

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารออร์กาโนคลอรีน (organochlorine)

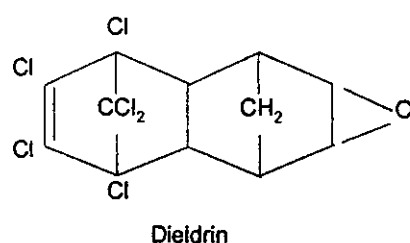
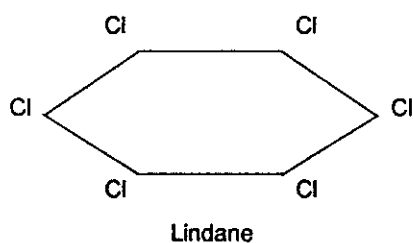
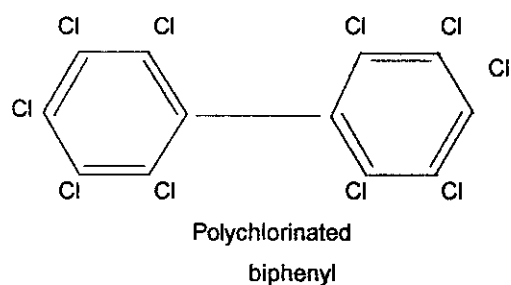
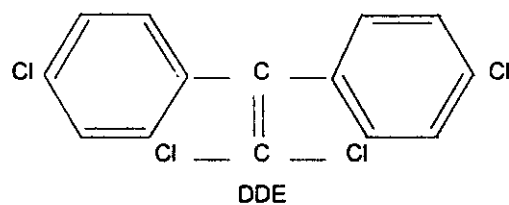
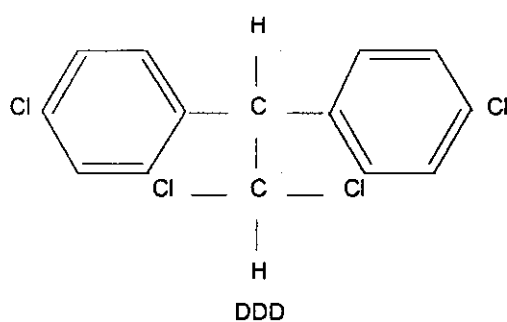
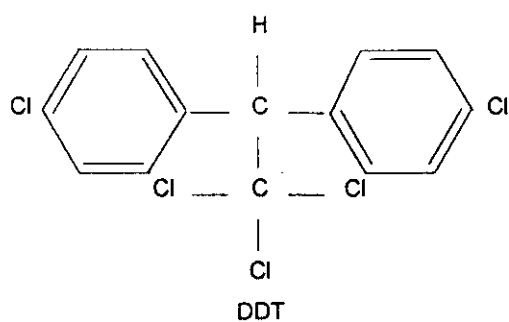
ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างโมเลกุลของสารออร์กาโนคลอรีน (สุภาณี พิมพ์สมาน , 2537) ได้แก่

1. ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และคลอรีน เป็นองค์ประกอบหลัก (บางกรณีอาจมีออกซิเจนและกำมะถันด้วย) และมีพันธะ C-Cl ในโมเลกุล
2. ไม่มีตำแหน่งทำปฏิกิริยา (reactive site) ภายในโมเลกุล
3. มีโครงสร้างส่วนที่เป็นวงแหวนคาร์บอนอยู่ในโมเลกุล รวมทั้งวงแหวนเบนซีน (benzene ring) ด้วย
4. โมเลกุลไม่มีสภาพขั้ว (nonpolar molecule) ละลายในไขมันได้ดี
5. มีเสถียรภาพทางเคมี ไม่สลายตัวง่ายในธรรมชาติ

สารออร์กาโนคลอรีน แบ่งออกได้เป็น (วิไลลักษณ์ อิ่มอุดม, 2534)

1. กลุ่มอนุพันธ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีน สารที่รู้จักกันดีในกลุ่มนี้ คือ ดีดีที (dichloro diphenyl trichloroethane) (ภาพที่ 2)
2. กลุ่มที่มีวงแหวนพันธะคู่ที่มีคลอรีน (cyclodienes) ได้แก่ คลอร์เดน อัลดริน ดีลดริน เฮปตาคลอร์ เอนดริน และ ทอกซาฟิน
3. กลุ่มวงแหวนที่มีคาร์บอน 6 ตัว และคลอรีน 6 ตัว (hexachlorocyclohexane) ได้แก่ ลินเดน (ภาพที่ 2)

สารออร์กาโนคลอรีนได้รับการพิจารณาว่า มีพิษเฉียบพลันน้อยกว่ากลุ่มอื่น แต่มีพิษเรื้อรังมากกว่าสารกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทแต่กลไกการออกฤทธิ์ไม่เหมือนกับสารกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต และคาร์บาเมต โดยแท้จริงแล้วยังไม่ทราบรายละเอียดของกลไกการออกฤทธิ์ (ไพโรจน์ ชุ่มสมบัติ, 2529 ; วิไลลักษณ์ อิ่มอุดม, 2534)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของสารออร์กาโนคลอรีนบางชนิด (Clark, 1992)

ตัวอย่างของสารปราบศัตรูพืชและสัตว์กลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่มีความเป็นพิษตามลำดับจากมากไปหาน้อย มีดังนี้ (วิไลลักษณ์ อิมอุดม, 2534)

1. อัลดริน (aldrin)
2. เอนดริน (endrin)
3. เอนโดซัลแฟน (endosulfan)
4. ดีลดริน (dieldrin)
5. เบนซีน เฮกซะคลอไรด์ (benzene hexachloride, BHC)
6. ดีดีที (DDT)
7. เฮปตาคลอร์ (heptachlor)

สาเหตุที่สารปราบศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนมีความคงทนในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนานเนื่องจากสมบัติ 2 ประการ ได้แก่ (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537)

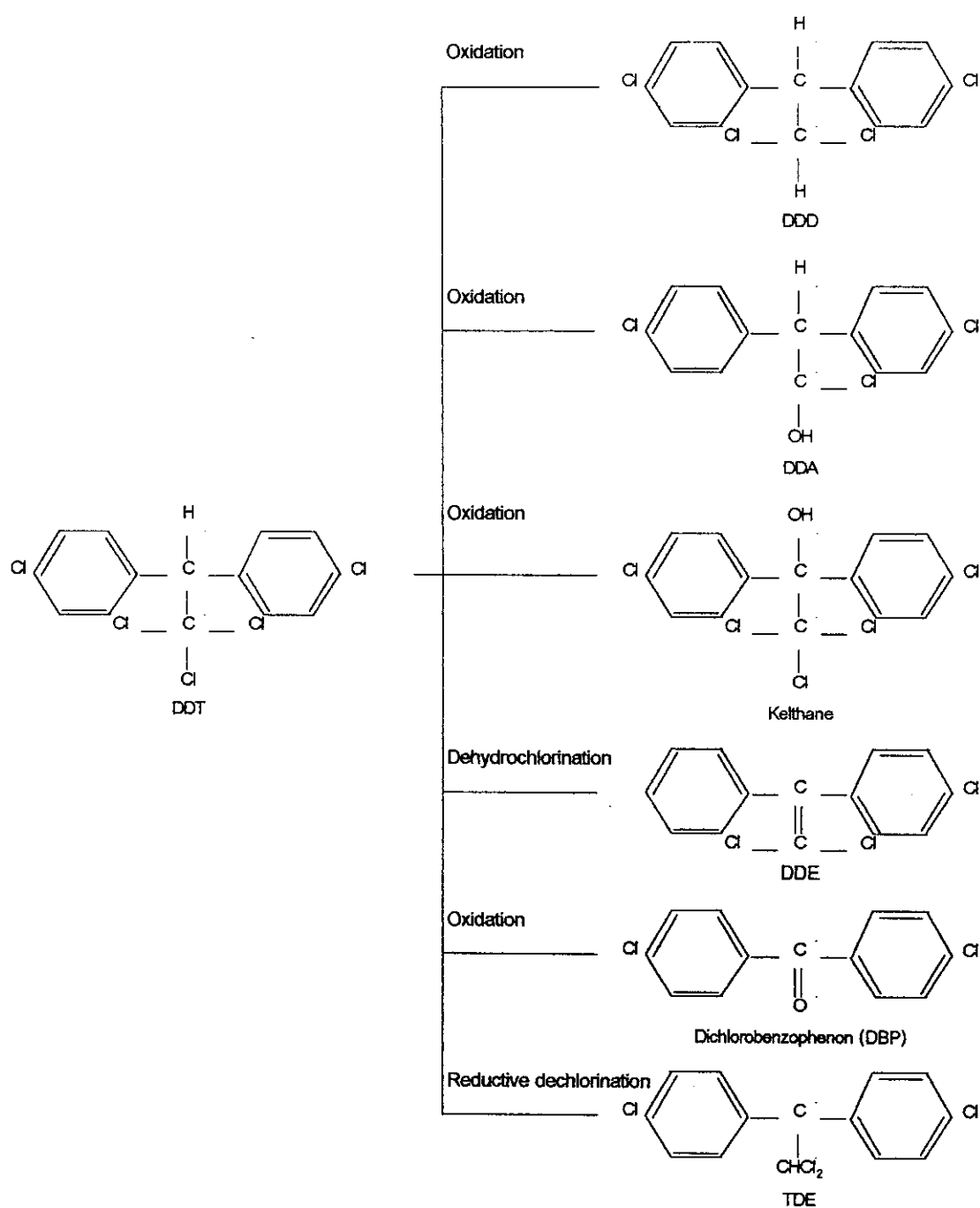
1. โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยพันธะ C-C, C-H และ C-Cl ซึ่งเป็นลักษณะของพันธะที่มีความเสถียร และถูกย่อยสลายได้ช้า
2. ละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในไขมัน ทำให้มีการสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิตได้ และเมื่อได้เข้าไปสะสมแล้วจะถูกขับถ่ายออกมาได้ยาก

การย่อยสลายของสารปราบศัตรูพืชและสัตว์กลุ่มออร์กาโนคลอรีน

สารออร์กาโนคลอรีนถูกย่อยสลายได้โดยทั้งทางธรรมชาติและจุลินทรีย์ ซึ่งการย่อยสลายโดยธรรมชาติ หรือโคเมตาบอลิซึม (co-metabolism) ได้แก่ การถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำหรือออกซิเจน และแสงอัลตราไวโอเลต เป็นต้น แต่จะเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่วนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (microbial dechlorination) จะมีแบคทีเรียอยู่หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ได้ (สิทธิพันธ์ ศิริรัตนชัย, 2523 ; Borner, 1994) ครึ่งชีวิตของสารออร์กาโนคลอรีนนับขึ้นอยู่กับการปัจจัยในสิ่งแวดล้อม ในเขตหนาวสารออร์กาโนคลอรีนสามารถคงสภาพอยู่ได้เป็นระยะเวลานาน ส่วนในเขตร้อนนั้นสารออร์กาโนคลอรีนจะถูกย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่า ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียมีกิจกรรมสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (วิไลลักษณ์ อิมอุดม, 2534) แบคทีเรียบางชนิดสามารถที่จะให้สารออร์กาโนคลอรีนเป็นแหล่งของคาร์บอนเพื่อใช้ในการเจริญได้ (Bouwer & Zehnder, 1993 ; Edward & Alexander, 1993) เช่น *Xanthovacter autotrophicus* โดยแบคทีเรียจะสร้างเอนไซม์ฮาโลจีเนส ซึ่งเป็นได้ทั้ง ฮาโลไฮโดรเลส (halohydrolases) และออกซิจีเนส (oxygenases) โดยเอนไซม์ชนิดแรกมีความจำเพาะต่อฮาโลจีเนตเตต อัลเคน ในขณะที่เอนไซม์ชนิดที่สองซึ่งสามารถทนต่อความร้อนและพีเอชสูง ๆ ได้นั้น จะมีความจำเพาะต่อฮาโลจีเนตเตต คาร์บอกซิลิก เอซิด ซึ่งฮาโลอัลเคนจะถูกไฮโดรไลซ์ภายในเซลล์ไปเป็นอัลกอฮอล์และไอออนของเฮไลด์ (Janssen, Scheper, Dijkhuizen, & Witholt, 1985 ; Belkin, 1992)

กระบวนการทางชีวเคมีในลักษณะต่าง ๆ ของดีดิตี

เมื่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้รับดีดิตี สิ่งมีชีวิตจะมีกลไกในการลดพิษของดีดิตีโดยการดึงดีดิตีออกจากตำแหน่งในการเกิดพิษในระบบประสาทการตอบสนอง (วิไลลักษณ์ อิมอุดม, 2534) และสร้างเอนไซม์จากตับเพื่อเปลี่ยนรูปดีดิตีให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลง ซึ่งเอนไซม์ที่ร่างกายสร้างขึ้นนี้สามารถใช้เป็นสิ่งบ่งชี้ถึงการที่ร่างกายได้รับดีดิตีหรือสารพิษอื่น ๆ เข้ามาในร่างกายได้ โดยเรียกเอนไซม์ที่ร่างกายสร้างขึ้นนี้ว่า ไบโอมาร์คเกอร์ (biomarker) (Foerlin et al., 1996) ซึ่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนรูปดีดิตี (ภาพที่ 3) ได้แก่



ภาพที่ 3 การย่อยสลายดีดีทีโดยแมลงและสัตว์เลื้อยคลานด้วยนม (พิมล เรือนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2525)

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้ดีดีทีเปลี่ยนเป็นดีดีเอ (dichloro diphenyl acetic acid) ดีบีพี (dichlorobenzophenone) และ เคลธเน (kelthane)
2. ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน (dehydrochlorination) ทำให้ดีดีทีเปลี่ยนเป็นดีดีอี (dichloro diphenyl ethane)
3. ปฏิกิริยารีดักทีฟดีคลอรีเนชัน (reductive dechlorination) ทำให้ดีดีทีเปลี่ยนเป็นดีดีอี และดีดีดี (dichloro diphenyl dichloroethane)

รูปใหม่ของดีดีทีเหล่านี้บางชนิดมีพิษน้อยกว่าดีดีที โดยเฉพาะดีดีเอซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ จึงสามารถถูกขับออกจากร่างกายพร้อมปัสสาวะ ทำให้สามารถลดความเป็นพิษที่จะเกิดกับร่างกายได้ แต่รูปใหม่ของสารนี้บางชนิดก็สามารถที่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษมากกว่าดีดีทีได้ เช่น ดีดีอี มีพิษต่อคนมากกว่าดีดีที โดยจะทำให้เปลือกไข่ของนกบางลง เป็นผลให้อัตรากการเกิดของนก ลดลงด้วย (วิไลลักษณ์ อิมอุตม, 2534 ; สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) และสารบางชนิดที่ถูกเปลี่ยนรูปนี้ก็สามารถที่จะถูกเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นสารอื่นได้อีก (Bouwer & Zehnder, 1993 ; Walker, Hopkin, Sibly, & Peakall, 1996)

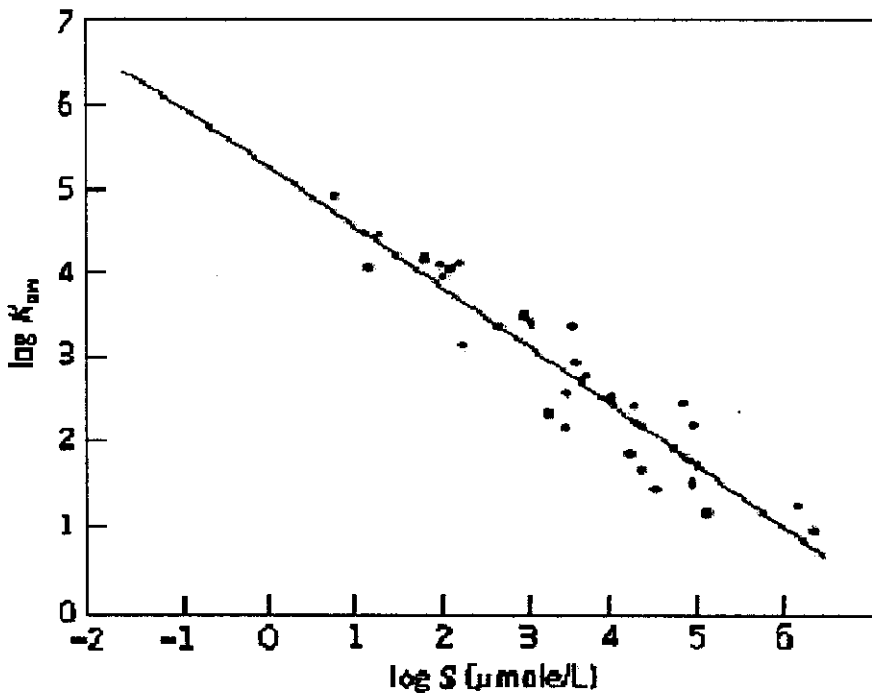
สัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำ (octanol-water partition coefficient)

การละลายเป็นปัจจัยเริ่มแรกของการซึมซับ ซึ่งหาได้จากสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำ (K_{ow}) ดังสมการ ซึ่งถูกนำมาใช้ในด้านเภสัชกรรมจนได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและนำมาประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ค่า K_{ow} เป็นการคำนวณโดยวัดการกระจายตัวขององค์ประกอบในขวดแก้วซึ่งบรรจุด้วยน้ำปราศจากอากาศ และนอร์มอลออกทานอล โดยขวดแก้วจะถูกเขย่าจนกระทั่งสารละลายทั้งสองชนิดอิ่มตัวซึ่งกันและกัน โดยจะมีออกทานอลละลายอยู่ในน้ำ 5.5×10^{-3} โมลต่อลิตร และมีน้ำละลายอยู่ในออกทานอล 2.3 โมลต่อลิตร จากนั้นนำสารที่ต้องการรู้ค่า K_{ow} ใส่ลงในขวดแก้วเพียงเล็กน้อยแล้วเขย่าจากนั้นสารละลายทั้งสองสถานะจะแยกออกจากกันและทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ

$$K_{ow} = \frac{\text{ความเข้มข้นในนอร์มอลออกทานอลที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}{\text{ความเข้มข้นในน้ำที่อิ่มตัวด้วยนอร์มอลออกทานอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}$$

ค่า K_{ow} จะมีค่าตั้งแต่ 0.001 ถึง 100,000,000 จึงได้มีการรายงานค่า K_{ow} ในรูปล็อก (log) K_{ow} (ตารางที่ 1) ซึ่งวิธีการนี้จะถูกจำกัดเมื่อค่า K_{ow} ของสารมีค่ามากกว่า 10^5 หรือมีค่าน้อยมาก ๆ

ค่า K_{ow} นี้มีความสำคัญในการทำนายพฤติกรรมการปนเปื้อนของสารพิษในสิ่งแวดล้อม โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารในสิ่งมีชีวิต (bioconcentration factor) ความเป็นพิษ และการซึมซับ (sorption) ต่อตะกอนดิน (Watts, 1998) และยังช่วยในการเลือกใช้สารละลาย และวิธีวิเคราะห์สารปนเปื้อนอีกด้วย (Fong, Moye, Seiber, & Toth, 1999)

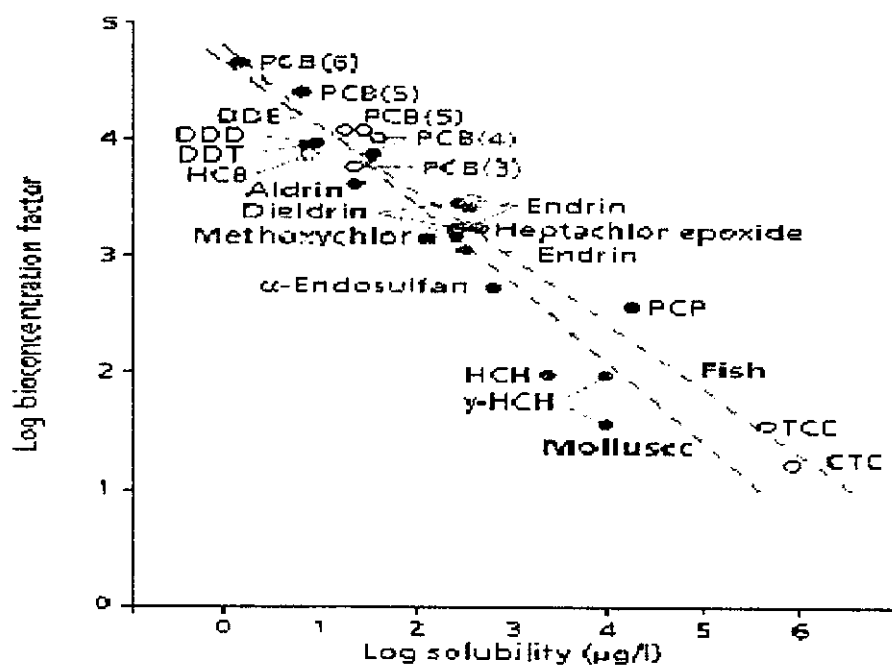


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการละลายน้ำกับล็อกสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำ (Watts, 1998)

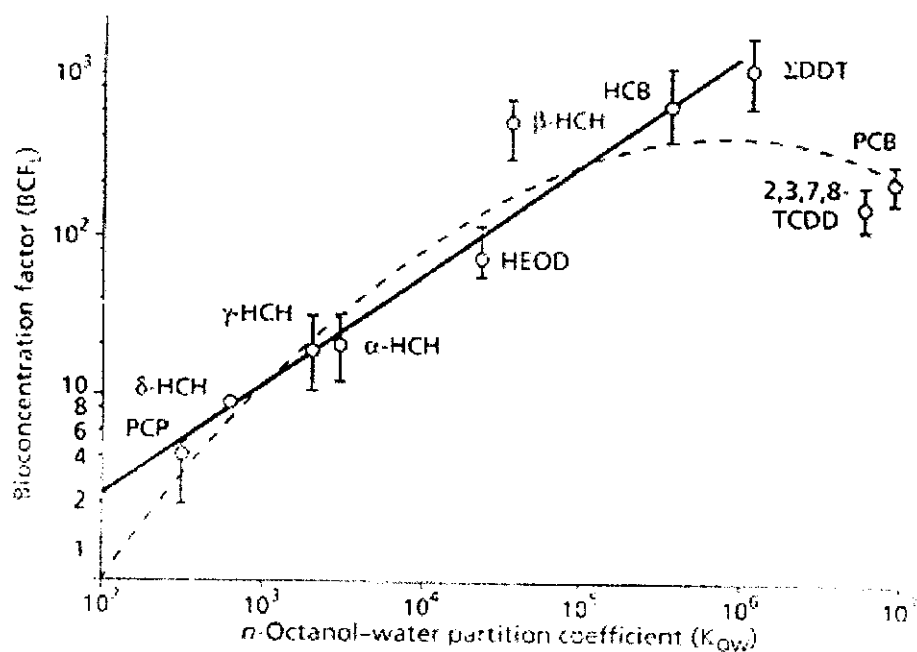
โดยสารที่ละลายน้ำได้น้อยจะละลายในไขมันได้มาก (ภาพที่ 4) จึงมีโอกาที่จะสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิตได้มากกว่าสารที่ละลายน้ำได้มากหรือสารที่มีค่าล็อกสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำสูงก็จะมีโอกาที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิตได้มากกว่าสารที่มีค่าล็อกสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำต่ำ ตัวอย่างเช่น สารกลุ่มดีดีทีที่ละลายน้ำได้น้อย และมีค่าล็อกสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำต่ำกว่าเฮกซีเอช จึงมี โอกาสที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิตได้มากกว่าเฮกซีเอช (ภาพที่ 5 และ 6)

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์การละลายของออกทานอลกับน้ำ (Watts, 1998)

Compound	Mean Log K _{ow}	Range
Insecticides		
Aldrin	5.17	
Carbaryl	2.38	2.31-2.56
Dieldrin	5.16	
DDT	6.11	5.76-6.36
Endrin	5.02	4.56-5.34
Hexachlorobenzen	5.65	5.45-6.18
Lindane	3.76	3.66-3.85
Malathion	2.84	
Parathion	3.43	2.15-3.93
Herbicides		
Atrazine	2.68	
2,4-D	2.94	1.57-4.88
2,4,5-T	3.40	
Trifluralin	5.31	5.28-5.34
Fungicides		
Pentachlorophenol	4.41	3.81-5.01



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิธึมการละลายน้ำกับลอการิธึมค่าความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Calow, 1993)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สัดส่วนของออกทานอลกับน้ำ กับลอการิธึมค่าความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Calow, 1993)

การสะสมของสารออร์กาโนคลอรีนในสิ่งมีชีวิต

เมื่อสารออร์กาโนคลอรีนปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำ ส่วนใหญ่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำมากกว่าที่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนและสะสมอยู่ในตะกอนดิน ทั้งนี้เพราะสารออร์กาโนคลอรีนมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และละลายได้ดีมากในตัวทำละลายอินทรีย์ สารออร์กาโนคลอรีนที่ละลายน้ำได้น้อยมีโอกาสที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิตได้มากกว่าสารออร์กาโนคลอรีนที่ละลายน้ำได้มาก และถึงแม้ว่าในแหล่งน้ำจะมีปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนต่ำจนไม่สามารถที่จะตรวจพบได้ก็ตาม แต่สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นก็สามารถที่จะสะสมสารเหล่านี้ไว้ในร่างกายได้ ซึ่งการสะสมจะเกิดจากการที่สิ่งมีชีวิตได้รับสารออร์กาโนคลอรีนเข้าไปในตัว และขับสารเหล่านี้ออกจากตัวในอัตราที่ช้ากว่าอัตราการได้รับ (ลิทธิพันธ์ ศิริรัตนชัย, 2523 ; เสาวภา อังสุพานิช, 2523) ตัวอย่างเช่น หอยนางรม *Crassostrea virginica* สามารถที่จะรับคีโพน (kepone) จากดินตะกอนแขวนลอยได้อย่างรวดเร็วและเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady state) ภายในเวลาหนึ่งสัปดาห์ และสามารถกำจัดคีโพนออกจากเนื้อเยื่อได้ถึงร้อยละ 70 ภายในสัปดาห์แรกที่ได้รับคีโพน แต่ส่วนที่ตกค้างอยู่จะยังคงอยู่ภายในเนื้อเยื่อหอยถึง 4 สัปดาห์ โดยมีค่าครึ่งชีวิตของคีโพนในหอยเฉลี่ยเท่ากับ 5.2 วัน (Morales-Alamo & Haven, 1983)

การสะสมสารออร์กาโนคลอรีนของสิ่งมีชีวิตจะขึ้นอยู่กับปริมาณไขมันของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ลักษณะทางภูมิประเทศ (geographical) และฤดูกาล การผันแปรในฤดูกาลอาจทำให้ปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในสิ่งแวดล้อมหรือปริมาณไขมันในสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในเนื้อเยื่อหอยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในน้ำ ตะกอนดิน และบริเวณที่ปล่อยหรือได้รับการปนเปื้อนจากสารเหล่านี้ และจะมีการกระจายเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน (Castro, Ferreira, & Vale, 1990 ; Scanes, 1997) แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในเนื้อเยื่อหอยจะมีค่าสูงกว่าในตะกอนดินหลายเท่า (Sericano, Atlas, Wade, & Brooks, 1990) เมื่อสารออร์กาโนคลอรีนเข้าสู่ตัวหอย จะไปสะสมอยู่ตามเนื้อเยื่อ เซลล์ และตามเซลล์ประสาท รวมทั้งยังสามารถเกาะติดและซึมเข้าไปในบริเวณผนังของเซลล์พืชได้เป็นอย่างดี ดังนั้นถ้าในน้ำมีแหล่งกักตุนพืชสารเหล่านี้ก็จะเข้าไปเกาะติดตามผนังเซลล์ทำให้มีโอกาสเพิ่มขยายทางชีวภาพ (biomagnification) ไปตามห่วงโซ่อาหาร (วิไลลักษณ์ อิมอุดม, 2534 ; ลิทธิพันธ์ ศิริรัตนชัย, 2523) และการปนเปื้อนด้วยสารออร์กาโนคลอรีนนี้ไม่สามารถใช้วิธีการกำจัด การปนเปื้อน (depuration) ได้ (กรมประมง, 2536)

การสะสมในแพลงก์ตอน

การสะสมของสารออร์กาโนคลอรีนในแพลงก์ตอนส่วนมากเกิดจากการที่สารออร์กาโนคลอรีนเกาะติดกับผิวนอกของแพลงก์ตอน (เสาวภา อังสุภาณิช, 2523) โดยแพลงก์ตอนสามารถสะสมสารออร์กาโนคลอรีนไว้ที่เซลล์ในปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำที่แพลงก์ตอนอยู่ถึง 265 เท่า (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) เมื่อปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น จำนวนแพลงก์ตอนและการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ของแพลงก์ตอนจะลดลง (Hargrave et al., 1992 ; Laws, 1981 ; Rajendran & Venugopalan, 1983 ; Rajendran, Rajendran, Matsuda, & Venugopalan, 1990) และในแหล่งน้ำที่มีแพลงก์ตอนอยู่น้อยจะพบว่ามีการสะสมสารออร์กาโนคลอรีนสะสมอยู่ในเซลล์แพลงก์ตอนมากกว่าแหล่งน้ำที่มีจำนวนแพลงก์ตอนปกติ (Taylor, Carey, Lean, & McQueen, 1991)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของสารออร์กาโนคลอรีนในแพลงก์ตอน (เสาวภา อังสุภาณิช, 2523)

1. ความเค็ม โดยความเค็มสูงจะทำให้มีการสะสมสารออร์กาโนคลอรีนในแพลงก์ตอนมากกว่าความเค็มต่ำ
2. อุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิสูงจะมีผลทำให้การสะสมสารออร์กาโนคลอรีนต่ำกว่าในภาวะที่อุณหภูมิต่ำ
3. แพลงก์ตอนที่ตายแล้วจะมีการสะสมสารออร์กาโนคลอรีนในเซลล์สูงกว่าแพลงก์ตอนที่มีชีวิต

การสะสมในหอย

เนื่องจากหอยสองฝากินอาหารโดยการกรองน้ำผ่านตัว ซึ่งจะมีทั้งอนุภาคแขวนลอย แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ปะปนอยู่ เมื่ออนุภาคแขวนลอยหรือแพลงก์ตอนเหล่านั้นได้รับสารออร์กาโนคลอรีนก็จะเกิดการสะสมสารออร์กาโนคลอรีนในหอยได้ ซึ่งส่วนมากจะเป็นกลุ่มดีดีที (Rojanavipart, 1995) โดยจะพบการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทั่วตัว เช่น เยื่อหุ้มลำตัวและอวัยวะภายใน (Ferreira, Cortesao, Castro, & Vale, 1990) เท้า และกล้ามเนื้อยึดเปลือก (Rajendran & Venugopalan, 1986) และพบว่าอาจมีการสะสมของดีดีทีไว้ในเนื้อเยื่อได้ในระดับปริมาณ 70,000 เท่าของระดับดีดีทีที่มีอยู่ในน้ำทะเล (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537)

การสะสมในปลา

ปลาสามารถที่จะสะสมสารออร์กาโนคลอรีนได้มากกว่าแพลงก์ตอนถึง 28.7 เท่า (Evans, Noguchi, & Rice, 1991) โดยปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนจะเพิ่มขึ้นตามอายุของปลา (Gutenmann, Ebel, Kuntz, Yourstone, & Lisk, 1992) ในปลากินพืชซึ่งอยู่ในน้ำที่มีเอนดริน

ปนเปื้อนอาจมีการสะสมในตัวได้ถึง 10,000 เท่าของปริมาณที่มีอยู่ในน้ำ (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) ส่วนการลดลงของสารออร์กาโนคลอรีนในปลาอาจเกิดจากการที่ปลาได้อพยพไปวางไข่ในบริเวณที่มีสารออร์กาโนคลอรีนเจือจาง ซึ่งเป็นผลทำให้ปริมาณไขมันในตัวปลาลดลงและการได้รับสารออร์กาโนคลอรีนจากสิ่งแวดล้อมลดลงด้วย (Cullen & Connell, 1992) การสะสมของสารออร์กาโนคลอรีนอาจพบได้ในเนื้อเยื่อทั่วไปในตัวปลา เช่น มีการตรวจวัดพบดีดีที เฮกซีเอช ดีดีดี และดีดีอี ตกค้างสะสมอยู่ในสมอง และเนื้อเยื่อไขมันของปลาไหล โดยพบดีดีที ดีดีดี และ ดีดีอี ในเนื้อเยื่อ ไขมันเท่ากับ 0.605, 0.633 และ 0.270 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Pick, de-Beer, & van-Dyk, 1981)

สารออร์กาโนคลอรีนมีผลต่อภาวะเจริญพันธุ์ (fertility) ของปลา โดยจะทำให้เอมบริโอของปลา การฟักไข่ และโอกาสรอดชีวิตของลูกปลาที่ฟักออกมาลดลงอีกด้วย (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) การที่สารออร์กาโนคลอรีนสะสมอยู่ในปลาสามารถจะบ่งบอกถึงสารพิษที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจจะกลายมาเป็นอาหารของมนุษย์ต่อไป และสามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบสุขภาพของมนุษย์ได้ (Zamojski, Smoczynski, Skibniewska, & Amarowicz, 1986)

การสะสมในนก

ในนกที่กินปลาพบว่าปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนมากกว่าปริมาณไขมันถึง 2 เท่า และมีมากขึ้น 5 ถึง 6 เท่า หลังจากการวางไข่ (Falandysz & Szefer, 1984) และพบว่าการสะสมดีดีดีเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณดีดีทีที่มีอยู่ในน้ำถึงประมาณ 80,000 เท่า (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) จากการวิเคราะห์หาปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในตัวอย่างเนื้อเยื่อตับ ไขมัน กล้ามเนื้อ และสมองของนกทะเลพบสารออร์กาโนคลอรีนมากที่สุดไนไขมัน ตับ กล้ามเนื้อ และสมอง ตามลำดับ โดยพบพีซีบีมากที่สุด ตามด้วยกลุ่มดีดีที กลุ่มคลอเดน เฮกซีบี และเฮกซีเอช ตามลำดับ ส่วนเฮกซีเอชที่พบมีปริมาณที่น้อยมาก ปริมาณพีซีบีที่ตรวจพบน้อยที่สุดเท่ากับ 2.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก ในตับของนกทะเลวัยอ่อน และตรวจพบพีซีบีมากที่สุดเท่ากับ 15,980 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก ในไขมันของนกทะเลในวัยเจริญพันธุ์ (Savinova, Polder, Gabrielsen, & Skaare, 1995)

สารออร์กาโนคลอรีนส่วนมากไม่มีผลต่อตัวนกโดยตรงแต่จะมีผลทางอ้อม เช่น มีผลทำให้เปลือกไข่ของนกบางลงเป็นผลให้อัตราการเกิดของนกลดลง อัตราการตายของตัวอ่อนเพิ่มขึ้น เกิดความผิดปกติทางสรีรวิทยา มีผลต่อการสืบพันธุ์ของนก หรือทำให้สัตว์ที่เป็นอาหารของนกลดลง ส่งผลให้นกเจริญเติบโตได้ช้า (วิไลลักษณ์ อิ่มอุดม, 2534 ; สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537 ; Harrison, 1997 ; Laws, 1981 ; Walker et al., 1996) ซึ่งนอกเหนือจากจะมีสาเหตุมาจากการ

ลดลงของอาหารแล้วนกยังต้องใช้พลังงานในการหาอาหารมากขึ้น และคุณภาพของอาหารก็ยังลดลงอีกด้วย (Whitmore, Cooper, & Sample, 1993) และจากการตรวจวัดสารออร์กาโนคลอรีนในนกทะเลที่อาศัยอยู่บริเวณแอนตาร์กติก (antarctic) พบว่านกทะเลก็มีการสะสมสารเหล่านี้เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายของสารออร์กาโนคลอรีนไปทั่วโลก (Van-Den-Brink & De-Ruiter-Dijkman, 1997) และได้มีการใช้สารออร์กาโนคลอรีนเป็นตัวติดตาม (tracer) ในการติดตามวงจรสารปนเปื้อนสารอินทรีย์ (organic contaminants cycling) ที่จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของสารกลุ่มนี้ (Roots, 1996)

การสะสมในคน

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการใช้ดีดีทีโดยตรงกับคน แต่พบว่าไม่มีอันตรายจากการใช้โดยตรงกับคนในครั้งนั้น และไม่มีรายงานการตายจากพิษเฉียบพลันของดีดีทีในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุหรือการพยายามฆ่าตัวตาย มีรายงานการสะสมดีดีทีในไขมันของเด็ก พบว่ามีสาเหตุมาจากอาหาร เช่น การกินอาหารที่มีดีดีทีปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ บ้าน และที่ใช้ในทางเกษตรกรรม และพบว่าคนงานที่มีโอกาสสัมผัสดีดีที จะมีดีดีทีสะสมในไขมันมากถึง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยไม่พบว่ามีอาการเจ็บป่วยให้เห็น (ไพโรจน์ อุ่นสมบัติ, 2529 ; วิไลลักษณ์ อิมอุดม, 2534) ชาวเอสกิโมได้รับสารออร์กาโนคลอรีนจากอาหารที่มีไขมันสูง ซึ่งจะพบสารกลุ่มนี้ได้ทั้งในน้ำมันผู้หญิงชาวเอสกิโมและเนื้อเยื่อไขมันของสัตว์ในบริเวณนั้น โดยพบสารกลุ่มนี้ในน้ำมันชาวเอสกิโมมากกว่าผู้หญิงที่อาศัยอยู่ในเขตเมืองของแคนาดา 2 ถึง 10 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการถ่ายทอดของสารออร์กาโนคลอรีนไปตามห่วงโซ่อาหาร (Dewailly et al., 1993) จากการวิจัยพบว่าดีดีทีที่มีค่าครึ่งชีวิตในไขมันในร่างกายมนุษย์ประมาณ 1 ปี ในขณะที่ดีดีทีมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 8 ปี และมีรายงานว่าสารออร์กาโนคลอรีนหลายชนิดมีฤทธิ์ก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) ส่วนในมนุษย์พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งบริเวณเนื้อเยื่อยึดต่อกระดูก (soft tissue sarcomas) (กองวัตภูมิพิช, 2541) โรคตับแข็ง โรคตับอักเสบเรื้อรัง และเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความผิดปกติของมารดาและทารกในครรภ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

การสะสมของสารออร์กาโนคลอรีนในเนื้อเยื่อไขมัน

สารออร์กาโนคลอรีนเป็นสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนระหว่างไขมันกับน้ำสูงมาก จึงสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันเป็นส่วนใหญ่ จากการศึกษาทั้งในคนและสัตว์ทดลอง แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของการกินกับปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนในเนื้อเยื่อไขมัน และเมื่อได้รับสารนี้เข้าสู่ร่างกายด้วยอัตราคงที่ ความเข้มข้นในเนื้อเยื่อไขมันจะถึงจุดสมดุล หลังจากนั้น

จะรักษาสภาพนี้ไว้ และเมื่อไม่ได้รับสารออร์กาโนคลอรีนเข้าไปอีก สารออร์กาโนคลอรีนจะถูกขับถ่ายออกจากร่างกายช้า ๆ การขับถ่ายนี้ได้รับการคาดคะเนว่าเป็นอัตราร้อยละ 1 ของสารนี้ที่เก็บสะสมไว้ในร่างกายที่เกิดขึ้นภายใน 1 วัน (วิลเลียมส์ อิมมูม, 2534)

จากการศึกษาในช่วงที่นิยมใช้ดีดีทีกันมากพบว่าการสะสมของดีดีทีในไขมันของมนุษย์ ถูกเก็บไว้ในไขมันของเนื้อเยื่ออะดิพอส (adipose tissue) และจะสะสมเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาและปริมาณที่ได้รับสารชนิดนี้ (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2537) และการสะสมจะลดลงตามการลดลงของดีดีทีที่ตกค้างในอาหาร และพบว่าระดับของดีดีทีที่สะสมในร่างกายขึ้นกับสิ่งตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่ผู้นั้นอาศัยอยู่ รวมทั้งอายุ และอาหารที่บริโภคซึ่งมีดีดีทีตกค้างอยู่ แต่ไม่พบว่าการสะสมในร่างกายนี้มีความสัมพันธ์อย่างเจาะจงกับความเจ็บป่วย หรือสุขภาพที่เจ็บป่วยแต่อย่างใด แต่พบว่ามีความสัมพันธ์กับการเพิ่มระดับคลอเลสเทอรอล ไตรกลีเซอไรด์ และแกมมา กลูตามิด ทรานสเปปทิดเอส ในซีรัม (วิลเลียมส์ อิมมูม, 2534)

สัตว์น้ำหลายชนิดได้รับการปนเปื้อนจากสารออร์กาโนคลอรีน และพบว่าสารเหล่านี้สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันเป็นส่วนใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นการสะสมในเนื้อเยื่อไขมันปลา ซึ่งการสะสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดและปริมาณไขมันในปลาเพิ่มขึ้น (Abd-Allah, 1994 ; Bamgbose, Jinadu, & Osibanjo, 1993 ; Hajslova, et al., 1997 ; Zamojski et al., 1986) ในนกทะเล ซึ่งพบพีซีบีในระดับเพียง 2.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก แต่พบในไขมันถึง 15,980 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก (Savinova et al., 1995) และในเต่าทะเล พบสารออร์กาโนคลอรีนมากที่สุดในไขมันใต้ผิวหนัง ตับ และกล้ามเนื้อหน้าอก ตามลำดับ (Rybitski, Hale, & Musick, 1995)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนกับปริมาณไขมันในหอยพบว่าปริมาณสารออร์กาโนคลอรีนที่ตกค้างจะขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อเยื่อไขมันของหอย (ปิยะวรรณ ศรีวิลาส และ จันทร์จรัส วัฒนะโชติ, 2541 ; Roe, 1998) โดยหอยนางรมจะมีปริมาณไขมันมากกว่าหอยแมลงภู่ และหอยแครง ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน (ปิยะวรรณ ศรีวิลาส และ จันทร์จรัส วัฒนะโชติ, 2541) ปริมาณไขมันในหอยนางรมจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูวางไข่ และหลังจากนั้นปริมาณไขมันจะลดลง และสารที่มีค่า K_{ow} ปานกลางหรือมีค่า K_{ow} ใกล้เคียงกับ 1 จะมีการสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของหอยมากกว่าสารที่มีค่า K_{ow} ต่ำ และสูง เนื่องจากต้องอาศัยทั้งความสามารถในการละลายน้ำ และการละลายในไขมันเพื่อที่จะผ่านผนังเซลล์ (Walker et al., 1996 ; Roe & MacIsaac, 1998)

หอยนางรม

หอยนางรมเป็นหอยสองฝาที่พบอยู่ทั่วไปในน้ำเค็ม เกาะอยู่ตามโขดหินหรือรากไม้ มีอยู่หลายชนิดที่อยู่ได้ตั้งแต่ความเค็มต่ำจนถึงความเค็มสูง ภายในเปลือกประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ โดยมีเนื้อเยื่อบาง ๆ ห่อหุ้มทั้งสองข้างของลำตัวเรียกว่าเนื้อเยื่อคลุม มีลักษณะเป็นริ้วแผ่ขยายออกไปถึงช่องปาก เหงือกมีสองคู่ ทำหน้าที่กรองอาหาร หายใจ และช่วยในการขับถ่ายของเสียออกจากร่างกาย บริเวณประมาณกึ่งกลางลำตัวมีกล้ามเนื้อใหญ่ทำหน้าที่ปิดและเปิดเปลือก (adductor muscle) ตลอดจนบังคับให้เปลือกอำmannน้อยตามต้องการ ส่วนถัดเข้าไปเป็นก้อนเนื้ออันเป็นที่รวมของอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งบรรจุอยู่ภายใน เช่น ระบบประสาท ระบบการถ่ายของเสีย การไหลเวียนโลหิต และระบบสืบพันธุ์ เนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่มของหอยนางรมไม่ได้บรรจุอยู่เต็มฝาเปลือกทั้งสองข้างเลยทีเดียว แต่ภายในมีส่วนที่เป็นช่องว่างเปิดติดต่อกับภายนอก ช่องเปิดนี้เป็นทางผ่านให้อาหารเข้าไปพร้อมกับน้ำ ผ่านการรวบรวมให้เป็นกลุ่มก้อนแล้วเข้าสู่ปาก ผ่านระบบย่อยอาหาร สุดท้ายเหลือเศษจะผ่านออกทางทวาร พร้อมกำจัดออกไปจากตัวหอย ซึ่งจะดำเนินไปในเวลาเดียวกับการหายใจ และการถ่ายของเสียของหอยด้วย

การกินอาหารของหอยนางรม ส่วนใหญ่ได้มาจากการกรองน้ำ เนื่องจากเป็นสัตว์ที่อาศัยอยู่กับที่ อวัยวะที่ใช้ในการกรองอาหารคือ เหงือก โดยน้ำที่ไหลผ่านเข้ามาในเนื้อเยื่อคลุมจะไหลผ่านเหงือกไปออกทางท่อน้ำออก อาหารหรืออนุภาคต่าง ๆ ซึ่งถูกพัดพามากับน้ำจะติดบนซี่เหงือก อาหารที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะตกลงในเนื้อเยื่อคลุมตอนล่าง และถูกขับออกทางท่อน้ำออก ส่วนที่มีขนาดเล็กจะมีเมือกมาคลุม และมีขนเล็ก ๆ (cilia) คอยพัดโบกให้อนุภาคเหล่านั้นเข้าสู่ทางเดินอาหารต่อไปได้ อนุภาคที่ไม่สามารถถูกย่อยได้จะถูกขับออกมาทางท่อน้ำออกภายหลัง กระบวนการกรองของหอยสองฝานี้จะเป็นไปด้วยดีและมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อคลุมมากพอ และตัวหอยอยู่ในน้ำตลอดเวลา (กรมประมง, 2536) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการกรองของหอยได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเล นอกจากนี้ชนิดและความเข้มข้นของอาหารก็มีผลต่ออัตราการกรองด้วย และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการกรองของหอยแต่ละชนิดพบว่าหอยเสียบและหอยแมลงภู่มิอัตราการกรองสูงสุด รองลงมาคือ หอยนางรม หอยลาย และหอยแครง ตามลำดับ (มันทนาภิรมย์, 2524)

การสืบพันธุ์ของหอยนางรม โดยทั่วไปแล้วหอยสองฝาจะมีเพศแยกกัน ยกเว้นในบางกรณีหอยตัวเดียวอาจจะมีทั้งไข่และน้ำเชื้อก็ได้ ลักษณะที่มีทั้งสองเพศอยู่ในตัวเดียวกันนี้เรียกว่า ภาวะ (hermaphrodite) ซึ่งอาจพบได้ในหอยสองฝาแทบทุกชนิด โดยที่มันอาจจะเปลี่ยนแปลงเพศได้เมื่อเข้าสู่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะแยกกันไปเลย การจำแนกเพศของ

หอยนางรมเมื่อดูจากลักษณะภายนอกเราไม่สามารถที่จะแยกได้ นอกจากจะเปิดเปลือกหอยออกมาแล้วสังเกตดูจากอวัยวะสืบพันธุ์ซึ่งปกคลุมอยู่รอบกระเพาะอาหาร โดยนำมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จึงจะแยกได้ว่าเป็นตัวผู้หรือตัวเมีย เพราะทั้งตัวผู้และตัวเมียเมื่อมีความสมบูรณ์เพศก็จะมีสีครีมหาวเหมือนกัน (กรมประมง, 2536)

ตัวอ่อนของหอยนางรมจะมีปริมาณมากในระหว่างฤดูฝน โดยพบทุกชุมมากในเดือนพฤศจิกายน การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของปริมาณประชากรตัวอ่อน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของฤดูวางไข่ของหอยที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำ และมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงระหว่างวันตามลักษณะของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอ่อน (ไพเราะ เคาศิริกุล, 2518)

องค์ประกอบทางชีวเคมีของหอยนางรม

องค์ประกอบทางชีวเคมีของหอยนางรมประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลวคือน้ำ ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 77.4 ถึง 90.2 และส่วนที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 5.6 ถึง 10.0 ไขมันร้อยละ 0.7 ถึง 2.4 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1.9 ถึง 4.7 และเกลือแร่และวิตามินอีกประมาณร้อยละ 2 (อำนวย โชติญาณวงศ์, 2524) ปริมาณน้ำในหอยนางรม *Crassostrea cucullata* จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเค็มของน้ำทะเล โดยปริมาณน้ำในหอยนางรมจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเค็มของน้ำทะเลลดลง ปริมาณไกลโคเจนในหอยนางรมจะลดลงในช่วงฤดูการวางไข่และจะเพิ่มขึ้นโดยเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 21.45 เป็นร้อยละ 45.03 ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gametogenesis) ปริมาณไขมันเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 4.33 เป็นร้อยละ 11.25 ปริมาณไขมันสูงสุดจะอยู่ในช่วงฤดูการวางไข่ หลังจากการวางไข่ปริมาณไขมันในหอยจะลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการพัฒนาอวัยวะสืบพันธุ์ (gonad) ปริมาณโปรตีนเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 52.30 เป็นร้อยละ 70.00 ซึ่งค่าสูงสุดนี้พบในช่วงฤดูวางไข่ (Nagabhushanam & Bidarkar, 1978)