนเลขคู่มาก

3) ปิโตรเลียมจะประกอบด้วยไซโคลอัลเคนและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมากกว่าที่พบในธรรมชาติ โดยเฉพาะสารประกอบพวก alkyl-substituted ring เช่น mono- และ poly-alkylated benzenes และแนพทาซีน ซึ่งจะไม่พบในธรรมชาติเลย

4) ปิโตรเลียมประกอบด้วยสารพวกแนพทีนอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะไม่พบไฮโดรคาร์บอนพวกนี้จากการสังเคราะห์โดยสิ่งมีชีวิต

พฤติกรรมและการกระจายของน้ำมันในแหล่งน้ำ

เมื่อน้ำมันรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะเกิดกระบวนการต่างๆ ทั้งทางฟิสิกส์ เคมีและชีวภาพ ต่อน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างๆ กระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วย การระเหย (evaporation), การกระจาย (spreading), การเกิดอิมัลชัน (emulsification), การละลาย (solution), การตกตะกอน (sedimentation), การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (chemical oxidation) การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (biodegradation), การดูดซับและการสะสมโดยสิ่งมีชีวิต (uptake and accumulation by organism) รวมทั้ง

การสะสมและการกำจัดของเสียจากสิ่งมีชีวิต เป็นต้น (พฤติกรรมของน้ำมันในแหล่งน้ำ แสดง ดังรูปที่ 2.3)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป อาจแสดงได้ในรูปของสมการแบบ first order equation ดังนี้ (Geyer, 1980)

$$d_c/d_t = (K_v, K_e, K_d, K_p, K_b) C$$

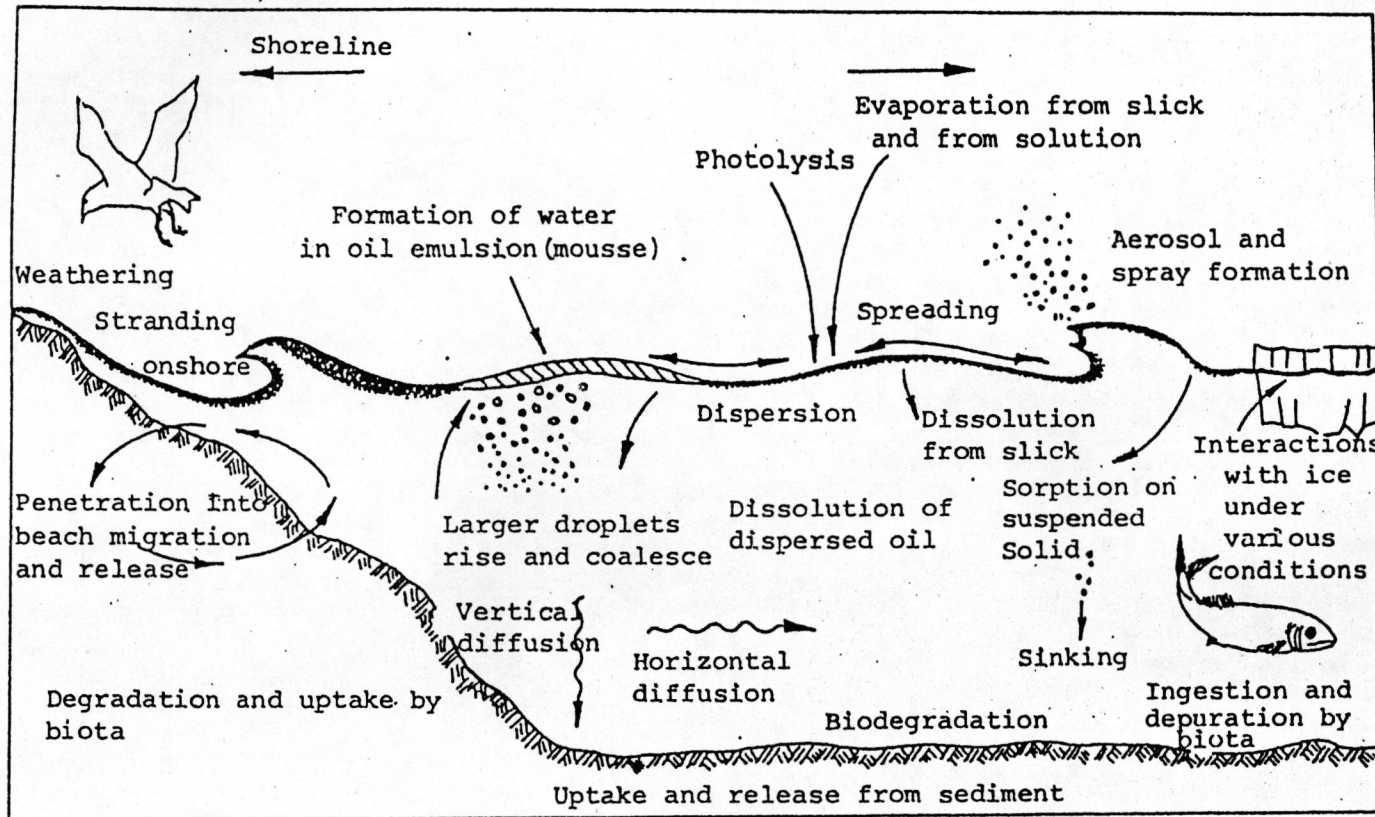
โดย ค่า K_v หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการระเหย
 K_e หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการเกิดอิมัลชัน
 K_d หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการละลาย
 K_p หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมีกัล
 K_b หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต

อัตราในการเกิดกระบวนการต่างๆ เหล่านี้จะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น องค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนในน้ำมัน สภาพอุณหภูมิกายของแหล่งน้ำ เช่น คลื่น ลม กระแส น้ำ และอุณหภูมิ เป็นต้น แต่โดยทั่วไปกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วแทบจะทันทีที่มีการรั่วไหลของน้ำมัน เช่น การแผ่กระจาย การละลาย และการระเหย ส่วนกระบวนการทางชีวภาพมักจะเกิดขึ้นภายหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของน้ำมันแล้ว การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแผ่กระจายของสารไฮโดรคาร์บอนในรูปต่างๆ ในสถานะแวดล้อม

~~ก~~ กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี

1. การแผ่กระจายตัวของน้ำมัน

น้ำมันที่ถูกทิ้งลงในน้ำจะเกิดเป็นคราบปกคลุมผิวน้ำ เนื่องจากองค์ประกอบในน้ำมันส่วนใหญ่ มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยมาก อิทธิพลจากกระแส น้ำ คลื่น



รูปที่ 2.3 แสดงพฤติกรรมของน้ำมันเมื่อไหลลงสู่แหล่งน้ำ

ที่มา : Smith, 1983

และลม จะเป็นตัวทำให้คราบน้ำมันแผ่กระจายออกเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ การแผ่กระจายของน้ำมัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณน้ำมันที่รั่ว คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน ระยะเวลา และสภาพธรรมชาติ เช่น ความเร็วลม เป็นต้น ตัวอย่างเช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงและค่อนข้างหนัก จะแผ่กระจายไปบนผิวน้ำได้ช้ากว่าน้ำมันที่มีค่าความหนืดต่ำๆ หรือในกรณีที่น้ำมันมีองค์ประกอบของ ไฮโดรเจน กำมะถันและออกซิเจนอยู่ จะทำให้น้ำมันสามารถเคลื่อนไปบนผิวน้ำได้ดี เนื่องจากสารประกอบพวกนี้มีแรงตึงผิวสูง

2. การระเหย

การระเหย เป็นกระบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้นทันทีที่มีการรั่วของน้ำมันเช่นเดียวกับการแผ่กระจายบนผิวน้ำ ไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่ำกว่า C_{15} (จุดเดือดต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส) จะระเหยไปจากผิวน้ำภายในเวลาไม่กี่วัน ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง $C_{15}-C_{25}$ (จุดเดือดระหว่าง 250-400 องศาเซลเซียส) จะระเหยได้เพียงเล็กน้อย และสำหรับไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอนมากกว่า C_{25} (จุดเดือดสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส) นั้น แทบจะไม่สามารถระเหยได้เลย

อัตราการระเหยของน้ำมันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วลม ปริมาณแสงแดด ความหนาของชั้นน้ำมัน และองค์ประกอบในน้ำมัน

3. การละลาย

ไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้แตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติแล้วกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะสามารถละลายน้ำได้ดีกว่ากลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ตัวอย่างค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนบางชนิด แสดงในตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอน ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จำนวนอะตอมของคาร์บอน , โครงสร้างของโมเลกุล, ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนบางชนิด

ชนิดของไฮโดรคาร์บอน	ความสามารถในการละลายน้ำ (ppm.)
อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	
นอร์มัล-เพนเทน ($n-C_5$)	40
นอร์มัล-เฮกเซน ($n-C_6$)	10
นอร์มัล-เฮปเทน ($n-C_7$)	3
นอร์มัล-ออกเทน ($n-C_8$)	1
นอร์มัล-โคเดเคน ($n-C_{12}$)	0.01
นอร์มัล-ไตรอะคอนเทน ($n-C_{30}$)	0.002
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	
เบนซีน	1,800
โทลูอิน	500
ไซลีน	175
อัลคิลเบนซีน	50
แอนทราซีน	0.075
ไครซีน	0.002

ที่มา : Ocean Affairs Board , 1975

ค่าความสามารถในการละลายที่แสดงในตารางข้างบนเป็นค่าที่ได้จากการละลายในน้ำกลั่น ส่วนความสามารถในการละลายในน้ำทะเลนั้นจะน้อยกว่าในน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 12-30 %

กระบวนการละลายของไฮโดรคาร์บอนในน้ำ นอกจากจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น อิทธิพลของกระแสลม สภาพของแหล่งน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้การย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนทางเคมีและชีวภาพก็มีส่วนสำคัญต่อการละลายด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันจะให้สารที่มีชี้ออกมาซึ่งสารที่มีชี้อนี้จะมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงขึ้น เช่น แนพทาลีน เมื่อถูกออกซิไดซ์เป็นแอลฟา-แนพทอล จะมีค่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นจาก 32 ppm. เป็น 740 ppm. เป็นต้น

4. การเกิดอิมัลชัน

เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ การกระจายของน้ำมันในน้ำจึงเกิดในลักษณะของอิมัลชัน อนุภาคของน้ำมันที่กระจายในน้ำ (oil-in-water) เกิดจากอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำ มีการศึกษาพบว่าอนุภาคของน้ำมันที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร ไปจนถึงหลายมิลลิเมตร สามารถกระจายไปได้ไกลเกินกว่า 200 กิโลเมตร สำหรับอิมัลชันชนิดที่อนุภาคของน้ำกระจายอยู่ในชั้นน้ำมัน (water-in-oil) จะเกิดขึ้นบริเวณผิวน้ำที่มีคราบน้ำมันลอยอยู่เป็นชั้นค่อนข้างหนา ซึ่งมักเป็นน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือ residue oil มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งที่เรียกว่า "chocolate mousse" (Ocean Affairs Board, 1975)

5. การเกิดน้ำมันดิน (tar)

น้ำมันดิน เป็นไฮโดรคาร์บอนส่วนที่เหลืออยู่หลังจากเกิดกระบวนการต่างๆ แล้วในช่วงเวลาหนึ่ง น้ำมันบางชนิดจะไม่ปรากฏลักษณะของน้ำมันดินให้เห็น เนื่องจากมีครึ่งชีวิตสั้น น้ำมันดิบที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนเพียงเล็กน้อย หรือไม่มีเลย จะไม่เกิดน้ำมันดิน อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะมีประมาณ 30 % ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดที่รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ

ในบริเวณที่มีกระแสน้ำรุนแรงจะทำให้ น้ำมันดินแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ และจะกระจายอยู่ในน้ำในระดับความลึกต่างๆ แต่ปริมาณน้ำมันดินส่วนที่กระจายในน้ำ มีปริมาณค่อนข้างต่ำ กระบวนการที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำมันดิน คือ การตกตะกอน เนื่องจากองค์ประ-

กอบส่วนใหญ่ของน้ำมันดินเป็นสารพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงสามารถจมลงสู่ท้องน้ำและทับถมในชั้นดินตะกอน นอกจากนี้ น้ำมันดินส่วนหนึ่งจะถูกกระแส น้ำและคลื่นลมพัดพาเข้าสู่ฝั่ง ทำให้ชายฝั่งสกปรก เป็นการทำลายทัศนียภาพที่สวยงาม

6. การตกตะกอน

การที่น้ำมันเกิดการตกตะกอนได้นั้นเนื่องจากมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก 3 กระบวนการใหญ่ๆ คือ

- 1) การระเหย และการละลายขององค์ประกอบที่เบากว่า
- 2) การรวมตัวกันของอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ
- 3) การดูดซับและการดูดซึม (adsorption and absorption) ไฮโดรคาร์บอนของอนุภาคแขวนลอย

ภายหลังจากที่น้ำมันเกิดการระเหย การละลาย และกระบวนการอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้ว สารที่เหลือจากกระบวนการเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นสารกึ่งของแข็ง หรือน้ำมันดินลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ น้ำมันดินนี้จะแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ และจมลงสู่ท้องน้ำดังกล่าวแล้วข้างต้น ส่วนอนุภาคของน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำจะสามารถรวมตัวหรือเกาะรวมกับสารแขวนลอยได้ กระบวนการนี้จึงมีความสำคัญต่อการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนจากผิวน้ำมาก โดยเฉพาะในบริเวณเอสทูรี เนื่องจากบริเวณนี้มีปริมาณของตะกอนแขวนลอยสูงมาก

ในกระบวนการดูดซับและดูดซึมนั้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด (เล็กกว่า 44 ไมโครเมตร) จะสามารถดูดซับหรือดูดซึมไฮโดรคาร์บอนได้ดีที่สุด โดยเฉพาะอนุภาคเคลย์ที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ

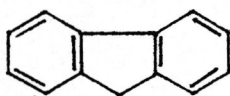
จากการศึกษาพฤติกรรมของน้ำมันที่ทับถมในดินตะกอน พบว่าน้ำมันสามารถซึมผ่านลงไปชั้นดินตะกอนได้ โดยที่ความสามารถในการซึมผ่านดินตะกอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตะกอน กล่าวคือ ตะกอนที่ประกอบด้วยทรายและกรวดมาก จะทำให้การซึมเกิดขึ้นได้ดีกว่าตะกอนที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ลักษณะของตะกอนที่ซับน้ำมันไว้ได้มากที่สุดหรือมีการซึม น้อยที่สุดเป็นตะกอนที่มีขนาดอนุภาคเล็กละเอียด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้มากนั่นเอง ส่วนตะกอนที่มีขนาดใหญ่ นอกจากจะเกิดการซึมได้ดีแล้ว ยังมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงอีกด้วย เพราะตะกอนขนาดใหญ่จะมีการไหลเวียนของธาตุอาหารและอากาศผ่านได้อย่างสะดวก

ปัจจัยสำคัญที่มีต่อการคงสภาพของน้ำมันในชั้นตะกอนนั้นคือ อัตราการย่อย

สลายทางชีวภาพ โดยบริเวณผิวของชั้นตะกอนจะเกิดการย่อยสลายของสารไฮโดรคาร์บอนได้เร็วมาก ส่วนชั้นที่ลึกลงไปซึ่งจะอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน การย่อยสลายจะเกิดได้ช้า เนื่องจากมีกิจกรรมของพวกจุลินทรีย์ต่ำมาก ทำให้น้ำมันที่อยู่ในชั้นที่ลึกลงไปสามารถคงสภาพได้เป็นเวลานานๆ ปี

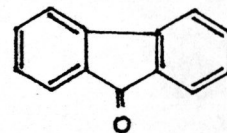
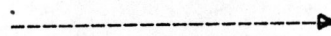
7. ปฏิกิริยาฟोटอออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาฟोटอออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาเริ่มแรกในกระบวนการย่อยสลายน้ำมัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดขององค์ประกอบในน้ำมัน เช่น สารพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จะถูกเปลี่ยนสภาพโดยพลังงานจากแสงอาทิตย์ ได้เร็วกว่ากลุ่มของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน และกลุ่มของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดที่โครงสร้างโมเลกุลมีกิ่งก้าน จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าชนิดที่เป็นโซ่ตรงเป็นต้น ช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีผลต่อการย่อยสลายน้ำมัน เป็นคลื่นแสงช่วงอุลตราไวโอเลต ส่วนช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากกว่า 350 นาโนเมตร จะไม่มีผลต่อการย่อยสลายของน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ ได้แก่ กรดคาร์บอกซิลิก อัลกอฮอล์ คีโตน และฟีนอล สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าน้ำมัน

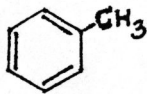


fluorene

sunlight

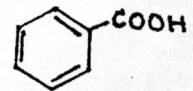
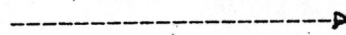


fluorenone



toluene

sunlight



benzoic acid

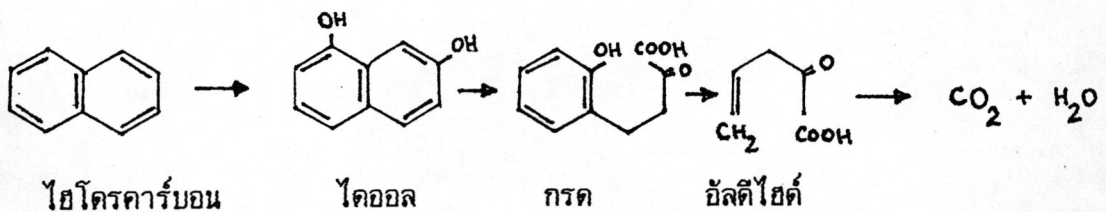
ข. กระบวนการทางชีวภาพ

1. การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ไฮโดรคาร์บอนและอนุพันธ์จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายในอัตราที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน จำนวนหรือปริมาณจุลินทรีย์ รวมทั้งสภาพแวดล้อมต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความเค็ม คลื่น และแสงแดด จะส่งผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและ เคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกด้วย

การเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งน้ำมันให้ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงอัตราการย่อยสลายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้อัตราการระเหยของไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น และยังทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง เป็นผลทำให้น้ำมันเกิดอิมัลชันได้มากขึ้น ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของน้ำมัน ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้มากขึ้น

สำหรับกลไกในการย่อยสลายน้ำมันโดยจุลินทรีย์นั้น จะแตกต่างกันไปตามชนิดของไฮโดรคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ในการศึกษาถึงแนวทางในการย่อยสลายของสารพาทอะโรมาติก และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน พบว่า ในขั้นแรกสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไดออล จากนั้นจะมีการแตกของวงแหวนได้เป็นกรดและอัลดีไฮด์ ตามลำดับ



ส่วนสารพาทอัลเคนจะถูกออกซิไดซ์เป็นอัลกอฮอล์ และกรดไขมัน ซึ่งในที่สุดจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนในการสร้างความเจริญเติบโตและให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Gibson, 1976 อ้างถึงใน Geyer, 1980)

2. การดูดซับและการสะสมโดยสิ่งมีชีวิต

สารไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้จะอยู่ในลักษณะต่างๆ

คือ ในรูปของสารละลาย ทรายน้ำมันที่ลอยอยู่บนน้ำ อนุภาคที่กระจายในน้ำและในรูปของตะกอน เป็นต้น โดยมีการถ่ายทอดสู่ห่วงโซ่อาหารจากกระบวนการต่างๆ ดังนี้

- 1) การดูดซับบนอนุภาคต่างๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ
- 2) การดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ละลายหรือที่กระจายในน้ำเข้าสู่ร่างกาย

โดยผ่านทางเหงือก

- 3) การกลืนหรือกินน้ำที่มีไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนอยู่เข้าไปโดยตรง

จากการทดลองทางชีววิธี (bioassay) โดยเลี้ยงหอยแมลงภู่ในบ่อเพาะเลี้ยงที่ เติมน้ำมันเตาเบอร์ 2 ลงไปในน้ำ พบว่า หอยแมลงภู่จะดูดซับไฮโดรคาร์บอนพวกพาราฟินเข้าไปในร่างกาย และเมื่อย้ายหอยแมลงภู่ไปเลี้ยงในบ่อที่ใส่น้ำสะอาดเป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่าปริมาณไฮโดรคาร์บอนในเนื้อเยื่อหอยมีค่าลดลง แสดงว่าหอยแมลงภู่สามารถกำจัดไฮโดรคาร์บอนออกจากร่างกายได้ เมื่ออยู่ในน้ำที่สะอาด และเมื่อเปลี่ยนชนิดน้ำมันเป็นน้ำมันเตาเบอร์ 5 พบว่า การดูดซับไฮโดรคาร์บอนของหอยแมลงภู่ จะน้อยกว่าชนิดแรก (Ocean Affairs Board, 1975) จากการศึกษาพบอีกว่า ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปสารละลาย จะถูกหอยแมลงภู่ดูดซับได้เร็วกว่ารูปอื่นๆ และเมื่อพักหอยแมลงภู่ในน้ำสะอาด ไฮโดรคาร์บอนที่ถูกดูดซับเข้าไป จะถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะโครงสร้างเดิม แสดงว่าไม่เกิดการเมตาโบไลส์ของสารไฮโดรคาร์บอนในตัวหอย

• ผลกระทบของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

การรั่วไหลของน้ำมันลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดผลเสีย 2 ทาง คือ ประการแรก สูญเสียทรัพยากรน้ำมัน อีกประการหนึ่งที่สำคัญมากคือ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสภาพแวดล้อมทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ

ก. ผลกระทบทางด้านกายภาพ

ทรายน้ำมันที่ล่องลอยบนผิวน้ำทำให้เกิดความสกปรกต่อเรือ และสิ่งมีชีวิตที่หากินบริเวณผิวน้ำรวมทั้งนกทะเลด้วย และเมื่อทรายน้ำมันเหล่านี้ถูกกระแสคลื่นและลมพัดพาเข้าสู่ฝั่ง จะทำให้ชายฝั่งสกปรก

ตามปกติทรายน้ำมันที่ปกคลุมผิวน้ำมักมีสีเข้มกว่าน้ำ ทำให้ชั้นน้ำมันสามารถดูด

กลิ่นรังสีดวงอาทิตย์ไว้ได้มากกว่าน้ำ เป็นผลให้บริเวณผิวน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ มักเกิดกับแหล่งน้ำที่ค่อนข้างเล็กและแคบ เช่น อ่าวเล็ก ๆ แม่น้ำลำคลอง เป็นต้น บางครั้ง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้มากพอที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ จากข้อมูลที่ได้ศึกษาพบว่าบางแห่งอุณหภูมิ อาจเพิ่มสูงขึ้นถึง 9 องศาเซลเซียส ในเขตอบอุ่น ผลของการเพิ่มอุณหภูมิมีก่ไม่ค่อยสำคัญนัก แต่ในบริเวณที่มีกระแสน้ำเย็นไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลมาก เช่น ถ้าอุณหภูมิ เพิ่มมากเกินไปจะทำให้ปลาที่อาศัยอยู่ในกระแสน้ำเย็นปรับตัวไม่ทัน และอาจตายได้ กรณีที่ อุณหภูมิเพิ่มไม่มากนัก ก็อาจมีผลต่อการกินอาหาร การวางไข่ และการฟักไข่ได้

ชั้นน้ำมันที่ปกคลุมผิวน้ำยังเป็นแผ่นกั้นระหว่างน้ำกับบรรยากาศ ทำให้ไม่เกิด การแลกเปลี่ยนของกาซออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้คราบน้ำมันยังบดบัง แสงอาทิตย์ไม่ให้ผ่านลงไปใต้น้ำที่ระดับลึกลงไปอีกด้วย พืชจึงไม่สามารถสังเคราะห์อาหารได้ โดยเฉพาะพืชเล็ก ๆ จำพวกสาหร่ายเมื่อลดจำนวนลงจะทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ในห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากปริมาณอาหารของสิ่งมีชีวิตที่สูงกว่ามีไม่เพียงพอ และการที่ไม่เกิดการสังเคราะห์แสงยัง ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำแทบทุกชนิด

ข. ผลกระทบทางด้านเคมี

คุณสมบัติในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอน มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในแง่ ของความเป็นพิษ กล่าวคือ ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของสารละลายจะมีพิษหรือเป็นอันตรายต่อ สิ่งมีชีวิตมากกว่ารูปอื่น ๆ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตสามารถรับสารไฮโดรคาร์บอนเข้าไปได้โดยตรงจาก การกิน และสัมผัสน้ำที่มีไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนอยู่ พิษของไฮโดรคาร์บอนเกิดได้ใน 2 ลักษณะ คือ พิษเฉียบพลัน (acute effect) และพิษเรื้อรัง (chronic effect) จากผลการศึกษา ของ มนัส เพ็ชรทองคำ (2522) ถึงพิษเฉียบพลันของน้ำมันดิบ ดีเซล และเบนซินต่อกุ้งแชบ๊วยชาว *Penacus merguensis* 2 วัย คือ วัยรุ่น (อายุ 45-60 วัน) และวัยอ่อน (อายุ 5-7 วัน) พบว่าความเข้มข้นของน้ำมันดิบที่ฆ่ากุ้งวัยรุ่นได้ 50 % ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง (96-hr LC₅₀) ที่อุณหภูมิ 23, 28 และ 33 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.54, 0.078 และ 0.74 ppm. ตามลำดับ ส่วนน้ำมันดีเซล ค่า 96-hr LC₅₀ ที่ 23 และ 28 องศาเซลเซียส มีค่า 1.01 และ 0.043 ppm. ตามลำดับ ส่วนที่ 33 องศาเซลเซียส จะมีค่าต่ำกว่า 0.13 ppm. และ น้ำมันเบนซิน มีค่า 96-hr LC₅₀ ที่ 23 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.13 ppm. ส่วนที่ 28 และ 33 องศาเซลเซียสจะมีค่ามากกว่า 0.20 ppm. ในกุ้งวัยอ่อนพบว่าค่า 24-hr LC₅₀

ของน้ำมันดิบ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซิน ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.28, 0.45 และ 0.98 ppm. ตามลำดับ โดยกุ้งวัยอ่อนมีความต้านทานต่อน้ำมันดิบและน้ำมันดีเซล ได้น้อยกว่ากุ้งวัยรุ่น

สุจิตรา เชาว์ปรีชา (2530) ได้ทดลองหาระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของ น้ำมันดิบอะเรเบียนชนิดเบาในรูปที่ละลายน้ำ ต่อลูกปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) Bloch. พบว่า ค่าความเป็นพิษที่ทำให้ลูกปลากะพงขาวตาย 50 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 96 ชั่วโมง เท่ากับ 1.00 มิลลิกรัม/ลิตร และผลการศึกษายาพิษสภาพของเนื้อเยื่อ พบว่ากึ่งเหงือกมีการบวมน้ำ และใน olfactory lamellae มีเซลล์ที่สร้างเมือกเพิ่มมากขึ้น และมีการเสื่อมของเซลล์ชนิดที่มีไขมัน โดยความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงยาพิษสภาพของเนื้อเยื่อ ขึ้นกับความเข้มข้นและระยะเวลาในการเลี้ยง

นอกจากการละลายแล้ว กระบวนการที่ทำให้น้ำมันกระจายอยู่ในน้ำคือ การเกิดอิมัลชัน ซึ่งจะเกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเช่นกัน แต่รุนแรงน้อยกว่าในรูปของสารละลาย

ค. ผลกระทบทางด้านชีวภาพ

ไฮโดรคาร์บอนชนิดที่มีอันตรายน้อยกว่าสูง เมื่อละลายอยู่ในน้ำจะสามารถทำให้สิ่งมีชีวิตหลายชนิดตายได้ ซึ่งชนิดและปริมาณของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับผลกระทบจากน้ำมันจนมีอัตราการตายสูงเช่นนี้ จะส่งผลต่อความสมดุลย์ในระบบนิเวศได้ ในกรณีที่สิ่งมีชีวิตได้รับไฮโดรคาร์บอนเข้าไปในปริมาณน้อย จะเกิดการสะสมในร่างกายและถ่ายทอดสู่ห่วงโซ่อาหารในที่สุด

ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน---> แพลงตอน---> ปลาเล็ก-----> ปลาใหญ่-----> มนุษย์

ไฮโดรคาร์บอนอาจเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อได้โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงในเมตาโบลิซึม มีการศึกษาพบว่ากระบวนการเมตาโบลิซึมของไฮโดรคาร์บอนทำให้เกิดสารพิษเพิ่มมากขึ้น เช่น สารพวกนอร์มัลพาราฟิน โดยปกติเป็นสารที่แทบจะไม่มีอันตรายนต่อมนุษย์ แต่เมื่อผ่านไปตามห่วงโซ่อาหารหลายขั้นแล้ว อาจเกิดคอนพันท์ที่เป็นอันตรายได้ (Ocean Affairs Board, 1975)

ในกรณีของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มีผู้สนใจศึกษาในด้าน

ความเป็นพิษกันค่อนข้างแพร่หลาย เช่น มีการศึกษาพบว่าสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดต่ำๆ ซึ่งเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ดีที่สุดนั้น จะมีความเป็นพิษสูงสุด เช่น เบนซิน โทลูอิน แนฟทาลีน และฟิแนนทรีน สารพวกนี้มีผลในการยับยั้งการสร้างเม็ดเลือด มีผลต่อระบบหายใจ การกระตุ้นหรือกดประสาทส่วนกลางในสัตว์ และยังเป็นสารที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และสารก่อมะเร็งอีกด้วย นอกจากนี้ สารประกอบพวก 3,4-เบนโซไพรีน และ 1,2-เบนซ์แอนทราซิน ก็อาจเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และเนื้องอกได้เช่นกันด้วย (กัลยา วัฒนากกร, 2531)

น้ำมันที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อนกทะเลอีกด้วย โดยคราบน้ำมันจะไปเคลือบขนนกทำให้บินไม่ไหว ส่วนน้ำมันที่ละลายในน้ำเมื่อนกกินน้ำทะเลเข้าไป จะทำให้ต่อมที่มีหน้าที่กำจัดเกลือไม่ทำงาน เป็นผลให้เกิดการสูญเสียน้ำในร่างกาย จนอาจทำให้นกตายได้ ปัญหาในลักษณะนี้ยังอาจเกิดขึ้นกับสัตว์ชนิดอื่นๆ ได้เช่นกัน อาทิ แมวน้ำ , นากทะเล เป็นต้น

การวิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

จากที่กล่าวมาแล้วว่าไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันมีมากมายหลายชนิด และมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนแตกต่างกันไปตั้งแต่ C_1-C_{70} ทำให้ไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นเทคนิคในการวิเคราะห์เพียงวิธีใดวิธีหนึ่งจึงไม่สามารถใช้วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนได้ทั้งหมด เพราะแต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะในด้านหลักการและความสามารถในการวิเคราะห์ ดังนั้นการเลือกวิธีที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน พอสรุปได้ คือ

เทคนิคการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric) เป็นการหาปริมาณในรูปของน้ำมันและกรีซ โดยการสกัดสารพวกน้ำมันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ แล้วระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ออกจนหมด จึงชั่งน้ำหนักของน้ำมันส่วนที่เหลืออยู่ การวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักนี้ เหมาะกับตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วง 5-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เช่น น้ำทิ้งจากชุมชนเมือง และเรือ เป็นต้น

เทคนิคอุลตราไวโอเลตแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (UV Absorption Spectrophotometry) เป็นเทคนิคที่ใช้หาปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนโดยการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแสงอุลตราไวโอเลต (ที่ความยาวคลื่น 256 นาโนเมตร) ของสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานโดยวิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน เทคนิคนี้เหมาะจะใช้กับตัวอย่างที่มีสารไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 10 ไมโครกรัม/ลิตร

เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี (UV Fluorescence Spectrophotometry, UVF) เทคนิคนี้วัดค่าความเข้มฟลูออเรสเซนซ์แทนการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง โดยสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบอะโรมาติกเมื่อดูดกลืนคลื่นแสงช่วงอุลตราไวโอเล็ต (310 นาโนเมตร) จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน เมื่อกลับลงสู่สภาวะเดิมจะมีการคายคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่มีความถี่เฉพาะออกมา โดยสารแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานในการกระตุ้นและคลื่นแสงที่คายออกมาเฉพาะแตกต่างกัน เทคนิคนี้เหมาะกับตัวอย่างที่มีปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 10 ไมโครกรัม/ลิตร เช่นเดียวกับเทคนิคคอลตราไวโอเล็ตแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี แต่เทคนิคนี้จะมีความไวต่อการวิเคราะห์มากกว่า จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในน้ำทะเล

เทคนิคอินฟราเรดแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (IR Absorption Spectrophotometry) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรดของสารตัวอย่าง เทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่นช่วงความถี่ของ C-H stretching เทคนิคนี้เหมาะกับตัวอย่างที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนต่ำๆ และสามารถวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่มีความเข้มข้นประมาณ 1 ppb ในตัวอย่างน้ำ 6 ลิตร ได้

เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากทั้งในด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ การวัดอาศัยเทคนิคในการแยกองค์ประกอบแล้วเปรียบเทียบเวลา และลักษณะของพีคในตัวอย่างกับสารมาตรฐาน เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่ต้องการทราบถึงรายละเอียดลักษณะโครมาโตแกรมของสารไฮโดรคาร์บอน

เทคนิคไฮเพอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) เป็นเทคนิคหนึ่งของลิควิดโครมาโตกราฟีแบบคอลัมน์ ที่ใช้ความดันช่วยทำให้เฟสที่เคลื่อนที่ไหลได้เร็วขึ้นโดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของคอลัมน์ลดลง การวิเคราะห์ทางคุณภาพและปริมาณ สามารถทำได้แบบเดียวกับเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยการเปรียบเทียบค่ารีเทนชันไทม์ และการวัดขนาดของพีคของสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน

เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี เป็นเทคนิคที่สามารถให้รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างอย่างกว้างของสารไฮโดรคาร์บอน โดยสารตัวอย่างที่ถูกแยกเป็นองค์ประกอบย่อยจากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ จะเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ที่ละองค์ประกอบ และจะถูกทำให้แตกออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยกระแสนิวเคลียสที่มีพลังงานสูง แมสสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูป Relative Abundance กับ m/z ratio ซึ่งมีรูปแบบต่างๆ กันในแต่ละสารประกอบ เทคนิคนี้มักวิเคราะห์ควบคู่กับวิธีแก๊สโครมาโตกราฟีเพื่อเป็นการ

ยืนยันผลการวิเคราะห์ทางคุณภาพ

ตารางที่ 2.3 เป็นข้อสรุปวิธีวิเคราะห์ ข้อดีและข้อเสียของวิธีต่างๆ

สภาพทั่วไปของแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง

แม่น้ำท่าจีน เป็นแม่น้ำที่มีต้นน้ำมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยแยกจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่บ้านคลองมะขามเฒ่า อำเภอวัดสิงห์ จังหวัดชัยนาท ไหลผ่านจังหวัดสุพรรณบุรี นครปฐม และลงสู่อ่าวไทยที่บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร มีความยาวตลอดลำน้ำประมาณ 325 กิโลเมตร มีประตูกั้นน้ำเพื่อกักเก็บไว้ใช้ในการชลประทาน 4 แห่ง คือ (รูปที่ 2.4)

- ประตูระบายน้ำพลเทพที่อำเภอวัดสิงห์ จังหวัดชัยนาท (กม. 318)
- ประตูระบายน้ำท่าโบสถ์ที่อำเภอหันคา จังหวัดชัยนาท (กม. 290)
- ประตูระบายน้ำชลมาครพิจารณ์ที่อำเภอสสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี (กม. 239)
- ประตูระบายน้ำโพธิ์พระยาที่อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี (กม. 202)

จากผลการสำรวจคุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีนของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 จนถึงปัจจุบัน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในทางที่เสื่อมลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ จึงได้กำหนดประเภทของแหล่งน้ำในแม่น้ำท่าจีนตามลักษณะการใช้ประโยชน์โดยอาศัยมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินที่มีใช้ทะเลเป็นเกณฑ์ เพื่อใช้เป็นเป้าหมายในการที่จะควบคุมและรักษาคุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีนให้ดีขึ้น โดยแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) จากปากแม่น้ำท่าจีน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร (กม.๑) ขึ้นไปจนถึงหน้าท่าว่าการอำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม(กม.82) เป็นเขตคุณภาพน้ำประเภทที่ 4
- 2) จากหน้าท่าว่าการอำเภอนครชัยศรี ขึ้นไปจนถึงประตูระบายน้ำโพธิ์พระยา(กม. 202) อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นเขตคุณภาพน้ำประเภทที่ 3
- 3) จากประตูระบายน้ำโพธิ์พระยา ขึ้นไปจนถึงต้นแม่น้ำที่อำเภอวัดสิงห์ จังหวัดชัยนาท (กม.325) เป็นเขตคุณภาพน้ำประเภทที่ 2

ก. แหล่งที่ตั้งและสภาพทางกายภาพของแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง

แม่น้ำท่าจีนตอนล่าง คือบริเวณที่เริ่มตั้งแต่ปากแม่น้ำท่าจีนขึ้นไป จนถึงบริเวณ

หน้าที่ว่าการอำเภอนครชัยศรี รวมระยะทางประมาณ 82 กิโลเมตร การไหลของน้ำในช่วงนี้จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของน้ำทะเล (tidal effect) กล่าวคือ น้ำในแม่น้ำจะไหลขึ้นลงตามการขึ้นลงของน้ำทะเล

ข. แหล่งกำเนิดของสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง

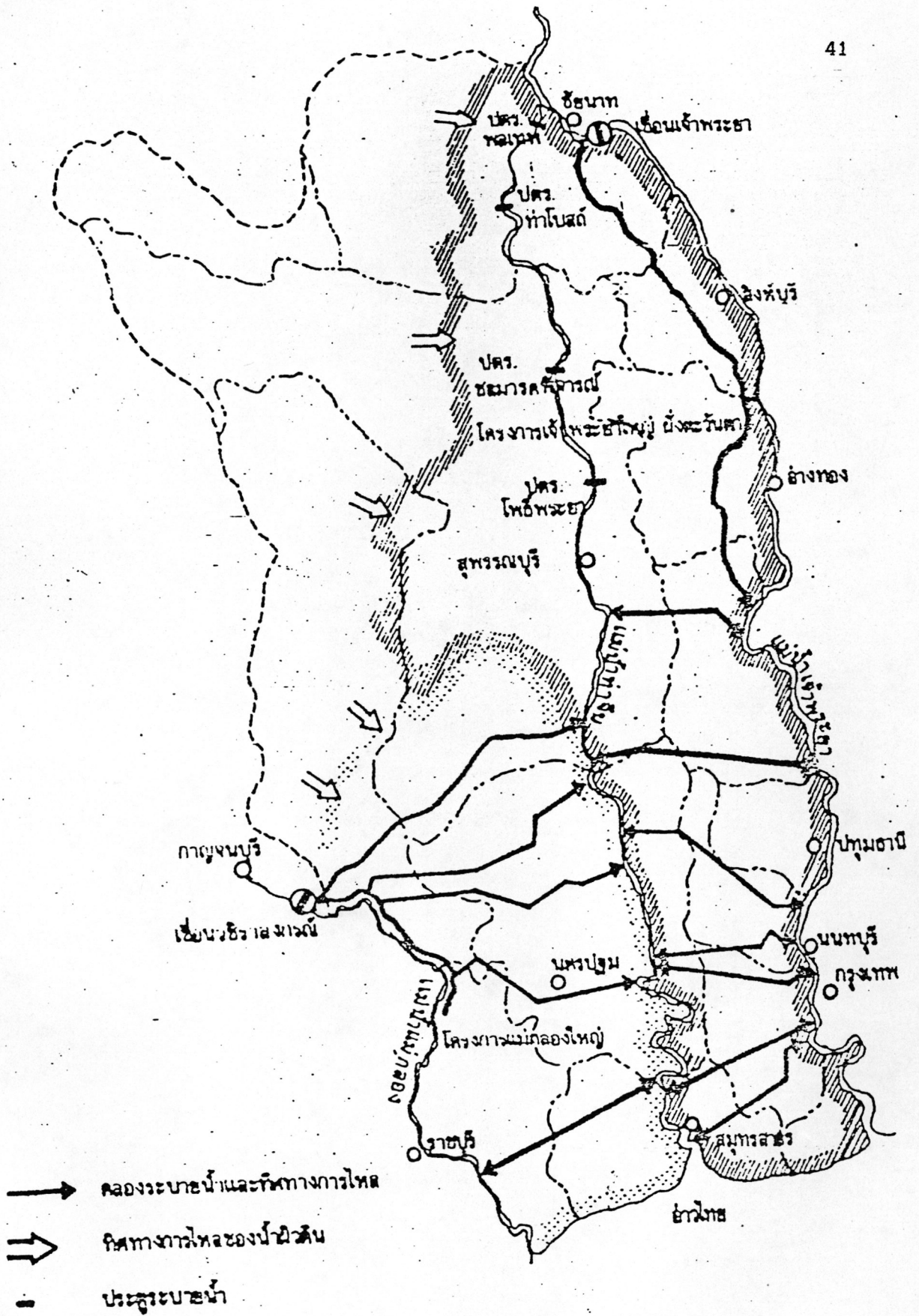
บริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง นอกจากจะเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากบริเวณพื้นที่ตอนบนและตอนกลางซึ่งไหลลงมาตามแม่น้ำแล้ว ยังเป็นแหล่งรับน้ำทิ้งจากชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่หนาแน่นตลอดริมน้ำในพื้นที่ตอนล่างนี้ด้วย (รูปที่ 2.5) และจากการที่บริเวณนี้มีชุมชนค่อนข้างหนาแน่น ความจำเป็นในการติดต่อคมนาคมจึงมีความสำคัญ ซึ่งจากการสังเกตพบว่าชาวบ้านนิยมใช้เรือหางยาวเป็นยานพาหนะในการเดินทางและขนส่งสินค้ากันมาก ส่วนบริเวณปากแม่น้ำซึ่งมีท่าเทียบเรือประมงหลายแห่ง จะพบว่ามีเรือประมงเป็นจำนวนมากที่แล่นเข้าออกบริเวณปากแม่น้ำ กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ อาจทำให้บริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่างเกิดปัญหาการปนเปื้อนจากน้ำมันได้

ตารางที่ 2.3 แสดงวิธีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในแหล่งน้ำ

วิธี	ชนิดของสาร ที่วิเคราะห์	ปริมาณของ น้ำตัวอย่าง(ลิตร)	ข้อดี	ข้อเสีย
ซึ่งน้ำหนัก	สารที่ไม่ระเหยง่าย ๗ อุกหุมิห้อง	1-4	วิธีวิเคราะห์และเครื่องมือ ที่ใช้ง่ายและสะดวก	ไม่สามารถใช้วิเคราะห์ ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นใน ช่วง ๐.3-๐.5 มก./ลิตร
อุลตราไวโอเลต แอมบซอพชั่น สเปกโตรเมตรี	คอนจูเกตโพลีอัลคีน อะโรมาติก	1	เหมาะกับตัวอย่างที่มีความ เข้มข้น >10 ไมโครกรัม/ลิตร	ไม่ให้รายละเอียดของ นอร์มัลอัลเคน, ความไว ในการวิเคราะห์มีน้อยกว่า วิธีฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี
ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี	สารประกอบที่ไม่อิ่มตัว อะโรมาติก	1	เหมาะกับตัวอย่างที่มีความ เข้มข้น >10 ไมโครกรัม/ลิตร	ไม่ให้ข้อมูลของนอร์มัล อัลเคน
อินฟราเรด สเปกโตรเมตรี	เมทิล, เมไซลีน คาร์บอนิล อะโรมาติก	1-4	ให้รายละเอียดเกี่ยวกับ ฟังก์ชันัลกรุป เช่น ซิลิโคน, พลาสติไซเซอร์	ตัวอย่างที่มีความเข้มข้น >3 ไมโครกรัม/ลิตร ไม่สามารถวิเคราะห์ได้
แกสโครมาโตกราฟี	ชนิดของ ไฮโดรคาร์บอน	1-20	การวิเคราะห์ รวดเร็ว และให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ	ให้รายละเอียดเกี่ยวกับ การย่อยสลายน้ำมันน้อย
แกสโครมาโตกราฟี แมสสเปกโตรเมตรี	ไฮโดรคาร์บอน แต่ละชนิด	1-10	วิเคราะห์สารไฮโดรคาร์บอน แต่ละชนิดได้แน่นอน	เครื่องมือที่ใช้ยุ่งยาก ซับซ้อนและมีราคาแพงมาก
HPLC*	ชนิดของไฮโดรคาร์บอน	-	การเตรียมตัวอย่างก่อนฉีด ไม่ยุ่งยาก, ไม่มีข้อจำกัดว่า ต้องเป็นสารที่ระเหยได้	เครื่องมือมีส่วนประกอบ ที่ซับซ้อนและมีราคาแพง

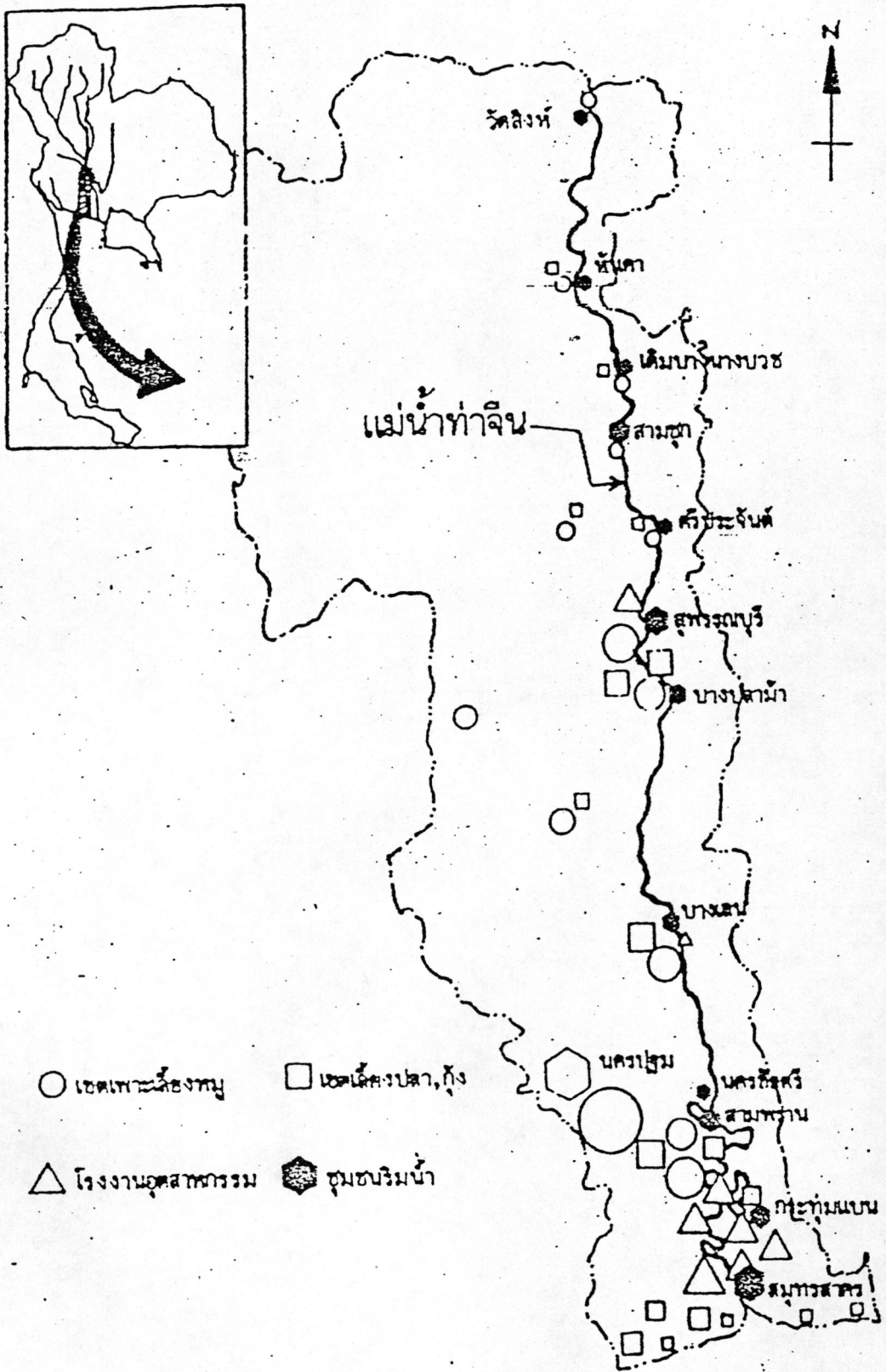
HPLC* = High Performance Liquid Chromatography

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ocean Affairs Board, 1975.



รูปที่ 2.4 แสดงระบบการระบายน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีน

ที่มา : กองมาตรฐานคุณภาพน้ำ สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2531



รูปที่ 2.5 แสดงกิจกรรมต่างๆ ในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนที่มีการระบายน้ำทิ้งลงสู่แม่น้ำท่าจีน
ที่มา : กองมาตรฐานคุณภาพน้ำ สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2531

ตารางที่ 2.4 แสดงจำนวนประชากรของชุมชนริมแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง

ชื่อชุมชน	กม.	พื้นที่ (ตร.กม.)	ประชากร			
			2522	2524	2529	2534*
เทศบาลเมืองสมุทรสาคร	5	5.9	46,522	48,027	50,153	54,296
จ.สมุทรสาคร						
เทศบาล ต.กระทุ่มแบน	23.5	2.2	11,220	17,747	12,808	13,866
จ.สมุทรสาคร						
สุขาภิบาลสามพราน	55	8.2	12,580	13,435	15,933	17,249
จ.นครปฐม						
สุขาภิบาลนครชัยศรี	82	3.5	7,559	7,602	7,987	8,647
จ.นครปฐม						
รวม		19.7	77,881	86,811	86,881	94,058

* คิดจากอัตราการเพิ่มของจำนวนประชากร 1.6 % ต่อปี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2529

ที่มา : กองมาตรฐานคุณภาพน้ำ สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2531

ชีววิทยาของหอยแมลงภู่ ; สิ่งมีชีวิตที่บ่งชี้สภาพมลภาวะ

หอยแมลงภู่ (*Perna viridis* Linn.) มีชื่อสามัญว่า Green mussel เป็นหอยสองฝาที่มีเปลือกยารูปไข่ เปลือกทั้งสองข้างมีขนาดเท่ากันและยึดติดกันตรงปลายด้านหน้า สีเปลือกด้านนอกมีสีเขียวเข้ม และมีสีเขียวน้ำตาลแก่ปนเล็กน้อย บนเปลือกมีลายเป็นวงซ้อนกัน สำหรับเปลือกด้านในมีสีขาว สามารถสังเกตเห็นรอยยึดติดกันของกล้ามเนื้อที่ใช้เปิด-ปิดฝาได้อย่างชัดเจน หอยแมลงภู่เป็นสัตว์ที่อยู่กับที่ เมื่อโตขึ้นจะสร้างเส้นใยสำหรับยึด

เกาะกับวัสดุที่เหมาะสม เช่น ตามไม้หลักปักไผ่ เป็นต้น หอยแมลงภู่กินอาหารโดยการกรอง ซึ่งอาหารส่วนใหญ่เป็นแพลงตอนพืช แบคทีเรีย และอินทรีย์สาร แหล่งที่พบหอยแมลงภู่จะอยู่บริเวณปากแม่น้ำหรือเขตนํ้ากร่อยเท่านั้น (นิลนาจ ชัยชนาวีสุทธิ , 2527)

จากสภาพทางชีววิทยาของหอยแมลงภู่ซึ่งเป็นสัตว์ที่อยู่กับที่ จึงทำให้มีการรับสารไฮโดรคาร์บอนจากน้ำได้โดยตรง ดังนั้นถ้าในแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนของน้ำมันในปริมาณสูง หอยแมลงภู่ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นๆ ก็ย่อมมีโอกาสที่จะได้รับสารไฮโดรคาร์บอนในปริมาณสูงด้วยการใช้หอยแมลงภู่เป็นตัวบ่งชี้มลภาวะของสิ่งแวดล้อมในน้ำ เนื่องจากคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวแทนในบริเวณพื้นที่ที่ศึกษา
2. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ชุกชุมในบริเวณที่ศึกษา
3. เป็นสิ่งมีชีวิตที่อายุยืนพอสมควร
4. เป็นตัวสหสัมพันธ์ระหว่างสารพิษในเนื้อเยื่อกับค่าเฉลี่ยของสารพิษในบริเวณนั้น
5. เป็นสิ่งมีชีวิตที่แสดงความเข้มข้นของสารพิษสูง