ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ ฟว
ผว 10

เอกสารผลงานที่เสนอขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

ของ

นายเทพวิทูรย์ ทองศรี
ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7ว

เรื่องที่ 2

การประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ: กรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของพืชและสัตว์น้ำจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

Ecological Risk Assessment: A case study of risk assessment of aquatic species by Pb exposure in Klity Creek, Kanchana Buri Province, Thailand

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวธิดา เกิดกำไร
ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ.2548

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

ของ

นายเทพวิฑูรย์ ทองศรี
ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7ว

เลขหมู่ ๓๗ ฟ๖
๐๑ 10
เลขทะเบียน 13917
วันที่ ๒๖ ส.ค. 49

เรื่องที่ 2

การประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ: กรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของพืชและสัตว์น้ำจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

Ecological Risk Assessment: A case study of risk assessment of aquatic species by Pb exposure in Klity Creek, Kanchana Buri Province, Thailand

ผู้ร่วมดำเนินการ
นางสาวธิดา เกิดกำไร
ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 8ว

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ.2548

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

ผลงานวิจัยนี้ประกอบด้วย (1) การดำเนินการศึกษาขั้นตอนในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศโดยเป็นการศึกษาความน่าจะเป็นหรือโอกาสของตัวรับในระบบนิเวศจากการกระจายหรือปนเปื้อนของสารเคมีในทางผ่านต่างๆ คือ ดิน น้ำ อากาศ โดยศึกษาผลกระทบ ต่อระบบนิเวศว่ามีโอกาสที่จะเกิดหรือเกิดขึ้นแล้วต่อตัวรับตัวเดียวหรือหลายตัวรับในระบบนิเวศนั้น เท่าไร และ (2) การดำเนินการศึกษาความเสี่ยงของพืชและสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นกรณีศึกษา โดยพบว่า กระบวนการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศต้องมีขอบเขตของ การประเมิน (framework) ที่ประกอบด้วย ที่มาของปัญหา (problem formulation) การวิเคราะห์ (analysis) และการวิเคราะห์ ความเสี่ยง (risk characterization) ในส่วนของตัวรับที่ ประกอบด้วยสัตว์บก สัตว์น้ำ พืชบก และพืชน้ำ โดยตัวรับสารปนเปื้อนที่เป็นสัตว์บก มีทาง ผ่านของสารปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ที่สำคัญคือ ทางเดินอาหาร ทางการหายใจ และการดูดซับโดยตรงจากการสัมผัสสารปนเปื้อนที่อยู่ ในดินที่เป็นแหล่งอาศัยของสัตว์เหล่านั้น พืชบกสามารถดูดดึงสารได้หลายทางผ่านคือ ราก ใบ และลำต้น พืชน้ำและสัตว์น้ำ หาได้จากสมการการสัมผัสโดยตรง(direct contact) สมการทางคณิตศาสตร์(mathematics model) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำนายโอกาสที่ตัวรับต่างๆเกิดความเสี่ยงต่อสารเคมีปนเปื้อนที่กระจายในสิ่ง แวดล้อม นอกจากนั้นกรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยงของพืชและสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรีจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในแหล่งน้ำพบว่า ปลา และสาหร่ายมีความเสี่ยงสูง ต่อการกระจายของสาร โลหะหนักตะกั่วในแหล่งน้ำนั้น โดยเฉพาะปลาที่มีโอกาสรับสารตะกั่วเข้า สู่ร่างกายอยู่ในระดับสูงเกินกว่ามาตรฐานต่างประเทศยอมให้มีได้ในเนื้อเยื่อของปลา

Abstract

This research complied with (1) a study of ecological risk assessment procedure which focused on the probability or likelihood of receptors in ecosystem regarding chemical exposure via soil, water, and air. Also, the adverse effects of chemical to single or multiples receptors in ecosystem has been studied. (2) A case study: aquatic species exposure to lead (Pb) at Klity Creek, Kanchana Buri province. As results, the ecological risk assessment framework has 3 procedures; problem formulation, analysis, and risk characterization. Receptors include terrestrial plants and animals, aquatic plants and animals. The pathways of terrestrial animal include food ingestion, inhalation and direct absorption. For terrestrial plants, chemicals were uptake via leaves, stem and root. For aquatic species, the pathway is direct contacted. The mathematics model has been used as a tool to determine the likelihood of potential receptors regarding risk from the chemical exposure in environment. From the case study, the results revealed that fish, and green algae are likely to have a risk from Pb exposure in water, Furthermore, Pb concentration in fish is likely to exceed the international standard regarding metal accumulation in tissues.

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคลากรในกลุ่มงานสิ่งแวดล้อม โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม ผู้วิจัยขอบคุณ ดร. สุจินดา โชติพานิช อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ และ นายชัยวุฒิ เลาวเลิศ รองอธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่มองเห็นความสำคัญของปัญหาและได้ให้ การสนับสนุนในการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ 8ว สุรัตน์ เพชรเกษม และ นักวิทยาศาสตร์ในโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมที่ได้ ช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมข้อมูล รายละเอียด ต่างๆ และท้ายสุดขอขอบพระคุณ ครอบครัวของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัย ตลอดเวลาที่ทำผลงานวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 ปัญหาและที่มาของการวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.6 ระยะเวลาดำเนินการ	3
1.7 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย	3
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	5
2.1 คำจำกัดความ	5
2.2 ขอบเขตการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ	6
2.2.1 ที่มาของปัญหา	6
2.2.2 การวิเคราะห์	13
2.2.3 การจำแนกลักษณะความเสี่ยง	15
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	17
2.3.1 พืชบก	17
2.3.2 สัตว์บก	20
2.3.3 พืชน้ำและสัตว์น้ำ	25

สารบัญ

หน้า

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ 26

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ 26

3.2 วิธีดำเนินการ 26

3.2.1 การทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์ 26

3.2.2 การวิเคราะห์ความไว 26

3.2.3 การทวนสอบสมการคณิตศาสตร์ 28

3.3 กรณีศึกษา 28

3.4 ค่าอ้างอิง 29

บทที่ 4 ผลการดำเนินการ 31

4.1 ผลการศึกษา 31

บทที่ 5 วิจารณ์ผลการดำเนินการ 34

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 37

6.1 สรุป 37

6.2 ข้อเสนอแนะ 38

เอกสารอ้างอิง 39

ภาคผนวก ก 41

ภาคผนวก ข 42

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้	29
2	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของสิ่งมีชีวิตในลำน้ำ	30
3	ค่าการรับสารตะกั่วของสิ่งมีชีวิตในลำน้ำ	31

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	แผนภาพแสดงกระบวนการในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ	7
2	แผนภาพแสดงรายละเอียดในการทำงานในแต่ละขั้นตอน	8
3	แผนภาพแสดงกระบวนการหาที่มาของปัญหา	9
4	แผนภาพแสดงกระบวนการวิเคราะห์	14
5	แผนภาพแสดงกระบวนการจำแนกลักษณะความเสี่ยง	16

บทที่ 1
บทนำ

1.1 คำนำ

การประเมินความเสี่ยงด้านนิเวศเป็นการประเมินวิเคราะห์ผลกระทบของสารปนเปื้อนในระบบสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ดิน ตะกอนดิน หรือ อากาศ โดยการวิเคราะห์ถึงความเสี่ยงที่สิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมหรือระบบนิเวศนั้นๆ มีโอกาสที่จะได้รับและส่งผลกระทบต่อผู้รับ(stressors) ทั้งทางตรงและทางอ้อม ผู้รับหมายถึง พืชบก พืชน้ำ สัตว์บก สัตว์น้ำ โดยทางผ่านของสารปนเปื้อนไม่ว่าจะเป็น การกิน การดื่ม การสัมผัส และการหายใจ

การประเมินความเสี่ยงของระบบนิเวศเป็นสิ่งสำคัญมากในการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของมนุษย์(Human risk assessment) ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบของสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่อสุขภาพของคน โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะได้รับสารปนเปื้อนนั้นจากทางผ่านคือการสัมผัสโดยตรงจากสารปนเปื้อนในดิน การรับสารปนเปื้อนผ่านอาหารที่รับประทาน การดื่มน้ำ และจากการหายใจรับสารปนเปื้อนในอากาศโดยตรง จะเห็นว่าถ้าชุมชนใดมีการใช้พืช ผัก ผลไม้ และสัตว์เพื่อการบริโภคหรือมีกิจกรรมที่สัมผัสกับดินที่มีสารปนเปื้อนอยู่ โอกาสที่จะได้รับสารปนเปื้อนนั้นเข้าสู่ร่างกายมากขึ้นและเกิดการสะสมความเป็นพิษของสารนั้นในร่างกาย

เมื่อถึงระดับความเข้มข้นที่สามารถทำอันตรายต่อร่างกายโดยอาจเป็นต้นเหตุของโรคร้ายเช่น มะเร็ง หรือทำให้การทำงานของอวัยวะล้มเหลว หรือแม้กระทั่งความผิดปกติทางพันธุกรรมได้ ในต่างประเทศได้มีการศึกษาผลกระทบหรือความเสี่ยงต่อระบบนิเวศอย่างจริงจังและกว้างขวาง ทั้งนี้ ได้มีการดำเนินการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม การประเมินความเสี่ยงของมนุษย์และการประเมิน ความเสี่ยงต่อระบบนิเวศไปพร้อมๆกัน ทำให้การศึกษาผลกระทบของสารเคมีหรือสารปนเปื้อน ต่อสิ่งแวดล้อมสามารถที่จะหาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขได้อย่างถูกต้องและยั่งยืน แต่ในประเทศไทยได้ให้ความสำคัญในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ไม่ได้ศึกษาวิจัยการประเมินความเสี่ยงไปด้วย ในรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมบางโครงการได้สรุปผลกระทบต่อสุขภาพของคน และระบบนิเวศอย่างคร่าวๆ ทำให้ผลการสรุปหรือการอ้างอิงมีข้อจำกัด และหลายโครงการเมื่อมี การไต่สวนสาธารณะ(Public hearing) แล้ว ไม่มีการชี้แจงข้อมูลที่ชัดเจนและขาดข้อมูล ทำให้เกิด ความขัดแย้งทางวิชาการและข้อพิพาททางสังคม

ในการศึกษาการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศจำเป็นต้องรู้ขั้นตอนและมีแผน การดำเนินการที่ถูกต้อง และมีการประเมินผลแต่ละขั้นตอนเป็นระยะๆ การประเมินความเสี่ยงต่อระบบ

นิเวศเป็นการรวบรวมความรู้ทุกสาขาในการดำเนินการประเมินผลกระทบกับระบบนิเวศและการป้อง กันความเป็นพิษของสารเคมีหรือสารปนเปื้อนเพื่อนำไปสู่การป้องกันที่เป็นรูปธรรมต่อสิ่งแวดล้อม

คำว่า "สิ่งแวดล้อม" ครอบคลุมถึงสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตและความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสอง โดยเฉพาะในการถ่ายทอดสารเคมีในวงจรของห่วงโซ่อาหารซึ่งมีความสลับซับซ้อนที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดี การศึกษาพฤติกรรมของสัตว์ต่างๆ หรือการดูดซับอาหารของพืชเป็นกลไก ที่ต้องศึกษาทั้งนี้เพื่อนำมาประเมินโอกาสหรือความเสี่ยงในกรณีศึกษาความเสี่ยงที่สัตว์หรือพืชที่เป็นตัวรับสารเคมีสุดท้ายในพื้นที่ศึกษานั้นๆ

1.2 ปัญหาและที่มาของการศึกษาวิจัย

ผลกระทบต่อระบบนิเวศที่เกิดจากการแพร่กระจายของสารเคมีปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะผ่านทางผ่านคือ ดิน น้ำ หรืออากาศ จะทำให้มีการสะสมความเข้มข้นของสารเคมีปนเปื้อนและ มีการส่งผ่านสารเคมีนั้นผ่านวงจรหรือสายใยอาหารในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตนั้นๆในพื้นที่ศึกษา โดยส่วนใหญ่ พื้นที่ศึกษาอาจเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการกำจัดกากอุตสาหกรรม พื้นที่อุตสาหกรรมเก่า เหมืองร้าง หรือพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้สารเคมีและพื้นที่ที่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมที่มีโอกาสได้ รับสารเคมีปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป สารเคมีปนเปื้อนจะถูกสะสม ทำปฏิกิริยาทางเคมี และถูก ดูดดึงและ/หรือดูดซับเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ที่มี คน สัตว์ หรือพืชเป็นผู้บริโภคสุดท้าย(endpoint) ซึ่งเป็นการสะสมความเป็นพิษที่ไม่มีการควบคุม และผลกระทบเกิดขึ้นในระยะยาว ดังนั้นการประเมิน ความเสี่ยงของผู้บริโภคสุดท้ายเป็นแนวทางเพื่อนำไปสู่การดำเนินการทางเทคนิคเพื่อลดความเสี่ยงต่ออันตรายของสารเคมีปนเปื้อนนั้น การให้ความสำคัญในการจัดการ ยิ่งไปกว่านั้นคือการปกป้องและรักษาทรัพยากรในระบบนิเวศให้มีความอุดมสมบูรณ์ และคุณภาพชีวิตของประชาชนที่อยู่ในพื้นที่นั้นๆ

การประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศเป็นเรื่องใหม่ในประเทศไทย ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศจึงจำเป็นและสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการค้นหาที่มาของปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม แนวทางในการกำหนดความสำคัญของปัญหาและนำไปสู่การนำข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ไปประกอบการออกข้อกำหนด ข้อบังคับทางกฎหมายต่อไป นอกจากนี้ กระบวนการนี้สามารถบ่งบอกถึงความ เสี่ยงที่มีในปัจจุบันหรือคาดการณ์ความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำเสนอแนวทางการดำเนินการ ขั้นตอน และแหล่งที่มาหรือตัวแปรของ การประเมินที่ต้องคำนึงถึงในการดำเนินการประเมินความเสี่ยงในกรณีที่ผู้ประเมินได้ทำการศึกษา

1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยเพื่อที่จะนำไปสู่สร้างคู่มือ(Guideline) สำหรับผู้ประเมินในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศในประเทศไทย โดยนำข้อมูลการศึกษาปริมาณตะกั่วในปี พ.ศ.2541-2542 มาใช้ในการนำเสนอขั้นตอนและในการคำนวณค่าความเสี่ยงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงผลการศึกษากรณีศึกษา(case study) เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ที่จะใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้คู่มือ (guideline) สำหรับผู้ประเมินในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ ในประเทศไทย

1.5.2 ได้แนวทางการจัดทำ ขั้นตอนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณค่าความเสี่ยงที่เหมาะสมในการใช้งาน

1.5.3 ได้แหล่งความรู้แหล่งข้อมูลด้านความ เป็นพิษในระบบ นิเวศ และแหล่งฐานข้อมูล ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ

1.6 ระยะเวลาดำเนินการ

ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2546 ถึงเดือน มกราคม 2548

1.7 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนของงานวิจัย มีการดำเนินการดังนี้

1.7.1 รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูล เอกสารวิชาการ ที่เผยแพร่ทั้ง ในและนอกประเทศ

1.7.2 ศึกษาทางผ่านของสารปนเปื้อนจากแหล่งปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายในกรณีที่ผู้รับเป็นสัตว์ และเข้าสู่ราก ลำต้น ใบ ในกรณีที่ผู้รับเป็นพืช

1.7.3 ศึกษาความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง

1.7.4 ศึกษาคุณสมบัติของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.7.5 ศึกษาและรวบรวมฐานข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิต

1.7.6 สรุปแผนงาน ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ

1.7.7 เปรียบเทียบผลการประเมินจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

1.7.8 วิเคราะห์ผลการวิจัย

1.7.9 สรุปผลการวิจัย

1.7.10 ข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 คำจำกัดความ

ในงานวิจัยนี้มีศัพท์ทางวิชาการที่ใช้บ่อยๆและสำคัญคือ

การประเมินสิ่งแวดล้อม (environmental assessment) หมายถึง การประเมินผลกระทบทุกๆด้านที่มาจากสิ่งแวดล้อมของมนุษย์ ได้แก่ การจราจร อากาศ น้ำ เสียงรำคาญ ค่านิยมทางสังคม แหล่งทรัพยากร ที่ส่งผลต่อการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ การประเมินชนิดนี้จะเปรียบเทียบ สถานการณ์ปัจจุบันและการคาดคะเนสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเนื่องจากผลกระทบดังกล่าว พร้อมกับแนวทางการแก้ไขหลายแนวทางในการลดหรือแก้ไข ให้ผลกระทบน้อยสุด ทั้งนี้ผู้ประเมินต้องดำเนินการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น(environmental impact statement) ตามที่กฎหมาย กำหนด

ระบบนิเวศ (ecosystem) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม ความเสี่ยง (risk) ครอบคลุมความน่าจะเป็น ความเป็นไปได้ หรือโอกาสที่จะเกิดอันตรายหรือได้รับอันตราย

การประเมินระบบนิเวศ (ecological assessment) เป็นการประเมินทรัพยากรที่มีในระบบนิเวศโดยนิยมใช้ในกรณีที่มีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศนั้นๆที่มีสาร-ปนเปื้อน(Environmental Protection Agency,1991) การประเมินจะครอบคลุมถึงการประเมินสถานการณ์ปัจจุบันและความเป็นอันตรายผลกระทบ และ ความเสียหายที่เกิดขึ้นหากมีการปนเปื้อนของสารเคมีและความสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีปนเปื้อน กับระบบนิเวศนั้น

การประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ(ecological risk assessment) หมายถึงกระบวนการในการประเมินโอกาส(likelihood) ของผลกระทบต่อระบบนิเวศว่ามีโอกาสที่จะเกิดหรือเกิดขึ้นแล้วต่อตัวรับตัวเดียวหรือหลายตัวรับในระบบนิเวศนั้น(Environmental Protection Agency,1998) ความเสี่ยงจะไม่เกิดขึ้นหากไม่มี (1) ตัวรับที่เป็นสาเหตุ ให้เกิดความเสียหายต่อตัวรับที่ถัดไป (2) เกิดการรับหรือสัมผัสต่อ ร่างกาย อวัยวะ ประชากร ชุมชนนั้นเป็นระยะเวลาที่นานพอที่จะก่อให้เกิดผลกระทบร้ายแรง (adverse effects) นั่นคือการประเมิน ความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ(ecological risk assessment) เป็นการประเมินระบบนิเวศที่เน้นความเสี่ยง จากอดีตหรืออนาคตของสารเคมีปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษานั้น โดยมีศึกษาลักษณะอันตราย(hazard identification) การประเมินความเป็นพิษ (toxicity assessment) การประเมินการกระจายของสารเคมี ปนเปื้อน(exposure assessment) และลักษณะหรือประเภทของความเสี่ยง(risk characterization) ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศเป็นการศึกษาโอกาสหรือความน่าจะเป็นในการได้รับสารเคมีปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจากการใช้ชีวิตปกติในแหล่งที่อยู่อาศัยของ

ตนเองหรือการอพยพเข้าไปอยู่ในแหล่งที่อยู่ใหม่ที่มีการปนเปื้อนของสารเคมีอยู่แล้ว โอกาสที่จะได้รับหรือสัมผัสกับสารเคมีปนเปื้อนนั้นขึ้นกับพฤติกรรม(behavior) และประเภทและชนิดของอาหารและอุปนิสัยของการบริโภค(diet) ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสื่อต่างๆ เช่น ดิน น้ำ อากาศ ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญด้วย(Calabrese and Baldwin,1993)

2.2 ขอบเขตการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ(Framework for Ecological Risk Assessment)

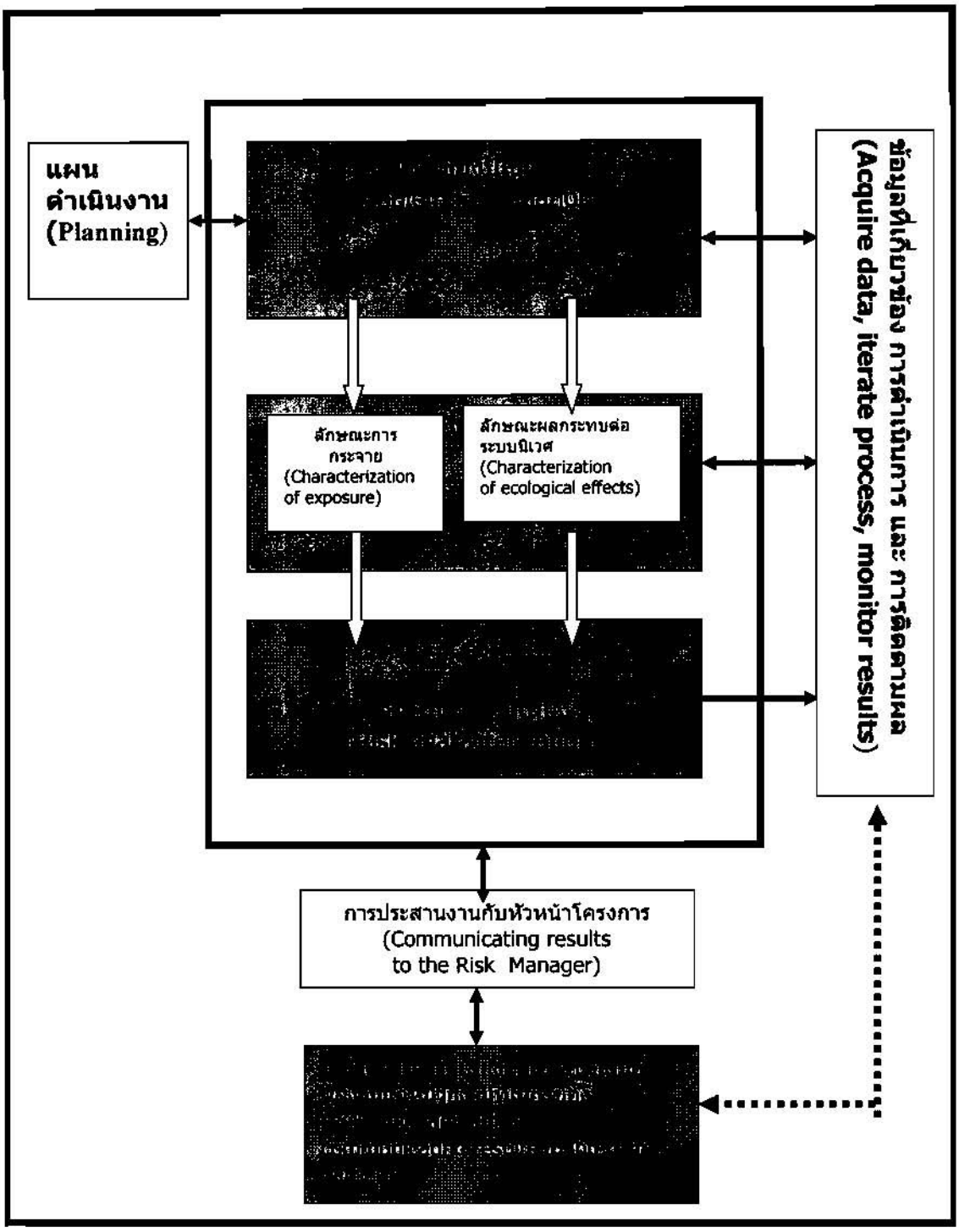
กระบวนการในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศต้องมีขอบเขตของการประเมินหรือ framework (U.S. Environmental Protection Agency,1992) คือมีที่มาของปัญหา (problem formulation) การวิเคราะห์ (analysis) การจำแนกลักษณะ ความเสี่ยง (risk characterization) ตามรูปภาพที่ 1 โดยแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดที่ต้องศึกษาและจัดทำ แสดงในรูปภาพที่ 2 และรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

2.2.1 ที่มาของปัญหา (Problem Formulation)

ที่มาของปัญหาประกอบด้วย แผนดำเนินการ ขอบเขตการศึกษา ในกำหนดการศึกษา ความเป็นไปได้(feasibility) ความกว้างของการศึกษา(breadth) วัตถุประสงค์(objectives)ของการศึกษา สำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศดังแสดงใน รูปภาพที่ 3

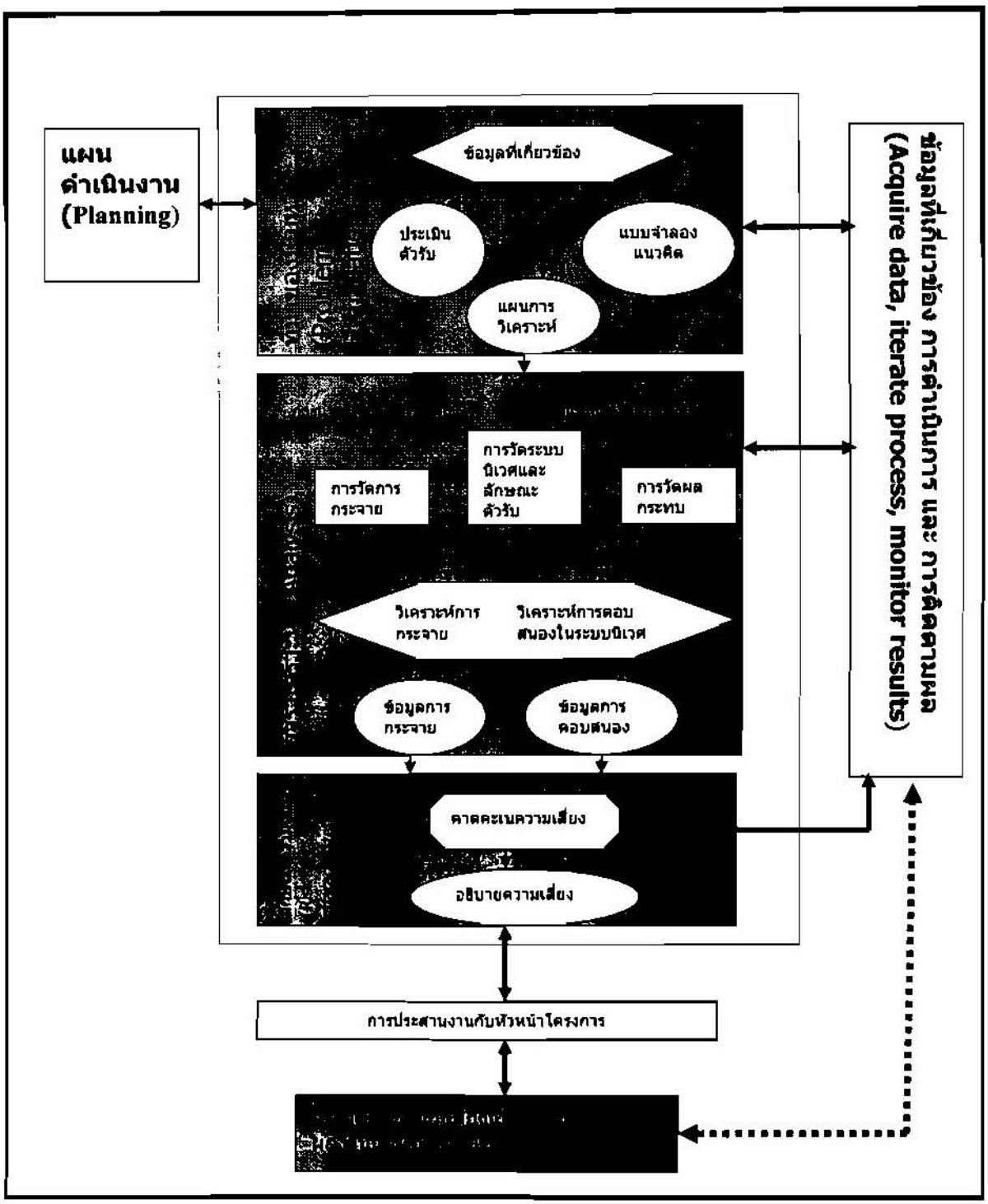
ที่มาของปัญหาจะต้องมีการประเมินเบื้องต้นเกี่ยวกับการแพร่กระจาย(exposure) และผลกระทบ(effects) ข้อมูลจำเป็นที่ต้องใช้ กฎหมายข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง และปัจจัยพื้นที่ที่ทำการศึกษา นอกจากนั้นในกระบวนการนี้จะต้องระบุระบบนิเวศที่มีโอกาสหรือความเสี่ยง ตัวรับ การวัด และการประเมินตัวรับสุดท้าย ข้อมูลเหล่านี้จะสรุปและได้กรอบความคิด หรือแบบจำลอง แนวคิด (conceptual model) ในการตั้งข้อสงสัยหรือสมมติฐานเกี่ยวกับความเสี่ยงที่ตัวรับในระบบ นิเวศนั้นๆเช่น ผลกระทบเฉพาะตัว ผลกระทบต่อประชากร ผลกระทบต่อชุมชนหรือระบบ นิเวศที่ศึกษา

รายละเอียดและความพร้อมของข้อมูลที่จำเป็นในการประเมินความเสี่ยงต้องมีการเตรียมพร้อม เนื่องจากในระบบนิเวศความเสี่ยงหรือผลกระทบนั้นเกิดกับตัวรับหลายๆตัวที่อยู่ในพื้นที่นั้นๆ โดยระดับของผลกระทบอาจรุนแรงถึงระดับทำให้เสียชีวิตสำหรับตัวรับชนิดหนึ่ง อาจมีผลกระทบระดับขาดแคลนอาหารสำหรับตัวรับชนิดอื่นเป็นต้น ดังนั้นที่มาของปัญหาจึงเป็นขั้นตอนแรกที่ต้องตั้งเป้าหมายให้ชัดเจน

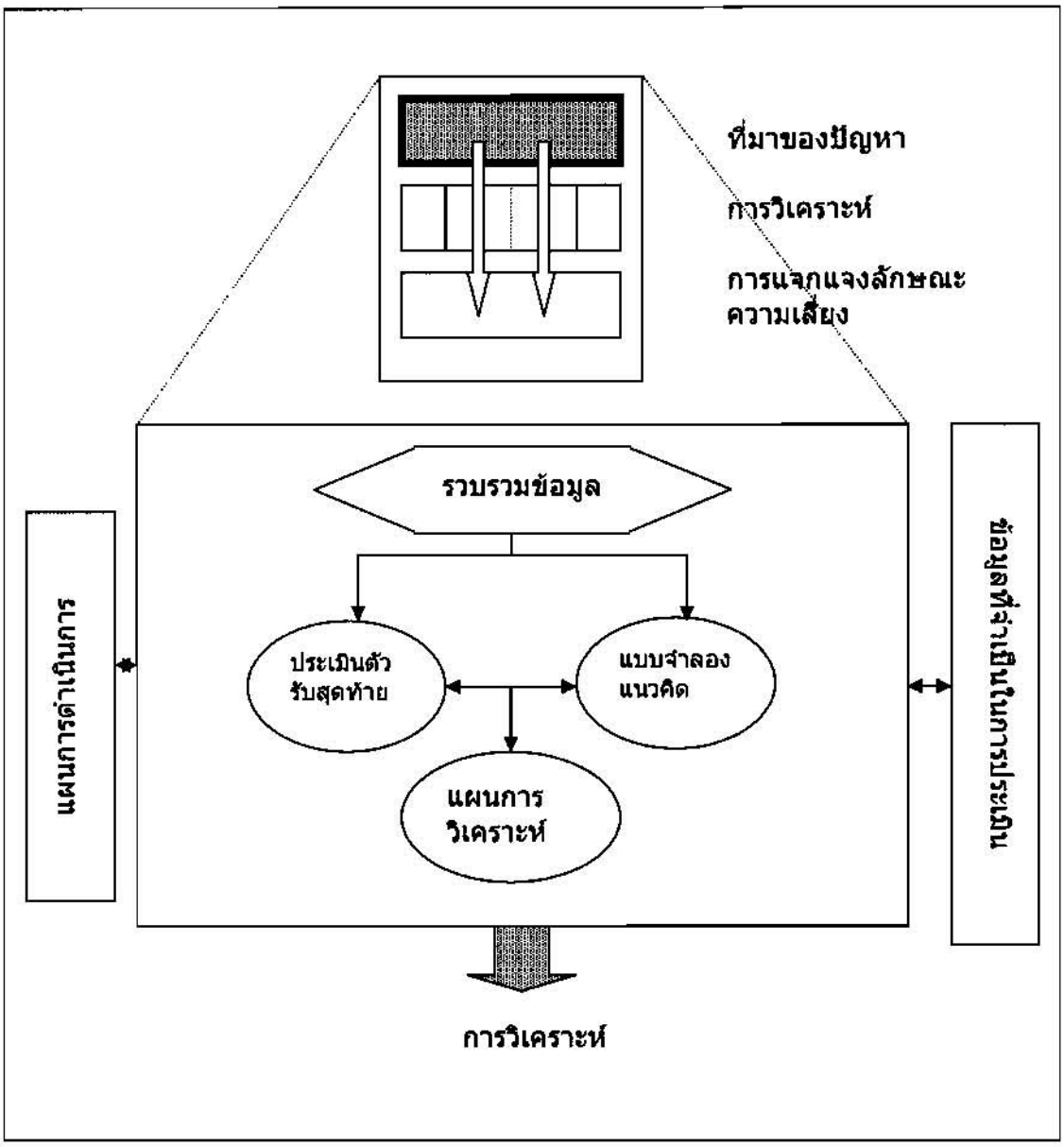


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการในการจัดทำการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ

(ที่มา: U.S. EPA, 1998)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงรายละเอียดในการทำงานในแต่ละขั้นตอน(ที่มา: U.S. EPA, 1998)



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงกระบวนการหาที่มาของปัญหา (ที่มา: U.S. EPA, 1998)

ในการดำเนินการหาที่มาของปัญหา สุดท้ายจะต้องได้ข้อสรุปอย่างน้อยดังนี้คือ (1) กำหนดและการประเมินตัวรับสุดท้ายที่อยู่ในระบบนิเวศนั้น (2) แบบจำลองแนวคิดที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวรับ (Stressor) กับตัวรับสุดท้าย (Endpoints) และ (3) แผนการวิเคราะห์(Analysis plan) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1 การเลือกประเมินตัวรับสุดท้าย (Selecting assessment endpoint)

เป็นการอธิบายค่าจริงที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ควรปกป้องที่จำกัดโดยขอบเขตของสิ่งแวดล้อมและพื้นที่ การเลือกตัวรับสุดท้ายเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการที่มาของปัญหาและมีข้อพิจารณาใน การเลือกตัวรับสุดท้าย(criteria for Selection) โดยที่ในแต่ละระบบนิเวศมีความหลากหลายและมีความเกี่ยวพันกันหลายระดับ นับว่าเป็นงานระดับท้าทายความสามารถในการจำแนกข้อมูลเหล่านี้และเผยแพร่ให้สาธารณชนนำไปใช้และประยุกต์ใช้ในการรักษาระบบนิเวศ ในการพิจารณาตัวรับสุดท้ายมีข้อพิจารณาอยู่ 3 อย่างคือ

1. การเกี่ยวข้องทางระบบนิเวศ (ecological relevance) เป็นการอธิบายความสำคัญหรือสะท้อนบทบาทของระบบที่มีผลกระทบโดยตรงกับตัวรับสุดท้ายนั้น โดยอธิบายถึงระดับที่เกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น แหล่งที่มาของอาหารในระบบ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทุกระดับในระบบ นั่นคือเป็นการศึกษาการเชื่อมโยงของแต่ละระดับหน้าที่ในระบบนิเวศที่จะเกิดกับตัวรับสุดท้ายนั่นเอง
2. ตัวรับที่มีโอกาสเกิดความเสี่ยง(susceptibility to known or potential stressors) เป็นการบ่งบอกว่าตัวรับสุดท้ายใดที่มีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบไวที่สุดในระบบนิเวศนั้น โดยขึ้นอยู่กับระบบการตอบสนองของอวัยวะหรือผลกระทบต่อร่างกายของตัวรับนั้นไม่ว่าในระดับผลกระทบต่ออัตราการเกิดอัตราการตายต่อตัวรับนั้นๆ การลดลงของประชากร ทั้งนี้แต่ละตัวรับจะมีความต้านทานต่อสารเคมีต่างระดับกัน
3. การเกี่ยวข้องกับเป้าหมายการจัดการ (relevance to management goals) โดยคำนึงถึงว่า ตัวแปรหรือตัวรับนั้นจัดอยู่ในกลุ่มสัตว์สงวนหรืออนุรักษ์ คุณค่าทางเศรษฐกิจ การกีฬา เหล่านี้จะช่วยให้เกิดการวางแผนในการจัดการที่เหมาะสมและบรรลุเป้าหมายได้

2.2.1.2 การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (Integration of available information)

หลักการคือการประเมินความเสี่ยงจะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นกับการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ให้ได้มากที่สุดที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะข้อมูลของแหล่งที่มาและแหล่งที่อยู่ของตัวรับลักษณะเฉพาะ โอกาสที่จะได้รับสารเคมีปนเปื้อน และลักษณะของระบบนิเวศที่มีโอกาสเกิดความเสี่ยงและผลกระทบต่อระบบนิเวศ

การรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการประเมินเป็นการเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยงตลอดโครงการ โดยมีเนื้อหาดังนี้

1) แหล่งที่มาและลักษณะของตัวรับ (source and stressor characteristics)

การแยกลักษณะของแหล่งปล่อยและตัวรับให้ชัดเจน เช่น เป็นแหล่งที่เกิดโดยธรรมชาติหรือมนุษย์ทำขึ้น เป็นแหล่งปล่อยหรือ เป็นแหล่งกระจาย

ตัวรับที่อาจได้รับผลกระทบทางด้านชีวภาพ เคมี หรือ ฟิสิกส์

ระดับความเข้มข้นหรือระดับความรุนแรงที่ตัวรับทนได้

สาเหตุที่เกิดผลกระทบ และบทบาทของตัวรับในระบบนิเวศนั้นๆ

2) ลักษณะการกระจาย(exposure characterization)

ลักษณะของความถี่ของการกระจาย

ระยะเวลาที่เกิดการกระจายในสิ่งแวดล้อม

ระดับความรุนแรงของการกระจาย

3) โอกาสที่ระบบนิเวศจะเกิดความเสี่ยง(ecological potentially at risk)

พื้นที่ทั้งหมดที่อาจได้รับผลกระทบ

ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อระบบนิเวศ

ปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ

โครงสร้างของระบบนิเวศ

สถานการณ์ปัจจุบันของระบบนิเวศนั้น

ตัวรับที่มีโอกาสเกิดความเสี่ยงมากที่สุด

ภูมิประเทศ

4) ผลกระทบต่อระบบนิเวศ(Ecological effects)

ข้อมูลในปัจจุบันและข้อมูลเพิ่มเติม

ลักษณะผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับตัวรับ

ผลกระทบที่เกิดขึ้นแล้ว

2.2.1.3 การจำแนกการประเมินตัวรับสุดท้าย (Defining assessment endpoints)

เมื่อมีการเลือกตัวรับที่มีโอกาสจะเกิดความเสี่ยงในระบบนิเวศแล้ว ขั้นต่อไปคือการดำเนิน การจำแนก การประเมินตัวรับสุดท้ายซึ่งมี 2 ขั้นตอนที่ต้องคำนึงถึงคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง การจำแนกหรือ บ่งบอกในรายละเอียดหรือเฉพาะตัว ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของตัวรับ (species) หน้าที่ของกลุ่มของตัวรับ (functional group of species) ชุมชน ระบบนิเวศที่ศึกษา และขั้นตอนที่สองคือการแจกแจงลักษณะ ของตัวรับที่จะต้องได้รับการปกป้องและมีโอกาสที่จะได้รับความเสี่ยง

2.2.1.4 แบบจำลองความคิด (Conceptual model)

ในขั้นตอนนี้การสร้างแบบจำลองความคิดเพื่อที่จะแสดงความสัมพันธ์และการนำเสนอระหว่างการทำนายความสัมพันธ์ในระบบนิเวศกับระบบนิเวศและตัวรับที่จะได้รับผลกระทบ การจัดทำแบบ จำลองความคิดต้องประกอบด้วย (1) การตั้งสมมติฐานที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวรับการกระ จาย การตอบสนองต่อสารปนเปื้อนของตัวรับ และเหตุผลของการเลือกตัวรับ (2) แผนภาพ (diagram) แสดง ความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งแบบจำลองความคิดนี้มีประโยชน์คือ

1) กระบวนการจัดทำแบบจำลองความคิดทำให้เกิดกระบวนการเรียนรู้
2) แบบจำลองความคิดสามารถปรับปรุง ดัดแปลงได้เมื่อความรู้เพิ่มขึ้น
3) แบบจำลองสามารถบ่งชี้สิ่งที่รู้และสิ่งที่ไม่รู้โดยบรรจุไว้ในแผนงานในอนาคต
4) แบบจำลองสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการสื่อสารหรือการนำเสนอผลงานได้เป็นอย่างดีเพราะได้รวบรวมข้อสันนิษฐานและขั้นตอนการประเมินไว้แล้ว

2.2.1.5 แผนการวิเคราะห์ (Analysis plan)

แผนการวิเคราะห์เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการค้นหาที่มาของปัญหาระหว่างการดำเนินแผนการวิเคราะห์ สมมติฐานด้านความเสี่ยง โดยมีการประเมินผลโดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่ ในขั้นตอนนี้ต้องมีองค์ประกอบดังนี้คือ แผนดำเนินการ ข้อมูลที่ต้องการ การวัด และวิธีการดำเนินการ แผนการ วิเคราะห์จะต้องมีการวิเคราะห์ก่อนนำไปใช้ และเมื่อเห็นว่ามีความเป็นไปได้แผนการนี้ก็สามารถนำไป ปฏิบัติต่อไป

2.2.2 การวิเคราะห์ (Analysis)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์รวมถึงการประเมินทางด้านเทคนิคเกี่ยวกับข้อมูลของความเป็นไปได้ที่มีการกระจายของสารเคมีปนเปื้อนไปสู่ตัวรับหรือลักษณะของการกระจาย (characterization of exposure) และผลกระทบที่เกิดจากการรับสารเคมีปนเปื้อนนั้นๆในรูปของผลกระทบทางนิเวศ (characterization of ecological effects) ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปภาพที่ 4

การจำแนกลักษณะการกระจายรวมถึง การทำนายหรือการวัดการกระจายในพื้นที่เป็นย่อมๆ หรือ เป็นพื้นที่ที่ตัวรับมีโอกาสที่จะสัมผัสหรือรับสารเคมีปนเปื้อนนั้น สำหรับผลกระทบทางนิเวศรวมถึงการแยกแยะและบ่งบอกถึงระดับของผลกระทบที่มีต่อตัวรับนั้นๆ และประเมินถึงสาเหตุและผลกระทบนั้นๆ

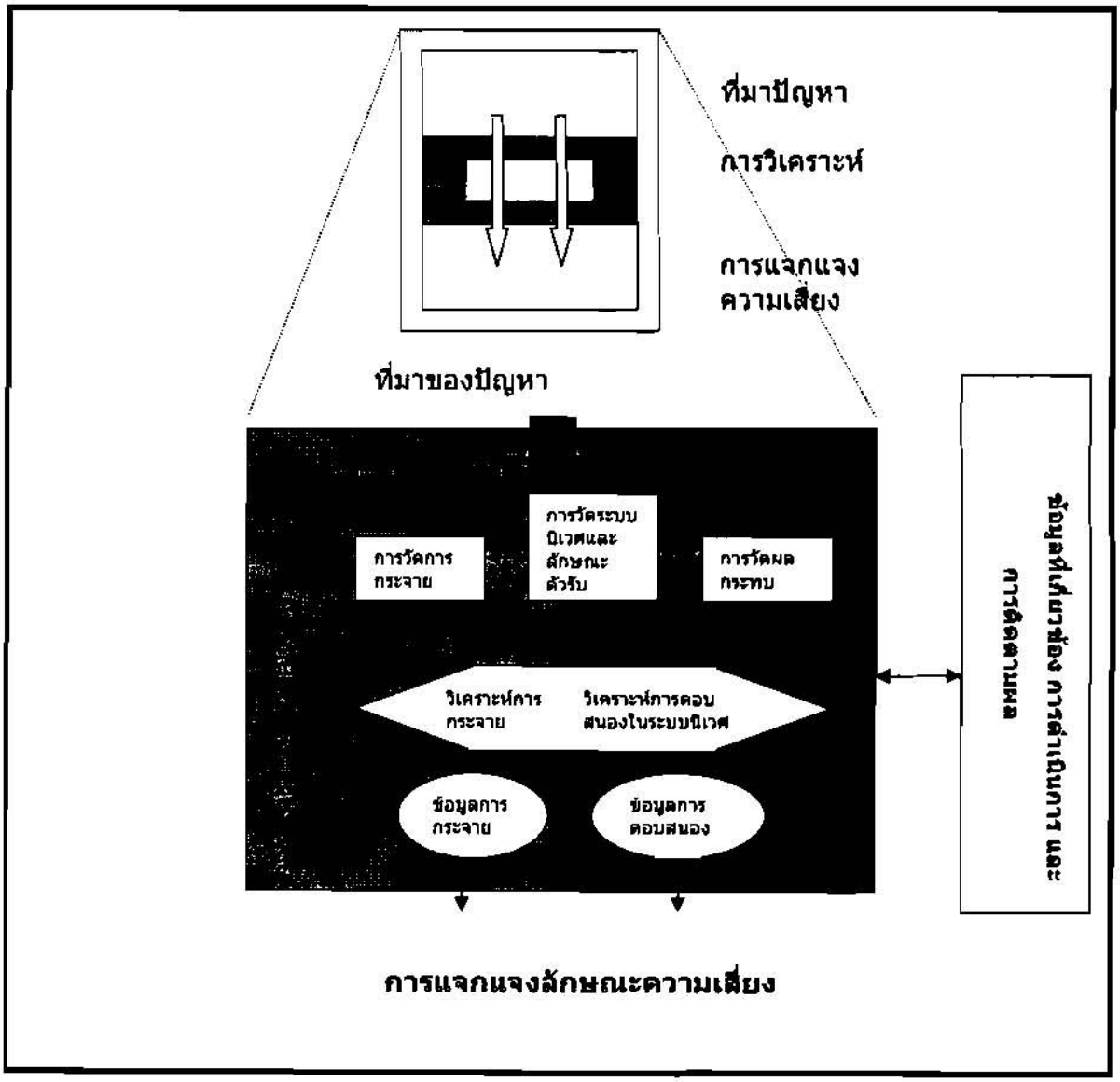
2.2.2.1 การจำแนกลักษณะการกระจาย (Characterization of exposure)

การจำแนกลักษณะการกระจายสามารถอธิบายศักยภาพ โอกาส หรือการเกิดขึ้นจริงจากการสัมผัสหรือการเกิดร่วมระหว่างตัวรับและตัวผ่าน โดยขึ้นกับการวัดการกระจายและลักษณะ ของตัวรับกับระบบนิเวศ (Environmental Protection Agency, 1998)

วัตถุประสงค์ของการจัดทำการจำแนกลักษณะการกระจายเพื่อที่นำไปสู่การสรุปข้อมูล(profile) ของการกระจายและทางผ่านระหว่างตัวรับในระบบนิเวศ รวมถึงโอกาสของแต่ละตัวรับที่จะเกิดความเสี่ยงต่อสารปนเปื้อนนั้นๆ

2.2.2.2 การจำแนกลักษณะผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Characterization of ecological effects)

การจำแนกลักษณะผลกระทบต่อระบบนิเวศเป็นการจำแนกผลกระทบทางนิเวศวิทยา ผลที่เกิดขึ้นต่อตัวรับ การเชื่อมโยงระหว่างตัวรับและการประเมินผลกระทบต่อตัวรับสุดท้าย และการแลกเปลี่ยนระหว่างตัวรับในแต่ละระดับ การดำเนินการในขั้นนี้จะต้องสอดคล้องกับแผนการวิเคราะห์ และแบบจำลองความคิดที่จัดทำไว้แล้ว นอกจากนั้นต้องทำการประเมินผลของผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวรับ และสุดท้ายจะต้องสรุปและจัดทำทะเบียนหรือข้อมูลระหว่างตัวรับและการตอบสนอง



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงกระบวนการวิเคราะห์(Analysis) (ที่มา: U.S. EPA, 1998)

2.2.3 การจำแนกลักษณะความเสี่ยง (Risk characterization)

การจำแนกลักษณะความเสี่ยงจะใช้ผลที่ได้จากขั้นการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการจำแนกลักษณะการกระจายและการจำแนกผลกระทบทางนิเวศสำหรับการประเมินโอกาสหรือความเป็นไปได้ที่จะเกิด ผลเสียต่อระบบนิเวศกับการเกิดการกระจายของตัวรับ ในขั้นตอนนี้จะรวมถึง สมมติฐานที่ตั้งไว้ ความไม่แน่นอนของการประเมิน ข้อดีและข้อเสียของการวิเคราะห์ ดังแสดงไว้ ในรูปที่ 5

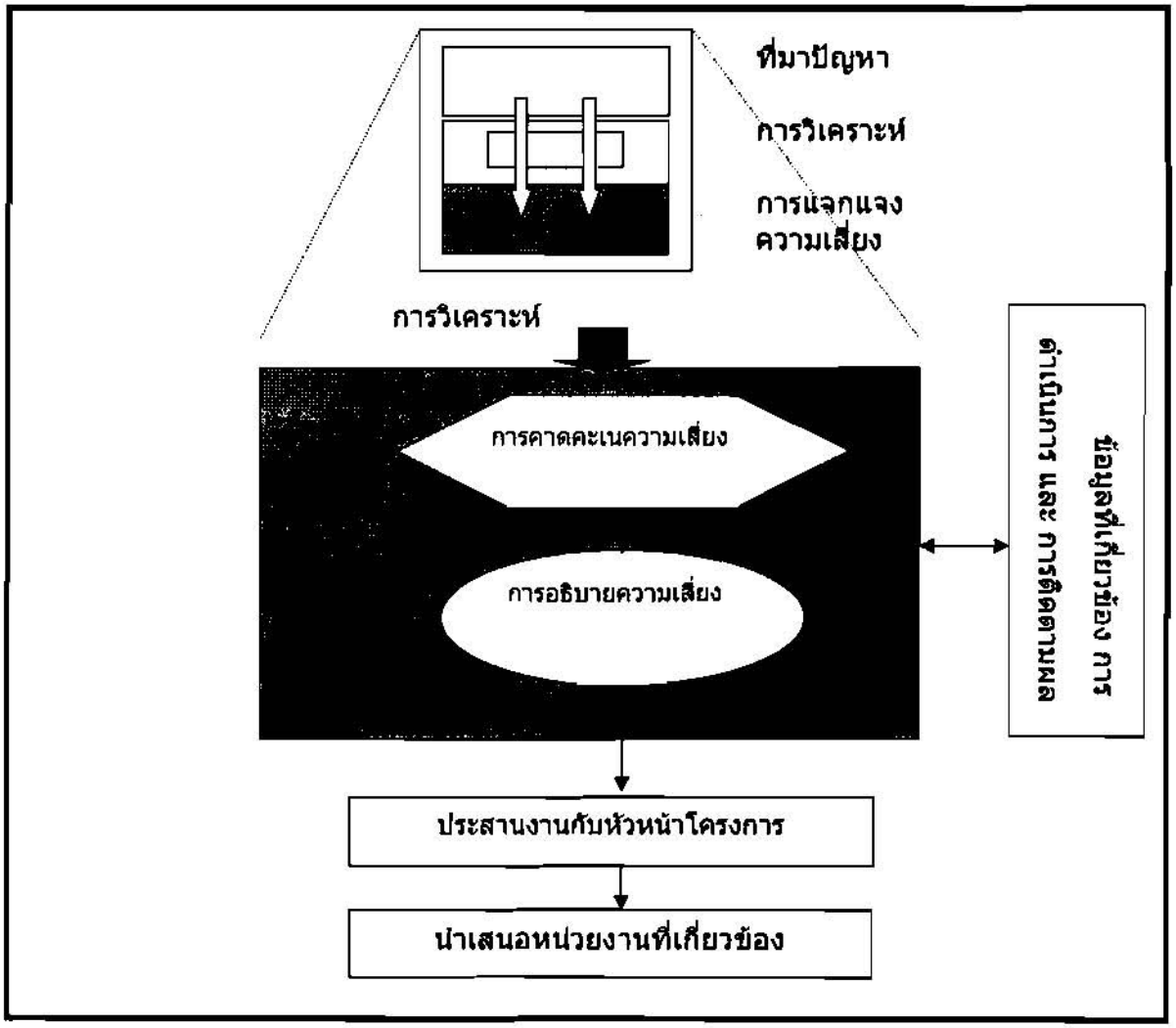
การลักษณะความเสี่ยง มี 2 ขั้นตอนคือ การคาดคะเนความเสี่ยง (risk estimation) และ การอธิบายความเสี่ยง (risk description) การคาดคะเนความเสี่ยงเป็นการรวบรวมความรู้และข้อมูลที่มี อยู่ในการนำเสนอความเสี่ยง โดยอาจศึกษาจากการเก็บตัวอย่างในพื้นที่หรือการจัดอันดับตามที่ข้อมูล ที่มีอยู่

การเปรียบเทียบผลกระทบจากความเข้มข้นสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมกับตัวรับและความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นในระบบนิเวศ การอธิบายความเสี่ยงเป็นการแปรผลข้อมูลที่ได้จากการคาดคะเนความเสี่ยงที่มีผลต่อตัวรับสุดท้ายรวมถึงการประเมินผลของการดำเนินการที่ขึ้นกับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบันและนำไปสู่การจัดทำรายงานผลการศึกษาต่อไป

การจำแนกลักษณะความเสี่ยงเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศและเป็นขั้นตอนประเมินผลและสรุปผลการศึกษาเสนอต่อหัวหน้าโครงการเพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการบริหารการจัดการต่อไป

ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการนำเสนอขั้นตอนการดำเนินการประเมินความเสี่ยง ต่อระบบนิเวศและรายละเอียดในการทำอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้การดำเนินการประเมินความเสี่ยงต่อระบบ นิเวศมี 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ที่มาของปัญหา การวิเคราะห์ และการวิเคราะห์ความเสี่ยง เนื้อหาต่อไปจะกล่าวถึงการนำสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการคำนวณค่าความเสี่ยงของตัวรับโดย
คำนึงถึงกลไกการนำสารเคมีปนเปื้อนสู่ร่างกาย ทางผ่านสู่ร่างกายและปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังมีรายละเอียดดังนี้

ธรรมวิทยาศาสตร์บริการ



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงกระบวนการจำแนกลักษณะความเสี่ยง(ที่มา: U.S. EPA, 1998)

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงที่กำหนดไว้โดย U.S. Environmental Protection Agency ที่กำหนดไว้ใน Wildlife exposure factors handbook (U.S.EPA, 1993) และงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องโดยสามารถแบ่งตัวรับสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ได้เป็น พืชบก สัตว์บก พืชและสัตว์น้ำ และสมการทางคณิตศาสตร์ใน แต่ละประเภทตัวรับสามารถสรุปได้ดังนี้

2.3.1 พืชบก (Terrestrial Plants)

พืชบกสามารถดูดดึงสารได้หลายทางผ่านคือ ราก ใบ และลำต้น และแต่ละทางผ่านมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้คำนวณปริมาณสารปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ ราก ลำต้น หรือ ใบ ของพืช ได้ ทางผ่านหลักๆมีดังนี้

2.3.1.1 การดูดดึงสารปนเปื้อนในดินโดยราก (Root Uptake from Root-zone Soil to Roots)

สามารถคำนวณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในรากโดยสมการ

$$C_{pr} = EC_{rzs} \times K_{psl} \text{(Hope, 1995)}$$

โดยที่

C_{pr} = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในราก (contaminant concentration in plant roots) หน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg)

EC_{rzs} = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดิน (contaminant concentration in root-zone soil) หน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg)

K_{psl} = สัมประสิทธิ์การดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินสู่รากพืช(plant-soil partition coefficient for root-zone soil to roots) หน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในดินต่อ หน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในรากพืช (mg/kg(soil)/mg/kg(roots)) และสามารถหาได้จากสมการ

$$K_{psl} = 270 \times K_{ow}^{-0.58} \quad \text{(McKone, 1993)}$$

โดยที่

K_{ow} = ค่าสัมประสิทธิ์ของสารปนเปื้อนในรูปของออกทานอลต่อน้ำ(contaminant-specific octanol-water partition coefficient) หน่วยโมลต่อลิตรของน้ำต่อโมลต่อลิตรของออกทานอล (mol/L(water)/mol/L(octanol))

และ K_{ow} สามารถหาได้จากสมการที่ให้ไว้ใน ภาคผนวก ก

2.3.1.2 รากดูดดึงสารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำ (Root Uptake from Root-zone Soil Solution to Roots)

สามารถคำนวณความเข้มข้นในรากพืชได้โดย

$$C_{pr} = EC_{sw} \times RCF \qquad \text{(Hope, 1995)}$$

โดยที่

EC_{sw}= ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำผิวดินที่สัมผัสกับรากพืช(contaminant concentration in surface water in contact with roots) หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร(mg/L)

RCF = ปัจจัยของการดูดดึงสารปนเปื้อนโดยราก(root concentration factor) ห หน่วย ลิตรต่อกิโลกรัม (L/kg) และหาได้จากสมการ

$$RCF = 0.82 + 0.03 \times K_{ow}^{0.77} \qquad \text{(Briggs } et\ al.\text{, 1983)}$$

2.3.1.3 การดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินโดยรากเข้าสู่ส่วนบนของพืช (Root Uptake from Root-zone Soil to Above-ground Plant Parts)

สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_{pa} = EC_{rzs} \times (K_{ps2}, B_r, B_v)$$

โดยที่จะใช้ค่าใดค่าหนึ่งในวงเล็บขึ้นกับว่าสารปนเปื้อนเป็นสารเคมีประเภทใด ถ้าเป็นสารอินทรีย์ (organic) คือค่า(K_{ps2}) หรือสารอนินทรีย์(inorganic)คือค่า (B_r, B_v). โดยที่

C_{pa} = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนส่วนบนของพืช(Contaminant concentration in above-ground plant parts) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม(mg/kg)

K_{ps2} = สัมประสิทธิ์การดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินสู่ส่วนบนของพืช(plant-soil partition coefficient for root-zone soil to above-ground plant parts) หน่วยเป็น mg/kg(soil)/mg/kg(above-ground plant) โดยที่ K_{ps2} หาได้จากสมการ

$$K_{ps2} = 7.7 \times K_{ow}^{-0.58} \qquad \text{(McKone, 1993)}$$

B_r = ค่าปัจจัยของการดูดดึงสำหรับส่วนบนของพืช (Bioconcentration factor for vegetative plant parts) mg/kg(soil)/mg/kg(vegetative plant)

B_v = ค่าปัจจัยของการดูดดึงสำหรับส่วนบนของพืชที่เป็นเมล็ด ฝัก(Bioconcentration factor for nonvegetative plant parts) มีหน่วยเป็น mg/kg(soil)/mg/kg(nonvegetative plant)

ค่า Br, Bv หาได้จาก Bechtel Jacobs company(1998)

2.3.1.4 การดูดซับสารปนเปื้อนในอากาศผ่านใบ (Foliar Uptake Vapor)

หาได้จาก สมการ

$$C_{pa} = EC_{vap} \times K_{pa} \text{(Hope, 1995)}$$

โดยที่

C_{pa} =ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนส่วนบนของพืช(Contaminant concentration in above-ground plant parts) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม(mg/kg)

EC_{vap} = ความเข้นข้นของสารปนเปื้อนในอากาศ(concentration of volatilized contaminant in air) หน่วย mg/ m^3

K_{pa} = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดดึงสารปนเปื้อนจากอากาศสู่ส่วนบนของพืช (plant-air partition coefficient for air to above-ground plant parts) มีหน่วยเป็น m^3/kg และสามารถหาได้จากสมการ

$$K_{pa} = [0.5 + (0.4 + 0.01K_{ow}) \times \frac{RT}{H}] \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{(Reiderer, 1990)}$$

R = ค่าคงที่สากลของก๊าซ(universal gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.314 Pa-m^3/mol/K

T = อุณหภูมิ(temperature) หน่วย องศาเคลวิน(K)

H = ค่าคงที่เฉพาะตามกฎของเฮนรี่(contaminant-specific Henry's law constant)มีหน่วยเป็น Pa-m^3/mol

2.3.1.5 การดูดซับสารปนเปื้อนฝุ่นละอองในอากาศผ่านใบ (Foliar Uptake ,particulates)

หาได้จากสมการ

$$C_{pa} = EC_{par} \times K_{pa} \quad \text{(Hope, 1995)}$$

C_{pa} = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนส่วนบนของพืช(Contaminant concentration in above-ground plant parts) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม(mg/kg)

EC_{vap} = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในอากาศ(concentration of particulated contaminant in air) หน่วย mg/ m^3

K_{pa} = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดดึงสารปนเปื้อนจากอากาศสู่ส่วนบนของพืช(plant-air partition coefficient for air to above-ground plant parts) มีหน่วยเป็น m^3/kg

2.3.2 สัตว์บก (Terrestrial Animals)

ตัวรับสารปนเปื้อนที่เป็นสัตว์บก มีทางผ่านของสารปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ที่สำคัญคือ ทางเดินอาหาร ทางการหายใจ และการดูดซับโดยตรง จากการสัมผัสสารปนเปื้อนที่อยู่ ในดิน ที่เป็นแหล่งอาศัยของสัตว์เหล่านั้น ทางผ่านเหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยสมการทางคณิต ศาสตร์ ดังต่อไปนี้

2.3.2.1 การดูดซับโดยตรงผ่านผิวหนัง (Direct Absorption from Dermal Exposure)

$$ADD_{dcs} = [(SA \times AF \times P_{cs} \times EC_s \times CF \times \alpha_d)/BW) \times \theta \times \psi$$

(modified from U.S U.S.EPA, 1991)

โดยที่

$$C_{dc} = ADD_{dc}/k_e \qquad \text{(Hope, 1995)}$$

ADD_{dc} = ค่าความเข้มข้นที่ดูดซับโดยตรงผ่านผิวหนังในแต่ละวัน(absorbed daily dose from dermal contact) หน่วย mg/kg

C_{dc} = ค่าความเข้มข้นในร่างกายของสัตว์จากการดูดซับสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ผ่านผิวหนัง (contaminant body burden in receptor from dermal contact) หน่วย mg/kg

EC_s = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในดิน(contaminant concentration in soil) หน่วย mg/kg

SA = พื้นที่ผิวหนังของสัตว์(surface area of ecological receptor) หน่วย cm^2

AF = ปัจจัยการดูดซับจากดินสู่ผิวหนัง(soil-to-skin adherence factor) หน่วย mg/ cm^2

P_c = สัดส่วนการสัมผัสระหว่างผิวหนังกับดิน(fraction of receptor surface area in contact with soil per day) หน่วย d^{-1} หาได้จาก mammal: 0.22, other vertebrates: 0.25, arthropods: 1(Maughan, 1993)

α_d = ค่าปัจจัยเฉพาะการดูดซับผ่านผิวหนังของสารปนเปื้อน(contaminant-specific dermal absorption factor) หน่วย mg/kg (contaminant body burden) / mg/kg (absorbed daily dose) หาได้จาก chemical database และ U. S. U.S.EPA(1995, 1989a)

k_e = ค่าอัตราการขับสารปนเปื้อน (contaminant-specific depuration rate) หน่วย d^{-1} หาได้จาก CRCIA (PNNL,1998)

BW = น้ำหนักตัว (body weight of receptor) หน่วย kg หาได้จาก species using U.S.EPA (1993), Dunning (1993), Silva and Downing (1995), Nagy (1983)

CF = ค่าการแปรหน่วย(conversion factor) เท่ากับ 1×10^{-6} kg/mg

θ = ค่าปัจจัยการใช้พื้นที่(site use factor, ratio of contaminant area to home range) มีค่า เป็น 1

ψ = ค่าปัจจัยการอาศัยตามฤดูกาล (seasonality factor;fraction of time per year receptor occurs at site) โดยมีค่า เป็น 1 สำหรับสัตว์ทุกชนิดยกเว้นสัตว์ปีก ที่มีการอพยพย้ายถิ่นฐาน ได้แก่ common snipe (0.33), bufflehead (0.5), Forster's tern (0.5), cliff swallow (0.5), and bald eagle (0.5).

พื้นที่ผิวหนังของสัตว์ (surface area of ecological receptor, SA) หน่วย cm^2 หาได้จากสมการ

สัตว์ปีก(Birds): $SA = 10 \times (BW \times 1000)^{0.667}$

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม(Mammals): $SA = 12.3 \times (BW \times 1000)^{0.65}$

สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ(Woodhouse's toads): $SA = 0.953 \times (BW \times 1000)^{0.725}$

สัตว์เลื้อยคลาน(Lizards): $SA = 8.42 \times (BW \times 1000)^{0.694}$

สัตว์เลื้อยคลาน

(Western aquatic garter snake): $= 2 \times \pi \times 1$ cm radius (1 cm + 106 cm length)

แมลง (Terrestrial arthropods): 0.0002 cm^2

2.3.2.2 การรับสารปนเปื้อนผ่านระบบทางเดินหายใจ (Inhalation of Contaminants)

$ADD_{iv} = [(IR_i \times EC_{vap})/BW] \times \theta \times \psi \times B_i$ (modified from Hope (1995))

และ $C_{iv} = ADD_{iv} \times (\alpha_i / k_e)$ (Hope ,1995)

โดยที่

ADD_{iv} = ค่าความเข้มข้นที่ดูดเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจในแต่ละวัน (applied daily dose from inhalation of volatilized, particulated contaminants) หน่วย mg/kg

C_{iv} = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในร่างกายจากการรับสารปนเปื้อนผ่านการหายใจ (contaminant body burden in receptor from vapor inhalation) หน่วย mg/kg

B_t = สัดส่วนการจำศีล(fraction of day spent in burrow) หน่วย hr/24hr

EC_{vap} = ความเข้นข้นของสารปนเปื้อนในอากาศ(concentration of volatilized contaminant in air) หน่วย mg/ m^3

α_v = ปัจจัยการดูดซับผ่านการหายใจ(inhalation absorption factor) หน่วย mg/kg (contaminant body burden) / mg/kg (applied daily dose)

IR_i = อัตราการหายใจ(inhalation rate) หน่วย m^3/day หาได้จากสมการต่อไปนี้

ประเภท (Species)	IR_i
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม(Mammals)	$2 \times 0.5458 \times BW^{0.89}$
สัตว์ปีก(Birds)	$2 \times 0.4089 \times BW^{0.77}$
สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ(Woodhouse's toad)	5.8×10^{-4}
สัตว์เลื้อยคลาน(Lizards and western aquatic garter snake)	$0.00045 \times (BW \times 1000)^{0.8}$
แมลง(Terrestrial arthropods)	$0.00045 \times (BW \times 1000)^{0.8}$

2.3.2.3 การรับสารปนเปื้อนจากทางผ่านระบบทางเดินอาหารจากดินและตะกอน (Incidental Ingestion of Soil or Sediment)

หาได้จากสมการ

$$ADD_{si} = (EC_s \times FS \times IR_f) / BW \times \theta \times \psi$$

โดยที่

ADD_{si} = ค่าความเข้มข้นที่ดูดเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินอาหารจากการกินดินหรือตะกอนดิน ในแต่ละวัน (applied daily dose from incidental ingestion of soil or sediment) หน่วย mg/kg,

EC_s = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในดินหรือตะกอนดิน (contaminant concentration in surficial soil or sediment) หน่วย mg/kg

FS = ค่าสัดส่วนมวลสารของดินหรือตะกอนดินในอาหาร (mass fraction of soil or sediment in the diet) หน่วย เปอร์เซ็นต์ดินในอาหาร (percentage of diet on dry weight basis)

IR_f = อัตราการย่อยอาหาร(food ingestion rate on dry-weight basis) หน่วย kg/day และหาได้จากสมการต่อไปนี้(U.S. EPA, 1993)

ชนิด (Species)	IR_r
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม(Mammals)	$= 0.235\ BW^{0.822}$
สัตว์ปีก(Birds)	$= 0.0582\ BW^{0.651}$
สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ(Woodhouse's toad)	$= 0.013(\ BW \times 1000)^{0.773}$
สัตว์เลื้อยคลาน(Lizards and western aquatic garter snake)	$= 0.013(\ BW \times 1000)^{0.773}$

2.3.2.4 การรับสารปนเปื้อนในน้ำดื่มผ่านระบบทางเดินอาหาร (Ingestion of Water) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$ADD_{wi} = EC_{dw} \times (IR_{dw}/BW) \times \theta \times \psi$ (U.S.EPA (1993)

โดยที่

ADD_{wi} = ค่าความเข้มข้นที่ดูดเข้าสู่ร่างกายผ่านการดื่มน้ำในแต่ละวัน (applied daily dose from drinking water) หน่วย mg/L-day

EC_{dw} = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในน้ำดื่ม(contaminant concentration at drinking water supply) หน่วย mg/L

IR_{dw} = อัตราการย่อยน้ำดื่ม(ingestion rate of drinking water) หน่วย mg/day

และสามารถหาได้จากสมการ (U.S. EPA 1993)

ชนิด (Species)	IR_{dw}
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammals)	$= 0.099 \times BW^{0.90}$
สัตว์ปีก (Birds)	$= 0.059 \times BW^{0.67}$
สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ (Woodhouse's toad)	0
สัตว์เลื้อยคลาน (Lizards and western aquatic garter snake)	0
แมลง (Terrestrial arthropods)	0

2.3.2.5 การรับสารปนเปื้อนในอาหารผ่านระบบทางเดินอาหาร (Ingestion of Food)

$$ADD_{fi} = \sum_{k=1}^{m} (C_k \times FR_{fk} \times IR_f/BW) \times \theta \times \psi \quad \text{(Hope, 1995)}$$

โดยที่

ADD_{fi} = ค่าความเข้มข้นที่ดูดเข้าสู่ร่างกายผ่านอาหารในแต่ละวัน (applied daily dose from ingestion of contaminated food) หน่วย mg/kg

m = จำนวนรายการอาหารที่สัตว์นั้นๆ กินทั้งหมด(number of food items in the diet of the receptor species)

FR_{fk} = สัดส่วนน้ำหนักของอาหารในหมู่อาหารทั้งหมด(wet weight fraction of the k^{th} food item in receptor diet) หน่วย kg (food)/kg(diet)

C_k = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนอาหารรายการนั้นๆ(contaminant concentration in the k^{th} food item) หน่วย mg/kg และหาได้จากสมการ

$$C_k = (ADD_{fi} + ADD_{wi} + ADD_{si}) \times (\alpha_{ing}/k_e) + C_{other} \text{ (Hope, 1995)}$$

โดยที่

C_k = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในอาหารในทุกทางผ่านเข้าสู่ร่างกายคือ ทางเดินอาหาร หายใจ และการดูดซับทางผิวหนังในอาหารนั้นๆ (contaminant concentration in food item k resulting from all appropriate uptake pathways (ingestion, inhalation, dermal absorption and etc.) หน่วย mg/kg

C_{other} = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในอาหารนอกเหนือจากทุกทางผ่านเข้าสู่ร่างกายคือ ทางเดินอาหาร หายใจ และ การดูดซับทางผิวหนังในอาหารนั้นๆ (contaminant concentration in food item k resulting from exposure pathways other than ingestion (inhalation, dermal absorption, direct absorption, plant root uptake and etc.) หน่วย mg/kg

α_{ing} = ปัจจัยการดูดซับในระบบทางเดินหายใจ (ingestion absorption factor)
หน่วย mg/kg (contaminant body burden) / mg/kg (applied daily dose)

2.3.3 พืชน้ำและสัตว์น้ำ (Aquatic Species)

หาได้จากสมการการสัมผัสโดยตรง(Direct Contact) คือ

$$C_{aq} = EC_{sw} \times BCF$$

โดยที่

C_{aq} = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในร่างกายของพืชและสัตว์น้ำ(contaminant body burden in aquatic receptor) หน่วย mg/kg

EC_{sw} = ค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในน้ำ หน่วย mg/L

BCF = ปัจจัยการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเข้าสู่ร่างกาย contaminant-specific bio-concentration factor) หน่วย L/kg หาได้จาก chemical database ECOTOX(2004)

หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Log BCF} = 2.791 - 0.564 \log K_{ow}$$

โดยที่ ค่า K_{ow} เป็นค่าการละลายน้ำของสารปนเปื้อน มีหน่วยเป็น mg/L)

สมการทางคณิตศาสตร์เหล่านี้รวบรวมมาจากแหล่งเอกสารอ้างอิงจากต่างประเทศและบทความทางวิชาการที่เผยแพร่ในวารสารต่างประเทศและกรณีศึกษาที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกาและหน่วยงานแห่งชาติที่เกี่ยวข้อง การประยุกต์และนำสมการทางคณิตศาสตร์เหล่านี้ มาใช้จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องและการยืนยันความถูกต้องของผลลัพท์ที่ได้จากการใช้สมการเหล่านี้

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ

เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ อุปกรณ์ที่จำเป็นในการศึกษาคือเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย ได้แก่ Microsoft Excel และ Microsoft Visual Basics นอกจากนั้นการวิเคราะห์ทางสถิติเป็นเครื่องมือที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้

3.2 วิธีดำเนินการ

วิธีดำเนินการในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการทดสอบสมการ คณิตศาสตร์ที่จะ นำไปใช้ในกรณีศึกษา และส่วนที่สองเป็นกรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของพืชและ สัตว์น้ำต่อการปนเปื้อน ของตะกั่วในระบบนิเวศโดยใช้พื้นที่ศึกษาหมู่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นกรณีศึกษา พืชและสัตว์น้ำได้แก่ ปลา สาหร่าย หอยทาก ไรน้ำ หอย และกุ้ง

3.2.1 การทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เลือกมาเนื่องจากมีตัวแปรจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณความเสี่ยงของสารปนเปื้อนแต่ละชนิดและประเภทของสัตว์หรือพืชที่เป็นตัวรับสุดท้าย ดังนั้นการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้ว่าตัวแปรใดมีผลกระทบโดยตรงต่อผลลัพธ์หรือค่าความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ การวิเคราะห์ความไว(Sensitivity analysis) เป็นวิธีทางสถิติที่ถูกนำมาทดสอบในงานวิจัยนี้

3.2.2 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

เป็นการศึกษาผลงานของตัวแปรในสมการหรือสมการคณิตศาสตร์กับผลลัพธ์หรือผลสุดท้ายที่นำไปเปรียบเทียบ ประมวลผลลัพธ์ลดความเสี่ยง การวิเคราะห์ความไว สามารถศึกษา ได้โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างผลลัพธ์จากสมการกับ ตัวแปรนั้น ๆ โดยค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ จะวัดระดับความเกี่ยวข้องระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือตัวแปร ที่ศึกษาและผลลัพธ์ปัจจัยของ สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ ที่มีผลต่อผลของการวิเคราะห์ ความไวได้แก่ (1) ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างตัวแปร ที่ใช้กับผลลัพธ์ และ (2) ช่วงของค่า ของตัวแปรในผลลัพธ์ต่อช่วงของตัวแปรในตัวแปรที่ใช้

ผลของค่า สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ สามารถแปรผลได้โดยถ้าค่า สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ มีค่าเป็นบวก (>0) แสดงว่าตัวแปรนั้นมีความ สัมพันธ์โดยตรงกับผลลัพธ์ (ความเสี่ยง) เช่นค่าตัวแปรนั้นเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ก็มากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าค่าตัวแปรนั้นน้อยหรือลดลง ผลลัพธ์ ค่าความเสี่ยงนั้นก็ลดลงตาม ซึ่งค่า สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ มีมากคือใกล้ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงความเกี่ยวข้องเชิงบวกของตัวแปรนั้นได้ สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ หาได้จากสมการ

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum_{k=1}^{m}(x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\left(\sum_{k=1}^{m}(x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^{m}(y_k - \bar{y})^2\right)^{1/2}}$$

โดยที่ m เป็นขนาดของตัวอย่าง, x เป็นค่าที่ป้อนเข้า, y เป็นค่าผลลัพธ์, ค่า x_k และ y_k เป็นค่าที่ตำแหน่งใดๆของ x และ y. ค่าของ $\rho_{x,y}$, จะอยู่ในช่วง –1 to 1.

$\rho_{x,y}$ = 1 หมายถึงความสัมพันธ์เชิงบวกกล่าวคือค่า y เพิ่มเมื่อค่า x เพิ่ม

$\rho_{x,y}$ = 0 หมายถึงตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน, ค่า x ที่ให้มาไม่มีความสำคัญต่อค่า y

$\rho_{x,y}$ = -1 เป็นความสัมพันธ์เส้นตรงเชิงลบคือค่า y ลดลงเมื่อเพิ่ม ค่า x

ค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ มากกว่า 0.5 บ่งถึงการขึ้นต่อกันโดยตรงของตัวแปรและผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาค่าความไวของแต่ละตัวแปรในแต่ละสมการ ทั้งนี้ในการศึกษาตัวแปรที่หนึ่งจะต้องมีการเปลี่ยนค่า(vary)ไปเรื่อยๆ ขณะที่ตัวแปรอื่นในสมการนั้นๆจะคงที่ ในการพิจารณาค่าตัวแปรอื่นถัดไปก็ใช้หลักการเดียวกัน จะเห็นว่าในการศึกษาค่าความไวของตัวแปรทั้งหมด ในแต่ละสมการมีความซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก

ดังนั้นการใช้รหัส(code) คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และการประมวลผลเป็นการแก้ปัญหาและช่วยให้การวิเคราะห์ความไวได้รวดเร็วและถูกต้อง รหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รหัสภาษา Visual Basics ร่วมกับฟังชั่นของ โปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้คำสั่งใน เมนู Macro เป็นตัวกำหนด ตัวอย่างรหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้ปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข

ผลการวิจัยแต่ละสมการที่ใช้ประเมินความเกี่ยวข้องในระบบนิเวศน์ต่อตัวรับ คือ สัตว์น้ำและพืชน้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำ/พืชน้ำได้รับสารปนเปื้อนโดยตรงผ่านการสัมผัสกับน้ำ ดังนั้นค่า ความเข้มข้น

ของสารปนเปื้อนในน้ำกับค่าปัจจัยการดูดซับสารปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย (bio-concentration factor) โดย ค่า ความไว ของ 2 ตัวแปรนี้ แสดงนัยสำคัญ ซึ่งกันและกัน

3.2.3 การทวนสอบสมการคณิตศาสตร์ (Model verification)

การทวนสอบ (verification) เป็นการตรวจสอบภายในว่าสมการหรือโมเดลทางคณิตศาสตร์ มีความถูกต้องและสัมพันธ์กันอย่างต่อเนื่อง ตามที่คาดหมายไว้หรือไม่ ในงานวิจัยนี้จะใช้กรณี ศึกษาโดยใช้ ไมโครซอฟท์เอกเซล (Microsoft excel) และ ไมโครซอฟท์ วิชวลเบสิก (Microsoft Visual Basics) เป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ทวนสอบ เนื่องจากความสัมพันธ์ของตัวแปรและห่วงโซ่อาหาร ของตัวรับนั้นๆมีหลายระดับและซับซ้อน การแสดงหรือคำนวณด้วยมือถือเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและอาจเกิดข้อผิดพลาดในการป้อนค่าได้ รหัสทางคอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทในการคำนวณ สำหรับรหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปรากฏอยู่ใน ภาคผนวก ข

3.2.3.1 การเลือกตัวรับและทางผ่าน

กรณีสัตว์บก มี 2 กรณีที่ศึกษาคือกรณีที่เป็นสัตว์กินสัตว์ และสัตว์กินพืช ทั้งนี้เนื่อง จากสมการได้ครอบคลุมทางผ่านของสารปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายของสัตว์เหล่านี้ทุกทาง ไม่ว่าจะเป็น ระบบ ทางเดินอาหาร ระบบหายใจ หรือการดูดซับโดยตรงผ่านผิวหนัง ทั้งนี้ทางระบบทางเดินอาหารนั้นองค์ประกอบ (fraction) ในอาหารของสัตว์แต่ละประเภท นั้นขึ้นอยู่กับห่วงโซ่อาหารนั้นๆ ว่ามีความซับซ้อนมากน้อยเท่าไร ถ้ามีอันดับหรือทางผ่านที่ซับซ้อน การพิจารณาหรือคำนวณค่าจะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพในการป้อนข้อมูลและประมวลผลได้ถูกต้องและรวดเร็ว ดังนั้นภาษาวิชวลเบสิกจึงมีความเหมาะสมในการใช้งานทั้งนี้เนื่องจากใช้ ง่าย และไม่มีข้อจำกัดด้านขนาดของข้อมูล

3.3 กรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำน้ำบริเวณหมู่บ้านคลิตี้ล่าง

หมู่บ้านคลิตี้ล่างตั้งอยู่ในเขตลุ่มน้ำแม่กลองตอนบน จังหวัดกาญจนบุรี มีประชากรประมาณ 228 คน และได้อาศัยลำน้ำห้วยคลิตี้เป็นแหล่งอุปโภคและบริโภค เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับเหมือง แร่ตะกั่วที่ได้รับการสัมปทาน

จากรายงานของศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา(2547) ที่มีการรายงานความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำ ดังกล่าว ดังตารางที่ 1 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า มีค่าปริมาณตะกั่วสูงสุดที่ 0.55 มิลลิกรัมต่อลิตร

และมีค่าเฉลี่ยทั้ง 7 จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ มีค่า 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการประเมิน ความเสี่ยง คำนึงถึงโอกาสที่สัตว์น้ำจะได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของสารตะกั่ว ดังนั้นในงาน วิจัยนี้ได้ใช้ทั้งสองค่านี้ ในการคำนวณค่า ความเสี่ยงต่อสัตว์น้ำ

ตารางที่ 1 ปริมาณตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้ ระหว่างปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2542
(หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร)(ที่มา:ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา, 2547)

จุดตรวจ	24 เมย.41	29 เมย.41	26 พค.41	28 มิย.41	2 ธค.41	กค.42	ธค.42
1. ก่อนโรงแต่งแร่	0	0.006	0.007	0.006	0.005	0.003	0.014
2. ใต้โรงแต่งแร่	1.38	0.107	0.1	0.067	0.03	0.025	0.072
3. ห้วยคลิตี้ 3 กม.	-	0.497	0.33	0.408	0.07	0.043	0.408
4. บ้านคลิตี้ล่าง	0.75	0.547	0.395	0.088	0.13	0.08	0.03
5, จุด KC4/1	-	-	-	-	-	0.041	0.058
6. หน่วยรักษาอุทยานฯ	-	0.166	0.174	0.136	0.14	-	-
7. น้ำตกคลิตี้ล่าง	0.15	-	-	-	-	-	-
ค่าสูงสุด	1.38	0.547	0.395	0.408	0.14	0.08	0.408
ค่าต่ำสุด	0.15	0.006	0.007	0.006	0.005	0.003	0.014
ค่าเฉลี่ย	0.76	0.2646	0.2012	0.141	0.075	0.0384	0.1164

3.4 ค่าอ้างอิง (Reference Values)

การคำนวณค่าความเสี่ยงของสัตว์น้ำจะใช้สมการที่เสนอไว้ในบทที่ 2 โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกาได้แนะนำไว้ในเอกสารคู่มือ และวารสารปริทัศน์ที่เกี่ยวข้อง(U.S.EPA, 1992 and 1993; Thomann et al., 1992; Hope, 1995; Cheng, 1998) สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแม่น้ำหรือแหล่งน้ำนั้นสามารถที่จะได้รับสารเคมีปนเปื้อนโดยการดูดซึมผ่านเข้าไปสู่ร่างกายโดยตรง(direct absorption)

ดังนั้นการคำนวณความเข้มข้นของตะกั่วที่สัตว์และพืชน้ำดูดกลืนเข้าไปจึงขึ้นอยู่กับปริมาณ

ความเข้มข้นของตะกั่วในแหล่งน้ำ และค่าสัมประสิทธ์การดูดซับ (bio-concentration factor) เฉพาะตัวของตะกั่วกับสัตว์น้ำและพืชน้ำชนิดนั้นๆ

สมการการสัมผัส โดยตรง (direct contact) **คือ**

$$C_{aq} = EC_{sw} \times BCF$$

โดยที่ C_{aq} เป็นค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในร่างกายของพืชและสัตว์น้ำ(contaminant body burden in aquatic receptor) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่า EC_{sw} เป็นค่าความเข้มข้นสารปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะใช้สองค่าคือ ค่าสูงสุดคือ 0.55 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ยคือ 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับค่าสัมประสิทธ์การดูดซับ (contaminant specific bio-concentration factor, BCF) มีหน่วยเป็นลิตรของน้ำต่อกิโลกรัมของน้ำหนักพืชหรือสัตว์และหมายถึงอัตราส่วนของความเข้มข้นสารเคมีปนเปื้อนในอวัยวะของสัตว์น้ำหรือพืชน้ำต่อความเข้มข้นของสารเคมีปนเปื้อนในน้ำหรือในแหล่งน้ำนั้นที่สภาวะสมดุลย์ (equilibrium) ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างคือ สรีระของสัตว์ ค่าองค์ประกอบ ระหว่างน้ำ และสารละลาย และหาได้จากการทด ลองในห้องปฏิบัติการเช่นกัน

ในการวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับได้มาจาก Handbook of Chemical risk assessment: health hazards to humans, plants, and animals (Eister, 2000) ที่รวบรวมค่าสัมประสิทธ์การ ดูดซับและค่าอื่นๆของสัตว์แลสารเคมีไว้ โดยค่าที่เกี่ยวกับตะกั่วและสิ่งมีชีวิตในน้ำแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับของสิ่งมีชีวิตในลำน้ำ(ที่มา: Eister, 2000)

ตัวรับ	ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับ(L-น้ำ/kg-น้ำหนักสัตว์/พืช)
ปลา	0.73
สาหร่าย(green algae)	20.7
หอยทาก	1.7
ไรน้ำ(Daphinia maxna)	0.1
หอย	0.1
กุ้ง	0.1

บทที่ 4
ผลการดำเนินการ

4.1 ผลการศึกษากรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำน้ำบริเวณหมู่บ้านคลิตี้ล่าง

ผลจากการประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้โดยใช้ความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำห้วย คลิตี้สองความเข้มข้นคือค่าที่ตรวจพบสูงสุด และค่าเฉลี่ยของการตรวจพบคือค่า 0.55 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับในตารางที่ 4 สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของตะกั่วโดยตะกั่วถูกดูดดึงและถูกดูดซับเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3 คือ

ตารางที่ 3 ค่าการรับสารตะกั่วของสิ่งมีชีวิตในลำน้ำ(Exposure values)

ตัวรับ	ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับ(L/kg)	ค่าการรับสารตะกั่ว*, mg/kg	
		กรณีค่าความเข้มข้นสูงสุด 0.55 mg/L	กรณีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 0.23 mg/L
ปลา	0.73	0.40	0.17
สาหร่าย (green algae)	20.7	11.38	4.76
หอยทาก	1.7	0.94	0.39
ไรน้ำ(Daphnia maxna)	0.1	0.06	0.02
หอย	0.1	0.06	0.02
กุ้ง	0.1	0.06	0.02

*ค่าการรับสารตะกั่ว = ค่าสัมประสิทธ์การดูดซับ(L/kg) X ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำ (mg/L)

เช่นกรณี ปลา ที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ = 0.73 L/kg และในกรณีที่ค่าความเข้มข้น ของตะกั่วในลำน้ำที่ค่าสูงสุดคือ 0.55 mg/L ดังนั้นค่าการรับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายของปลา มีค่าประมาณ 0.40 mg/kg

พิจารณาจากผลการคำนวณค่าความเข้มข้นที่สิ่งมีวิตในลำน้ำห้วยคลิตี้ในกรณีที่การกระจาย ของตะกั่วที่ค่าสูงสุดคือ มีปริมาณตะกั่วในลำน้ำประมาณ 0.55 มิลลิกรัมตะกั่วต่อน้ำหนึ่งลิตรพบว่า ในกรณีของปลา จะดูดซับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายและสะสมอยู่ในลำตัวประมาณ 0.40 มิลลิกรัมตะกั่ว ต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมของปลา

ขณะที่สาหร่ายซึ่งเป็นตัวรับตั้งต้นหรือเริ่มแรกในห่วงโซ่อาหารของสัตว์น้ำจะดูดซับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้มากถึง 11.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หอยทากที่ถือว่าอยู่ในระบบนิเวศนั้น ด้วยมีโอกาสที่ จะรับเอาตะกั่วเข้าสู่ร่างกายประมาณ 0.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ ไรน้ำ หอย และกุ้ง มีโอกาสที่จะสะสมตะกั่วในร่างกายประมาณ 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ผลการคำนวณค่าความเข้มข้นที่สิ่งมีวิตในลำน้ำห้วยคลิตี้ในกรณีที่การกระจาย ของตะกั่วที่ค่าเฉลี่ยทั้งสองปีที่เก็บข้อมูลคือ มีปริมาณตะกั่วในลำน้ำประมาณ 0.23 มิลลิกรัมตะกั่วต่อน้ำ หนึ่งลิตร พบว่า ในกรณีของปลา จะดูดซับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายและสะสมอยู่ในลำตัวประมาณ 0.17 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัมของปลา

ขณะที่สาหร่ายซึ่งเป็นตัวรับตั้งต้นหรือเริ่มแรกในห่วงโซ่อาหารของสัตว์น้ำจะดูดซับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายประมาณ 4.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หอยทากที่มีโอกาสที่จะรับเอาตะกั่วเข้าสู่ร่างกายประมาณ 0.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ ไรน้ำ หอย และกุ้ง มีโอกาสที่จะสะสมตะกั่วในร่างกายประมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จากรายงานความเป็นอันตรายหรือความเป็นพิษจากการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำน้ำที่มีปริมาณตะกั่วที่ 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีผลร้ายแรงต่อการแพร่พันธ์ของไรน้ำ และค่าความเข้มข้นของตะกั่ว 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชสาหร่าย ยิ่งไปกว่านั้นถ้าตะกั่ว อยู่ในรูป Tetramethyl lead ที่ระดับ 0.0035 มิลลิกรัมต่อลิตรจะส่งผลกระทบต่อปลาเช่นลดการตก ไข่เพื่อการสืบพันธุ์

จะเห็นว่าสัตว์น้ำที่ลำน้ำห้วยคลิตี้มีความเสี่ยงต่อสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในลำน้ำสูงไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้นเฉลี่ยหรือระดับความเข้มข้นสูงสุด โดยมีโอกาสที่จะได้รับอันตรายไม่ว่าจะเป็นตัวรับโดยตรง หรือเป็นตัวผ่านไปสู่ตัวบริโภคอื่นๆในระดับสูงขึ้นไปในระบบห่วงโซอาหาร โดยที่ในการเปรียบเทียบว่าปริมาณสารที่สัตว์น้ำรับเข้าสู่ร่างกายนั้นมีค่ามากพอที่จะเป็นสาเหตุในการเกิดอันตรายต่ออวัยวะ ร่างกาย หรือพันธุกรรมของสัตว์น้ำหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง(benchmark)ที่นิยม

ใช้คือค่า No observed adverse effect level (NOAEL) และ/หรือค่า No observed adverse effect concentration (NOAEC) ทั้งนี้ค่า NOAEL และ NOAEC นี้เป็นค่ามากสุดของสารเคมีที่ไม่เป็น อันตรายต่อสัตว์หรือตัวรับที่ได้รับสารเคมีเข้าสู่ร่างกาย ค่านี้เป็นค่าเฉพาะสัตว์และสารเคมีนั้นๆ ในกรณีที่ค่า NOAEL ไม่มี สามารถใช้ค่า Lowest observed adverse effect level , LOAEL และ/หรือค่า Lowest observed adverse effect level, LOAEC ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่มีค่าน้อยสุดที่ ก่อให้เกิดอาการ หรืออันตรายต่อสัตว์ทดลองหรือพืชได้ (Oak Ridge National Laboratory, 1996,1997)

นอกจากนั้นสามารถใช้ค่า Lethal Dose, LD_{50}หรือ LC_{50} แทนค่า NOAEL ได้ทั้งนี้ ค่า NOAEL, LOAEL และค่า LD_{50} มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้

NOAEL หรือ NOAEC = LOAEL หรือ LOAEC / 10

LOAEL หรือ LOAEL = LD_{50} หรือ LC_{50}/ 15

บทที่ 5
วิจารณ์ผลการดำเนินการ

จากผลการประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้โดยใช้ความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้สองความเข้มข้นคือ ค่าที่ตรวจพบสูงสุดและค่าเฉลี่ยของการตรวจพบคือค่า 0.55 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาผลกระทบสุดท้าย(end point) ในกรณีที่ตัวรับเป็นปลาที่มีโอกาส เสี่ยงที่จะสะสมตะกั่วในร่างกายอยู่ที่ประมาณ 0.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในกรณีที่เป็นความเสี่ยงสูงสด และมีโอกาสที่สะสมปริมาณตะกั่วในร่างกายประมาณ 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หากเปรียบเทียบ ในแง่ของผู้บริโภคนั้น ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดปริมาณตะกั่วในปลาไว้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ประเทศเดนมาร์กได้กำหนดมาตรฐานไว้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเช่นกัน จะเห็นได้ว่าถ้าคนหรือสัตว์อื่นได้บริโภคปลาในพื้นที่ดังกล่าวโอกาสที่จะได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายและมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายจากตะกั่วผ่านทางอาหารได้

หากพิจารณาระดับความเข้มข้นของตะกั่วคือ 0.55 มิลลิกรัมตะกั่วต่อลิตรผลกระทบที่มีต่อปลาโดยตรง คือเท่ากับค่า Lethal Dose 50 หรือ LD_{50} คือ 0.51 มิลลิกรัมตะกั่วต่อน้ำหนึ่งลิตร (ข้อมูลของปลา Rainbow trout) ที่ทดลอง 96 ชั่วโมง และค่า LD_{50} ของปลาดุกคือ 19.5 มิลลิกรัมตะกั่วต่อน้ำหนึ่งลิตร ค่า LD_{50} บ่งบอกถึงผลกระทบที่สัตว์จนตายประมาณร้อยละ 50 ต่อสารเคมีที่ระดับความเข้มข้นหนึ่งๆ ค่า LD_{50} แตกต่างจากกันไปตามชนิดและสารเคมีแสดงให้ เห็นว่าความเสี่ยงของปลาที่มีต่อการกระจายของตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นที่ไม่ใช่ความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับชนิดและประเภทของปลาในลำน้ำนั้นๆว่ามีความไวหรือการตอบสนองกับสารเคมี สภาพทางเคมีและกายภาพของลำน้ำนั้น ดังนั้นจะต้องมี การศึกษา ในเชิงลึกต่อไปโดยเฉพาะการศึกษาค่า Maximum allowable tissue concentration (MATC) หรือค่าที่ยอมให้มีได้มากสุดในเนื้อเยื่อของปลา จะสามารถนำไปสู่ความรู้ความเข้าใจด้านพิษวิทยาของ สารเคมีต่อสัตว์หรือพืชนั้นๆได้

ในกรณีของสาหร่าย เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยงในกรณีที่ความเข้มข้นของตะกั่วในแหล่งน้ำอยู่ที่ 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีผลต่อการเคลื่อนไหว(immobilization effect) ที่ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัม จะส่งผลให้สาหร่ายลดการสังเคราะห์แสงลงร้อยละ 50 โดยที่ความเข้มข้น 0.21 มิลลิกรัม ต่อลิตรจะเริ่มมีอาการและประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงจะน้อยลง เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเฉลี่ยที่ตรวจพบในแหล่งน้ำ คือ 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าสาหร่ายมีโอกาสเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบอย่างสูงยิ่ง พิจารณาค่าความเข้มข้นสูงสุดคือที่ 0.55 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่า LD_{50} ของสาหร่ายต่อสารตะกั่วมี

ค่าประมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้ว สามารถกล่าวได้ว่าสาหร่ายเป็นตัวรับอีกประเภทหนึ่งในระบบนิเวศของลำน้ำห้วยคลิตี้ที่มีความเสี่ยงสูง ต่อการปนเปื้อนของตะกั่ว

หอยทาก(Snail) มีความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงเช่นเดียวกับสาหร่าย โดยที่การสัมผัสตะกั่วที่ความเข้มข้น 0.036 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้หอยทากมีน้ำหนักตัวลดลงร้อยละ 50 และที่ ความเข้มข้น 0.048 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้น้ำหนักตัวลดลงร้อยละ 100 และที่ความเข้มข้นที่ 0.019 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเริ่มมีอาการตอบสนองต่อความเป็นพิษของตะกั่ว

จากผลการศึกษาพบว่าหอยทากจะสะสมตะกั่วไว้ในร่างกายระดับเฉลี่ย 0.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสะสมไว้สูงสุดประมาณ 0.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก และมีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดปริมาณตะกั่วเข้าไปในห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ

กุ้ง หอย และไรน้ำ เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่พิจารณาในกรณีศึกษาครั้งนี้ ผลการศึกษาพบว่า ในส่วนของไรน้ำ(Daphnia magna) นั้น จากรายงานการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า ถ้าไรน้ำสัมผัสกับตะกั่วในน้ำในปริมาณ 0.030 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 21 วัน ระบบสืบพันธุ์ ของไรน้ำจะถูกทำลายไปร้อยละ 15 และค่า LD_{50} ของไรน้ำมีค่าประมาณ 6.3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าเฉลี่ยของตะกั่วในลำน้ำก็มากพอที่จะส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธ์ของไรน้ำแล้ว

นอกจากนั้นการสะสมปริมาณตะกั่วในไรน้ำจากการศึกษาจะอยู่ในช่วง 0.02-0.06 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ไรน้ำเป็นตัวผ่านหรืออาหารขั้นต้นในห่วงโซ่อาหาร และถูกบริโภคโดยสัตว์น้ำ อีกทอดหนึ่ง ดังนั้นไรน้ำจึงมีความเสี่ยงต่อการกระจายของตะกั่วในลำน้ำและต้องมีการศึกษา วิจัยถึงผล กระทบอื่นๆ อีกต่อไป

จากผลกรณีศึกษา กุ้งมีโอกาสที่จะสะสมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในช่วง 0.02-0.06 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับหอย ค่า LD_{50} ของกุ้ง มีค่า 0.020 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ณ สถานการณ์ปัจจุบันกุ้งอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่ออันตรายเนื่องจากการกระจายของตะกั่ว เพราะมีรายงานว่า ปริมาณตะกั่ว ที่อยู่ในรูปTetraethyl lead ในน้ำ เพียง 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตรก็สามารถฆ่ากุ้งตายได้ ดังนั้นการศึกษาดูว่าตะกั่วในแหล่งน้ำอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีรูปใดน่าจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศได้ดียิ่งขึ้น เพราะความเป็นพิษขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารปนเปื้อนนั้นๆ อย่างไรก็ตาม กุ้งก็เป็นตัวกลางที่จะส่งผ่านตะกั่วไปสู่สัตว์หรือตัวรับอื่นๆได้ โดยเฉพาะคนที่เป็นตัวรับสุดท้าย

สำหรับหอย ค่า LD_{50} ประมาณ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้แล้วจะพบว่าปริมาณตะกั่วมีค่ามากพอที่จะส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของหอยเนื่องจากมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่า LD_{50} ซึ่งเป็นค่าที่หอยไม่มีชีวิตร้อยละ 50 เช่นเดียวกับกุ้ง หอยเป็นตัวกลางที่จะส่งผ่านตะกั่วไปสู่สัตว์หรือผู้บริโภคอื่นๆ ดังนั้นการดำเนินกิจกรรมในการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมจะต้องครอบคลุมและคำนึงถึงการผ่านสารพิษหรือสารปนเปื้อนทางระบบนิเวศอีกทางด้วย

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

การศึกษาวิจัย การประเมินความเสี่ยงต่อระบบนิเวศ กรณีศึกษา การประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ได้นำเสนอแนวทางการดำเนินการ ขั้นตอน และแหล่งที่มาหรือตัวแปรของการประเมินความเสี่ยงที่ต้องคำนึงถึงในการดำเนินการ เพื่อให้ความรู้ความเข้าใจทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการการนำไปใช้ ทั้งนี้การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยง ทำให้ประหยัดเวลาในการดำเนินการประเมินเนื่องจาก ไม่ต้องใช้เวลาในการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างการปนเปื้อนสารเคมีในตัวรับในระบบนิเวศ ทั้งนี้ผลการประเมินสามารถนำไปประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อมต่อไป ทั้งนี้การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะต้องมีการศึกษา และมีการทวนสอบ และการทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การการวิเคราะห์ความไว ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะช่วยให้ทราบถึงบทบาทของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าการประเมินความเสี่ยง ทั้งนี้การทวนสอบผลการประเมินเป็นขั้นตอนที่จะยืนยันระดับความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว

สำหรับผลกรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงของสัตว์น้ำในลำน้ำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี นั้นพบว่าปลามีโอกาสเสี่ยงที่จะสะสมตะกั่วในร่างกายอยู่ที่ประมาณ 0.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในกรณีของสาหร่าย เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยงต่อการเคลื่อนไหว(immobilization effect) และจะทำให้สาหร่ายลดการสังเคราะห์แสงลงร้อยละ 50 ที่เป็นความเสี่ยงสูงสด หอยทาก(Snail) มีความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงเช่นเดียวกับสาหร่าย โดยที่การสัมผัสตะกั่วที่ความ เข้มข้น 0.036 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้หอยทากมีน้ำหนักตัวลดลงร้อยละ 50 อนึ่งไรน้ำสัมผัสกับตะกั่วในน้ำในปริมาณ 0.030 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 21 วัน ระบบสืบพันธุ์ ของไรน้ำจะถูกทำลายไปร้อยละ 15 กุ้งอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่ออันตรายเนื่องจากการกระจายของตะกั่ว เช่นกันเพราะมีรายงานว่า ปริมาณตะกั่ว ที่อยู่ในรูปTetraethyl lead ในน้ำ เพียง 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตรก็สามารถฆ่ากุ้งตายได้ เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของตะกั่วในลำน้ำห้วยคลิตี้แล้วจะพบว่าปริมาณตะกั่วมีค่ามากพอที่จะส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในลำน้ำทุกชนิด ทั้งนี้จะต้องการศึกษาในท้องที่ต่อไป เพื่อที่จะทราบผลกระทบที่แท้จริง และมีข้อเสนอแนะในการดำเนินการดังจะกล่าวต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากกรณีศึกษาผลการวิจัยและจากทบทวนงานวิจัยอื่นในวารสารปริทัศน์พบว่างานวิจัย เรื่องนี้สามารถที่จะต่อยอดเพื่อนำไปสู่การศึกษา วิจัย ในแนวกว้าง และแนวลึก ทำให้สามารถนำ ไปใช้ให้เป็นประโยชน์โดยเฉพาะเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการจัดการสิ่งแวดล้อมและเพื่อพัฒนาคุณภาพ ชีวิตของคนไทยต่อไป โดยมีสาขาที่น่าส่งเสริม สนับสนุนให้มีการทำงานวิจัยมีดังนี้

1. ควรมีการทำฐานข้อมูลด้านระบบนิเวศที่รวบรวมข้อมูลของพืช สัตว์ ทั้งบนบก และในน้ำ น้ำจืด น้ำเค็ม และมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของสารเคมีทั้งประเภทสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ค่า NOAEL, LOAEL, LD_{50}, BCF ของแต่ละตัวรับและเฉพาะสารเคมีนั้น
2. สามารถต่อยอดงานวิจัยนี้ไปสู่การประเมินความเสี่ยงต่อสัตว์บก พืชบก โดยต้องมีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ดินตะกอน และคุณภาพอากาศ เพื่อหาปริมาณการปนเปื้อน ของงาตะกั่วในบริเวณที่ศึกษา
3. สามารถต่อยอดงานวิจัยนี้ไปสู่การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชน(human health risk assessment) ทั้งนี้ต้องศึกษาลักษณะการดำรงชีวิตของประชากรกลุ่มที่ศึกษา และข้อมูลทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับสารมลพิษและการตอบสนองของร่างกายทั้งในระยะสั้น(acute effects) และระยะยาว (chronic effects)
4. การทดสอบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้โดยเทียบผลกับข้อมูลที่เก็บจากพื้นที่ศึกษาจริง โดยการเก็บและวิเคราะห์พืช สัตว์ ในพื้นที่ศึกษา และยืนยันผลและแก้ไขสมการคณิต ศาสตร์ในกรณีที่ผลการทำนายและผลการสำรวจมีค่าที่แตกต่างกันมาก
5. สามารถต่อยอดสมการคณิตศาสตร์เป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ง่ายต่อการใช้งาน โดยสามารถพัฒนาไปสู่การจดสิทธิบัตรและเป็นนวตกรรมใหม่ด้านการจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อมได้
6. ทำการศึกษา วิจัย ด้านทางผ่าน(transport) การเคลื่อนตัว และชนิดหรือ ประเภทของสารปนเปื้อนในตัวกลาง (chemical speciation) เพื่อจะได้มีความเข้าใจในการเปลี่ยนสถานะของสารเคมีปนเปื้อนในตัวกลางไม่ว่าจะเป็น ดิน ดินตะกอน น้ำ หรือ อากาศ และความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารเคมีและความเป็นพิษได้ถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา, ผลการตรวจตะกั่วในแหล่งน้ำ [ออนไลน์] สามารถเข้าถึงได้ http://www.karencenter.com/kitty-deadly-river1.htm, วันที่เข้าถึง 1 มิถุนายน 2547

Bechtel Jacobs Company, Radiological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on aquatic Biota at Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee: Bechtel Jacobs Company, 1998.

Briggs, G.G. et al. Relationships between lipophilicity and the distribution of non-ionized chemicals in barley shoots following uptake by the roots. **Pesticide Science**,1983, vol 14, p492-500.

Calabrese, E.J.and Baldwin, L.A. Performing ecological risk assessments. Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, 1993.

Cheng, J.J., RESRAD-ECORISK: A Computer code for ecological risk assessment beta version 1.01. Argonne National Laboratory Environmental Assessment Division, Control Argonne, IL, No. 1452, 1998.

Duning, J.B., CRC handbook of avian body masses. CRC Press, Boca Raton, Florida,1993.

Eisler, R., Handbook of chemical risk assessment: health hazards to humans, plants, and animals, volume 1: metals, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 2000.

Graedel, T.E. and Allenby, B.R., Industrial ecology. Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Hope, B.K., A review of models for estimating terrestrial ecological receptor exposure to chemical contaminants. **Chemosphere**, December, 1995, vol 30, p 2267-2287.

Maughan, J.T., Ecological assessment of hazardous waste sites, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.

McKone, T.E., The precision of QSAR methods for estimating intermedia transfer factors in exposure assessments. **SAR and QSAR in Environ. Res.**, 1993, vol.1, p. 41-45.

Nagy, K.A., Field metabolic rate and food requirement scaling in mammals and birds. **Ecological Monographs.** 1987,vol 57, p111-128.

Oak Ridge National Laboratory, Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on aquatic biota. Oak Ridge, Tennessee, 1996.

Oak Ridge National Laboratory, Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on terrestrial plants. Oak Ridge, Tennessee, 1997

Riederer, M., Estimating partitioning and transport of organic chemicals in the foliage/atmosphere system: decision of fugacity-based model. **Environ. Sci. Technol.** 1990. vol 24, p 829-837.

Silva, M., and Downing, J.A., CRC handbook of mammalian body masses. CRC Press, Boca Raton, Florida,1995.

Thomann, R.V., Connolly, J.P. and Parkerton, T.F., An equilibrium model of organic chemical accumulation in aquatic food webs with sediment interaction. **Environmental Toxicology and Chemistry,** 1992, vol. 11, p.615-629.

U.S.Environmental Protection Agency, Risk assessment guidance for superfund, volume I, human health evaluation manual, Part B, development of risk-based preliminary remediation goals. Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC, United States Environmental Protection Agency,1991.

U.S. Environmental Protection Agency, Framework for ecological risk assessment. Washington DC, United States Environmental Protection Agency,1992.

U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for ecological assessment. Office of Research and Development, Washington DC, United States Environmental Protection Agency,1998.

U.S. Environmental Protection Agency, A review of ecological assessment case studies from a risk assessment perspective, volume II. Office of Research and Development, Washington DC, United States Environmental Protection Agency,1994.

U.S. Environmental Protection Agency, Wildlife exposure factors handbook, vol. I and II. Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC, United States Environmental Protection Agency,1994.

ภาคผนวก ก

Solubility Estimation Equations

Regression Equation for the Estimation of S (Lyman *et al*, 1990)

Eq No	Equation[a]	Units of S	No.[b]	r^{2c}	Chemical Classes Represented
1	$\log S = -1.37\log K_{ow} + 7.26$	μmol/L	41	0.903	Mixed classes; aromatics and chlorinated hydrocarbons well represented
2	$\log S = -0.922\log K_{ow} + 4.184$	mg/L	90	0.740	Mixed classes; pesticides well represented
3	$\log S = -1.49\log K_{ow} + 7.46$	μmol/L	34	0.970	Mixed classes; several pesticides
4	$\log 1/S = 1.113\log K_{ow} - 0.926$	mol/L[d]	41	0.935	Alcohols[e]
5	$\log 1/S = 1.229\log K_{ow} - 0.720$	mol/L[d]	13	0.960	Ketones[e]
6	$\log 1/S = 1.013\log K_{ow} - 0.520$	mol/L[d]	18	0.980	Esters[e]
7	$\log 1/S = 1.182\log K_{ow} - 0.935$	mol/L[d]	12	0.880	Ethers[e]
8	$\log 1/S = 1.221\log K_{ow} - 0.832$	mol/L[d]	20	0.861	Alkyl halides[e]
9	$\log 1/S = 1.294\log K_{ow} - 1.043$	mol/L[d]	7	0.908	Alkynes[e]
10	$\log 1/S = 1.294\log K_{ow} - 0.248$	mol/L[d]	12	0.970	Alkenes[e]
11	$\log 1/S = 0.996\log K_{ow} - 0.339$	mol/L[d]	16	0.951	Aromatics[e](benzene and benzene derivatives)
12	$\log 1/S = 1.237\log K_{ow} + 0.248$	mol/L[d]	16	0.908	Alkanes[e]
13	$\log 1/S = 1.214\log K_{ow} - 0.850$	mol/L[d]	140	0.912	All chemical represented by Eqs. 4-12 plus propionitrile[e]
14	$\log 1/S = 1.339\log K_{ow} - 0.978$	mol/L[d]	156	0.874	All chemicals represented by Eqs.4-12 plus propionitrile[e]
15	$\log S = -2.38\log K_{ow} + 12.90$	μmol/L	11	0.656	Phosphate esters
16[f]	$\log S = -0.9874\log K_{ow} - 0.0095t_m + 0.77178$	mol/L	35	0.990	Halobenzenes
17[f]	$\log S = -0.88\log K_{ow} - 0.01t_m - 0.012$	mol/L	32	0.979	Rigid aromatic hydrocarbons (polynuclear aromatics)
18	$\log S = -0.962\log K_{ow} + 6.50$	μmol/L	9	0.878	Halogenated 1- and 2-carbon hydrocarbon (8 with Cl, 1 with Br)

a. S = aqueous solubility; K_{ow} = octanol/water partition coefficient; t_m = melting point (^{0}C), $t_m \geq 25^0$C; N = number of carbon atoms in molecule.

b. No. = number of compounds in data set used to obtain equation.

c. r^2 = square of correlation coefficient

d. Actually, moles/ 1000 g of water (i.e., molar solubility). For most chemicals this is very close to the molar solubility (moles/liter of solution), and no correction need be applied.

e. All chemicals used were liquids. Values of K_{ow} for many of these chemicals were estimated.

f. If t_m is less than 25^{0}C, a value of 25^{0}C should be used for t_m in Eqs.16-17

ภาคผนวก ข

รหัสคอมพิวเตอร์(Computer Codes)

การคำนวณจะใช้การรหัสคอมพิวเตอร์คือ Microsoft visual basic โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ให้ไว้ในบทที่ 2 รหัสที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้ คือ

ADDingestion = ADDtplant(Concentration, Animal, Chemical, SiteName) + _ (1)

ADDwi(Concentration, Animal, SiteName) + _

ADDsi Concentration, Animal, SiteName)

ADDtplant(Concentration, Animal, Chemical, SiteName) (2)

$= (C_k\ FR_{fk} \times IR_f/BW) \times \theta \times \psi$

CkFRfk =Ftplant(database,Tanimalfood) *Ftplant(Concentration, chemical) (3)

Ftplant(Concentration, chemical) = Ecs(concentration)*((Bv +Br, database,

Contaminantproperty)) (4)

รหัสการคำนวณความไว

รหัสคำสั่ง (computer code) ในการวิเคราะห์ความไว

โดยใช้รหัส Microsoft visual basic(VBA) ร่วมกับ Microsoft excel

```
Public Sub Sensi1()
   'Columns("AA:FZ").Select
   'Selection.EntireColumn.Hidden = True
'ADDdermal
   Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$E$11:$E$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AA1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AA1") = "ADDdermal"
   'addinhalation
   Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$F$11:$F$1010"), _
```

```
    Worksheets("Sensitivity").Range("AC1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AC1") = "ADDinhalation"
  'add ingestion


   Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$G$11:$G$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AE1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AE1") = "ADDingestion" '3
 'ECs
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$H$11:$H$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AG1"), , False, True, , , 95
   Worksheets("Sensitivity").Range("AG1") = "ECs" '4
 'ECdw
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$I$11:$I$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AI1"), , False, True, , , 95
     Worksheets("Sensitivity").Range("AI1") = "ECdw" '5
 'ECvap
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$J$11:$J$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AK1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AK1") = "ECvap" '6
 'ECpar
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$K$11:$K$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AM1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AM1") = "ECpar" '7
  'IRf
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$L$11:$L$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AO1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AO1") = "IRf" '8
   'IRi
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$M$11:$M$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AQ1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AQ1") = "IRi" '9
  'IRw
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$N$11:$N$1010"), _
    Worksheets("Sensitivity").Range("AS1"), , False, True, , , 95
    Worksheets("Sensitivity").Range("AS1") = "IRw" '10
 'Bw
```

```
   Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$O$11:$O$1010"), _
     Worksheets("Sensitivity").Range("AU1"), , False, True, , , 95

     Worksheets("Sensitivity").Range("AU1") = "Bw" '11
     'Worksheets("Sensitivity").Columns("FJ:FK").AutoFit
'SA
   Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Descr",
Worksheets("Result").Range("$P$11:$P$1010"), _
     Worksheets("Sensitivity").Range("AW1"), , False, True, , , 95

     Worksheets("Sensitivity").Range("AW1") = "SA" '12
     'Worksheets("Sensitivity").Columns("FE:FF").AutoFit

     'Worksheets("Sensitivity").Range("FH1") = "Summary ECs"
     'Worksheets("Sensitivity").Columns("FH:FI").AutoFit
'End Sub 'temp separation
If Worksheets("Result").Range("$h$11") > 0 Then 'dermal sens1


  Range("AH122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)+(Sensitivity!R4C50/Sensitivity!R3C50))"  'ecs
   Range("AI122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)+(Sensitivity!R4C50/Sensitivity!R3C50))" 'bw
   Range("AJ122").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C50/Sensitivity!R3C50)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)+(Sensitivity!R4C50/Sensitivity!R3C50))" 'sa



   Worksheets("Sensitivity").Range("A35") = "Parameters"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A37") = "ECs"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A39") = "SA"
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("A24") = "IRi"
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("A8") = "IRdw"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A38") = "BW"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A40") = "Q"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A41") = "W"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A42") = "Pcs"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A43") = "AF"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("A14") = "Bench"
```

```
    Worksheets("Sensitivity").Range("B33") = "Pathway:Dermal absorption"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B35") = "Definition"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C35") = "Sensitivity(contribution to variance,%)"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C36") = Worksheets("Result").Range("$B$9")
'receptor1 name

    Worksheets("Sensitivity").Range("B37") = "Contaminant concentration in
soil/sediment"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B39") = "Suface area"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("B24") = "Inhalation  rate"
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("B8") = "Water ingestion rate"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B38") = "Body weight"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B40") = "Site use factor"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B41") = "Seasonality factor"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B42") = "Fraction of surface area in contact with
soil per day"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B43") = "Soil to skin adherence factor"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("B14") = "Bench"


    Worksheets("Sensitivity").Range("C37") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AH$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C38") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AI$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C39") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AJ$122")
    'Worksheets("Sensitivity").Range("C25") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AO$122")
    'Worksheets("Sensitivity").Range("C") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AU$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C40") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C41") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$U$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C42") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$V$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C43") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")

    Worksheets("Sensitivity").Columns("A:E").AutoFit

  End If 'Sub
If Worksheets("Result").Range("$k$11") > 0 Then


 If Worksheets("Result").Range("$J$11") <= 0 Then
```

```
 Range("AL122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))"
'epar
   Range("AM122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = 0
'"=((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)+(Se
nsitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'evap
   Range("AN122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'iri
   Range("AO122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'bw
   Else

Range("AL122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C38/Sensitivity!R3C38)+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'epar
   Range("AM122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C38/Sensitivity!R3C38)/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)+(Sen
sitivity!R4C38/Sensitivity!R3C38)+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensitivity!
R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'evap
   Range("AN122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C38/Sensitivity!R3C38)+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'iri
   Range("AO122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)*100/((Sensitivity!R4C40/Sensitivity!R3C40)
+(Sensitivity!R4C38/Sensitivity!R3C38)+(Sensitivity!R4C44/Sensitivity!R3C44)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)))" 'bw

   End If

   Worksheets("Sensitivity").Range("A20") = "Parameters"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A22") = "ECpar"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A23") = "ECvap"
```

```
    Worksheets("Sensitivity").Range("A24") = "IRi"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("A") = "IRdw"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A25") = "BW"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A26") = "Q"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A27") = "W"
   " Worksheets("Sensitivity").Range("A28") = "Ke"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("A13") = "FR"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("A14") = "Bench"

    Worksheets("Sensitivity").Range("B18") = "Pathway:Inhalation"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B20") = "Definition"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C20") = "Sensitivity(contribution to variance,%)"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C21") = Worksheets("Result").Range("$B$9")
'receptor1 name

    Worksheets("Sensitivity").Range("B22") = "Concentration of pariculated-bound
contaminant in air"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B23") = "Concentration of volatilized contaminant
in air"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B24") = "Inhalation  rate"
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("B8") = "Water ingestion rate"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B25") = "Body weight"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B26") = "Site use factor"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B27") = "Seasonality factor"
    "Worksheets("Sensitivity").Range("B28") = "Contaminant specific depuration rate"
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("B13") = "Wet weight fraction of food item in the
diet"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("B14") = "Bench"


    Worksheets("Sensitivity").Range("C22") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AL$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C23") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AM$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C24") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AN$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C25") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AO$122")
    'Worksheets("Sensitivity").Range("C") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AU$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C26") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C27") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$U$122")
    "Worksheets("Sensitivity").Range("C28") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$V$122")
```

```
   ' Worksheets("Sensitivity").Range("C13") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")

    Worksheets("Sensitivity").Columns("A:E").AutoFit

  End If 'Sub
If Worksheets("Result").Range("$O$11") > 0 Then
'Public Sub random3() 'Sensitivity for ingestion1

 If Worksheets("Result").Range("$N$11") <= 0 Then
   Range("AQ122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AR122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AS122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AT122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = 0
'"=((Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34
)+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sens
itivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AU122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensi
tivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"

  Else
  Range("AQ122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)+(Sensi
tivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AR122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
```

```
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)+(Sensi
tivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AS122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)+(Sensi
tivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AT122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)+(Sensi
tivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   Range("AU122").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=((Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48)*100)/((Sensitivity!R4C34/Sensitivity!R3C34)
+(Sensitivity!R4C36/Sensitivity!R3C36)+(Sensitivity!R4C46/Sensitivity!R3C46)+(Sensi
tivity!R4C42/Sensitivity!R3C42)+(Sensitivity!R4C48/Sensitivity!R3C48))"
   End If

   Worksheets("Sensitivity").Range("A3") = "Parameters"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A5") = "ECs"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A6") = "ECdw"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A7") = "IRf"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A8") = "IRdw"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A9") = "BW"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A10") = "Q"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A11") = "W"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A12") = "FS"
    Worksheets("Sensitivity").Range("A13") = "FR"

    Worksheets("Sensitivity").Range("B2") = "Pathway:Ingestion"

    Worksheets("Sensitivity").Range("B3") = "Definition"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C3") = "Sensitivity(contribution to variance,%)"
    Worksheets("Sensitivity").Range("C4") = Worksheets("Result").Range("$B$9")
'receptor1 name

    Worksheets("Sensitivity").Range("B5") = "Contaminant concentration in
soil/sediment"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B6") = "Contaminant concentrarion in drinking
water supply"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B7") = "Food ingestion rate"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B8") = "Water ingestion rate"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B9") = "Body weight"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B10") = "Site use factor"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B11") = "Seasonality factor"
```

```
    Worksheets("Sensitivity").Range("B12") = "Mass fraction of soil/sediment in the diet"
    Worksheets("Sensitivity").Range("B13") = "Wet weight fraction of food item in the
diet"
   " Worksheets("Sensitivity").Range("B14") = "Contaminant specific depuration rate"
    'Worksheets("Sensitivity").Range("B14") = "Bench"


    Worksheets("Sensitivity").Range("C5") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AQ$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C6") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AR$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C7") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AS$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C8") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AT$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C9") =
Worksheets("Sensitivity").Range("$AU$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C10") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C11") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$U$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C12") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$V$122")
    Worksheets("Sensitivity").Range("C13") = "0"
'Worksheets("Sensitivity").Range("$W$122")
   " Worksheets("Sensitivity").Range("C14") = "0"
    Worksheets("Sensitivity").Columns("A:E").AutoFit
    'Range("A1").Select 'back to a1
End If
   Worksheets("Sensitivity").Columns("AA:FZ").Select
   Selection.EntireColumn.Hidden = True
   Worksheets("Sensitivity").Select
   Worksheets("Sensitivity").Range("A1:A2").Show
   'Range("A1").Select 'back to a1
   End Sub
```