บทที่ 2

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารประกอบดีบุกอินทรีย์

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ (Organotin) เป็นสารประกอบที่มีพันธะดีบุก-คาร์บอนอย่างน้อย 1 พันธะด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยปกติจะมีการจัดเรียงตัวอิเล็กตรอนของดีบุกเป็นแบบ SP^3 ไฮบริไดเซชั่น (Hybridization) ทำให้สารประกอบดีบุกอินทรีย์มีพันธะโควาเลนต์ของดีบุกเป็นแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ในสารประกอบดีบุกอินทรีย์จะมีคุณสมบัติค่อนไปทางไอออนิกเช่น ไตรออร์กาโนทินไฮดรอกไซด์จะประพฤติตัวเหมือนอนินทรีย์เบส, บิส-(ไตรออร์กาโนทิน) ออกไซด์ จะประพฤติตัวเป็นเบสแก่สามารถทำปฏิกริยากับกรดอินทรีย์ หรือ กรดอนินทรีย์ แล้วให้เกลือที่ไม่นำไฟฟ้าและไม่ละลายน้ำ โดยปกติแล้วดีบุกจะไม่เกิดพันธะคู่กับออกซิเจน เช่น ไดออร์กาโนทินออกไซด์ จะเกิดอยู่ในรูปของโพลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง (Cross-linked) ขึ้นภายในโมเลกุลระหว่างดีบุก-ออกซิเจน สารประกอบดีบุกอินทรีย์เฮไลด์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกริยา แทนที่เหมือนสารอนินทรีย์พวกโลหะเฮไลด์ ส่วนมากจะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ นิยมใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์อื่นๆ สารประกอบดีบุกอินทรีย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ (Tetraorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_4Sn โดยที่ R อาจจะเป็นหมู่แอลิฟาติก เช่น เมธิล- บิวทิล- หรือ หมู่อะโรมาติก เช่น เฟนิล เป็นต้น สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์ 4 หมู่มีความสำคัญมากในการใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบอื่นๆ เช่น โมโน- ได- และ ไตรออร์กาโนทิน

2. สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่ (Triorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_3SnX โดยที่ R อาจจะเป็นหมู่แอลคิลหรือหมู่แอริล ส่วน X อาจจะเป็นเฮไลด์ ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอกซิเลต เป็นต้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สองหมู่ (Diorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_2SnX_2 โดยที่ R อาจเป็นหมู่แอลคิล หรือ หมู่แอริล ส่วน X อาจเป็นพวกเฮไลด์ ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอกซิเลต เป็นต้น

4. สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่ดีบุกอินทรีย์หนึ่งหมู่ (Monoorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ $RSnX_3$ โดยที่ R อาจเป็นหมู่แอลคิลหรือหมู่แอริล ส่วน X จะเป็นพวกเฮไลด์ ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และคาร์บอกซิเลตเป็นต้น (ชฎาพร, 2534)

การใช้ประโยชน์จากสารประกอบดีบุกอินทรีย์

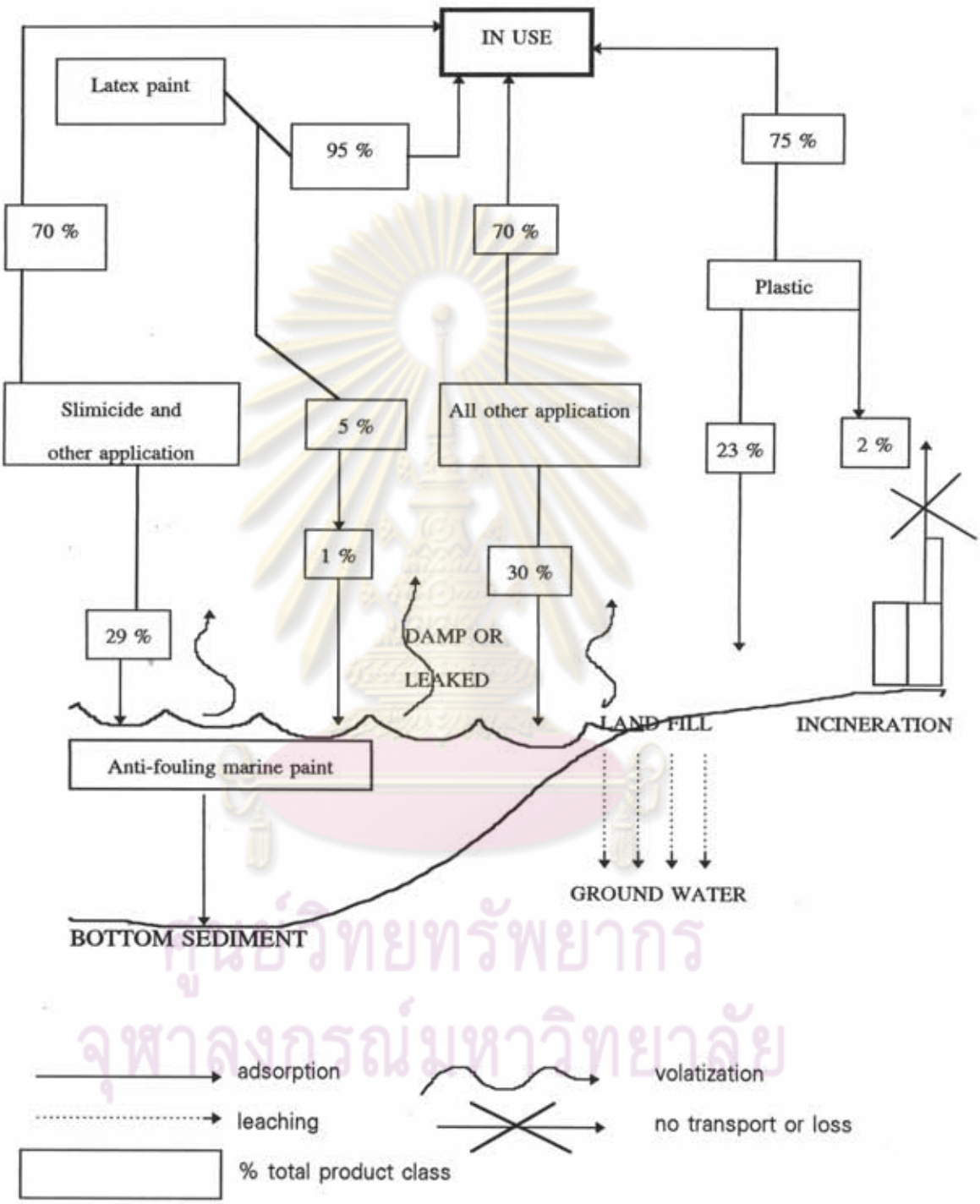
การใช้ประโยชน์จากสารประกอบดีบุกอินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็นการใช้ใน 2 ลักษณะ คือการใช้เป็นสารสำหรับปราบศัตรูทางชีวภาพและการใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมีประมาณ 70 เปอร์เซนต์ของการใช้ทั้งหมด (พรสวรรค์, 2536) สารประกอบไตรออร์กาโนทิน (Triorganotin) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่นๆที่ใช้ในภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมเช่น โมโนออร์กาโนทิน ไดออร์กาโนทินและไตรออร์กาโนทิน โดยนำมาใช้เป็นสารสำหรับปราบศัตรูทางชีวภาพ (Biocide) ในปี ค.ศ.1950 เริ่มมีการใช้ดีบุกอินทรีย์ในการเป็นสารฆ่าเชื้อรา (Fungicide) ทางเกษตรกรรม และสารฆ่าแบคทีเรีย (Bacteriocide) ในอุตสาหกรรมในรูปของไตรฟีนิลทินไฮดรอกไซด์และไตรฟีนิลทินอะซิเทต เพื่อป้องกันการเกิดโรคใบจุด (Photobright) ในพืชผักต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืชพวกหนอนชนิดต่างๆ ตลอดจนกำจัดแมลงสาบและยุงตามบ้านเรือนด้วยแต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย จนกระทั่งปีค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพื่อนำสารประกอบไตรออร์กาโนทินมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยในช่วงต้นปี 1960 มีการนำดีบุกอินทรีย์ในรูปของ ไตรบิวทิลทินออกไซด์ และ ไตรบิวทิลทินฟลูออร์ไรด์ในการกำจัดหอยทากน้ำจืดซึ่งเป็น Intermidiate host ของหนอนจีนัส Shistosoma ในการแพร่เชื้อโรคพยาธิใบไม้ในตับ (Schistosomiasis) สู่มนุษย์ นอกจากจะนำมาใช้เป็นยาปราบศัตรูทางชีวภาพแล้วยังนำมาใช้เป็นสารรักษาเนื้อไม้ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชศัตรูสัตว์ที่เฉพาะเจาะจงกับสิ่งที่ต้องการต่อต้านโดยใช้ความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์อื่นๆ สารประกอบไตรออร์กาโนทินที่นำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้แก่ ไตรเมทธิลทินใช้เป็นยาฆ่าแมลง ไตรโพรพิลทิน ไตรบิวทิลทิน ไตรฟีนิลทินใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชและแบคทีเรีย ไตรไซโคเฮกซิลทินไฮดรอกไซด์ใช้ปราบแมลงไรที่ตอมผลไม้ บีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ใช้รักษาเนื้อไม้ ป้องกันเชื้อ

รา แมลง มอดกัดกินเนื้อไม้และผสมสีทาเรือเพื่อป้องกันพรียง การใช้ประโยชน์สารประกอบไตรออร์กาโนทินส่วนใหญ่แล้วใช้เป็นสารที่ทำให้เสถียร (Stabilzer) ในการผลิตพลาสติกชนิดพีวีซี (P.V.C.) ให้ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนทั้งในกระบวนการผลิต (180-200) องศาเซลเซียส)และขณะใช้งานกลางแดดสีคงทนไม่หมองมัวและไม่เปราะ สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่ใช้เป็นสีกันเพรียงจะมีอะตอมของดีบุก (Sn) จับอยู่กับหมู่บิวทิล (C_4H_9) 3 หมู่ด้วยพันธะแบบโควาเลนต์ การใช้ในลักษณะเป็นสารสำหรับปราบศัตรูทางชีวภาพประมาณ 30 เปอร์เซนต์ของที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยจะใช้สารประกอบที่มีหมู่ดีบุกอินทรีย์ 3 หมู่ เป็นหลัก

สารประกอบดีบุกอินทรีย์กับสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมเกิดจากการใช้งานในหลายๆ รูปแบบ เช่น การใช้งานที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายในบรรยากาศโดยเป็นยาปราบศัตรูพืช หรือยาฆ่าเชื้อราทางเกษตรกรรม การใช้งานในทางอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเป็นส่วนผสมลงในสีทาบ้าน ผสมพลาสติกและ พีวีซี เพื่อป้องกันการซีดของสีและไม่เปราะ การใช้งานในน้ำโดยตรงในรูปของสีกันเพรียง การใช้งานในหลายๆ รูปแบบดังที่กล่าวมานี้สามารถปลดปล่อยสารประกอบ ดีบุกอินทรีย์ออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นสิ่งแวดล้อมทางดิน น้ำ หรือแม้กระทั่งสิ่งแวดล้อมใต้พื้นท้องทะเล เพราะเมื่อเกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมแล้วสามารถสะสมมาถึงสิ่งมีชีวิตชั้นสูงเช่นมนุษย์ด้วย สารประกอบดีบุกอินทรีย์สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทางด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการแพร่กระจายทางอากาศ ทางน้ำ และทางดิน โดยหล่งที่สามารถแพร่กระจายสารประกอบดีบุกอินทรีย์เข้าสู่สิ่งแวดล้อมนั้นแสดงในรูปที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1 แสดงปริมาณการใช้และการแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

ที่มา : Laughlin and Liden (1985)

ตารางที่ 1 แหล่งของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

ตัวกลาง	สาร	แหล่ง
อากาศ	R_3SnX	- การฉีดพ่นใช้งานในภาคเกษตรกรรม - การระเหยออกจากการใช้เป็นสารปราบศัตรูทางชีวภาพ
	R_3SnX,R_2SnX_2 และ $RSnX_3$	- การฟุ้งกระจายจากการใช้งานในทางอุตสาหกรรม
	R_2SnX_2 และ $RSnX_3$	- การพ่นสารสารประกอบดีบุกอินทรีย์เคลือบกระจกโดยการใช้อุณหภูมิและความดันที่สูง เพื่อให้เกิดฟิลม์ SnO_2
น้ำ	R_3SnX	- การใช้สีกันเพรียง - การฟุ้งกระจายมาจากการใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - น้ำล้นผิวดินจากการเกษตรกรรม - ขบวนการทางอุตสาหกรรม
	R_2SnX_2 และ $RSnX_3$	- ชะล้างมาจากการใช้เป็นสารเสถียรในผลิตภัณฑ์ พีวีซี
	R_3SnX	- การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - สารรักษาสภาพเนื้อไม้
ดิน	R_3SnX	- การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - สารรักษาสภาพเนื้อไม้
	R_3SnX และ R_2SnX_2	- จากการทิ้งสารเหลือใช้ทางอุตสาหกรรม

ที่มา: Blunden and Chapman, 1986

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณการใช้งานของสารประกอบดีบุกอินทรีย์

ในปี 1976 มีการใช้งานดีบุกประมาณ 200 x 10^3 ตัน ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุกอินทรีย์ประมาณ 28 x 10^3 ตัน โดยปริมาณการใช้งานประมาณ 40 เปอร์เซนต์จะเกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานของ United Kingdom Department of The Environment ในปี ค.ศ. 1986 พบว่าปริมาณการใช้งาน ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในปี 1980 มีประมาณ 30 x 10^3 ตัน แบ่งการใช้งานได้ดังนี้

- สารทำให้เสถียรในผลิตภัณฑ์ พี วี ซี (ไดบิวทิล) ประมาณ 20 x 10^3 ตัน (66.6 %)
- สารรักษาสภาพเนื้อไม้ (ไตรบิวทิล) ประมาณ 3-4 x 10^3 ตัน (10-13 %)
- สีกันเพรียง (ไตรบิวทิล) 2-3 x 10^3 ตัน (6.6-10 %) และ
- การใช้งานในลักษณะอื่นทั้ง ได-และ ไตรบิวทิลทิน <2 x 10^3 ตัน (~6 %)

(Dobson, 1990)

จากการสำรวจการขายสีที่มีสารประกอบไตรบิวทิลทินและสีกันเพรียงในประเทศฟินแลนด์ทั้งในลักษณะขายปลีกและขายส่ง เมื่อปี 1987 มีปริมาณ 42,000 ลิตร มีปริมาณการขายปลีกประมาณ 37,000 ลิตร ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินในสีกันเพรียงมีประมาณ 4-18 เปอร์เซนต์ สารรักษาสภาพเนื้อไม้ที่มีสารประกอบไตรบิวทิลทิน ประมาณ 130 ตัน มีส่วนประกอบของสารประกอบไตรบิวทิลทิน 0.9-1.8 เปอร์เซนต์ (Dobson, 1990)

การจดทะเบียนสีกันเพรียงในประเทศสหรัฐอเมริกามี 300 ชนิด ในปี 1987 แต่มีสีกันเพรียง 17 ชนิดเท่านั้นที่จดทะเบียนสำหรับใช้โดย US.EPA. (Environmental Protection Agency) . ในปี 1988 สหราชอาณาจักรมีการจดทะเบียนสารรักษาสภาพเนื้อไม้ 345 ชนิด สารปราบศัตรูทางชีวภาพประมาณ 24 ชนิด และสีกันเพรียง 215 ชนิดที่มีส่วนประกอบของไตรบิวทิลทิน โดยอยู่ในการควบคุมของกฎหมายยาปราบศัตรูพืช และในปี 1989 ปริมาณการจดทะเบียนของสีกันเพรียง สารรักษาสภาพเนื้อไม้และสารปราบชีวภาพมีการลดลงมาเหลือ 148, 337 และ 26 ชนิดตามลำดับ (MAFF/HSE, 1989) จะเห็นได้ว่าปริมาณการจดทะเบียนของสีกันเพรียงในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี 1987 มีการจดทะเบียนโดยการที่ไม่มีการควบคุมความรุนแรงของสีแต่ละชนิดจึงทำให้สีแต่ละชนิดไม่ได้มาตรฐานของ US.EPA. ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานของการเกิดพิษของสีกันเพรียงไว้ ทำให้สีกันเพรียงที่ไม่ได้มาตรฐานหลายชนิดเลิกการผลิตไป

บีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์

มีสูตรทางเคมีคือ $(CH_3\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2)_3Sn\text{-}O\text{-}Sn(CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_3)_3$ มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์

IUPAC name	Distannoxane, hexabutyl
CAS name	Bis(tributyltin) oxide
CAS number	56-35-9
Molecular formula	$C_{24}H_{54}OSn_2$
Relative molecular mass	596
Boiling point (°C)	173 (130Pa)
Melting point (°C)	< - 45
Relative density (20 °C)	1.17-1.18
Vapour pressure (Pa at 20 °C)	1×10^{-3}
Refactive index (20 C)	1.4880-1.4895

ที่มา: (Dobson, 1990)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้ประโยชน์ของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์

จากคุณสมบัติในการเกิดพิษของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ จึงมีการนำคุณสมบัติในการเกิดพิษเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการฆ่าสิ่งมีชีวิตที่ต้องการกำจัด ซึ่งการใช้ประโยชน์โดยทั่วไปพอจะสรุปได้ดังนี้

1. สารฆ่าเชื้อราและรักษาสภาพเนื้อไม้
2. สารฆ่าสิ่งมีชีวิตทางการเกษตร
3. สารทำให้เสถียรในผลิตภัณฑ์พีวีซี

4. สารผสมลงในสีเพื่อทำเป็นสีป้องกันสิ่งมีชีวิตประเภทเกาะติดใต้ผิวท้องเรือ (สีกันเพรียง)

การใช้ประโยชน์ของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ในรูปของสารป้องกันสิ่งมีชีวิตประเภทเกาะติดหรือที่เรียกกันว่าสีกันเพรียง (Anti-fouling marine paints) เป็นการนำสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ผสมลงในสีเพื่อป้องกันการเกาะติดของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ที่พื้นท้องเรือ โดยมีการเริ่มนำเข้ามาใช้เมื่อช่วงต้นปี ค.ศ.1960 ด้วยความสามารถในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในความเข้มข้นปริมาณต่ำ และรวมถึงมีความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในปริมาณต่ำเช่นกัน

การควบคุมปริมาณการใช้สารประกอบไตรบิวทิลทิน

หลายๆ ประเทศได้มีความเข้มงวดในการใช้สารประกอบไตรบิวทิลทินในลักษณะการใช้เป็นสีกันเพรียง เพราะการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตเป็นวงกว้าง การควบคุมในแต่ละประเทศจะแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีการควบคุมการใช้กับเรือที่มีความยาวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 เมตร ลงมา หรือจะควบคุมอัตราการชะล้างของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ออกมาจากสีกันเพรียง ประมาณ 4 หรือ 5 ไมโครกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ต่อวัน (Dobson, 1990)

การปนเปื้อนของสารประกอบไตรบิวทิลทินในสภาพแวดล้อมทางทะเล

การใช้งานของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในลักษณะหลายรูปแบบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้สามารถบอกได้ว่าทางที่สามารถนำสารประกอบไตรบิวทิลทิน เข้าสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเลได้ด้วยกันทั้งนั้นไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในทางอากาศ ดินและน้ำ การปนเปื้อนอาจจะเริ่มมาจากการนำสารเข้าสู่แหล่งน้ำจืด สะสมในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ จนนำมาสะสมในทะเลในที่สุด โดยเฉพาะการใช้งานในน้ำโดยตรงในรูปแบบของสีกันเพรียงจะสามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารประกอบไตรบิวทิลทินในปริมาณมาก

การปรากฏของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในน้ำทะเลนั้น ไม่ว่าสารประกอบไตรบิวทิลทินจะเข้าสู่ทะเลในรูปแบบใด จะเกิดการสร้างรูปแบบของสารประกอบขึ้น เช่นที่ pH 8

จะเกิดรูปแบบของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในลักษณะสารประกอบคลอไรด์ ไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต แต่ไม่ว่าสารประกอบจะอยู่ในรูปใดจะเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆได้ใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุผลนี้เองจึงได้มีการอ้างถึงการเกิดพิษของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในรูปของ ไอออน (TBT^+) (Bryan and Gibbs, 1991)

การวัดปริมาณของสารประกอบไตรบิวทิลทินในสหราชอาณาจักรในช่วงปี 1980 ชี้ให้เห็นถึงปริมาณที่พบในบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการสะสมสารประกอบไตรบิวทิลทิน ว่ามีความสัมพันธ์ต่อปริมาณการใช้สารประกอบไตรบิวทิลทินจริงๆ

1. สามารถพบความเข้มข้นประมาณ 1,000 นาโนกรัมต่อลิตรได้ในบริเวณที่มีการจอดเรือยอร์ชในช่วงฤดูแล้ง และจะพบความเข้มข้นที่สูงมากในบริเวณที่มีการทำความสะอาดเรือและการทำสีเรือที่มีสารประกอบไตรบิวทิลทิน

2. บริเวณที่มีการจอดเรือสินค้าใหญ่ๆ จะมีความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่ำกว่าบริเวณที่มีการจอดเรือเล็กในปริมาณมาก

3. ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน บริเวณปากแม่น้ำส่วนมากจะต่ำในช่วงฤดูหนาวและเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการขัดล้างของสีใหม่ในช่วงฤดูใบไม้ผลิและยังสูงอยู่ในช่วงฤดูร้อนจะลดลงในช่วงฤดูใบไม้ร่วงซึ่งเป็นช่วงที่มีการเริ่มนำสีเรือเก่าออก

4. ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินที่ผิวหน้าน้ำมีถึงหลายร้อยนาโนกรัมต่อลิตรเช่นที่ท่าเรือ Hamble ของเมือง Southampton เนื่องจากเป็นที่ที่มีการจอดเรือเล็กเป็นจำนวนมาก โดยที่ในบริเวณอื่นนั้นจะพบในความเข้มข้นเพียง 50 - 100 นาโนกรัมต่อลิตร

5 ในบริเวณปากแม่น้ำที่มีการแบ่งชั้นของน้ำโดยมีชั้นของน้ำเค็มเป็นตัวแบ่ง ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน จะมีแนวโน้มที่จะลดน้อยลง

6. ในบริเวณปากแม่น้ำและที่จอดเรือ ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ที่ผิวหน้าชั้นน้ำจะมีความเข้มข้นที่สูงกว่าชั้นล่างลงไป 1.9 - 27 เท่า ซึ่งเป็นการพบที่สำคัญเพราะว่าที่ผิวน้ำนั้นเป็นบริเวณของตัวอ่อนของสัตว์น้ำระยะต่างๆ หลายชนิดเป็นจำนวนมาก และส่วนมากจะมีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจ

ในช่วงของปี 1985 ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ที่ผิวหน้าน้ำในสหราชอาณาจักรในบริเวณปากแม่น้ำมีค่าตั้งแต่น้อยกว่า 1 นาโนกรัมต่อลิตร ถึงมากกว่า 1,000 นาโนกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะค่าที่พบได้ทั่วไปในบริเวณปากแม่น้ำจะมีค่าอยู่ในช่วง 10-100 นาโนกรัมต่อลิตรที่ระดับผิวน้ำ (Bryan and Gibbs, 1991)

การย่อยสลายของสารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำทะเล

ความสามารถในการละลายของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ ในน้ำนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ค่า Oxidation-reduction potential, ความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ, Ionic strength, ความเข้มข้นและลักษณะของตัวทำละลาย ความสามารถในการทำละลายของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ในน้ำมีรายงานว่ามีค่า 750 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ ค่า pH 6.6 และ 31,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 8.1 พันธะระหว่าง คาร์บอน-ดีบุก ไม่สามารถสลายตัวโดยน้ำและค่าครึ่งชีวิตเมื่อมีแสงสว่างมีค่ามากกว่า 89 วัน (Emund, 1988)

สิ่งหนึ่งที่ป้องกันการเกิดพิษของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ คือความสามารถในการย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิตซึ่งอาศัยขั้นตอนของการ Debutylation เกิดสารประกอบไดบิวทิลทิน (DBT) และสารประกอบโมโนบิวทิลทิน (MBT) ในภาคสนามนั้นความเข้มข้นของสารประกอบไดบิวทิลทินในแหล่งน้ำใดก็ตาม จะต่ำกว่าสารประกอบไตรบิวทิลทินและความเข้มข้นของสารประกอบโมโนบิวทิลทินจะมีค่าต่ำสุด และในขณะนั้นความเข้มข้นของสารประกอบเททระบิวทิลทิน จะสามารถถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียและแพลงตอนพืช (Phytoplankton) การย่อยสลายของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในน้ำทะเลนั้นจะถูกสลายโดยแสงร่วมกับสารประกอบไนเตรต ค่าครึ่งชีวิตของสารประกอบไตรบิวทิลทินจะมีค่า 3-8 วัน ในที่มีแสง และ 7-13 วันในที่มืด ค่าครึ่งชีวิตมีแนวโน้มที่ยาวนานขึ้นเมื่อ
อุณหภูมิต่ำลงคือมีค่า 60 วัน ที่ 5 องศาเซลเซียส และยังพบว่าจุลินทรีย์ในน้ำมีผลต่อการอยู่ตัวของสารประกอบบีสไตรบิวทิลทิน เช่น ปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินมีค่า 5,000 นาโนกรัมต่อลิตร ในที่จอดเรือที่มีการปนเปื้อนอย่างมากมีค่าครึ่งชีวิต 13 วัน ที่ 20 องศาเซลเซียส แต่ในแหล่งน้ำที่สะอาด ค่าการย่อยสลายจะยาวนานขึ้น พืชบางชนิดเช่นสาหร่ายเซลเดียวและ หญ้าทะเล (Ell grass, *Zostera marina*) มีส่วนช่วยในการย่อยสลายสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทิน ในบริเวณที่มีน้ำตื้นบางพื้นที่ (Bryan and Gibbs, 1991)

Thain และคณะ (1987) ศึกษาการย่อยสลายของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทิน ออกไซด์ และสารประกอบไดบิวทิลทิน พบค่าครึ่งชีวิต 6 วันสำหรับสารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำจืดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 60 วัน สำหรับสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ในน้ำทะเลที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสและ 90 วัน สำหรับสารประกอบไดบิวทิลทินออกไซด์ในน้ำทะเลที่ 5 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายและการปรากฏของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ และสารประกอบไดบิวทิลทินออกไซด์ มีลักษณะที่คล้ายกัน ทำให้การวัดสารประกอบทั้ง 2 ชนิด ในสหราชอาณาจักร มีอัตราส่วนใกล้เคียงกันในสถานที่เดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามการปรากฏของสาหร่ายและแบคทีเรียที่ทนต่อสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ได้ในอุณหภูมิที่ต่างกันทำให้มีความแตกต่างกันของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินในบริเวณเดียวกันในแต่ละฤดู

Lee และคณะ (1987) ศึกษาอัตราการย่อยสลายของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทิน ออกไซด์ ในน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม 22 ส่วนในพันส่วน อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส จากแม่น้ำ Skidaway ในรัฐจอร์เจีย ประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าในที่ที่มีแสงจะมีอัตราการย่อยสลายมากกว่าในที่มืดและในน้ำที่มีความเข้มข้นของ Chlorophyll 3 และ 12 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่า 9 วัน และ 4 วัน ตามลำดับ จากการทดลองนี้ยืนยันได้ว่าการย่อยสลายของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทิน ออกไซด์ในน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของสาหร่ายชนิดต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในแหล่งน้ำนั้น

สารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินในตะกอน

จากคุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบไตรบิวทิลทิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการละลายในไขมันและการที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ บอกได้ว่าเมื่อสารประกอบไตรบิวทิลทินลงสู่แหล่งน้ำ จะทำการเกาะกับสารที่เป็นตะกอนในน้ำโดยขึ้นกับสภาพของตะกอนนั้นๆ ประมาณได้ว่า 10-95 เปอร์เซนต์ของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์เมื่อลงสู่แหล่งน้ำแล้วจะเข้าจับกับตะกอนในแหล่งน้ำนั้นๆ และจะอยู่ในสภาพนั้นๆ นานกว่า 10 เดือน โดยไม่หลุดออกมา แต่จะมีการย่อยสลายในตะกอน การศึกษาหาอัตราการเกาะในตะกอนที่ท่าเรือ Pearl มีค่า 0.57 นาโนกรัมไตรบิวทิลทินต่อตารางเซ็นติเมตรต่อวัน ไม่มีการหลุดออกของสารประกอบไตรบิวทิลทินจากดินตะกอน แต่จะมีการย่อยสลายเกิดเป็นสารประกอบ ไดบิวทิลทิน ในอัตรา 0.16-0.55 นาโนกรัมไดบิวทิลทินต่อตารางเซ็นติเมตรต่อวัน (Dobson, 1990)

Dobson (1990) ได้อธิบายการเข้ายึดเกาะของสารประกอบไตรบิวทิลทินในตะกอนมีปัจจัยสำคัญคือ

-ความเค็ม

-ขนาดของดินตะกอน

-ปริมาณของดินตะกอน

-อุณหภูมิ

-ปริมาณของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินตะกอนนั้น

สารประกอบไตรบิวทิลทิน สามารถยึดเกาะติดกับดินตะกอนและสารแขวนลอยได้ ค่าครึ่งชีวิตสำหรับการหลุดออกจากดินตะกอนและสารแขวนลอยมีค่ามากกว่า 10 เดือน ค่าครึ่งชีวิตของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในดินตะกอนในน้ำจืดมีค่าประมาณ 16 สัปดาห์ และ 23 สัปดาห์ สำหรับในน้ำเค็ม (Emund, 1988)

การเกาะตัวของสารประกอบไตรบิวทิลทินบนสารแขวนลอยต่างๆ ทำให้เกิดการตกลงสู่ดินตะกอน ตัวอย่างเช่น ท่าเรือ Poole ในสหราชอาณาจักร ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน มีค่าจาก 49 นาโนกรัมต่อลิตร ถึง 1,270 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งและความเข้มข้นของสารประกอบไดบิวทิลทินมีค่าใกล้เคียงกัน อัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทินทินระหว่างดินตะกอนและน้ำมีค่า 2,400 ต่อ 15,000 เท่า ในที่ๆ มีการปนเปื้อนมาก ในแม่น้ำ Severn และ บริเวณ Black creek ในอ่าว Chesapeake มีปริมาณในดินตะกอนในช่วงที่น้อยกว่า 50 นาโนกรัมต่อกรัม อัตราส่วนระหว่างตะกอนต่อน้ำ มีค่า 860 ต่อ 3,800 เท่า ความเข้มข้นของสารประกอบไดบิวทิลทินมีค่าใกล้เคียงกับสารประกอบไตรบิวทิลทิน การกระจายของสารประกอบไตรบิวทิลทินในดินตะกอนและในน้ำ มีอัตราส่วนแตกต่างกันเนื่องจากน้ำถูกควบคุมโดยปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณของสาร ขนาดอนุภาคของดินตะกอน ชนิดดินตะกอนและความเค็ม (Bryan and Gibbs, 1991)

Kram และคณะ (1989) ศึกษาการปลดปล่อยสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์จากดินตะกอน ในหาดซานเดียเอโก้ (San Diego Bay) พบว่าในขนาดดินตะกอนละเอียดจะปลดปล่อยสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ปริมาณ 40 เปอร์เซนต์ ภายใน 24 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนหยาบซึ่งปลดปล่อยได้ถึง 90 เปอร์เซนต์ ภายใน 24 ชั่วโมง

Unger และคณะ (1988) แสดงถึงการเกาะยึดของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ในดินตะกอนว่าจะถูกปลดปล่อยออกมาในเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง และชี้ให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมที่มีการผสมผสานความเข้มของสารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำและในดินตะกอนจะอยู่ในสภาพที่สมดุลย์ได้และคาดการณ์ต่อไปอีกว่าในพื้นที่ที่มีการใช้สีทาเรือที่มีส่วนประกอบของสารประกอบไตรบิวทิลทิน เมื่อถูกกำหนดการใช้ให้น้อยลง การหลุดออกจากดินตะกอนของสารประกอบไตรบิวทิลทิน และการถูกชะล้างออกจากสีเรือก็จะทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลมีแนวโน้มที่จะน้อยลง และจากการออกสำรวจภาคสนามในสหราชอาณาจักร ก็มีแนวโน้มว่าจะเป็นเช่นนั้น

Unger และคณะ (1987) ศึกษาการยึดเกาะของสารประกอบไตรบิวทิลทินคลอไรด์ ในดินตะกอนที่ได้จากอ่าว Chesapeake พบว่าในเวลา 24 ชั่วโมง ของการยึดเกาะจะได้ค่าเป็นกราฟเส้นตรง และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการยึดเกาะเท่ากับ 1,000 และในการทดสอบการหลุดออกจากตะกอนในเวลา 24 ชั่วโมงได้ค่าเท่ากัน แสดงถึงสารประกอบไตรบิวทิลทินคลอไรด์มีทั้งคุณสมบัติการยึดเกาะและการหลุดออกจากตะกอนสลับกันไปมาได้ และค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเค็ม

การถูกย่อยสลายของสารประกอบไตรบิวทิลทิน ไปเป็นสารประกอบไดบิวทิลทิน และโมโนบิวทิลทินในดินตะกอนจะช้ากว่าการสลายตัวในน้ำ และมีค่าครึ่งชีวิตเป็น 162 วัน Waldock และคณะ(1990) ได้รายงานไว้ว่าค่าครึ่งชีวิตในดินตะกอนที่มีออกซิเจนจะมีค่าน้อยกว่า 1 ปี และในดินตะกอนที่ไม่มีออกซิเจนจะนานประมาณ 2 ปี (Bryan and Gibbs, 1991)

การเกิดพิษของสารประกอบไตรออร์กาโนทินในสิ่งมีชีวิต

สารประกอบไตรออร์กาโนทิน ที่มีพิษมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานในขบวนการไมโตรครอนเดีย ออกซิเดทีฟ ฟอสโฟรีเลชั่น (Mitochondrial oxidative phosphorylation) และประสิทธิภาพทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการจับโปรตีนบางตัว โดยธรรมชาติที่แน่นอนของการจับที่ Binding sites บนโปรตีนยังไม่เป็นที่รู้จักกันดีนัก แต่จากการศึกษากับ

ฮีโมโกลบินของแมว พบว่าทั้ง Cysteine และ Histidine ในส่วนของโปรตีนจะเข้าร่วมกับ R_3Sn ผลของสารประกอบเททระออร์กาโนทิน (R_4Sn) ปรากฏว่าจะเกิด Dealkylation ขึ้นในร่างกายสัตว์ทดลองอย่างรวดเร็ว เกิดอนุพันธ์ของ R_3SnX สารประกอบไดแอลคิลทินแสดงความเป็นพิษที่แตกต่างจากสารประกอบ R_4Sn และ R_3SnX เลยทีเดียว คือจะเข้ารวมกับโคเอนไซม์ หรือเอนไซม์ที่มีหมู่ Dithiol เช่น ถูกรีดิวส์ด้วย Lipoic acid จะยับยั้งการออกซิไดส์ ∝-Ketoacid เป็นต้น จะสร้างพันธะ Sn-S ที่แข็งแรง ดังนั้นแสดงว่าฤทธิ์ทางชีวภาพของสารประกอบไดออร์กาโนทินเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะ Sn-S ระหว่างสารประกอบไดออร์กาโนทินกับเอนไซม์ที่มีหมู่ Thiol ที่ว่องไวเหล่านี้ (วทัญญู เทียนทอง, 2536)

การเกิดพิษของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ ขึ้นอยู่กับจำนวนหมู่ของสารอินทรีย์ที่เพิ่มเข้าไปและจำนวนคาร์บอนอะตอมในหมู่อินทรีย์นั้นๆ โดยทั่วไปความเป็นพิษในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามหมู่อินทรีย์ จากหนึ่งไปสาม และลดลงเมื่อเพิ่มหมู่ที่สี่เข้าไป ในหมู่ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ด้วยกันไตรออร์กาโนทินจะมีพิษมากกว่าในรูปอื่น โดยความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นตามคาร์บอนอะตอม จากหนึ่งถึงสี่และลดลงเรื่อยๆ ทำให้สารประกอบไตรบิวทิลทินมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำมากที่สุด (Emund, 1988)

โดยธรรมชาติแล้วหมู่ X ใน R_3SnX มีผลต่อการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยมาก จนไม่นำมาคิดในปฏิกริยาต่อสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างความเป็นพิษของสารประกอบไตรออร์กาโนทินต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ในหมู่ ไตรอัลคิลทิน ด้วยกัน ไตรเมทธิลทิน มีความเป็นพิษสูงสุดต่อแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ไตรโพรพิลทินมีความเป็นพิษสูงสุดต่อแบคทีเรียแกรมลบและไตรบิวทิลทินมีผลสูงสุดต่อแบคทีเรียแกรมบวกและเชื้อรา พบว่าการเพิ่มหมู่อัลคิล ทำให้ปฏิกริยาต่อสิ่งมีชีวิตลดน้อยลงเรื่อยๆ เช่น ไตรออกทิลทิน จะไม่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดเลย เพราะการเกิดพิษโดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อมจะเป็นกลุ่ม ไตรบิวทิล- ไตรฟีนิล- และ ไตรไซโคลเฮกซิลทินเสียส่วนใหญ่ และ จากการทดลองทั้งในห้องปฏิบัติการและในสัตว์ทดลองเพื่อให้ได้รูปแบบของความเป็นพิษออกมา พบว่าเตตระออร์กาโนทิน (R_4Sn) มีรูปแบบของการเกิดพิษที่ข้ามากซึ่งตรงข้ามกับสารประกอบไตรออร์กาโนทิน (Blunden and Chapman, 1986)

การเกิดพิษของสารประกอบไตรออร์กาโนทินในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ

โครงสร้างของหมู่ R ในสารประกอบไตรออร์กาโนทินที่แตกต่างกันจะมีความสามารถในการเกิดพิษต่อชนิดของสิ่งมีชีวิตต่างกัน โดยการเกิดพิษของหมู่ R ในรูปแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเกิดพิษของสารประกอบไตรออร์กาโนทินต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ

ชนิดของสิ่งมีชีวิต	หมู่ R ใน R_3SnX
แมลง	CH_3
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม	C_2H_5
แบคทีเรียแกรมลบ	$n\text{-}C_3H_7$
แบคทีเรียแกรมบวก รา ปลา พืช สัตว์จำพวกหอย สัตว์ทะเลมีข้อปล้อง	$n\text{-}C_4H_9$
ปลา รา สัตว์จำพวกหอย สัตว์ทะเลมีข้อปล้อง	C_6H_5
ปลา หมัด	Cyclo-C_6H_{11}, $C_6H_5(CH_3)_2CCH_2$

แหล่งที่มา: Blunden and Chapman, 1986

การเกิดพิษของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล

- สาหร่าย

ความสามารถในการทนต่อการเกิดพิษของสารประกอบไตรบิวทิลทินของสาหร่ายในแต่ละชนิดไม่เท่ากัน สาหร่ายขนาดใหญ่ๆบางชนิด เช่น *Enteromorpha* sp. และ *Ectocarpus* sp. สามารถเจริญได้เล็กน้อยที่ผิวใต้ท้องเรือที่มีการทาสีกันเพรียง และ *Fucus* sp. สามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณปากแม่น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบไตรบิวทิลทินในปริมาณสูง สาหร่ายบางชนิดก็มีความไว ต่อการเพิ่มมากขึ้นของสารประกอบไตรบิวทิลทิน โดยสารประกอบไตรบิวทิลทินสามารถระงับการเจริญเติบโตของไดอะตอม *Skeletonema costatum* และ *Thalassira pseudonana* ค่า EC_{50} ที่ทำให้ปริมาณการเจริญเติบโตของเซลลดลงคือช่วง 350-1150 นาโนกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อลิตร จากการเปรียบเทียบค่า EC_{50} ของ สเตนัสคลอไรด์ ไดบิวทิลทินไดคลอไรด์ และ เททระบิวทิลทิน ใน *S. costatum* มีค่า 325, 40 และ 17 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ *S. costatum* สามารถย่อยสลายสารประกอบไตรบิวทิลทินไปเป็นสารประกอบไดบิวทิลทินและสารอนุพันธ์อื่นๆ ได้ บางการทดลองสามารถชี้ให้เห็นว่า *S. costatum* ไม่สามารถเจริญได้ในที่ที่มีความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินเกิน 100 นาโนกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับการเจริญของ *Dunaliella tertiolecta* และ*Pavlova lutheri* ปรากฏว่าความเข้มข้น 100 นาโนกรัมต่อลิตรจะมีผลต่อ การเจริญเล็กน้อย และสามารถเจริญได้ที่ความเข้มข้น 1,000 นาโนกรัมต่อลิตรโดยมีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบไตรบิวทิลทินได้ต่ำ จากการเปรียบเทียบนี้บอกได้ว่าการที่สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ในที่ที่มีความเข้มข้นของสารประกอบไตรบิวทิลทินสูงไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบไตรบิวทิลทินได้ดี (Bryan and Gibbs, 1991)

การทดสอบพิษของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ต่อสาหร่าย เมื่อมีความเข้มข้นของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ที่สูงพอสามารถระงับการเจริญเติบโตและก่อให้เกิดการตายของสาหร่ายขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเกิดพิษของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ (TBTO) ต่อสาหร่าย

ชนิดสาหร่าย	สาร	ผลกระทบ
Ankistrodesmus falcatus	TBTO	เกิดการย่อยสลายเป็น DBT 50 % เมื่อใช้ความเข้มข้น 20 ppb ในเวลา 4 สัปดาห์ และเกิดการสะสมในปริมาณ 30,000 เท่า
Skeletonema costatum	TBTO	ค่า 72-hr EC_{50} = 0.33 ppb
Thalassiosira pseudonana	TBTO	ค่า 72-hr EC_{50} = 1.33 ppb
Pavlova lutheri, *Dunaliella tertiolecta*, *S. costatum*	TBTO	ตายหมดภายในเวลา 2 วัน ที่ความเข้มข้น 5 ppb และ ที่ความเข้มข้น 0.1 ppb ก่อให้เกิดอาการ Red-action ในระหว่างการเจริญ

แหล่งที่มา: Michael, 1987

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- สัตว์ทะเล

การเกิดพิษของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสัตว์นั้นเกิดจากการที่สัตว์รับเอาสารประกอบไตรบิวทิลทิน เข้าสู่ร่างกายแล้วเกิดการผิดปกติหรือการตาย โดยขึ้นกับปริมาณของสาร ระยะเวลาในการสัมผัส ชนิดของสัตว์ ช่วงชีวิตของสัตว์ และชนิดของสารประกอบไตรบิวทิลทินที่สัตว์แต่ละชนิดรับเข้าไป

การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ในสัตว์กลุ่มต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสัตว์ทะเล

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Crustaceans			
Crangon crangon	TBTO	Larvae 96 hr LC_{50}= 1.5 ppb	Static renewal
		Adult 96 hr LC_{50} = 41 ppb	every 24 hours
Acartia tonsa	TBTO	72-hr LC_{50} = 2.1 ppb	Static renewal
		96-hr LC_{50} = 1.0 ppb	every 24 hours
		144-hr LC_{50} = 0.4 ppb	
Acanthomysis sculpta	TBT as	96-hr LC_{50} = 0.42 ppb	Static renewal
	leachate		every 24 hours
Daphnia magna	TBTO	48-hr LC_{50} = 1.67 ppb	Static
		(1.01-2.5 ppb)	
Fish			
Oncorhynchus tshawytscha	TBTO	96-hr LC_{50} = 1.5 ppb	Static renewal
Lepomis macrochirus	TBTO	96-hr LC_{50} = 7.6 ppb	Static
		(5.6-10 ppb)	
Salmo gairdneri	TBTO	96-hr LC_{50} = 6.9 ppb	Static
		(6.27-7.8 ppb)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 (ต่อ) การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสัตว์ทะเล

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Ictalurus punctatus	TBTO	96-hr LC_{50} = 12.0 ppb (7.3-20.0 ppb)	Static
Fundulus heteroclitus	TBTO	96-hr LC_{50} = 24.0 ppb	Static
Cyprinodon variegtus	TBTO (acetone-methanol	21 day LC_{50} = 0.96 ppb total mortality at 3.2 ppb at 14 days	21-day flow-through acute testing
Mollusca			
-Bivalves			
Crassostrea gigus	TBTO	48-hr LC_{50} = 1.5 ppb	Static renewal every 24 hours
Mytilus edulis	TBTO	48-hr LC_{50} = 2.3 ppb	Static renewal every 24 hours
Crassostrea gigas	TBTO	48-hr EC_{50} = 0.9 ppb (0.4-1.9 ppb)	Static
-Gastropoda			
Biomphalaria and *Bulinus*	TBT	48-hr LC_{50} = 10-100 ppb	Static
Biomphalaria glabrata		100 % died at 10 ppb	Static

แหล่งที่มา: (Michael, 1987)

การเกิดพิษเรื้อรังของสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ ต่อสัตว์ทะเล

สารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ ในความเข้มข้นปริมาณน้อยสามารถก่อให้เกิดการผิดปกติขึ้นในสิ่งมีชีวิตได้ โดยที่สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีขีดจำกัดในการทนต่อปริมาณของสารพิษที่สะสมในร่างกาย เมื่อมีการรับสารพิษเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่ไม่มากเกินขีดของความทนก็

จะแสดงอาการความผิดปกติออกมาอาจจะเป็นการผิดรูปร่างไปจากเดิม มีการพัฒนาที่ช้ากว่าปกติ และรวมถึงการกลายพันธุ์ทางด้านพันธุกรรม การเกิดพิษเรื้อรังของสัตว์น้ำเค็มเนื่องจากการรับสารประกอบบีส-ไตรบิวทิลทินออกไซด์ เข้าสู่ร่างกายสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเกิดพิษเรื้อรังของสัตว์ทะเลเนื่องจากการรับสารประกอบไตรบิวทิลทินเข้าสู่ร่างกาย

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
-Crustaceans			
Homarrus americanus larvae	TBTO	ไม่มีการเจริญเติบโต ที่ความเข้มข้น 0.1 ppb	Static renewal every 48 hours
Acanthomysis sculpta (juveniles and mature females)	TBTO as leachate	ผลต่อการสืบพันธุ์ที่ความเข้มข้น 0.19 ppb ผลต่ออัตราการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้น 0.25 ppb คาดการณ์พิษเรื้อรังที่ความเข้มข้น 0.14 ppb	Flow-through for 63 days
Palaemonetes pugio	TBTO	ไม่เกิดการตอบโต้ที่ความเข้มข้น 2.3-30 ppb	Flow-throught
Rhithropanopeus harrisii	TBTO TBTS	ผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ที่ความเข้มข้น 10 ppb ของ TBTO และ 20 ppb ของ TBTS	Static renewal every 24 hours
-Bivalves			
Crassostrea gigas (spat)	TBT metha-crylate leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow-trough

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 (ต่อ) การเกิดพิษเรื้อรังของสัตว์ทะเลเนื่องจากการรับสารประกอบไตรบิวทิลทินเข้าสู่ร่างกาย

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Mytilus edulis (spat)	TBT metha-crylate leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow-trough
Venerupis decussata (clam spat)	TBT metha-crylate leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow-trough

แหล่งที่มา: (Michael, 1987)

กุ้งกุลาดำ

กุ้งกุลาดำหรือกุ้งกะลา หรือกุ้งม้าลาย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus monodon* Fabricius และมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Tiger prawn หรือ Jumbo tiger prawn กุ้งชนิดนี้อยู่ในวงศ์ Penaeidae ในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ลำตัวจะเป็นสีม่วงแดง มีแถบสีน้ำตาลหรือดำพาดขวาง ลำตัวเป็นปล้องๆ โคนขาว่ายน้ำมีแถบสีเหลืองเป็นปล้องๆ เปลือกหัวเกลี้ยงไม่มีขน หนวดมีสีดำไม่มีลายฟันกรีด้านบนมี 7-8 ซี่ ด้านล่างมี 3 ซี่ ร่องข้างกรีทั้งสองด้านมีลักษณะแคบและยาวไม่ถึงฟันอันสุดท้าย ที่ขาเดินคู่ที่ 5 ไม่มีระยางค์อันนอก

กุ้งกุลาดำเป็นกุ้งที่ใหญ่ที่สุดในวงศ์ Penaeidae ถิ่นอาศัยของกุ้งกุลาดำได้แก่น่านน้ำแถบไต้หวัน ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์และที่พบมากได้แก่ ออสเตรเลียและอินเดีย กุ้งชนิดนี้อยู่ในเขตร้อนชอบอาศัยอยู่ในบริเวณร่องน้ำลึกห่างออกจากฝั่งและชอบพื้นทะเลที่เป็นดินทราย สามารถอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและความเค็มต่ำ เช่นบริเวณป่าชายเลน เป็นกุ้งที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

กุ้งกุลาดำวางไข่ในทะเล กุ้งที่มีอายุประมาณ 12-18 เดือนจะวางไข่ในทะเลลึกกว่าระดับน้ำประมาณ 15-30 เมตร ใกล้กับพื้นท้องทะเล กุ้งขนาด 70-150 กรัมจะวางไข่ครั้งละประมาณ 1,000,000 - 1,200,000 ฟอง กุ้งชนิดนี้ส่วนมากจะผสมพันธุ์ในเวลากลางคืน โดยตัวผู้จะสอดอวัยวะเพศที่เรียกว่า พีเทสมา (Petesma) เข้าไปในอวัยวะเพศเมียที่เรียกว่า ทีไลคัม (Thelycum) พร้อมกับปล่อยน้ำเชื้อเข้าไปเก็บในถุงเก็บน้ำเชื้อเพื่อรอโอกาศที่จะผสมกับไข่ในระยะหลัง เมื่อไข่แก่และสุกเต็มที่ จะถูกขับออกมาทางช่องเพศตรงโคนขาเดินคู่ที่ 3 และจะได้รับการผสมกับ น้ำเชื้อของตัวผู้ซึ่งจะไหลออกจากรูเปิดเล็กๆ ที่บริเวณขาเดินคู่ที่ 4 ของตัวเมีย แม่กุ้งจะใช้เวลาวางไข่ครั้งหนึ่งๆ ประมาณ 3-5 นาที ไข่ที่ผสมแล้วขณะที่ปล่อยสู่น้ำทะเลใหม่ๆ จะมีลักษณะกลม ไข่จะค่อยๆ พัฒนาจนฟักเป็นตัวภายในเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง กุ้งวัยอ่อนจะวิวัฒนาการ และเปลี่ยนรูปร่างไปตามขั้นตอนและเมื่อถึงบริเวณชายฝั่งก็จะเลี้ยงตัวอยู่ในบริเวณนี้จนกระทั่งโตเต็มวัยจึงอพยพกลับสู่ทะเล และจะผสมพันธุ์วางไข่ต่อไปอีก

<u>การวิวัฒนาการและการเปลี่ยนรูปร่างของกุ้งกุลาดำ</u>

<u>1. ลูกกุ้งวัยอ่อนในระยะที่ 1</u> (ระยะนอเพลียส)

เป็นลูกกุ้งที่ฟักออกจากไข่ใหม่ๆ จะมีขนาดเล็กมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่างๆ 6 ครั้งภายใน 40-50 ชั่วโมง ระยะนี้ลูกกุ้งยังไม่กินอาหาร แต่จะได้อาหารส่วนใหญ่จากถุงอาหารที่ติดตัวมาและจะมีชีวิตส่วนใหญ่ตาม หน้าดิน

- นอเพลียสระยะที่ 1 ขนาดลำตัวประมาณ 0.30 มิลลิเมตร รูปร่างค่อนข้างกลม หัวโตเรียวไปทางด้านหาง มีระยางค์ 3 คู่ มีระยางค์อันเดียวอยู่ระหว่างระยางค์คู่ที่ 1

- นอเพลียสระยะที่ 2 ขนาดลำตัวประมาณ 0.30-0.36 มิลลิเมตร ระยางค์เริ่มแบ่งออกเป็นปล้อง หนามปลายหางใหญ่และยาวออก

- นอเพลียสระยะที่ 3 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 0.36-0.38 มิลลิเมตร เริ่มปรากฏฐานของระยางค์ท้อง ปลายหางเรียวเล็กมีหนาม 3 คู่

- นอเพลียสระยะที่ 4 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 0.36-0.40 มิลลิเมตร ปลายระยางค์ท้องแยกออกเป็น 2 แฉก มีหนามที่ปลายหาง 4 คู่

- นอเพลียสที่ 5 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 0.40-0.44 มิลลิเมตร เริ่มมีเปลือกหัวขากรรไกรกลมลำตัวยาวออก ปลายหางแยกออกเป็น 2 แฉก

- นอเพลียสที่ 6 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 0.40-0.5 มิลลิเมตร เปลือกหัวใหญ่ขึ้นขากรรไกรยาวออกมีหนามที่ปลายหาง 7 คู่

2. ลูกกุ้งวัยอ่อนระยะที่ 2 (ระยะโปรโตซูเอี้ย)

ลูกกุ้งจะมีลำตัวยาวขึ้นส่วนหัวโตเห็นได้ชัด ลูกกุ้งจะค่อยๆ ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ และเริ่มกินอาหาร อาหารของลูกกุ้งระยะนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสาหร่ายเล็กๆ ลูกกุ้งจะเริ่มเดินทางเข้าหาฝั่ง และจะอยู่ในระยะที่ 2 ประมาณ 4 วัน มีการเปลี่ยนแปลงลอกคราบ 3 ครั้ง แต่ละครั้งมีรูปร่างดังนี้ คือ

- โปรโตซูเอี้ยระยะที่ 1 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 0.85-1.00 มิลลิเมตร ลำตัวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนหัว ส่วนอก และส่วนท้อง ส่วนอกแยกเป็น 6 ปล้อง ส่วนหัวมีเปลือกคลุมตลอด ตายังอยู่ภายในเปลือกมองเห็นเป็นจุดดำ แยกออกเป็น 2 ตา แต่ยังไม่มีก้านตา ระยางค์คู่ที่ 3 เปลี่ยนหน้าที่จากการว่ายน้ำมาเป็นช่วยในการกินอาหาร ปลายหางมีหนาม 7 คู่ ระบบทางเดินอาหารเห็นได้ชัดเจนตลอดลำตัว

- โปรโตซูเอี้ยระยะที่ 2 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 1.20-1.40 มิลลิเมตร ตาโผล่พ้นเปลือกหัว มีก้านตายาว กรีแหลมยื่นไปด้านหน้าและงุ้มลงด้านล่างเล็กน้อย ระหว่างตามีหนาม 1 คู่ บนเปลือกหัว เปลือกหัวเริ่มขยายออกปกคลุมส่วนอก และที่ส่วนท้องเริ่มแบ่งเป็น 5 ปล้อง ส่วนหางแยกเป็น 2 แฉก และมีขนข้างละ 7 เส้น

- โปรโตซูเอี้ยระยะที่ 3 ขนาดลำตัวยาวประมาณ 1.50-2.00 มิลลิเมตร แพนหางชั้นนอกมีขนาดใหญ่กว่าแพนหางอันใน รอบๆแพนหางมีขน ระยางค์ว่ายน้ำเกิดขึ้นที่ปล้องอกทั้ง 5 ปล้อง

3. ลูกกุ้งวัยอ่อนระยะที่ 3 (ระยะไมซีส)

ลูกกุ้งในระยะนี้มีลักษณะคล้ายพ่อแม่มากขึ้นสามารถมองเห็นได้ชัดจะอยู่ในระยะนี้ประมาณ 7 วัน มีการเปลี่ยนแปลง 3 ระยะคือ

- ไมซีสระยะที่ 1 ส่วนหัวกับส่วนอกเชื่อมติดกัน ระยางค์คงทำหน้าที่ว่ายน้ำ ปลายระยางค์แบ่งเป็น 2 แฉก ส่วนท้องแบ่งออกเป็น 6 ปล้อง หนามปล้องที่ 1 และ 2 หายไปปลายหางมีหนาม 8 คู่ หนวดคู่ที่ 1 เริ่มแบ่งเป็น 3 ปล้อง ปลายหางเป็น 2 แฉก ลำตัวมีความยาวประมาณ 2.50-3.00 มิลลิเมตร

- ไมซีสระยะที่ 2 ส่วนหัวกับส่วนอกเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ มีเปลือกหัวคลุมตลอดระยางค์คู่ที่ 1-3 ตรงปลายเปลี่ยนเป็นก้ามหนีบ ระยางค์ว่ายน้ำตรงปล้องท้องเจริญขึ้น หนามปล้องที่ 3 หายไป หางเว้าเล็กน้อย ลำตัวมีความยาวประมาณ 3.00-3.45 มิลลิเมตร

- ไมซีสระยะที่ 3 ขาว่ายน้ำเจริญขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ปล้อง มีฟันกรี 1-2 อัน ที่สันกรีบน ตัวมีความยาวประมาณ 4.04-4.50 มิลลิเมตร

4. ลูกกุ้งวัยอ่อนในระยะที่ 4 (ระยะโพสลาวา)

ระยะโพสลาวาคือตัวอ่อนระยะสุดท้าย ระยะนี้ลูกกุ้งมีความยาวประมาณ 5.50 มิลลิเมตร ลูกกุ้งมีระยางค์ครบเหมือนกุ้งเต็มวัย ลูกกุ้งจะวิวัฒนาการไปเรื่อยๆจนเข้าสู่กุ้งระยะวัยรุ่น โดยแบ่งเป็น 25 ระยะภายใน 25 วัน เรียกว่า โพสลาวาที่ 1 (พี 1) เรื่อยไปจนถึงระยะโพสลาวาที่ 25 (พี 25) หลังการลอกคราบแต่ละครั้งรูปร่างจะเปลี่ยนแปลงสมบูรณ์ยิ่งขึ้นขาว่ายน้ำเจริญมากว่ายน้ำได้ดี ระยางค์อกทำทำหน้าที่จับอาหาร ลูกกุ้งจะมีสีเหลืองใส กรียาวออก ฟันกรีเพิ่มขึ้นเป็น 6-7 อัน บนสันกรีบน มีลายหรือมีจุดเกิดขึ้น กรียาวออก หนามบนลำตัวหายไปหมด ลูกกุ้งจะเลี้ยงตัวบริเวณป่าไม้ชายเลน หรือในแหล่งน้ำกร่อย ประมาณ 3-4 เดือน ก็จะเจริญเติบโตเป็นกุ้งวัยรุ่น เมื่ออายุ 6 เดือน กุ้งจะเดินทางสู่ทะเลเพื่อ ผสมพันธุ์ต่อไป

การทดสอบสารพิษทางพิษวิทยา

ในหลายปีที่ผ่านมามีสารเคมีไม่น้อยกว่า 63,000 ชนิด ที่ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์สารเคมีใหม่ๆ ขึ้นมาไม่น้อยกว่า 1,000 ชนิดต่อปี ซึ่งสารเคมีเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป ถ้ามีการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้สามารถก่อปัญหาขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้การเฝ้าระวัง (Monitoring) ผลกระทบของสารเคมีต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่กระทำได้ยาก เพราะสภาพธรรมชาติมีปัจจัยต่างๆ เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญและข้อจำกัดของการศึกษาทางพิษวิทยาของนิเวศน์วิทยาของแหล่งน้ำ แต่ในปัจจุบัน มีการพัฒนาเทคนิคสำหรับการทดลองทางพิษวิทยาสำหรับการทดลองขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยนักพิษวิทยา ในการประเมินความเป็นพิษทางสารเคมีต่างๆ ทั้งชนิดและปริมาณตลอดจนทำนายเกี่ยวกับความเสียหายที่จะเกิดกับอวัยวะและเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาทดลองทางพิษวิทยา โดยใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวทดสอบ (Bio-testing) กับสารเคมีที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และสังเกตผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งมีชีวิตนั้น แล้วนำผลมาแปรความหมาย (Interpretation) เทียบกับตัวมาตรฐานหรือตัวควบคุม โดยใช้สถิติช่วยในการวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล เป็นเทคนิคที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า "เทคนิคทางชีววิเคราะห์" (Bioassay) ซึ่งเทคนิคทางชีววิเคราะห์นี้ ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ความเป็นกรด-

ด่าง อุณหภูมิ ความเค็ม ความขุ่น ปริมาณคลอรีนและสารพิษต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ รวมทั้งโลหะหนัก และตัวทำละลายต่างๆ (Solvents) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นดัชนีวัดที่สำคัญในระบบนิเวศน์แหล่งน้ำ ว่ามีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้นเพียงไร และถ้าพารามิเตอร์ในเหล่งน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าจะเป็นเหตุใดก็ตาม จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดใด (Species) ได้บ้าง นอกจากนี้ยังอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับควบคุมคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีค่าในทางเศรษฐกิจ และเป็นมาตรฐานคุณภาพน้ำที่จะใช้ควบคุมปริมาณการปล่อยน้ำเสีย ที่ควรได้รับการอนุมัติจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

การทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute Toxicity Test)

เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดผลหรืออาการที่สัตว์ทดลองตอบสนองต่อสารพิษหลังจากได้รับสารพิษในปริมาณมากๆเพียงครั้งเดียวหรือหลายๆครั้งในระยะเวลาอันสั้น ประมาณ 24 ชั่วโมงหรือน้อยกว่า โดยทั่วไปมักแสดงความเป็นพิษเฉียบพลันด้วยค่า LC_{50} หรือ LD_{50}

Median lethal dose (LD_{50}) หมายถึง ปริมาณหรือความเข้มข้นต่ำสุดของสารพิษที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50 เปอร์เซนต์ หรือครึ่งหนึ่งของประชากรทั้งหมด โดยการทดสอบสารพิษส่วนใหญ่จะทำการให้สัตว์กินสารพิษหรือฉีดเข้าไปในปริมาณที่รู้แน่นอน

สำหรับ Median lethal concentration (LC_{50}) มีความหมายเช่นเดียว LD_{50} แต่มักใช้กับการทดสอบสารพิษโดยตรง แต่ดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารพิษอยู่ในระดับความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองนั้นตาย โดยการทดสอบสารพิษโดยการแช่สัตว์ทดลองในภาชนะที่ใส่สารพิษในความเข้มข้นต่างๆ เช่นการทดสอบสารพิษในสัตว์น้ำ

สารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่มักต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่า LD_{50} หรือ LC_{50} ก่อนนำไปใช้หรือจำหน่าย โดยให้สัตว์ทดลอง เช่น หนู กระต่าย สุนัข กินสารเคมีเหล่านั้นเข้าไป หรือฉีดเข้าเส้นเลือดโดยตรง แล้วตรวจวัดจำนวนสัตว์ทดลองที่ทำให้สัตว์เหล่านั้นตายภายใน 7 วัน หรือ 14 วัน

ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นพิษแบบต่างๆ นี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในคนที่ได้รับสารพิษนั้นเข้าไป และกำหนดระดับความปลอดภัย (Safety level) ของสารพิษนั้น ซึ่งมักกำหนดระดับความปลอดภัยให้ต่ำกว่าระดับเริ่มเป็นพิษ (Threshold dose or concentration) 10 เท่า 100 เท่า หรือมากกว่า โดยพิจารณาจากชนิดของสัตว์ทดลอง กลไกลในการออกฤทธิ์ของสารพิษและความแตกต่างของปฏิกริยาทางชีวเคมีในคนและสัตว์ทดลอง นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นยังนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยง (Risk) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อต้องการทราบโอกาศหรือความเป็นไปได้ที่สารพิษนั้น จะทำอันตรายต่อบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือชุมชนใดชุมชนหนึ่งเมื่อมีการนำสารพิษนั้นมาใช้ในวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งโดยพิจารณาเปรียบเทียบกับผลประโยชน์ที่ได้รับจากการนำสารพิษนั้นมาใช้ โดยทั่วไปหัวข้อที่จะนำมาพิจารณาประกอบในการประเมินความเสี่ยงได้แก่

1. ความจำเป็นในการใช้สารพิษนั้นมีมากน้อยเพียงใด
2. มีสารอื่นที่จะนำมาใช้แทนหรือสนองความจำเป็นนั้นหรือไม่
3. ประโยชน์ที่สาธารณะชนจะได้รับมากน้อยเพียงใด
4. วิธีการใช้เป็นอย่างไร
5. ผลต่อเศรษฐกิจเป็นอย่างไร
6. ผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างไร
7. มีผลต่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติหรือไม่

การหาค่า LC_{50}

วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ในการหาค่า LC_{50} โดยวิธี โพรบิท (Probit analysis) ตามวิธีการของ Finney (1971)

แนวความคิดของวิธีโพรบิท

ถ้าให้สิ่งมีชีวิตหรือสัตว์ทดลองจำนวนหนึ่งได้รับสารพิษหรือตัวกระตุ้น (Stimuli) ชนิดใดชนิดหนึ่ง จะพบว่าจำนวนสิ่งมีชีวิตที่แสดงอาการหรือตอบสนอง (Response) ต่อสารพิษ จะแตกต่างกันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆของสารพิษ ซึ่งเรียกว่า Biological variation โดยที่ตัวอ่อนแอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หรือว่องไวต่อสารพิษจะแสดงอาการก่อนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ส่วนตัวที่แข็งแรงหรือทนทานต่อสารพิษจะแสดงอาการเมื่อได้รับสารพิษที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น ความเข้มข้นหรือปริมาณ (Dose) และการตอบสนองของสิ่งมีชีวิตนี้จะมีลักษณะเป็นโค้งซิกมอยด์ (Sigmoid curve) ซึ่งเรียกว่า Dose-response curve (รูปที่ 2 และรูปที่ 3)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารพิษกับการตอบสนอง (Dose-response relationship) ของสิ่งมีชีวิตนี้ เมื่อนำมาแจกแจงความถี่จะได้รูปโค้งแบบระฆังคว่ำ (Normal frequency distribution) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ทางซ้ายสุดของเส้นโค้งนี้คือพวกที่ตอบสนองได้ว่องไวที่สุดต่อสารพิษ (Hypersusceptible organisms) และพวกที่อยู่ทางขวาสุดของเส้นโค้งคือพวกที่ทนทานต่อสารพิษ (Resistant organisms)

ประชากรของสิ่งมีชีวิตที่มีการแจกแจงความถี่แบบ Normal frequency distribution นี้ มีค่า $\mu\pm1\sigma$ $\mu\pm2\sigma$ และ $\mu\pm3\sigma$ เท่ากับ 68.3, 95.5 และ 99.7 เปอร์เซนต์ ของประชากรทั้งหมดตามลำดับ เมื่อ μ คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นทั้งหมด และ σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้น

เนื่องจากการหาค่า LC_{50} จากเส้นโค้งซิกมอยด์ ตามรูปที่ 3 จำเป็นต้องมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและเปอร์เซนต์การตอบสนองจำนวนมาก จึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง เพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องพยายามเปลี่ยนความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งนี้ให้เป็นเส้นตรงซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นในการตอบสนอง (Probability, P) หรือเปอร์เซ็นการตอบสนองให้อยู่ในเทอมของ Normal equivalent deviation (N.E.D.) โดยสมการดังนี้

$$Y' = (x-\mu)/\sigma \qquad \text{_____(1)}$$

ดังนั้นเมื่อ

$x = \mu$ จะได้ $Y' = 0$

Y' = N.E.D. ของค่า P ใดๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1เมื่อ $\mu = 0$ และ $\sigma = 1$

x = ค่า log ของความเข้มข้นใดๆ

ถ้าให้ $b = 1/\sigma$ และ $a' = -\mu/\sigma$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า N.E.D. กับค่าความเข้มข้นจะเป็นสมการเส้นตรงคือ

$$Y' = a' + bx \qquad \text{_____(2)}$$

จากสมการ (2) จะเห็นว่า Y' จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ - $+\infty$ และจะมีค่าเป็นลบ เมื่อค่า $P < 0.5$ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการหาค่าในทางสถิติ จึงแนะนำให้ใช้ค่าโพรบิท (Probit = probability unit) แทนค่า N.E.D.

โดยให้

$$\text{probit } (Y) = 5+Y'$$

หรือ $Y = 5+a'+bx$ _____(3)

ถ้าให้ $a = 5+a'$ ดังนั้น $Y = a+bx$ _____(4)

จะเห็นได้ว่าสมการ (4) ยังคงเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้น การหาค่า LC_{50} จึงหาได้จากกราฟเส้นตรง (Probit line) ระหว่างค่าความเข้มข้นและค่าโพรบิทโดยเปลี่ยนค่าเปอร์เซนต์การตอบสนองเป็นค่าโพรบิทเสียก่อน โดยการคำนวนจากสมการหรือดูจากตารางสำเร็จ

การหาค่า LC_{50} ของสารมลพิษต่างๆที่มีต่อแหล่งน้ำ

การหาค่า LC_{50} ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการกำหนดมาตรฐานของน้ำทิ้งที่มาจากกิจกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรม เกษตรกรรม เหมืองแร่ ฯลฯ นอกจากนี้ยังใช้ในการประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำในกรณีที่สารมลพิษเหล่านี้ปะปนอยู่ในแหล่งน้ำ และในปัจจุบันยังใช้เพื่อวัดความเป็นพิษของสารเคมีที่ผลิตขึ้นมาใหม่ รายละเอียดที่ศึกษามีดังนี้ (ประสงค์, 2531)

1. สัตว์ทดลองควรเป็นสัตว์ที่มีความว่องไวในการตอบสนองเมื่อได้รับสารพิษ มีการแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย มีสภาพแข็งแรง ไม่มีโรค และมีอายุหรือขนาดเท่าๆกัน

2. การนำพาสัตว์ทดลองต้องระมัดระวังในการนำพา หรือขนส่งสัตว์ทดลอง มิให้สัตว์ทดลองตายหรืออ่อนแอลงก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง โดยจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม

3. การนำมาเลี้ยงให้เคยชินกับสภาพในห้องปฏิบัติการ

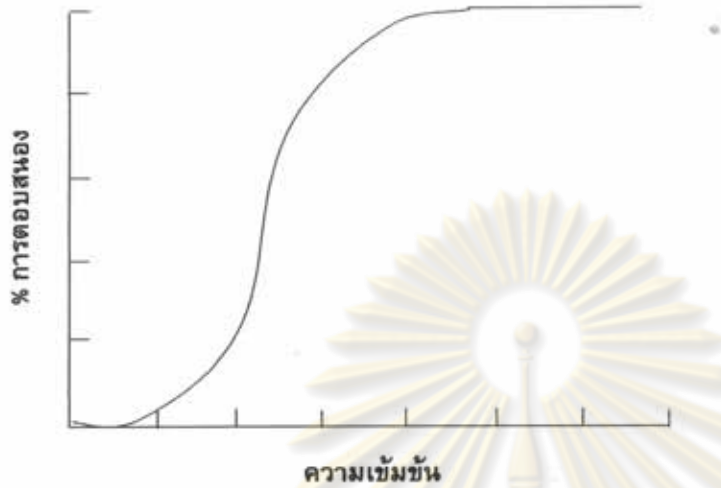
4. การเตรียมน้ำที่ใช้ในการทดลองทางพิษวิทยาควรเป็นน้ำที่สะอาด ที่ปราศจากการปนเปื้อนในการเกิดพิษโดยทิ้งไว้หรือเป่าอากาศ (Aerated) เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน ก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำที่จะนำมาใช้ในการทดลอง เช่น ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ pH ความเป็นกรด-ด่าง (Acidity-alkalinity) ความกระด้างของน้ำ (Hardness) และอุณหภูมิ ควรนำมาตรวจวิเคราะห์ ทั้งในช่วงก่อนการทดลองและหลังการทดลอง

5. ภาชนะที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไปมักใช้ภาชนะที่ทำมาจากพลาสติก แก้ว หรือแสตนเลส ในการเลือกใช้ภาชนะจะต้องคำนึงถึงชนิดของสารพิษที่ใช้ในการทดลองด้วย

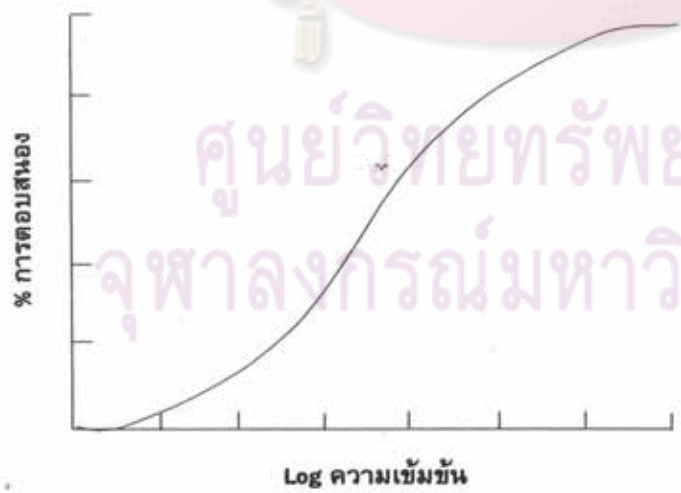
6. การทดลอง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การทดลองเบื้องต้น (Small scale exploratory test) เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นอย่างคร่าวๆ ที่ทำให้สัตว์ทดลองตายตั้งแต่ร้อยละ 0-100 ของประชากรสัตว์ทดลองทั้งหมด และ การทดลองขั้นละเอียด (Full scale exploratory test) โดยการนำช่วงความเข้มข้นของสารพิษจากการทดลองเบื้องต้น มาจัดระดับความเข้มข้นใหม่ โดยวิธีการแบ่งช่วงของความเข้มข้นของสารพิษออกเป็น 5 ระดับความเข้มข้น และ 1 ชุดควบคุม โดยทำการทดลอง 2 หรือ 3 ซ้ำ (Replication) ใส่สัตว์ทดลองลงไปในภาชนะ ซึ่งถ้าเป็นสัตว์ทดลองขนาดเล็ก เช่น ตัวอ่อนของสัตว์น้ำ ควรใส่สัตว์ทดลอง 10 ตัว หรือมากกว่า แต่โดยทั่วไปอาจใช้สัดส่วนดังนี้ คือ น้ำหนักสัตว์ทดลองต่อสารละลายที่ใช้ต่อวัน เท่ากับ 2 กรัม ต่อ 2 ลิตร ต่อวัน หรือ 1 กรัมต่อ 1 ลิตร ต่อวัน (APHA, 1985)

7. การหาค่า LC_{50} โดยวิธีโพรบิท

ในการประเมินความเป็นพิษของสารพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งจะแสดงความเป็นพิษในเทอมของ LC_{50} คือความเป็นระดับความเข้มข้นของสารพิษที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย ร้อยละ 50 ของประชากรสัตว์ทดลองทั้งหมด แต่เนื่องจากการทดลองมีระยะเวลามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น ค่า LC_{50} จึงต้องกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ทดลองไว้ด้วย โดยปกติเวลาที่ใช้ในการทดลองมักอยู่ในช่วง 24-120 ชั่วโมง ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ คือ 24 hr-LC_{50} 48 hr-LC_{50} หรือ 96 hr-LC_{50} เป็นต้น ซึ่งวิธีการคำนวนค่าดังกล่าวค่าดังกล่าว ในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำค่าร้อยละการตายมาเขียนกราฟ (Plot) ลงบนกระดาษ Percentage-log หรือนำร้อยละการตายมาเปิดตารางโพรบิทเปลี่ยนค่าร้อยละการตายเป็นค่าโพรบิท แล้วจึงนำมาเขียนลงบนกระดาษโพรบิท (Probit graph paper) และวิธีที่นิยมใช้สะดวก คือ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Package) ช่วยในการวิเคราะห์ เช่น SPSS-X SPSS-PC และ SYSTAT เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS-PC ดังแสดงในภาคผนวก ค.

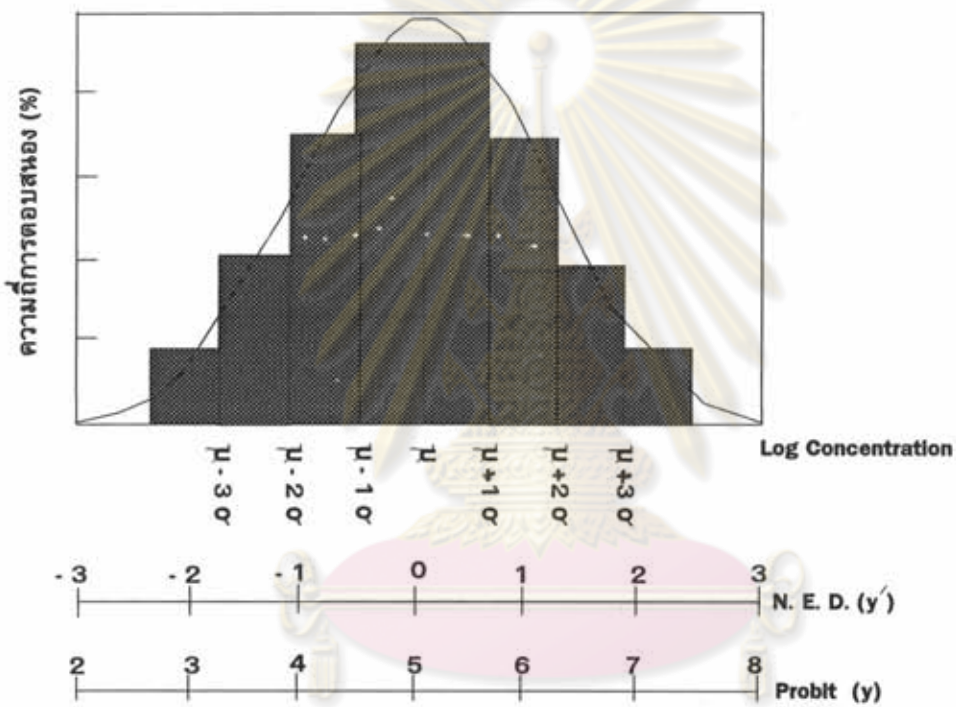


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือปริมาณของสารพิษ กับการตอบสนองของสิ่งมีชีวิต มีลักษณะเป็นโค้งแบบซิกมอยด์ ซึ่งเรียกว่า Dose-response curve



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3 เส้นโค้งซิกมอยด์เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้นให้เป็นค่า log



รูปที่ 4 การแจกแจงความถี่แบบปกติ (Normal frequency distribution) และค่า (log concentration) N.E.D. และค่าโพรบิท (Probit)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย