

ผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมในลูกปลานิล

(*Oreochromis niloticus* Linnaeus)



นางสาวพัชรภรณ์ อธิธิโรจนกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4108-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF TEMPERATURE TO ACUTE TOXICITY OF CADMIUM, ZINC AND THEIR MIXTURE ON
JUVENILE OF NILE TILAPIA, *Oreochromis niloticus* Linnaeus



Miss Patcharaporn Itthirojjanakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-Departmental)

Graduate School Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4108-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และสารละลาย
ผสมร่วมในลูกปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus)
โดย นางสาวพัชรภรณ์ อธิธิโรจนกุล
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรธิตวารกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรธิตวารกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญ นิติธรรมขง)

พัชรภรณ์ อธิธิโรจนกุล : ผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมในลูกปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) (EFFECT OF TEMPERATURE TO ACUTE TOXICITY OF CADMIUM, ZINC AND THEIR MIXTURE ON JUVENILE OF NILE TILAPIA , *Oreochromis niloticus* Linnaeus) อ.ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรธิดาวรกุล, 113 หน้า. ISBN 947-17-4108-1.

ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมในลูกปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) ด้วยวิธีชีววิเคราะห์แบบน้ำนิ่งในห้องปฏิบัติการ โดยการทดลองส่วนแรกเป็นการทดลองกับแคดเมียมและสังกะสีที่อยู่ในสารละลายเพียงชนิดเดียว ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ข้อมูลความเป็นพิษในรูปมัธยฐานของระดับความเข้มข้น (LC_{50}) ในเวลา 96 ชั่วโมง ที่ความเชื่อมน้ำร้อยละ 95 พบว่า ค่า $96-h LC_{50}$ (ค่าเฉลี่ยและพิสัย) ของแคดเมียมและสังกะสีมีค่าเท่ากับ 13.08 (9.94 - 16.26) mg Cd/l และ 40.49 (37.99 - 43.07) mg Zn/l ตามลำดับ ส่วนการทดลองขั้นต่อมาเป็นการทดลองกับสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสี ที่อุณหภูมิ 24, 28 และ 32 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์ข้อมูลความเป็นพิษแบบ Response Surface Analysis สามารถหาความสัมพันธ์ของความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ได้ดังสมการ $M_{96-24c} = 31.621804 - 0.153524 Cd - 2.154992 Zn + 0.030476 Cd^2 + 0.0488 CdZn + 0.058103 Zn^2$, $M_{96-28c} = 20.561982 - 0.453714 Cd + 0.581789 Zn + 0.034286 Cd^2 + 0.034933 CdZn + 0.0111 Zn^2$ และ $M_{96-32c} = 53.988788 + 0.524571 Cd - 0.082992 Zn + 0.001905 Cd^2 + 0.0048 CdZn + 0.017214 Zn^2$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะความเป็นพิษร่วมกันของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสี ที่ทุกอัตราส่วนทั้ง 3 อุณหภูมิ เป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน และเมื่อลูกปลานิลวัยอ่อนได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีเป็นระยะเวลานานมากขึ้น อัตราการตายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลทำให้ระดับความเป็นพิษของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลวัยอ่อนเพิ่มขึ้น และความเป็นพิษของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในสารละลายผสม จากการคำนวณโดยใช้ค่า safety factor หรือ uncertainty factor สามารถประเมินระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ ที่ระดับอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ในสภาพสารละลายเดี่ยวเป็น 0.13 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในสภาพสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ นั้น ไม่สามารถหาความเข้มข้นที่แน่นอนได้ เนื่องจาก $96-h LC_{50}$ ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคดเมียมและสังกะสี ที่อยู่ในสารละลายผสม

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สุขภาพ..... ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา ..2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4389083220 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : TOXICITY / CADMIUM / ZINC / *Oreochromis niloticus* L. / TEMPERATURE
 PATCHARAPORN ITTHIROTJANAKUL : EFFECT OF TEMPERATURE TO
 ACUTE TOXICITY OF CADMIUM, ZINC AND THEIR MIXTURE ON JUVENILE
 OF NILE TILAPIA, *Oreochromis niloticus* Linnaeus. THESIS ADVISOR : ASSOC.
 PROF. SOMKIAT PIYATIRATITIVORAKUL, Ph.D. 113 pp. ISBN 974-17-4108-1.

Static bioassay tests were conducted to determine effect of temperature to acute toxicity of cadmium, zinc and their mixture on juvenile Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* Linnaeus. Firstly, acute toxicity of individual cadmium and zinc at 28^oc was tested to determine median lethal concentrations (LC₅₀) with 95% confidence limit at 96 hours. The results showed that 96-h LC₅₀ (mean and range) of cadmium and zinc were 13.08 (9.94 - 16.26) mg Cd/l and 40.49 (37.99 - 43.07) mg Zn/l, respectively. Secondly, experiment was established to determine toxicity of cadmium and zinc combinations on juvenile Nile Tilapia at temperature 24, 28 and 32^oc. Mixtures of cadmium and zinc at concentration near 96-h LC₅₀ of each metal were used to define mortality of the fish at 96 hours. The mortality data of treatment combinations were analyzed using Response Surface Analysis. Toxicity results of cadmium and zinc for 96 hours for 24, 28 and 32^oc were express as $M_{96-24c} = 31.621804 - 0.153524 \text{ Cd} - 2.154992 \text{ Zn} + 0.030476 \text{ Cd}^2 + 0.0488 \text{ CdZn} + 0.058103 \text{ Zn}^2$, $M_{96-28c} = 20.561982 - 0.453714 \text{ Cd} + 0.581789 \text{ Zn} + 0.034286 \text{ Cd}^2 + 0.034933 \text{ CdZn} + 0.0111 \text{ Zn}^2$ and $M_{96-32c} = 53.988788 + 0.524571 \text{ Cd} - 0.082992 \text{ Zn} + 0.001905 \text{ Cd}^2 + 0.0048 \text{ CdZn} + 0.017214 \text{ Zn}^2$, respectively. The combined effect of the mixture of cadmium and zinc in every ratio exhibited synergism. The mortality of fish that exposed the mixtures of cadmium and zinc increased with increase of temperature. This result possibly concluded that temperature increased the toxicity of the combined effect of cadmium and zinc on juvenile of Nile Tilapia. In addition, no observed adverse effect levels (NOAEL) based on safety factors or uncertainty factors were calculated. The concentration of individual cadmium and zinc which no observed adverse effect on juvenile of Nile Tilapia at 28^oc were 0.13 mgCd/l and 0.4 mgZn/l, respectively. The NOAEL of the combined effect of cadmium and zinc at various temperatures was not calculated.

Field of study... Environmental Science ... Student's signature.....

Academic year... 2003 Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย จึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่านดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรชิตวิกรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยตานนท์, รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญ นิตธีรรมยง ที่ได้สละเวลาอันมีค่า มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักวิจัย ผู้ช่วยนักวิจัย เจ้าหน้าที่ และนิสิตปริญญาโทที่ทำงานวิจัยในหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณปิยะชาติ เกษตรพันธ์ุ์ ฟาร์มธรรมชาติ ในเครือบริษัทกรุงเทพฟาร์ม เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ที่ให้การสนับสนุนลูกปลานิลมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้การสนับสนุน คอยช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1. แคลเมียม.....	4
2.2 สังกะสี.....	9
2.3 การแพร่กระจายของแคลเมียมและสังกะสีในแหล่งน้ำ.....	18
2.4 แคลเมียมและสังกะสีในสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ.....	20
2.5 ปฏิสัมพันธ์ของแคลเมียม และสังกะสี.....	23
2.6 ความเป็นพิษของแคลเมียมและสังกะสีต่อปลา.....	26
2.7 ชีวิตวิทยาบางประการของปลานิล.....	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1. ขั้นตอนเตรียมการทดลอง.....	43
3.2. วิธีการทดลอง.....	45
3.3. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	46
3.4. การวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 พิษเฉียบพลันของแคลเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล.....	48
4.2 พิษเฉียบพลันของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคลเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิล.....	49
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคลเมียมและสังกะสี.....	54
4.4 ผลของความเป็นพิษของแคลเมียมและสังกะสีต่อพฤติกรรมของลูกปลานิล.....	55
4.5 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	66

4.6 ระดับที่ปลอดภัยของแคดเมียมและสังกะสี.....	67
บทที่ 5 วิจัยผลกระทบทดลอง	
5.1 ความเป็นพิษของแคดเมียมในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล.....	69
5.2 ความเป็นพิษของสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล.....	70
5.3 ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมต่อลูกปลานิล.....	72
5.4 ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมต่อลูกปลานิล ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ	73
5.5 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระหว่างการทดลอง.....	74
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียมและสารประกอบ.....5
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะสังกะสีและสารประกอบสังกะสี_11
ตารางที่ 2.3	ปริมาณการผลิตและการบริโภคสังกะสีภายในปี ค.ศ. 1994 (thousand tonnes) 13
ตารางที่ 2.4	การใช้ประโยชน์จากสารประกอบสังกะสี..... 14
ตารางที่ 2.5	ไอโซมต่าง ๆ ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ..... 24
ตารางที่ 2.6	พิษเฉียบพลันของแคดเมียมต่อปลาชนิดต่างๆ..... 27
ตารางที่ 2.7	ความเป็นพิษเฉียบพลัน (96-h LC ₅₀) ของสังกะสีในปลาชนิดต่างๆ..... 31
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองพิษเฉียบพลันของแคดเมียมต่อลูกปลานิล..... 48
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองพิษเฉียบพลันของสังกะสีต่อลูกปลานิล..... 49
ตารางที่ 4.3	การผสมสารละลายแคดเมียมและสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ค่าเป็นแคดเมียม : สังกะสี (mg Cd/mg Zn))..... 50
ตารางที่ 4.4	คุณภาพน้ำที่ใช้ในระหว่างทำการทดลอง..... 66

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 4.1	อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.2	อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส.....	57
รูปที่ 4.3	อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ 4.4	ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส.....	59
รูปที่ 4.5	ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส.....	60
รูปที่ 4.6	ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส.....	61
รูปที่ 4.7	อัตราการตายของลูกปลานิลวัยอ่อนเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 24 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	62
รูปที่ 4.8	อัตราการตายของลูกปลานิลวัยอ่อนเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 48 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	63
รูปที่ 4.9	อัตราการตายของลูกปลานิลวัยอ่อนเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 72 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	64
รูปที่ 4.10	อัตราการตายของลูกปลานิลวัยอ่อนเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่าง แคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 96 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	65
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CdCl ₂ ก่อนและหลังการทดลอง (96 ชั่วโมง).....	67
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ZnCl ₂ ก่อนและหลังการทดลอง (96 ชั่วโมง).....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวของเศรษฐกิจทำให้การเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมของประเทศเป็นไปอย่างรวดเร็ว กระบวนการผลิตนั้นก่อให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมาก ซึ่งถ้าไม่ได้รับการกำจัดหรือกำจัดอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ก็อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษจากโลหะหนักเป็นปัญหาที่นับวันยิ่งจะทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากโลหะหนักนั้นเป็นวัตถุอันตรายที่สำคัญต่อการผลิตของอุตสาหกรรมหลายประเภท เมื่อผ่านกระบวนการผลิต โลหะหนักเหล่านี้มักพบปะปนอยู่ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ประกอบกับคุณสมบัติของตัวโลหะหนักเองที่มีการละลายตัวช้า จึงสามารถสะสมอยู่ในน้ำ ดินตะกอน นอกจากนี้ยังสามารถสะสมและเพิ่มปริมาณขึ้นตามลำดับชั้นในห่วงโซ่อาหารเกิดเป็นปัญหามลพิษต่อแหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของสัตว์น้ำและรวมถึงสุขภาพของมนุษย์ ดังเช่น กรณีการเกิดโรคอิไต อิไต ในประเทศญี่ปุ่น ดังนั้นการควบคุมปริมาณและความเข้มข้นของโลหะหนักก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำให้อยู่ในระดับที่ไม่เกินความสามารถในการรองรับของแหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยไม่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศจึงน่าจะเป็นการแก้ปัญหามลพิษที่ได้ผล ซึ่งการศึกษาเพื่อให้ทราบระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัยของมลพิษประเภทต่าง ๆ ที่มีต่อสัตว์น้ำสามารถทำได้โดยการประเมินจากการทดลองแบบชีววิเคราะห์ (bioassay) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เป็นแนวทางในการป้องกันรักษาแหล่งน้ำให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ทั้งยังเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจ และสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเราสามารถนำผลที่ได้จากการประเมินมากำหนดมาตรฐานคุณภาพของแหล่งน้ำได้

สิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการศึกษาคือ ลูกลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) ซึ่งเป็นปลาน้ำจืดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย พบได้ในแหล่งน้ำจืดทั่วทุกภาคของประเทศแม้แต่แหล่งน้ำบริเวณชายทะเลที่มีน้ำกร่อยปลานิลก็สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีคุณค่าทางเศรษฐกิจเนื่องจากเป็นปลาที่นิยมนำมาบริโภค นอกจากนี้ยังเป็นปลาที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับการเลี้ยงในสภาพห้องปฏิบัติการและยังสามารถมีชีวิตอยู่ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ 11-42 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเป็นสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออันตรายของโลหะหนักในแหล่งน้ำได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งโลหะหนักที่จะใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ แคดเมียมและสังกะสี ซึ่งเป็นโลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทโดยแคดเมียม

นั้นใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวโลหะ ผลิตแบตเตอรี่ ผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผสมในสารฆ่าแมลงและปุ๋ยฟอสเฟต สำหรับสังกะสีใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก อุตสาหกรรมยาง เซรามิกเครื่องเคลือบ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมกระดาษและไม้อัด อุตสาหกรรมยา เป็นต้น ซึ่งจากการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดนี้ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังข้อมูลการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง (ตั้งแต่สมุทรปราการ-ปทุมธานี) ที่ได้ติดตามตรวจสอบโดยกรมเจ้าท่าพบว่า ในปี พ.ศ.2543 มีปริมาณของแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสี 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมเจ้าท่า, 2543) ซึ่งถึงแม้ว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ แต่จากการตรวจวัดนั้นค่าที่ได้เป็นปริมาณโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งจากคุณสมบัติของโลหะหนักซึ่งสามารถจับตัวกับอนุภาคหรือสารแขวนลอยชนิดต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำทำให้เกิดการตกตะกอนได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่มีโลหะหนักตกค้างในดินตะกอนอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะเหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูง pH ต่ำ โลหะหนักเหล่านี้ก็สามารถแตกตัว และละลายจากดินตะกอนสู่น้ำ ทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้

ในอดีตการศึกษาความเป็นพิษของโลหะทั้ง 2 ชนิด มักเป็นการศึกษาในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและพบว่า แคดเมียมมีความเป็นพิษอย่างมากต่อสัตว์น้ำ และมีผลในระยะยาวต่อการสืบพันธุ์ การเจริญเติบโต ส่วนสังกะสีนั้นแม้จะเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจนเกินไปก็จะเกิดความเป็นพิษได้เช่นกัน แต่ในความเป็นจริงสภาพแวดล้อมในแหล่งน้ำประกอบด้วยโลหะหลายชนิดรวมกันอยู่ในรูปสารละลายผสม ซึ่งอาจมีผลให้ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสัตว์น้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ นอกจากนี้คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำนั้น โดยเฉพาะอุณหภูมิก็มีส่วนสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม เนื่องจากเป็นสัตว์เลือดเย็นจึงสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่านั้น และอุณหภูมิยังมีผลต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ และระดับความเป็นพิษของโลหะหนักอีกด้วย ซึ่งการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของโลหะหนักต่าง ๆ ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นยังมีน้อย ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงมุ่งที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมที่มีต่อลูกปลานิล เพื่อให้สามารถประเมินอันตรายของแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

(1) เพื่อหาระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมที่มีต่อลูกปลานิล ด้วยระดับความเข้มข้นที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ภายใน 96 ชั่วโมง

(2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระดับความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมร่วมต่อลูกปลานิล

(3) เพื่อหาลักษณะความเป็นพิษร่วมกันของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิล

1.3. ประโยชน์ที่ได้รับ

(1) ทราบถึงความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิล

(2) สามารถทราบปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี ว่ามีลักษณะความเป็นพิษต่อสัตว์ทดลองเป็นแบบแบบเสริมฤทธิ์ หรือแบบต้านฤทธิ์ ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ กัน ในสภาพห้องปฏิบัติการ และสามารถเชื่อมโยงเข้ากับสภาพความเป็นไปของแคดเมียมและสังกะสีที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้

(3) เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการติดตามตรวจสอบสถานะอันตรายของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โดยใช้ลูกปลานิลเป็นดัชนีชีวภาพของแหล่งน้ำจืดในประเทศไทย

(4) เป็นข้อมูลที่สามารถใช้ในการกำหนดเกณฑ์สำหรับมาตรฐานคุณภาพน้ำของประเทศ ไทยซึ่งเป็นระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำได้

บทที่ 2

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคลเมียม

2.1.1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

แคลเมียมเป็นธาตุโลหะ มีสีขาวฟ้าขาว มีลักษณะเนื้ออ่อน สามารถบิดโค้งงอได้และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มีเลขอะตอม 48 และมีน้ำหนักอะตอม 112.40 กรัม อยู่ในหมู่ IB ของตารางธาตุ เช่นเดียวกับสังกะสีและปรอท ไม่ค่อยพบในรูปแร่แคลเมียมบริสุทธิ์ ตามธรรมชาติสามารถพบแคลเมียมเป็นส่วนประกอบอยู่ในหิน ในดิน และในน้ำ โดยเฉพาะในถ่านหินและปิโตรเลียม แหล่งที่มาของแคลเมียมที่สำคัญที่สุด คือ ในแร่สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง สำหรับในประเทศไทยพบแคลเมียมในแร่สังกะสีในรูปซิงค์ซัลไฟด์และคาร์บอนเนต ซึ่งมีแคลเมียมประมาณ 0.38% แคลเมียมมีค่าออกซิเดชันเท่ากับ 0, +1 และ +2 แต่ที่พบโดยทั่วไปมักจะอยู่ในสถานะที่มีเลขออกซิเดชันเป็น +2 แคลเมียมสามารถเกิดสารประกอบกับเกลือได้หลายชนิด ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปแคลเมียมอินทรีย์ เนื่องจากในธรรมชาติยังไม่เคยพบในรูปแคลเมียมอินทรีย์ ถึงแม้ว่าแคลเมียมสามารถจับกับโปรตีนหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ และเกิดเป็นเกลือของกรดอินทรีย์ได้ก็ตามแต่จะถือว่าอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ ในอากาศที่มีความชื้นแคลเมียมจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วเกิดเป็นไอของแคลเมียมออกไซด์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับ ไออน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และ ไฮโดรเจนคลอไรด์ เกิดเป็นเกลือแคลเมียมคาร์บอนเนต แคลเมียมไฮดรอกไซด์ แคลเมียมซัลไฟต์ แคลเมียมซัลเฟต และแคลเมียมคลอไรด์ ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นในปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมและแพร่กระจายสู่บรรยากาศได้ เกลือของแคลเมียมบางชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอนเนต และ ออกไซด์ ปกติจะไม่ละลายในน้ำ แต่ก็สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้จากอิทธิพลของ ออกซิเจนและสภาวะที่เป็นกรด ส่วนเกลือของแคลเมียมพวกซัลเฟต ไนเตรต และเฮไลเจน นั้นสามารถละลายในน้ำได้ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบแคลเมียมชนิดต่าง ๆ นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียมและสารประกอบ

	Cadmium	Cadmium chloride	Cadmium acetate	Cadmium oxide	Cadmium hydroxide	Cadmium sulfide	Cadmium sulfate	Cadmium sulfite
CAS number	7440-43-9	10108-64-2	543-90-8	1306-19-0		1306-23-6	10124-36-4	
Empirical formula	Cd	CdCl ₂	C ₄ H ₆ CdO ₄	CdO	Cd(OH) ₂	CdS	CdSO ₄	CdSO ₃
Relative atomic or molecular mass	112.41	183.32	230.50	128.40	146.41	144.46	208.46	192.46
Relative density	8.642	4.047	2.341	6.95	4.79	4.82	4.691	
Melting point (°C)	320.9	568	256	< 1426	300(decomposes)	1750	1000	Decomposes
Boiling point (°C)	765	960	decomposes	900-1000(decomposes)				
Water solubility(g/litre)	Insoluble	1400 (20 °C)	very soluble	insoluble	0.0026 (26 °C)	0.0013 (18 °C)	755 (0 °C)	slightly soluble

2.1.2. การใช้ในอุตสาหกรรม

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม คือ

(1) ใช้ในการชุบโลหะ โดยจะใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โลหะที่ได้จากการชุบจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

(2) ใช้เป็น stabilizers สำหรับโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้ในกระบวนการย่อยสลาย PVC ซึ่งในระหว่างที่ได้รับความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต stabilizers ซึ่งบรรจุด้วยเกลือของแคดเมียมอินทรีย์ ซึ่งส่วนมากเป็นคาร์บอเนต เช่น cadmium laurate หรือ cadmium stearate จะถูกใส่เข้าไปใน PVC ก่อนการผลิตซึ่งจะไปช่วยยับยั้งปฏิกิริยาที่จะทำให้ PVC เกิดการย่อยสลายในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งจะช่วยให้อายุการใช้งานได้มากขึ้น

(3) ใช้เป็นเม็ดสีในกิจการอุตสาหกรรม ใช้ cadmium sulfide และ cadmium sulfoselenide ในการให้สีเหลืองถึงสีแดงเข้มในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สีอีนามัล (enamels) เซรามิก ยาง แก้ว ฝ้า เส้นใย หนังสือ หมึกพิมพ์ และพลาสติก

(4) ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ cadmium hydroxide ร่วมกับโลหะนิกเกิล เป็น cadmium-nickel battery ซึ่งนำมาใช้ผลิตแบตเตอรี่ในโทรศัพท์มือถือ และเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบพกพา

(5) ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็น โลหะผสม (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและทนทานต่อการสึกกร่อน เช่น โลหะผสมของทองแดงที่มีแคดเมียม 1 % (cadmium bronze) ที่ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์ โลหะผสมของทองแดงและตะกั่วซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ 20% ที่ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (printing plates) โลหะผสมของทองแดง แคดเมียมและเซอร์โคเนียมที่ใช้ในอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ ที่มี voltage สูงๆ ทั้งนี้เพราะโลหะผสมประเภทนี้จะมีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม ที่ใช้ผสมกับกับโลหะผสมอื่นในเครื่องประดับ เช่น ผสมกับทอง เงิน และทองแดง นอกจากนี้ยังใช้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ ในการผสมกับโลหะอื่นให้มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น cadmium arsenide, cadmium antimonide และ cadmium telluride เป็นต้น

(6) ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น Cadmium chloride ผสมในสารฆ่าเชื้อรา (fungicides) Cadmium fluoride ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมการแตกตัวของนิวเคลียส Cadmium sulfide ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ Cadmium chloride ในกิจการถ่ายรูป เป็นสารในการอัดรูป

โดยในปี ค.ศ. 1960 แคดเมียมถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งหลังจากนั้น แคดเมียมมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนแคดเมียมที่ผลิตได้ทั่วโลกถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะ แต่ต่อมาในปี 1985 ลดลงเหลือเพียง 25 % ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมการปล่อยของเสียจากโรงงานชุบโลหะอย่างเข้มงวดแต่ในทางตรงกันข้ามปริมาณการใช้แคดเมียมในแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้นจาก 8% ในปี 1970 เป็น 37% ในปี 1985 โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้แคดเมียมในแบตเตอรี่มากกว่า 75% ของการบริโภคทั้งหมดในปี 1985 ส่วนการผลิตเม็ดสีและ stabilizers คิดเป็น 22% และ 12% ของปริมาณการบริโภคแคดเมียมทั่วโลกในปี 1985 ซึ่งตลาดของเม็ดสีแคดเมียมค่อนข้างคงตัวตั้งแต่ปี 1970 ถึง 1985 แต่การใช้แคดเมียมใน stabilizers ลดลง ซึ่งสาเหตุใหญ่ๆ น่าจะเป็นผลมาจากปัจจัยทางเศรษฐกิจ ส่วนการใช้แคดเมียมในการผลิตโลหะผสมนั้นมีแนวโน้มลดลง ซึ่งคิดเป็นประมาณ 4% ของปริมาณการใช้แคดเมียมในปี 1985 (Wilson, 1988 อ้างถึงใน WHO, 1992)

2.1.3. แหล่งที่มาของแคดเมียม

2.1.3.1 จากธรรมชาติ (Natural sources)

แคดเมียมสามารถพบได้ทั่วไปตามเปลือกโลก โดยปกติแล้วพบว่ามีความเข้มข้นประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและมักจะพบร่วมกับสังกะสี แต่ในหินตะกอน เช่น หินฟอสเฟตพบว่ามี ความเข้มข้นของแคดเมียมสูงถึง 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นต้น จากกระบวนการสลายตัวผุพังตามธรรมชาติและการกัดกร่อนเป็นผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายแคดเมียมปริมาณมหาศาลจากแม่น้ำลงสู่มหาสมุทร จากการประมาณค่าว่ามากถึง 15,000 ตันต่อปี และในพื้นที่ทั่วไปที่ไม่ใช่เป็นแหล่งแร่ พบว่ามีปริมาณแคดเมียมอยู่ในผิวดินประมาณ 0.1 ถึง 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเฉลี่ยแล้วพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ไม่ได้อยู่บริเวณภูเขาไฟอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ถ้าเป็นดินที่อยู่ในบริเวณภูเขาไฟมีมากถึง 4.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กิจกรรมของภูเขาไฟเป็นแหล่งธรรมชาติที่สำคัญของแคดเมียมในชั้นบรรยากาศ ประมาณ 100-500 ตันต่อปี ภูเขาไฟใต้ทะเลก็เป็นอีกแหล่งที่ปลดปล่อยแคดเมียมออกสู่สิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน นอกจากนี้ในพื้นที่ชนบทหรือในที่รกร้างว่างเปล่านั้นพบว่า ปกติมีความเข้มข้นของแคดเมียมในอากาศน้อยกว่า 1 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Korte, 1983 อ้างถึงใน WHO, 1992)

น้ำทะเลมีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ น้อยกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมที่ละลายน้ำในแม่น้ำจากการเก็บตัวอย่างในแม่น้ำ Mississippi, Yangtze, Amazon และ Orinoco ระหว่างปี ค.ศ.1976 ถึง 1982 มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1.1-13.5 นาโนกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ในดินตะกอนจากแม่น้ำและทะเลสาบบางแห่งพบว่ามีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.03 ถึง 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในดินตะกอนจากทะเล จากการตรวจวัดปริมาณแคดเมียมที่ละลายน้ำในมหาสมุทรพบว่ามีปริมาณน้อยกว่า 5 นาโนกรัมต่อลิตร (Simpson, 1981 อ้างถึงใน WHO, 1992)

2.1.3.2 จากการกระทำของมนุษย์ (Anthropogenic sources)

(1) การปลดปล่อยสู่บรรยากาศ (Emissions to atmosphere)

การปลดปล่อยโลหะหนักทั่วโลกที่มีแหล่งที่มาจากมนุษย์ในปี 1983 โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7,570 ตัน (Nriagu and Pacyna, 1988) ซึ่งครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมดมาจากการผลิตแคดเมียม ของทั้งประชาคมยุโรปและทั่วโลก ส่วนของเสียชุมชนที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ เช่น นิกเกิล-แคดเมียมแบตเตอรี่ พลาสติกที่มีเม็ดสีที่ทำจากแคดเมียม stabilizers การกำจัดของเสียพวกนี้ด้วยการเผาเป็นสาเหตุที่สำคัญของการปลดปล่อยแคดเมียมสู่ชั้นบรรยากาศ เช่นเดียวกับในกระบวนการผลิตของการชุบโลหะถึงแม้ว่าโลหะที่ใช้แล้วส่วนมากจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการรีไซเคิลก็ตาม อุตสาหกรรมการชุบโลหะก็ยังคงถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งที่มาของการปล่อยแคดเมียมสู่ชั้นบรรยากาศด้วย

(2) การปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำ (Emissions to aquatic environment)

การทำเหมืองของโลหะชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metal) เป็นแหล่งที่สำคัญของการปล่อยแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำ การปนเปื้อนในน้ำและน้ำเสียของเหมืองแร่มาจากกระบวนการผลิตแร่ และการไหลบ่าของน้ำฝนจากพื้นที่เหมือง ซึ่งการปล่อยน้ำทิ้งเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียงทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ นอกจากนี้เหมืองที่ถูกทิ้งร้างเป็นเวลาหลาย ๆ ปีก็ยังคงทำให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียงได้ ส่วนการถลุงแร่โลหะชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็กถือเป็นแหล่งที่มาที่สำคัญที่สุดที่ปลดปล่อยแคดเมียมลงสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Nriagu and Pacyna, 1988) เช่น น้ำเสียที่เกิดจากการควบคุมมลพิษทางอากาศโดยใช้ gas scrubbing และน้ำทิ้งจากโรงถลุงแร่ ส่วนในกระบวนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตมีผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของแคดเมียมในหินฟอสเฟตระหว่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดฟอสฟอริกและของเสียคืออิปซัม นอกจากนี้ในดินหรือน้ำที่มี

สภาพเป็นกรดจะช่วยเพิ่มโอกาสในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากดินและดินตะกอนสู่แหล่งน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินมากขึ้น

(3) การปลดปล่อยลงสู่ดิน (Emissions to soil)

ของเสียทั้งจากผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตโลหะที่ไม่ใช่เหล็กที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ รวมถึงเถ้าถ่านจากการกำจัดของเสียด้วยวิธีการเผา ทั้งสามอย่างนี้เป็นของเสียที่ทำให้ระดับแคดเมียมในดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีมาตรการกำจัดอย่างถูกวิธีเพื่อป้องกันการไม่ให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่หน้าดิน ส่วนการทำเกษตรโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟตพบว่าเป็นวิธีที่เพิ่มแคดเมียมลงสู่ดิน ซึ่งส่วนประกอบของแคดเมียมที่อยู่ในปุ๋ยนั้นจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของหินฟอสเฟตที่นำมาใช้ พบว่าในปุ๋ยที่มาจากแอฟริกาตะวันตกมีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 160-255 กรัมต่อฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ 1 ตัน ในขณะที่ตอนตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกามีแคดเมียม 35 กรัมต่อตัน โดยอัตราการเพิ่มแคดเมียมในดินจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตของประเทศในประชาคมยุโรปพบว่ามีประมาณ 5 กรัมต่อเฮกแตร์ (1 เฮกแตร์ เท่ากับ 6.25 ไร่) โดยคิดเป็น 1% ของแหล่งที่มาของแคดเมียมในดิน ถึงแม้ว่าจะเป็นปริมาณที่น้อยแต่การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ ก็จะทำให้แคดเมียมในดินเพิ่มสูงขึ้นได้ นอกจากนี้การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียในการเกษตรก็เป็นแหล่งที่มาของแคดเมียมในดินได้เช่นกัน โดยในประเทศไทยสามารถวัดปริมาณแคดเมียมได้ถึง 80 กรัมต่อเฮกแตร์ แต่เมื่อมองในระดับประเทศแล้วถือว่าเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตและการสะสมในชั้นบรรยากาศ มีรายงานว่าดินที่ปนเปื้อนสารมลพิษมีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบได้มากถึง 57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ยิ่งถ้าอยู่ในบริเวณใกล้เคียงอุตสาหกรรมผลิตโลหะด้วยแล้วอาจสูงถึง 160 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Fleischer *et al.*, 1974 อ้างถึงใน WHO, 1992) ระดับแคดเมียมในดินสูงที่สุดที่เคยรายงานไว้มาจากบริเวณเหมืองเก่าโดยสูงถึง 468 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.2 สังกะสี

2.2.1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สังกะสีเป็นธาตุโลหะ สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ สังกะสีบริสุทธิ์จะมีสีฟ้าแกมขาวมันวาว มีลักษณะเนื้ออ่อน มีเลขอะตอมเท่ากับ 30 และมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 65.38 กรัม อยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางธาตุ ไม่ค่อยพบสังกะสีในรูปสังกะสีบริสุทธิ์ ตามธรรมชาติสังกะสีที่พบจะอยู่ในรูปแร่ sphalerite หรือ wurtzite (ZnS) นอกจากนี้ยังพบใน smithsonite ($ZnCO_3$) hemimorphite

($Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot XH_2O$) และ Zincite (ZnO) ในประเทศไทยแร่สังกะสีมักพบร่วมกับแร่ตะกั่ว เช่น ในบริเวณที่เป็นแหล่งตะกั่ว ที่อำเภอทองผาภูมิ สังขละบุรี และศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี แหล่งแร่สังกะสีที่เป็นแหล่งใหญ่ที่สุดของประเทศ และได้มีการพัฒนาเป็นเหมืองแร่สังกะสีที่มีการผลิตที่สำคัญ คือ แหล่งสังกะสีบริเวณผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และจากแหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสี จังหวัดกาญจนบุรี สังกะสีมีค่าออกซิเดชันเป็น +2 มีลักษณะทางเคมีคล้ายแคลเซียม ที่อุณหภูมิปกติ โลหะสังกะสีจะเปราะไม่สามารถบดงอได้ แต่จะสามารถตีออกเป็นแผ่นบาง ๆ และหลอมเป็นรูปร่างต่างได้เมื่อได้รับความร้อน 100–150 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 210 องศาเซลเซียส สังกะสีจะเปราะและสามารถกลายเป็นผงได้ และถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็จะกลับมาอ่อนและตีเป็นแผ่นได้อีกครั้ง (Beliles, 1994) เพราะสังกะสีไวในการทำปฏิกิริยามาก โดยจะทำปฏิกิริยากับธาตุชนิดอื่น เช่น ออกซิเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โลหะสังกะสีสามารถเผาไหม้ในอากาศให้เปลวไฟสีน้ำเงินแกมเขียว สังกะสีจะเสถียรเมื่ออยู่ในอากาศที่แห้ง แต่ถ้าได้รับอากาศที่มีความชื้นจะเกิดเป็นฟิล์มของซิงค์ออกไซด์ หรือคาร์บอเนต ($2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$) สังกะสีในรูปโลหะจะไม่ละลายน้ำแต่ละลายในกรดและเบสได้ไฮโดรเจน และเกลือของสังกะสีที่ละลายน้ำได้ Oxidizing agents หรืออ็อกซิไดซิงเอเจนต์ของโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล และ โคบอลต์ จะไปลดการละลายของสังกะสีลง นอกจากนี้ยังสามารถเกิดสารประกอบได้กับ แอมโมเนีย เอมีน ไซยาไนด์ และไฮโดรเจนอ็อกไซด์ เกิดเป็นเกลือได้หลายชนิด ซึ่งทุกชนิดไม่นำไฟฟ้า และมีสีขาวหรือไม่มีสี ยกเว้น ในกลุ่ม chromophore เช่น chromate ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบสังกะสีชนิดต่าง ๆ นั้นแสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะสังกะสีและสารประกอบสังกะสี

Chemical name	Relative atomic/molecular mass	Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	Relative density (g/cm^3) ($^{\circ}\text{C}$)	Crystalline form	Solubility
Zinc	65.38	419.58	907	7.14 (25)	Distorted hexagonal close packed	Soluble acid, alkali; insoluble H_2O ,
Zinc acetate	183.47	237	200 ^a	1.735	Monoclinic	Soluble H_2O , alcohol
Zinc bromide	225.19	394	690	4.201 (25)	Rhombic	Soluble H_2O , alcohol, ether
Zinc carbonate	125.39	300 ^a	ND	4.398	rhombohedral	Soluble acid, alkali; slightly soluble H_2O
Zinc chloride	136.29	283	732	2.907 (25)	hexagonal, deliquescent	Soluble H_2O , acid, acetone, alcohol
Zinc fluoride	103.38	872	ca. 1500	4.95 (25)	monoclinic or triclinic	Soluble HCl , HNO_3 , NH_4OH ; slightly soluble H_2O , aqueous HF
Zinc hexafluorosilicate	207.46	ND ^a	ND	2.104	crystalline powder	Soluble H_2O
Zinc hydroxide	99.39	125 ^a	ND	3.053	rhombic	Soluble acid, alkali; very slightly soluble H_2O

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Chemical name	Relative atomic/molecular mass	Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	Relative density (g/cm^3) ($^{\circ}\text{C}$)	Crystalline form	Solubility
Zinc iodide	319.19	446	624 ^a	4.736 (25)	hexagonal	Soluble H_2O , alcohol, ether
Zinc nitrate, hexahydrate	297.48	36.4	105–131 ($-\text{H}_2\text{O}$)	2.065 (14)	tetragonal	Soluble H_2O , alcohol
Zinc oxide	81.38	1975	ND	5.606	hexagonal	Soluble dilute acetic acid, alkali; insoluble H_2O , alcohol
Zinc phosphate	386.08	900	ND	3.998 (15)	rhombic	Soluble acid, NH_4OH ; insoluble H_2O , alcohol
Zinc phosphide	258.09	> 420	1100 (sublimes in H_2)	4.55 (13)	tetragonal	Soluble benzene, CS_2 ; insoluble H_2O , alcohol
Zinc sulfate	161.44	600 ^a	ND	3.54 (25)	rhombic	Soluble H_2O , MeOH , glycerol
<i>alpha</i> -Zinc sulfide	97.44	1700 \pm 20	ND	3.98	hexagonal	Very soluble alcohol; insoluble acetic acid
<i>beta</i> -Zinc sulfide	97.44	ND ^a	ND	4.102 (25)	cubic	Very soluble acid

ที่มา : Lide (1991)

หมายเหตุ : ^aสลายตัว(Decomposition)

2.2.2. การใช้ในอุตสาหกรรม

สังกะสีนั้นเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดเป็นอันดับสี่รองจาก เหล็ก อะลูมิเนียม และ ทองแดง ปริมาณสังกะสีที่ผลิตได้จากเหมืองทั่วโลกมีประมาณ 7,140,000 ตันในปี ค.ศ. 1992 และ 7,089,000 ตัน ในปี ค.ศ. 1994 ปริมาณการผลิตและการบริโภคสังกะสีทั่วโลก รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่าการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่นั้นคิดเป็น 20–30% ของสังกะสีที่ผลิตได้ (1.9 ล้านตัน ในปี ค.ศ. 1994) โดยมาจากแผ่นสังกะสีและเหล็กชุบมากถึง 80% (EZI, 1996)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการผลิตและการใช้สังกะสีในปี ค.ศ. 1994 (thousand tonnes)

Geographical area	Mine production	Zinc production	Zinc consumption
Europe	1012	2510	2350
Canada	1008	693	148
Australia	971	323	161
China	755	975	577
Peru	682	158	69
USA	597	356	1191
Mexico	369	212	108
Other countries	1271	1862	2291
World total	6665	7089	6895

สังกะสีถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่ม คือ

(1) ใช้ในการชุบโลหะ สังกะสีส่วนใหญ่ถูกใช้เป็นตัวเคลือบโลหะชนิดอื่น เช่น เหล็ก และ เหล็กกล้า เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน โดยใช้แผ่นสังกะสีมุงหลังคาบ้าน ทำรั้ว ใช้ทำ ส่วนประกอบในอุตสาหกรรมรถยนต์

(2) ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม (alloy) โดยผสมกับอะลูมิเนียม ทองแดง ไทเทเนียมและแมกนีเซียม เนื่องจากโลหะเหล่านี้มักขาดความแข็งแรง และเราจะเรียกโลหะผสมที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักว่า โลหะผสมสังกะสี ซึ่งนิยมใช้ในกระบวนการหล่อ และการ หลอม เนื่องจากความแข็งแรงทนทานต่อการชุบซึ่มมากกว่าโลหะชนิดอื่นที่มีความหนาเท่ากัน (Beliles, 1994) เช่น ทองสัมฤทธิ์ ทองเหลือง เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี (20-45 %

ขึ้นอยู่กับให้นำไปใช้) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี โดยแร่สังกะสี (smithsonite) ถูกใช้ในการผลิตทองเหลืองในยุโรปตั้งแต่ปี ค.ศ. 1400

(3) ใช้เป็นเม็ดสีในกิจการอุตสาหกรรม เช่น Zinc sulfide Zinc oxide และ Zinc carbonate สีอีนามเมล (enamels) เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หนังก หมึกพิมพ์ วัสดุบุพื้นและพลาสติก

(4) ใช้ในการผลิตเครื่องสำอางค์และด้านเภสัชกรรม เช่น ยาขี้ผึ้ง สบู่

(5) ใช้ในกิจการอื่นๆ ซึ่งการใช้ประโยชน์จากสารประกอบสังกะสีแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การใช้ประโยชน์จากสารประกอบสังกะสี

สารประกอบสังกะสี	การใช้ประโยชน์
Zinc acetate	ใช้ในยาสมานแผล , เป็นสารรักษาเนื้อไม้ และสีข้อมผ้า
Zinc antimonide	ใช้ในอุปกรณ์ที่เป็น Thermolectric
Zinc arsenate	ใช้เป็นสารฆ่าแมลง, เป็นสารรักษาเนื้อไม้
Zinc arsenite	ใช้เป็นสารฆ่าแมลง, เป็นสารรักษาเนื้อไม้
Zinc bacitracin	ใช้เป็นสารป้องกันแบคทีเรียในยาที่เป็นครีม และยาเหน็บทวารหรือช่องคลอด
Zinc bromide	ใช้เป็นน้ำยาเคลือบฟิล์มถ่ายภาพ, ใช้ในการผลิตไฮสังเคราะห์
Zinc caprylate	ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา
Zinc carbonate	ใช้ในการผลิตเซรามิก, สารทนไฟ, เครื่องสำอาง (เช่นครีมหรือแป้งฝุ่น), ใช้ในเภสัชกรรม (ยาปฏิชีวนะทั่วไป)
Zinc chloride	ใช้ในสารสังเคราะห์สารอินทรีย์ (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำให้แห้ง), สารทนไฟ, ใช้ในการบัดกรี, การเคลือบโลหะ, การเตรียมสารปฏิชีวนะ, ในการทอผ้า (สารที่ช่วยให้ติดสีข้อม), สารยัดคีด, สารอุดฟัน, ใช้ในยาสมานแผล

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

สารประกอบสังกะสี	การใช้ประโยชน์
Zinc dibenzylthiocarbamate	ใช้เป็นตัวเร่งให้เกิดการกระจายตัวของยางและซีเมนต์
Zinc dichromate	ใช้เป็นเม็ดสี
Zinc fluoride	ใช้ในการผลิตเซรามิก แก้ว, เป็นสารรักษาเนื้อไม้, การเคลือบโลหะ
Zinc fluorosilicate	ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการแข็งตัวของคอนกรีต, ใช้เป็นสารกำจัดสนิมหรือผงซักฟอกในการซักผ้า, วัตถุกันเสีย
Zinc iodide	ใช้ในยาปฏิชีวนะ
Zinc laurate	ใช้ในสี, สารเคลือบเงา, ใช้ในการผลิตยาง
Zinc linoleate	ใช้ในการทำให้สีแห้ง
Zinc oxide	ใช้เป็นตัวเร่ง, สารเพิ่มความแข็งแรงในยาง, ครีม, เม็ดสีและตัวยับยั้งการป้องกันเชื้อราในสี, เป็นตัวดูดรังสียูวีในพลาสติก, ใช้ในอาหารสัตว์, เครื่องสำอาง, ใช้ในอุปกรณ์แบบ piezoelectric
Zinc-1,4-phenol-sulfonate	ใช้เป็นสารฆ่าแมลง, ยาปฏิชีวนะ
Zinc phosphate	ใช้เป็นสารอุดฟัน, ใช้ในการชุบเหล็กกล้า
Zinc phosphide	ใช้เป็นสารกำจัดหนู
Zinc propionate	ใช้เป็นสารกำจัดเชื้อรา
Zinc salicylate	ใช้เป็นยาปฏิชีวนะ
Zinc stearate	ใช้ในเครื่องสำอาง, แลคเกอร์, ครีม, สารหล่อลื่น, ยาสำหรับโรคผิวหนัง, สารผสมในอาหาร
Zinc sulfate	ใช้ในการผลิตไฮดรอกไซด์, สารผสมในอาหาร, เป็นสารรักษาเนื้อไม้, ใช้ในการผลิตพลาสติก
Zinc sulfide	ใช้เป็นเม็ดสี, แก้ว, ใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ และจอภาพโทรทัศน์, ใช้เป็นสารเรืองแสงในสี, เป็นสารฆ่าเชื้อรา
Zineb	ใช้เป็นสารกำจัดแมลง, สารฆ่าเชื้อรา
Ziram	ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา, ใช้เป็นตัวเร่งในการผลิตยาง

ที่มา : ดัดแปลงจาก : Sax and Lewis (1987) และ Budavari (1989) อ้างถึงใน WHO (2001)

2.2.3. แหล่งที่มาของสังกะสี

2.2.3.1. จากธรรมชาติ (Natural sources)

สังกะสีเป็นส่วนประกอบปริมาณน้อยของหินเกือบทุกชนิด ในสภาพธรรมชาติจะหาสังกะสีในรูปโลหะได้ยากมาก แต่ในแร่หลายชนิดมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลัก แร่ Sphalerite (ZnS) เป็นแร่ที่สำคัญที่สุดและเป็นแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์สังกะสี นอกจากนี้ยังมีแร่ Smithsonite ($ZnCO_3$) และแร่ hemimorphite ($Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot XH_2O$) สิ่งเจือปนที่พบในแร่สังกะสีเป็นหลัก (1–14%) แคลเซียม (0.1–0.6%) และตะกั่ว (0.1–2%) ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและการตกสะสม ตามธรรมชาติระดับของสังกะสีในดินนั้นมีความหลากหลายมาก โดยในบริเวณที่มีแร่ปริมาณมากก็จะมีสังกะสีอยู่มาก US EPA (1980) อ้างถึงใน WHO (2001) คาดว่าจำนวนสังกะสีที่ลงสู่แหล่งน้ำในสหรัฐอเมริกา ที่มาจากการชะล้างพังทลายของดินมีถึง 45,400 ตันต่อปี และทั่วโลกจะมีค่าประมาณ 915,000 ตันต่อปี

แหล่งที่มาของสังกะสีในอากาศส่วนใหญ่มาจากการที่ลมพัดพาเอาเศษดิน จากหินอัคนี และจากไฟไหม้ป่าประมาณ 19,000 ตันต่อปี, 9,600 ตันต่อปี และ 7,600 ตันต่อปี ตามลำดับ นอกจากนี้แหล่งที่มาของสังกะสีในอากาศยังมาจากสิ่งมีชีวิต และเกลือทะเล ซึ่งพบว่าปริมาณ 8,100 ตันต่อปีและ 440 ตันต่อปี ตามลำดับ ดังนั้นจึงคาดว่าปริมาณสังกะสีที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศโดยธรรมชาติมีประมาณ 45,000 ตันต่อปี

2.2.3.2. จากการกระทำของมนุษย์ (Anthropogenic sources)

(1) การปลดปล่อยสู่บรรยากาศ (Emissions to atmosphere)

สังกะสีจะถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศในรูปของฝุ่นหรือไอ ในระหว่างการทำเหมือง ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการจัดเก็บแร่ และการกัดกร่อนโดยลม จากการศึกษาในยุโรปตะวันตก สหรัฐอเมริกา แคนาดาและสหภาพโซเวียต คาดว่าการปล่อยสังกะสีออกสู่บรรยากาศทั่วโลกมีประมาณ 70,250 ถึง 193,500 ตันในปี ค.ศ.1983 ซึ่งส่วนมากจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะที่ไม่ใช่เหล็กถึง 50–70% ส่วนที่เหลือมาจากการผลิตปูนซีเมนต์ การใช้ปุ๋ยฟอสเฟต และมาจากแหล่งที่มาอื่น ๆ เช่น จากน้ำมัน และถ่านหิน นอกจากนี้ยังมาจากการกำจัดของเสียด้วยวิธีการเผาอีกด้วย (Nriagu and Pacyna, 1988)

(2) การปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำ (Emissions to aquatic environment)

การทำเหมือง และจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ทำให้เกิดการปล่อยสังกะสีลงสู่แหล่งน้ำ ประมาณ 33,000 ถึง 178,000 ตันต่อปี (Nriagu and Pacyna, 1988) การปล่อยสังกะสีจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งลดลงอย่างมากในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณสังกะสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำในปี ค.ศ. 1988 ประมาณ 386 ตันลดลงเหลือเพียง 30 ตันในปี 1993 (TRI, 1993 อ้างถึงใน WHO, 2001)

นอกจากนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ และคลอรีน ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดสามารถเกิดปฏิกิริยากับชั้นที่เป็นไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนตที่บริเวณพื้นผิวของโลหะสังกะสี ให้กลายเป็นสังกะสีที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ โดยพบว่าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับ pH ของน้ำฝนน้อยกว่า 4 โดยปริมาณการกัดกร่อนที่ pH 4-7 มีน้อยกว่า 1 ไมโครเมตรต่อปี แต่จะเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าเมื่อ pH เป็น 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนนั้นรุนแรงขึ้น และสัมพันธ์กับกับระดับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ในแต่ละปีคาดว่าสังกะสีนั้นถูกกัดกร่อนประมาณ 3.6 ไมโครเมตรในพื้นที่เขตชนบท, 3.8 ไมโครเมตรในพื้นที่เขตเมือง, 4.3 ไมโครเมตรในเขตอุตสาหกรรม และ 4.5 ไมโครเมตรในเขตใกล้ทะเล สำหรับประเทศในแถบยุโรป อัตราการกัดกร่อนต่อปีมีประมาณ น้อยกว่า 8 กรัมต่อตารางเมตร, 8-16 กรัมต่อตารางเมตร และ 16-28 กรัมต่อตารางเมตรสำหรับในเขตชนบท เขตเมือง และเขตอุตสาหกรรม ตามลำดับ (Knotkova and Porter, 1994) นอกจากนี้การปลดปล่อยสังกะสีจากบ้านเรือน เช่น จากท่อน้ำที่เป็นโลหะชุบสังกะสี เครื่องสำอาง ยา และอื่น ๆ

(3) การปลดปล่อยลงสู่ดิน (Emissions to soil)

ในแต่ละปีคาดว่ามีการปลดปล่อยสังกะสีลงสู่ดินจากการทำเหมืองและการถลุงแร่ประมาณ 1-3 ล้านตัน ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณสังกะสีที่ปล่อยลงสู่ดิน 689-2,054 พันตันต่อปีมาจากการกระทำของมนุษย์ โดย 260-1,100 ตันต่อปีเกิดจากการใช้ปุ๋ย และ 49,000 - 135,000 ตันต่อปีจากการชะล้างจากชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตามแหล่งที่มาของการปล่อยสังกะสีลงสู่ดินที่สำคัญที่สุดนั้นมาจากของเสียที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ เช่นของเสียจากการเกษตร และของเสียจากสัตว์ ปุ๋ยคอก กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย และเถ้าลอย ซึ่งมีประมาณ 640-1,914 พันตันต่อปี (Nriagu and Pacyna, 1988) เนื่องจากในปุ๋ยเคมีฟอสเฟตมีปริมาณสังกะสีอยู่ 60-470 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในปุ๋ยเคมีชนิดอื่นที่ไม่ใช่ฟอสเฟตมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในปุ๋ยคอกนั้นมีประมาณ 12.6-39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.3 การแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในแหล่งน้ำ

2.3.1. แคดเมียมในแหล่งน้ำ

แคดเมียมที่พบในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอออนอิสระ (Cd^{2+}) หรือไฮดรอกไซด์อออน ($CdOH^+$) ภายใต้สภาวะที่ความเป็นกรดเป็นด่างน้อยกว่า 7–8 แต่ถ้าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเป็นพบว่าปริมาณ $CdOH^+$ จะลดลง ในขณะที่ปริมาณของ Cd^{2+} จะเพิ่มขึ้น แคดเมียมสามารถเกิดพันธะกับคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรมาก ในน้ำที่เป็นด่างจะพบแคดเมียมในรูปแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) ส่วนในสภาวะรีดักชันจะพบแคดเมียมในรูป bisulphide ion ($CdHS$) นอกจากนี้ยังพบแคดเมียมในรูปซัลเฟต ($CdSO_4$) และสามารถเกิดพันธะกับสารต่าง ๆ เช่น cystine, fulvic acids, EDTA, NTA, DPTA, xanthates และ dithiocarbamates เป็นสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์ได้

ในกรณีที่เป็นสารประกอบแคดเมียมอินทรีย์ คุณสมบัติทางเคมีนั้นจะมีผลอย่างมากกับ bioavailability ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกประกอบด้วย แคดเมียมเกิดสารประกอบกับ EDTA, NTA และ DPTA ซึ่งจะเป็รูปที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ กลุ่มที่สองนั้นเป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มการดูดซึมแคดเมียมแต่สารประกอบนั้นจะอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้น้อยกว่าในรูปอออนอิสระ เช่น fulvic acids ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ, amino acid histidine, และ carboxylic acids like citric acid (Part and Wikmark, 1984) ส่วนกลุ่มสุดท้ายประกอบด้วยสารประกอบพวก xanthates และ dithiocarbamates ซึ่งเมื่อรวมกับโลหะหนักแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะเป็ตัวที่ช่วยพาโลหะหนักผ่านเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและนำไปสู่การเพิ่มการดูดซึมแคดเมียมในสิ่งมีชีวิตในน้ำมากกว่าในรูปอออนอิสระ โดยเฉพาะ xanthates ซึ่งใช้ในการทำเหมืองเพื่อสกัดแร่โลหะจากที่อยู่ในรูปซัลไฟด์โดยวิธี flotation พบว่าน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงสกัดแร่ที่มีความเข้มข้นของ xanthates ระหว่าง 4 ถึง 400 ไมโครกรัมต่อลิตร (Waltersson, 1984 อ้างถึงใน WHO, 1992)

2.3.2. สังกะสีในแหล่งน้ำ

สังกะสีในแหล่งน้ำสามารถแบ่งเป็น 7 รูป (Florence, 1980) คือ

- (1) โลหะไฮดรอกไซด์อออน เช่น $Zn(H_2O)_6^{2+}$ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 นาโนเมตร)

- (2) สารประกอบเชิงซ้อนอนินทรีย์ที่ไม่เสถียร เช่น $Zn(H_2O)_5Cl^+$, $Zn(H_2O)_5OH^+$ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร)
- (3) สารประกอบเชิงซ้อนอนินทรีย์ที่ไม่เสถียร เช่น Zn-citrate, Zn-glycinate (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1–2 นาโนเมตร)
- (4) สารประกอบเชิงซ้อนอนินทรีย์ที่เสถียร เช่น ZnS, $ZnCO_3$, Zn_2SiO_4 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1–2 นาโนเมตร)
- (5) สารประกอบเชิงซ้อนอนินทรีย์ที่เสถียร เช่น Zn-humate, Zn-cysteinate (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2–4 นาโนเมตร)
- (6) อนุภาคอนินทรีย์สารแขวนลอย เช่น $Zn^{2+}Fe_2O_3$, $Zn^{2+}SiO_2$ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 100–500 นาโนเมตร)
- (7) อนุภาคอินทรีย์สารแขวนลอย เช่น Zn^{2+} -humic acid, Zn^{2+} -organic detritus (เส้นผ่านศูนย์กลาง 100–500 นาโนเมตร)

สารประกอบสังกะสีจะถูกไฮโดรไลซ์ในสารละลายได้เป็น hydrated zinc ions, zinc hydroxide และ hydrated zinc oxides ซึ่งจะตกตะกอน ปฏิกิริยานี้จะลด pH ในน้ำ ถึงแม้ว่าในแหล่งน้ำจะมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในแหล่งน้ำก็ตาม นอกจากนี้สังกะสีจะถูกดูดซับอย่างแข็งแรงโดยเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่น้ำเป็นเบส หรือถูกดูดซับโดยซัลไฟด์ ซิลิกา อะลูมินา แมงกานีสไดออกไซด์ และกรดฮิวมิก (Huang *et al.*, 1977)

ซิงค์ซัลไฟด์เป็นรูปที่พบมากที่สุดดินตะกอนที่ขาดออกซิเจน ส่วนด้านบนของชั้นตะกอนจะมีออกซิเจน ซึ่งสังกะสีจะเกิดปฏิกิริยากับ ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสที่เป็นส่วนประกอบของดินหรือที่เคลือบอยู่บนผิวของแร่ชนิดอื่น ในน้ำสังกะสีจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิด (US EPA, 1984 อ้างถึงใน WHO, 2001) 50% ของปริมาณสังกะสีที่อยู่ในแหล่งน้ำจืดที่มีสภาวะเป็นกรดจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ที่ไม่ใช่คอลลอยด์ เช่น zinc carbonate, zinc hydroxy carbonate หรือ zinc silicate ส่วนในแหล่งน้ำจืดที่มีสภาวะเป็นเบส เกือบทั้งหมดจะถูกดูดซับด้วยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปอนุภาคคอลลอยด์ pH ของแหล่งน้ำจืดส่วนมากอยู่ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับโลหะหนักในอนุภาค การเปลี่ยนแปลง pH ไปเพียง 0.5 มีผลทำให้เกิดความแตกต่างว่าสังกะสีจะอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับหรือ ในรูปที่แตกตัว Florence (1977) พบว่าระดับ pH ช่วงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.0–6.1 ปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นพบในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ที่มีแร่ธาตุสูง ในแหล่งน้ำจืด สารอินทรีย์มีบทบาทสำคัญเนื่องจากสามารถเกิดพันธะกับสังกะสีได้ที่ pH สูง (มากกว่า 6.5) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสังกะสีในทะเลสาบขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของน้ำ

2.3.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในแหล่งน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในแหล่งน้ำ มีดังนี้

(1) คุณสมบัติทางเคมีของแคดเมียมและสังกะสี เช่น เลขออกซิเดชัน ความแข็งแรงของการเกิดพันธะของอ็อกซิเจน ขนาดของโมเลกุล จำนวนประจุ และความสามารถในการละลายของสารประกอบของแคดเมียมและสังกะสี เป็นต้น

(2) สภาวะแวดล้อมของแหล่งน้ำ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเป็นด่าง ความกระด้าง สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนรูป การละลาย และการเกิดปฏิกิริยาของแคดเมียมและสังกะสี ในแหล่งน้ำ

(3) ชนิดของลิแกนด์ในน้ำที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคดเมียมและสังกะสี ทั้งในรูปสารอนินทรีย์ HCO_3^- , F^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , HS^- และ CN^- และที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ อินทรีย์คาร์บอนที่ละลายในน้ำ (Dissolved organic carbon ; DOC) ฮิวมัส เปปไทด์ โพลีอะมิโนคาร์บอกซิเลต (Polyaminocoboxylates) เป็นต้น

(4) ปัจจัยอื่น ๆ เช่น กระบวนการทางชีวเคมีของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ จลศาสตร์ เทอร์โมไดนามิก สมดุลเคมี และค่าคงที่ของสภาวะเสถียร (stability constant)

2.4 แคดเมียมและสังกะสีในสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำสามารถรับโลหะหนักได้โดยตรงจากน้ำ โดยผ่านทางอวัยวะที่ช่วยในการหายใจ เช่น เหงือกหรือปอด ผ่านทางผิวหนัง และยังสามารถได้จากการย่อยสลายอาหารที่ปนเปื้อนโลหะหนัก จากการศึกษาพบว่าแคดเมียมในรูปอ็อกไซด์สเตรนนั้นเป็นรูปที่พบมากที่สุด สิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นแคดเมียมและสังกะสีในรูปอ็อกไซด์สเตรนจึงสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ทุกชนิด โดยผ่านกลไกการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ซึ่งการศึกษาในเหงือกปลา พบว่าที่บริเวณ apical epithelial membrane ของคลอไรด์เซลล์ที่เหงือกปลาจะมี calcium channel ซึ่งใช้ร่วมกันระหว่างแคดเมียม สังกะสี และแคลเซียม โดยแคดเมียมและสังกะสีมีกลไกการดูดซึมร่วมกับแคลเซียม เพราะมีอ็อกไซด์สเตรนใกล้เคียงกันและยังสามารถเกิดสารเชิงซ้อนได้กับลิแกนด์ชนิดเดียวกัน ดังนั้นแคดเมียม และสังกะสีจึงสามารถไปแทนที่แคลเซียมใน calmodulin ซึ่งเป็นโปรตีนจำเพาะสำหรับการส่งผ่านแคลเซียมได้ (Verboost *et al.*, 1989)

เมื่อเข้าไปสู่ร่างกายแล้วแคดเมียมและสังกะสีจะถูกดูดซับไว้ที่เนื้อเยื่อของร่างกาย โดยเนื้อเยื่อเหงือกเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการสะสมของโลหะหนักทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ ถึงแม้ว่าจะได้รับในรูปของสารละลายผสม ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักแต่ละชนิด โดยพื้นที่ผิวด้านนอกของเหงือกมีลำดับของอัตราการดูดซึมอย่างเฉพาะเจาะจง ตามคุณสมบัติทางเคมีของโลหะแต่ละชนิด และโลหะหนักจะจับกับพื้นที่ผิวด้านนอกของเหงือกด้วยพันธะอออนิก และจับกับ cytosolic ในเหงือกด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Wepener, Vuren และ Preez, 2001) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการสะสมของโลหะหนักตามอวัยวะเป้าหมาย (target organ) เช่น ตับ ไต และผิวหนัง ในปริมาณที่แตกต่างกันไปตามบทบาทและหน้าที่ของโลหะชนิดนั้น ๆ เช่น สังกะสี ซึ่งเป็นโลหะที่เป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของเซลล์ โดยทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของเอนไซม์ และโปรตีนหลายชนิด นอกจากนี้ยังเป็นสารประกอบที่สำคัญของโครงสร้างสิ่งมีชีวิตอีกด้วย แต่การได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไปกว่าความต้องการจะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้ ส่วนแคดเมียมนั้นเป็นโลหะที่ไม่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต การได้รับเข้าไปจึงก่อให้เกิดความเป็นพิษขึ้น ส่วนกลไกการขนส่งจาก epithelial cells สู่วัสดุเนื้อเยื่อชั้นนอกยังไม่ค่อยเป็นที่เข้าใจมากนัก แคดเมียมจะไม่ถูกขนส่งโดย Ca-ATPase ใน basolateral epithelial membrane เหมือนกับที่ขนส่งแคลเซียม แต่มีความเป็นไปได้ที่จะเกี่ยวข้องกับกลไกการแลกเปลี่ยน $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ซึ่งแคดเมียมอาจจะไปแทนที่แคลเซียมและส่งผ่านสู่เส้นเลือดได้ โดยการเคลื่อนที่ของโลหะผ่านช่องทางนี้ถูกควบคุมทั้งจากปัจจัยภายนอก เช่น ปริมาณแคลเซียมในน้ำ และปัจจัยภายใน เช่น ฮอรโมนส่วนสังกะสีผ่านเข้าสู่ epithelial cell โดยการแพร่เช่นเดียวกับแคดเมียม (Spry and Wood, 1989) อีออนของแคดเมียมและสังกะสีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน เช่น sulfhydryl อะมิโน คาร์บอกซิล ไฮดรอกไซด์ และออกไซด์ บนพื้นผิวของเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และโมเลกุลของเอนไซม์ นอกจากนี้ร่างกายของสิ่งมีชีวิตบางชนิดยังสามารถสังเคราะห์โปรตีน metallothionein ซึ่งสามารถช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนักได้อีกด้วย metallothioneins ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีซัลเฟอร์ปริมาณมาก ประกอบอยู่กับกรดอะมิโน เช่น cysteine ซึ่ง metallothioneins พบในสิ่งมีชีวิตทั้งบนบกและในน้ำ และในปลานั้น metallothioneins ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาถึงการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ วิธีการวิเคราะห์ metallothionein ในปลาถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้ radioimmunoassay โดยมีพื้นฐานจากการใช้ antibodies ที่เฉพาะเจาะจงกับ metallothionein ในปลา (Hogstrand and Haux, 1990) เช่นการทดลองในปลา perch (*Perca fluviatilis*) ที่จับได้ในบริเวณแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี เช่น โรงงานทำทองเหลือง พบว่าการสะสมแคดเมียม และสังกะสี ในตับมีความสัมพันธ์กับระดับ metallothionein มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนการจับถ่ายแคดเมียมและสังกะสี โดยทั่วไปปลาจะกำจัดโลหะหนักผ่านทาง เหงือก น้ำดี ปัสสาวะ ผิวหนัง และกล้ามเนื้อ ซึ่งทางที่จะกำจัดโลหะหนักมีมากกว่าทางที่จะดูดซึม แต่อย่างไรก็ตามการสะสมของโลหะหนักก็ยังมีมากกว่าการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โลหะหนักไปจับกับโปรตีนในเนื้อเยื่อนั่นเอง ในสิ่งมีชีวิตบางชนิดสามารถกำจัดโลหะหนักผ่านทาง การลอกคราบได้ ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักจากสัตว์น้ำ คือ ระยะเวลา อุณหภูมิ ปฏิสัมพันธ์ของสาร อายุของปลา กิจกรรมของเมตาบอลิซึม และครั้งชีวิตของโลหะ (Kargin, 1996)

การศึกษาการจับถ่ายแคดเมียมจากสิ่งมีชีวิตมีน้อยมาก พบว่าสิ่งมีชีวิตที่มีการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มว่าจะยังมีอยู่เป็นเวลานาน การจับถ่ายแคดเมียมออกจากร่างกายส่วนใหญ่จะผ่านทางไต ยกเว้นสิ่งมีชีวิตที่มีการลอกคราบจะสามารถจับถ่ายแคดเมียมผ่านการลอกคราบได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาผลของปฏิสัมพันธ์ของโลหะหนักในการสะสม และการกำจัด สังกะสีและแคดเมียมในเนื้อเยื่อของตับ เหงือก และกล้ามเนื้อของปลานิล พบว่า การสะสมของแคดเมียมในปลากลุ่มที่ได้รับสารผสมของแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 10 วันต่ำกว่าในกลุ่มของปลาที่ได้รับแคดเมียมเพียงชนิดเดียว และที่ทุกระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง โดยแคดเมียมจะพบในเนื้อเยื่อตับมากที่สุด รองลงมาเป็นเหงือก และกล้ามเนื้อ ตามลำดับ ส่วนการสะสมของสังกะสีในเนื้อเยื่อของปลาที่ได้รับสารผสมแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 10 วันสูงกว่าในปลากลุ่มที่ได้รับสังกะสีเพียงชนิดเดียว และที่ทุกระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง โดยสังกะสีจะพบในเนื้อเยื่อเหงือกมากที่สุด รองลงมาเป็นตับ และกล้ามเนื้อ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในกลุ่มที่ได้รับแคดเมียมเพียงอย่างเดียวมีการกำจัดแคดเมียมในเนื้อเยื่อเหงือกอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในกลุ่มที่ได้รับสารผสมแคดเมียมและสังกะสี พบว่ามีการกำจัดแคดเมียมในตับอย่างมีนัยสำคัญ และระดับแคดเมียมในเหงือกและในตับลดลง 70% และ 40% ตามลำดับ ส่วนในปลากลุ่มที่ได้รับสังกะสีเพียงชนิดเดียวพบว่ามีการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญที่เนื้อเยื่อของเหงือก และตับ ในขณะที่ในกลุ่มที่ได้รับสารผสมของแคดเมียมและสังกะสีมีการกำจัดในเนื้อเยื่อตับ อย่างเดียว และยังพบว่าสังกะสีทำให้การสะสมของแคดเมียมในเนื้อเยื่อทั้งหมดของปลานิลลดลง ส่วนแคดเมียมทำให้การสะสมของสังกะสีในเนื้อเยื่อของปลานิลเพิ่มขึ้นในสารผสมที่มีระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น และปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีก็เป็นแบบต้านฤทธิ์กัน (Kargin and Cogun, 1999) ส่วนการเกิด metallothionein และ โปรตีนชนิดอื่น ๆ ที่สามารถจับกับโลหะหนักได้ในตับของปลานิล โดยเหนี่ยวนำด้วยโลหะหนักชนิดที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น ทองแดง สังกะสีและเหล็ก และชนิดที่ไม่มีความจำเป็น เช่น แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมพบว่ากลุ่มที่ได้รับโลหะเกือบทุกชนิดมีปริมาณโลหะหนักในตับเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นสังกะสีที่ในกลุ่มควบคุมและ

กลุ่มที่ได้รับโลหะหนักมีปริมาณใกล้เคียงกัน ส่วนระดับโปรตีนในตัวของกลุ่มควบคุมจะแตกต่างจากกลุ่มที่ได้รับโลหะหนักไม่เกิน 10 % ส่วนการทดลอง cytosol ในตัวของปลานิลพบว่าในกลุ่มควบคุมมี metallothionein ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานต่ำ ประมาณ 6500 Da ทนความร้อน (80 องศาเซลเซียส) และพบมีทองแดงและสังกะสีประกอบอยู่ในโปรตีนชนิดนี้ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่ามีกลุ่ม Sulfhydryl เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อเทียบกับในกลุ่มที่ได้รับโลหะหนัก พบว่ามีเพียงแคดเมียมเท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับโปรตีนชนิดนี้ โดยพบว่ามีสารสะสมแคดเมียมใน MT pool เพิ่มขึ้น ส่วนในทองแดงและสังกะสีซึ่งปกติจะพบอยู่ในโปรตีนชนิดนี้อยู่แล้ว แต่การได้รับทองแดงและสังกะสีเพิ่มขึ้นไม่พบว่าทำให้ระดับของโลหะทั้งสองชนิดใน MT เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ทั้งตะกั่วและเหล็ก ไม่พบว่ามีสารจับกับโปรตีนชนิดใดที่ทำการศึกษานี้เลย ดังนั้น Cd-MT จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนแคดเมียมในปลานิลได้ดีที่สุด (Atti and Canli, 2003) ได้

2.5 ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียม และสังกะสี

เนื่องจากโลหะทั้งสองชนิดอยู่ในกลุ่ม IIB ซึ่งคุณสมบัติเกี่ยวกับค่าประจุอยู่ในกลุ่ม “soft metal” ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ ซัลเฟอร์ได้ดี สำหรับ Zn^{2+} ซึ่งถือว่ามีบทบาทหน้าที่ในสิ่งมีชีวิตโดยสามารถจับกับหมู่ sulphhydryl (-SH) ในเอนไซม์และโปรตีนได้ดี รวมทั้งสามารถเกิดปฏิกิริยากับไนโตรเจนและออกซิเจนใน nucleophilic group ของ nucleotides, nucleic acid และ peptides เป็นส่วนประกอบของ metalloenzymes 18 ชนิด และเอนไซม์อีก 15 ชนิดที่เป็น Zn^{2+} ion-protonated enzymes ตัวอย่างของเอนไซม์ต่าง ๆ ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 2.5

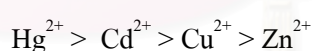
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 เอนไซม์ต่าง ๆ ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ

Enzyme or Protein	Reaction
Carbonic anhydrase	$\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$
Superoxide dismutase	$2 \text{O}_2^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$
Aldolase	aldol condensation in glycolysis cycle
DNA polymerase	Polymerization of DNA
RNA polymerase	Polymerization of RNA
Transcarboxylase	Rearrangement of carboxylates
carboxypeptidase A	hydrolysis of C-terminals of amino acids
Pyruvate carboxylase	glycolysis reaction
alcohol dehydrogenase	dehydrogenation of alcohols
Estrogen receptor	activation of estrogen-inducible genes

ที่มา Kendrick (1992)

การเกิดพิษของแคดเมียมนั้นอาจเกิดจากสาเหตุที่ แคดเมียมเข้าไปแทนที่ Zn^{2+} และมีประสิทธิภาพในการแย่งจับกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต ซึ่งเรียงลำดับความสามารถในการจับกับหมู่ sulphhydryl (-SH) ได้ตามลำดับดังนี้คือ (Viarengo and Nott, 1993)



เมื่อแคดเมียมจับกับ -SH แล้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ของโมเลกุลเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้

แคดเมียมนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึม และหน้าที่ของธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแคดเมียมมีผลในการยับยั้งเอนไซม์และโปรตีนในการทดลองในหลอดทดลอง แต่ไม่ชัดเจนว่าแคดเมียมมีผลไปยับยั้งเอนไซม์เหล่านี้ในร่างกายของสัตว์ทดลอง แต่เอนไซม์ทั้งหมดที่แสดงในตารางที่ 2.5 เป็นโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายที่จะได้รับผลกระทบจากแคดเมียม และเนื่องจากการที่แคดเมียมสามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์กับโมเลกุลอื่น เช่น โปรตีน และดีเอ็นเอ โดยแคดเมียมจะเข้าไปจับกับโปรตีนที่บริเวณกลุ่ม sulphhydryl ซึ่งจะมีผลทำให้เอนไซม์นั้นไม่สามารถ

ทำงานได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำลาย DNA โดยตรงโดยการเข้าจับแบบโดยตรง หรือผ่านทาง reactive oxygen ซึ่งในที่สุดแคดเมียมก็จะสามารถยับยั้งเมตาบอลิซึมและการขนส่ง divalent cations ชนิดอื่น เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ซีลีเนียม และแคลเซียม โดยถ้าในขณะที่มีปริมาณธาตุที่จำเป็นเหล่านี้มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตแล้ว ความเป็นพิษของแคดเมียม และปริมาณการสะสมในเนื้อเยื่อจะเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณธาตุที่จำเป็นดังกล่าวมีมากเกินไปเกินความต้องการแล้ว ก็จะสามารถป้องกันการเกิดพิษของแคดเมียมได้ โดยเฉพาะสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่สำคัญที่สุดในการปกป้องร่างกายจากแคดเมียม สังกะสีสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการป้องกันโดยเพิ่มระดับ metallothionein ก่อนที่ร่างกายจะได้รับแคดเมียม นอกจากนี้ทองแดงก็มีคุณสมบัตินี้แต่ไม่มากเท่าใดนัก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส มีผลต่อการดูดซึมแคดเมียม เหล็ก กรดแอสคอบิก และโปรตีน นอกจากนี้แคลเซียม และ thiols เช่น cysteine จะช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมได้ด้วย ซีลีเนียมก็เช่นเดียวกันช่วยมีกลไกเฉพาะตัวในการป้องกันความเป็นพิษของแคดเมียมได้

จากผลการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีในปลาหลายชนิดพบว่าสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กันได้หลายรูปแบบ เช่น ในปลา flagfish (*Jordanella floridae*) พบว่าในสารผสมของแคดเมียมและสังกะสีมีความเป็นพิษแบบอิสระต่อกัน และมีความเป็นพิษค่อนข้างน้อย แต่ก็ยังมากกว่าพิษของสังกะสีเพียงชนิดเดียว (Spehar *et al.*, 1978 อ้างถึงใน WHO, 2001) ในปลา chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) มีปฏิสัมพันธ์แบบเท่ากับผลบวก (Finlayson and Verrue, 1982 อ้างถึงใน WHO, 2001) ส่วนในปลาคูอุย (*Clarias macrocephalus*) พบว่าที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1, 1:2 และ 2:1 แสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบมากกว่าผลบวก (เสริมฤทธิ์กัน) (Pattanee Saisombat, 1983) แต่ส่วนมากมักพบว่าปฏิสัมพันธ์จะเป็นแบบต้านฤทธิ์กัน เช่น ในปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) ที่ได้รับสังกะสี (100 ไมโครกรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 17 วัน จะไปเพิ่มค่า 120-h LC₅₀ สำหรับแคดเมียมจาก 1.1 ไมโครกรัมต่อลิตรเป็น 4.1 ไมโครกรัมต่อลิตร (Anadu *et al.*, 1989) และจากการศึกษาผลของแคดเมียมและสังกะสีต่อการตายของ sperm ในปลาคูกรัสเซีย (*Clarias gariepinus*) พบว่าปริมาณของแคดเมียมที่พบใน gonads ซึ่งมาจากการสะสมจากการได้รับโลหะหนักจากน้ำหรืออาหารจะทำให้การตายของ sperm ลดลงในระหว่างที่สะสมอยู่ใน testis ความเป็นพิษของแคดเมียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อได้รับสังกะสีในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องมาจากความสมดุลระหว่างแคดเมียมและสังกะสีใน binding sites ของ sperm (Kime *et al.*, 1996) หรืออาจกล่าวได้ว่าสังกะสีสามารถป้องกันความเป็นพิษของแคดเมียม เนื่องจากสังกะสีสามารถลดการสะสมของแคดเมียมได้โดยการยับยั้งการดูดซึมแคดเมียมจากในเหงือก หรือโดยการส่งผ่านแคดเมียมไปยังอวัยวะภายใน ส่วนการที่แคดเมียมสามารถลดการสะสมของสังกะสีในเนื้อเยื่อของปลา ส่วนหนึ่งสามารถอธิบายได้โดยการแข่งขันกันระหว่างโลหะ 2 ชนิด ในการจับกับโปรตีนที่จะมารับเช่น metallothionein หรือจับกับจุดที่มีการดูดซับในเหงือก

2.6 ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีต่อปลา

โดยทั่วไปไอออนของโลหะหนักจะเข้าไปจับกับโปรตีน ขัดขวางการขนส่งกรดอะมิโนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ มีผลต่อเอนไซม์ โดยเฉพาะ DNA polymerase, Ca-ATPase, Na-K ATPase และยับยั้งการเกิด glutathione ส่วนผลกระทบที่เกิดในเซลล์นั้น โลหะหนักจะเข้าไปขัดขวางกระบวนการเมตาบอลิซึม และมีผลการสังเคราะห์ metallothionein และ DNA นอกจากนี้ยังมีผลต่อการถอดรหัสของ RNA ด้วย

2.6.1. ความเป็นพิษของแคดเมียม

อาการที่ชัดเจนของความเป็นพิษของแคดเมียมต่อปลาน้ำจืดคือความไม่สมดุลของระดับไอออนเพราะการลดลงของ Ca^{2+} , Na^+ และ Cl^- โดยแคดเมียมจะไปยับยั้งเอนไซม์ที่ใช้ในการส่งผ่านไอออน โดยแคดเมียมจะไปยับยั้งเอนไซม์ Ca-ATPase ในผนังเซลล์ของลำไส้ของปลา เช่นเดียวกับที่บริเวณเหงือกเนื่องจากพบว่าเมื่อได้รับแคดเมียมจะมีการยับยั้งการดูดซึมแคลเซียมในเหงือกของในระยะตัวเต็มวัย และในระยะตัวอ่อน ในทำนองเดียวกันพบว่าแคดเมียมจะไปยับยั้งเอนไซม์ Na/K-ATPase ในเหงือกปลา (Sylviane and Gostan, 1994) ซึ่งมีผลต่อการสร้าง ATP ในเหงือกปลาด้วย โดยพิษเฉียบพลันของแคดเมียมในปลาชนิดต่างๆ ได้ทำการรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 พิษเฉียบพลันของแคดเมียมต่อปลาชนิดต่างๆ

Organism	Size/ age	Stat/ Flow ^a	Temperature (°C)	Hardness ^d (mg/litre)	pH	Duration (h)	LC ₅₀ (mg/litre)	References
Chinook salmon(<i>Onchorhynchus thawytscha</i>)	juvenile	Flow	11-13	20-22	7.0-7.3	96	0.001 (± 0.0007)	Finlayson & Verrue (1982)
Rainbow trout (<i>Salmo gairdneri</i>)	Juvenile	Flow			6.4-8.3	96	0.0066	Hale (1977)
	5-15 g	Stat	8.5-10.7	61-65	7.4	48	2.9	Pascoe <i>et al.</i> (1986)
	5-15 g	Stat	8.5-10.7	283-317	7.4	48	5.7	Pascoe <i>et al.</i> (1986)
	5-15 g	Stat	8.5-10.7	61-65	7.4	96	1.3	Pascoe <i>et al.</i> (1986)
	5-15 g	Stat	8.5-10.7	283-317	7.4	96	2.6	Pascoe <i>et al.</i> (1986)
Fathead minnow (<i>Pimephales promelas</i>)	adult	Stat	25	20	7.5	24	1.09 (0.79-2.91)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	24	78.1 (57.2-117)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	48	1.09 (0.79-2.91)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	48	72.6 (52.7-105)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	96	1.05 (0.7-4.43)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	96	72.6 (52.7-105)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	18-22	190-210	7.7	48	0.1 (0.07-0.17)	Hall <i>et al.</i> (1986)
	adult	Stat	18-22	190-210	7.7	96	0.09 (0.07-0.14)	Hall <i>et al.</i> (1986)

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

Organism	Size/ age	Stat/ Flow ^a	Temperature (°C)	Hardness ^d (mg/litre)	pH	Duration (h)	LC ₅₀ (mg/litre)	References
Bluegill sunfish (<i>Lepomis macrochirus</i>)	adult	Stat	25	20	7.5	24	4.56 (3.64-6.08)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	48	2.76 (2.02-3.46)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	96	1.94 (1.33-2.35)	Pickering & Henderson (1966)
Goldfish (<i>Carassius auratus</i>)	adult	Stat	25	20	7.5	24	3.46 (2.85-4.82)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	48	2.62 (2.04-3.68)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	96	2.34 (1.81-3.16)	Pickering & Henderson (1966)
Guppy(<i>Poecilia reticulata</i>)	adult	Stat	25	20	7.5	24	3.37 (2.73-4.81)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	48	2.31 (1.78-3.11)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	96	1.27 (0.97-1.71)	Pickering & Henderson (1966)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	1 mM		24	10.4	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	1 mM		48	5.7	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	1 mM		72	4.3	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	1 mM		96	3.8	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	2 mM		24	33	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	2 mM		48	20.5	Canton & Slooff (1982)

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

Organism	Size/ age	Stat/ Flow ^a	Temperature (°C)	Hardness ^d (mg/litre)	pH	Duration (h)	LC ₅₀ (mg/litre)	References
Guppy(<i>Poecilia reticulata</i>)	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	2 mM		72	14.4	Canton & Slooff (1982)
	3-4 weeks	Flow ^c	23-25	2 mM		96	11.1	Canton & Slooff (1982)
Green sunfish (<i>Lepomis cyanellus</i>)	adult	Stat	25	20	7.5	24	7.84 (6.13-14.2)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	24	88.6 (74-106)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	48	3.68 (2.89-4.69)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	48	71.3 (56.3-92.2)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	20	7.5	96	2.84 (2.1-3.56)	Pickering & Henderson (1966)
	adult	Stat	25	360	8.2	96	66 (51.7-84.4)	Pickering & Henderson (1966)
Golden shiner (<i>Notemigonus crysoleucas</i>)		Flow		72.2	7.5	96	2.8 (1.9-4.3)	Hartwell <i>et al.</i> (1989)
<i>Puntius arulius</i>	2.4 g	Stat ^b	23-27	60-70	7.5	24	59.99 (58.5-61.5)	Shivaraj & Patil (1988)
	2.4 g	Stat ^b	23-27	60-70	7.5	48	45.7 (43.9-47.5)	Shivaraj & Patil (1988)
	2.4 g	Stat ^b	23-27	60-70	7.5	72	41.7 (39.7-43.)	Shivaraj & Patil (1988)
	2.4 g	Stat ^b	23-27	60-70	7.5	96	39 (36.5-41.7)	Shivaraj & Patil (1988)

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

Organism	Size/ age	Stat/ Flow ^a	Temperature (°C)	Hardness ^d (mg/litre)	pH	Duration (h)	LC ₅₀ (mg/litre)	References
Killifish (<i>Oryzias latipes</i>)	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	1 mM		48	> 2.8	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	1 mM		72	0.35	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	1 mM		96	0.35	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	2 mM		24	> 2.6	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	2 mM		48	1.8	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	2 mM		72	0.17	Canton & Slooff (1982)
	4-5 weeks	Stat ^b	23-25	2 mM		96	0.13	Canton & Slooff (1982)
Zebra fish (<i>Brachydanio rerio</i>)	6 months	Flow	19-21	1.7 mM		24	7	Canton & Slooff (1982)
	6 months	Flow	19-21	1.7 mM		48	4.2	Canton & Slooff (1982)

ที่มา : WHO (1992)

^a Stat = สถานะน้ำนิ่ง (ไม่เปลี่ยนน้ำตลอดการทดลอง) ; Flow = สถานะน้ำไหล (ความเข้มข้นของแคดเมียมถูกให้อย่างต่อเนื่อง)^b สถานะน้ำนิ่งแต่มีการเปลี่ยนน้ำทุก 24 ชั่วโมง^c สถานะที่น้ำไหลเป็นระยะ ๆ^d ความกระด้างของน้ำในรูป มิลลิกรัม CaCO₃ ต่อลิตร

ตารางที่ 2.7 ความเป็นพิษเฉียบพลัน (96-h LC₅₀) ของสังกะสีในปลาชนิดต่างๆ (WHO, 2001)

Organism	Size/age	Stat/Flow	Temp (°C)	Hardness (mg/litre)	pH	Zinc salt	Concentrations (mg/litre)	References
Chinook salmon (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	1.03 g	Stat	12	211	7.4–8.3	chloride (47.3%)	1.27 (n)	Hamilton & Buhl (1990)
	juvenile	Flow	11–13	20–21	7.1–7.2	sulfate	0.084 (m)	Finlayson & Verrue (1982)
	alevin	Flow	12	23	7.1		>0.66 (n)	Chapman (1978)
	swim-up	Flow	12	23	7.1		0.097 (n)	Chapman (1978)
	parr	Flow	12	23	7.1		0.46 (n)	Chapman (1978)
	smolt	Flow	12	23	7.1		0.7 (n)	Chapman (1978)
Coho salmon (<i>O. kisutch</i>)	alevin	Stat	12	41	7.1–8.0	chloride	0.73 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	0.47 g	Stat	12	41	7.1–8.0	chloride	0.82 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	0.63 g	Stat	12	41	7.1–8.0	chloride	1.81 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	2.7 kg	Flow	14	25	7.4	chloride	0.91 (n)	Chapman & Stevens (1978)
Rainbow trout (<i>O. mykiss</i>)	alevin	Stat	12	41	7.1–8.0	chloride	2.17 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	0.60 g	Stat	12	41	7.1–8.0	chloride	0.17 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	juvenile	Flow			6.4–8.3	acetate	0.550 (m)	Hale (1977)
	alevin	Flow	12	23	7.1		0.815 (n)	Chapman (1978)

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Organism	Size/age	Stat/Flow	Temp (°C)	Hardness (mg/litre)	pH	Zinc salt	Concentrations (mg/litre)	References
Rainbow trout (<i>O. mykiss</i>)	swim-up	Flow	12	23	7.1		0.093 (n)	Chapman (1978)
	parr	Flow	12	23	7.1		0.136 (n)	Chapman (1978)
	smolt	Flow	12	23	7.1		>0.651 (n)	Chapman (1978)
	2.7 kg	Flow	10	83	7.45	chloride	1.76 (n)	Chapman & Stevens (1978)
	juvenile	Flow	15	26	6.8	sulfate	0.43 (n)	Sinley <i>et al.</i> (1974)
	juvenile	Flow	15	333	7.8	sulfate	7.21 (n)	Sinley <i>et al.</i> (1974)
	25–70 g	Flow	12.7	137	7.3	sulfate	2.6 (m)	Meisner & Quan Hum(1987)
	160–290 g	Flow	12.9	143	7.1	sulfate	2.4 (m)	Meisner & Quan Hum(1987)
Cutthroat trout (<i>Salmo clarki</i>)	0.6 g	Stat	10	38	7.5	sulfate	0.152	Mayer & Eilersieck (1986)
	0.9 g	Stat	15	43	7.5	sulfate	0.600	Mayer & Eilersieck (1986)
	0.9 g	Stat	10	40	7.8	sulfate	0.130	Mayer & Eilersieck (1986)
	1.0 g	Stat	10	40	8.5	sulfate	0.061	Mayer & Eilersieck (1986)
	1.0 g	Stat	10	38	6.5	sulfate	0.100	Mayer & Eilersieck (1986)
	1.0 g	Stat	5	38	7.5	sulfate	0.074	Mayer & Eilersieck (1986)
						7.8	sulfate	2.61 (n)

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Organism	Size/age	Stat/Flow	Temp (°C)	Hardness (mg/litre)	pH	Zinc salt	Concentrations (mg/litre)	References
Fathead minnow (<i>Pimephales promelas</i>)	79 mg	Flow	25	220	7.5	sulfate	0.77–0.96 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	25	20	8.2	sulfate	33.4 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	25		7.5	acetate	0.88 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	25		7.5		2.33 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	15				2.55 (n)	Pickering & Henderson (1966)
Arctic grayling (<i>Thymallus arcticus</i>)	fry	Stat	12		7.1–8.0	chloride	0.32 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	alevin	Stat	12		7.1–8.0	chloride	2.92 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	0.20 g	Stat	12		7.1–8.0	chloride	0.14 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
	0.85 g	Stat	12		7.1–8.0	chloride	0.17 (n)	Buhl & Hamilton (1990)
Bluegill (<i>Lepomis macrochirus</i>)	1–2 g	Stat	25		7.5	sulfate	4.85–5.82 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	25		8.2	sulfate	40.9 (n)	Pickering & Henderson (1966)
	1–2 g	Stat	15		7.5		6.44 (n)	Pickering & Henderson (1966)
Pumpkinseed (<i>Lepomis gibbosus</i>)		Stat	28		8.0		20.1 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Organism	Size/age	Stat/Flow	Temp (°C)	Hardness (mg/litre)	pH	Zinc salt	Concentrations (mg/litre)	References
Banded killifish (<i>Fundulus diaphanus</i>)		Stat	28		8.0		19.2 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)
Striped bass (<i>Roccus saxatilis</i>)		Stat	28		8.0		6.8 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)
White perch (<i>Roccus americanus</i>)		Stat	28		8.0		14.4 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)
American eel (<i>Anguilla rostrata</i>)		Stat	28		8.0		14.5 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)
Carp (<i>Cyprinus carpio</i>)		Stat	28		8.0		7.8 (m)	Rehwoldt <i>et al.</i> (1972)
	3.2 cm	Stat*	15		7.1	sulfate	0.45–1.34 (n)	Alam & Maughan (1992)
	6.0 cm	Stat*	15		7.1	sulfate	1.64–2.25 (n)	Alam & Maughan (1992)
	47–62 mm	Stat*	15		6.3	sulfate	3.12 (n)	Khengarot <i>et al.</i> (1983)
Goldfish (<i>Carassius auratus</i>)	1–2 g	Stat	25		7.5	sulfate	6.44 (n)	Pickering & Henderson (1966)

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Organism	Size/age	Stat/Flow	Temp (°C)	Hardness (mg/litre)	pH	Zinc salt	Concentrations (mg/litre)	References
Guppy (<i>Poecilia reticulata</i>)	0.1–0.2 g	Stat	25		7.5	sulfate	1.27 (n)	Pickering & Henderson (1966)
Flagfish (<i>Jordanella floridae</i>)	juvenile	Flow	25		7.1–7.8	sulfate	1.5 (n)	Spehar (1976)
Channelfish (<i>Nuria denricus</i>)	500 mg	Stat			6.1		6.06 (n)	Abbasi & Soni (1986)
Tilapia (<i>Tilapia zilli</i>)	subadult	Stat	9.3		6.7	sulfate	33 (n)	Hilmy <i>et al.</i> (1987)
	subadult	Stat	25		6.7	sulfate	13 (n)	Hilmy <i>et al.</i> (1987)
Catfish (<i>Clarius lazera</i>)	subadult	Stat	9.3		6.7	sulfate	52 (n)	Hilmy <i>et al.</i> (1987)
	subadult	Stat	25		6.7	sulfate	26 (n)	Hilmy <i>et al.</i> (1987)

ที่มา : WHO (2001)

หมายเหตุ m = measured concentrations

n = nominal concentrations

นอกจากนี้ปลาที่ได้รับแคดเมียมเป็นระยะเวลานานพบว่า การรับออกซิเจนในเนื้อเยื่อเหงือกลดลง เกิดการตายของเซลล์ และลอกหลุดของเยื่อเมือกในเหงือก (Voyer *et al.*, 1975) และแคดเมียมยังไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ aspartate aminotransferase และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ glucose-6-phosphate dehydrogenase ในตับของปลา cunner (*Tautoglabrus adspersus*) (Macinnes *et al.*, 1977) ลดการดูดซึมกลูโคส และฟรุกโตสจากลำไส้ในปลา catfish (*Heteropneustes fossilis*) (Sastry and Subhadra, 1983) เกิดการแตกหักของกระดูกบริเวณหาง (Bengtsson *et al.*, 1975) เนื่องจากได้รับแคดเมียมนั้นมีปริมาณแคดเมียมใน vertebral column น้อยกว่าในกลุ่มควบคุม (Muramoto, 1981b) และทำให้การเจริญเติบโตของปลา white sucker (*Catostomus commersoni*) และปลา common shiners (*Notropis cornutus*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Borgmann and Ralph, 1986) นอกจากนี้ยังมีผลต่อการสืบพันธุ์และการเกิดรูปร่างที่ผิดปกติของตัวอ่อน โดยพบว่าแคดเมียมมีผลต่อการสืบพันธุ์ของปลาหางนกยูง (*Poecilia reticulata*) พบว่าทำให้ลูกปลาที่เกิดจากพ่อแม่ที่ได้รับแคดเมียมมีจำนวนลดลง (Hatakeyama and Yasuno, 1987) ส่วนปลา brook trout (*Salvelinus fontinalis*) ตัวผู้ที่โตเต็มวัยในรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 นั้นตายในขณะฤดูผสมพันธุ์ และมีผลต่อการเจริญเติบโตของลูกปลาตัวอ่อนในรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 ด้วย (Benoit *et al.*, 1976) ในปลา sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*) พบว่าจะใช้ระยะเวลาในการฟักนานกว่าปกติถึง 3 วัน และตัวอ่อนที่ฟักออกมามีขนาดสั้นกว่าในกลุ่มควบคุม (Meteyer *et al.*, 1988) และในปลา rainbow trout พบว่ามีการเกิดรูปร่างที่ผิดปกติของแกนกระดูกสันหลัง (bent tails, lordosis) และยังทำให้การเปลี่ยนแปลงของถุงไข่แดง การเจริญเติบโตและการพัฒนาในตัวอ่อนช้าลงด้วย (Stasinait, 1999)

2.6.2. ความเป็นพิษของสังกะสี

เนื่องจากสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่จะเป็นต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เพราะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางสรีรวิทยา โดยจำเป็นต้องใช้สังกะสีในการรักษาความสมดุลของ plasma membrane (Cakmak and Marschner, 1988) ใช้ในการกระตุ้นเอนไซม์มากกว่า 300 ชนิด เป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการ transcription และเป็น hormone receptors แต่สิ่งมีชีวิตนั้นต้องการสังกะสีในปริมาณที่พอเหมาะเท่านั้น ซึ่งถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการหรือน้อยเกินไปก็จะก่อให้เกิดความเป็นพิษขึ้น ความเป็นพิษเฉียบพลันของสังกะสี โดยมีระดับความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50% ในระยะเวลา 96 ชั่วโมงหรือ ค่า 96-h LC₅₀ ของปลาชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.7

พบว่าความเป็นพิษของสังกะสีมีผลทำให้การเจริญเติบโตของปลา rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) ถูกยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 1.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และเกิด

ภาวะ hyperglycaemia อย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ได้รับสังกะสีเป็นเวลา 7 วัน (Watson and McKeown, 1976) สังกะสีที่ความเข้มข้น 1.368 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้การรอดชีวิตของตัวอ่อนของปลา brook trout (*Salvelinus fontinalis*) ที่เพิ่งฟัก และลูกปลาที่อายุ 12 สัปดาห์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Holcombe *et al.*, 1979) ส่วนในปลา fathead minnow (*Pimephales promelas*) พบว่าระดับความเข้มข้นที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ว่าไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษของสังกะสีจากการคาดประมาณเป็น 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร (Norberg and Mount, 1985) ที่ระดับความเข้มข้น 0.145 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการยึดติดและความเปราะบางของไข่ ที่ความเข้มข้นของสังกะสีเป็น 0.295 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลต่อความสามารถในการฟักตัวและการรอดชีวิตของตัวอ่อนลดลง และเกิดการฟักแบบผิดปกติเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Benoit and Holcombe, 1978) โดยความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของตัวอ่อนของปลาเป็น 0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร (Magliette *et al.*, 1995) และความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการผิดปกติของรูปร่างของตัวอ่อนเป็น 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (Dawson *et al.*, 1988) ส่วนระดับความเข้มข้นที่มีผลต่อการอยู่รอดของปลานิล (*Tilapia nilotica*) หรือค่า TL_{50} ที่เวลา 24, 48, และ 72 ชั่วโมง ของ Zn^{2+} จาก $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ มีค่าเป็น 86.41, 74.76 และ 65.55 มิลลิกรัมต่อลิตร (จารุวรรณ สมศิริ, 2523)

2.6.3. ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีต่อปลา

2.6.3.1. ปัจจัยทางกายภาพและเคมี

ปัจจัยทางกายภาพและเคมีนั้นมีผลต่อปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ การสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต รวมถึงความเป็นพิษ มีดังนี้

(1) อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนในน้ำ

อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงและทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากอุณหภูมิของร่างกายสัตว์น้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของน้ำและสภาพแวดล้อมที่มันอาศัยอยู่ โดยปกติอุณหภูมิภายในตัวปลาจะแตกต่างไปจากอุณหภูมิของน้ำเพียง 0.5-1 องศาเซลเซียส และปลาจะสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำในช่วงจำกัด เนื่องจากอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำนั้นมีความสำคัญต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตเช่น การหายใจ, การว่ายน้ำ, การกิน, การย่อยของอาหาร, การขับถ่ายและการเต้นของหัวใจ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง Metabolic rate ในปลาแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับขบวนการทางชีวเคมีภายใน

ร่างกายและสภาพแวดล้อม เช่น ปลาขนาดใหญ่จะมี Metabolic rate น้อยกว่าปลาที่มีขนาดเล็ก โดยเหงือกปลาจะเป็นอวัยวะที่สำคัญช่วยในการถ่ายเทและรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกาย การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็ว (Temperature shock) สามารถทำให้เกิดอันตรายโดยตรงต่อสัตว์น้ำได้ เช่น ทำให้ระบบการควบคุมขับถ่ายน้ำและแร่ธาตุภายในร่างกาย (Osmoregulatory system) ผิดปกติไปทำให้ร่างกายอ่อนแอและตายได้ การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีอุณหภูมิสูงหรือระบบหล่อเย็น (Cooling system) จะมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำบริเวณดังกล่าว และส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารในระดับสูงขึ้นไป อุณหภูมิยังมีผลต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพของแหล่งน้ำหลายประการ เช่น ความหนาแน่น, ความหนืด, ความสามารถในการละลายก๊าซออกซิเจน, การแบ่งชั้นของน้ำ, การหมุนเวียนของแร่ธาตุต่างๆ และกระแสน้ำ เป็นต้น ผลกระทบที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงคือ ปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำจะลดลง ขณะเดียวกันสัตว์น้ำต้องการออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดปัญหาขาดแคลนออกซิเจนขึ้นได้และการทำงานของแบคทีเรียและจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในการย่อยสลายสิ่งปฏิกูลต่างๆ ในน้ำก็จะเพิ่มขึ้นและต้องการใช้ออกซิเจนมากขึ้นก็จะทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจนเร็วขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการเน่าเสีย นอกจากนี้ชนิดปริมาณและสัดส่วนของประชากรจะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิ เช่น การอพยพย้ายถิ่น การวางไข่ การฟักไข่ และเป็นตัวของสัตว์น้ำ จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำยังมีผลทำให้พืชน้ำโดยเฉพาะแพลงก์ตอนมีการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณของสาหร่ายหลายชนิด เช่น อุณหภูมิสูงจะมีพืชน้ำเงินแกมเขียวมาก จะไม่ก่อประโยชน์ต่อสัตว์น้ำบางชนิดอาจทำให้เป็นพิษแก่สัตว์น้ำได้ นอกจากนี้หากมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดการเน่าเสียและมีกลิ่นเหม็นย่อมมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้เช่นเดียวกัน อุณหภูมินอกจากมีผลต่อสัตว์น้ำโดยตรงอาจมีผลทางอ้อมเช่น อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้สารพิษประเภทต่างๆ เช่น ยาปราบศัตรูพืชและโลหะหนักมีความรุนแรงมากขึ้น โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะช่วยเพิ่มการดูดซึมแคดเมียมจากในน้ำ (Douben, 1989) เนื่องจากอุณหภูมิไปกระตุ้นการหายใจ นอกจากนี้อุณหภูมิและออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีผลต่อกระบวนการทางเคมีในแหล่งน้ำ และดินตะกอน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการปลดปล่อยแคดเมียมและสังกะสีให้อยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถนำไปใช้ได้ เช่น ทำให้เกิดการออกซิเดชันหรือรีดักชันของแคดเมียมและสังกะสี ซึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อปลาในน้ำจืด (Roch and Maly, 1979) และน้ำเค็ม (Eisler, 1971) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาในปลา *Tilapia zilli* ที่ระดับอุณหภูมิ 9.3 และ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า 96h-LC₅₀ ของสังกะสีเป็น 33 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในปลาคูค *Clarius lazera* พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่า 96h-LC₅₀ ลดลงจาก 52 เป็น 26 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hilmy et al., 1987 อ้างถึงใน WHO, 2001) นอกจากนี้ยังพบว่าผลของอุณหภูมิต่อความเป็นพิษของสังกะสีนั้นจะเฉพาะเจาะจงกับชนิดของสิ่งมีชีวิต เช่นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความเป็นพิษของสังกะสีเพิ่มขึ้นในปลา goldfish (*Carassius auratus*) และปลา bluegill (*Lepomis*

macrochirus) แต่กลับไม่ผลต่อความเป็นพิษของสังกะสีในปลา golden shiners (*Notemigonus crysoleucas*) หรือปลา rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Smith and Heath, 1979) และการที่น้ำมีปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นจะช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อปลา mummichog (*Fundulus heteroclitus*) ลงได้นอกจากนี้ยังพบว่าในน้ำจืดแคดเมียมมีความเป็นพิษมากกว่าในน้ำเค็มถึง 10 เท่า (Voyer, 1975)

(2) ความกระด้างของน้ำ

เนื่องจากระดับความกระด้างของน้ำนั้นมีผลทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ โดยโลหะหนักนั้นจะจับกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำ ซึ่งทำให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำมาใช้ได้ นอกจากนี้ Mg^{2+} และ Ca^{2+} สามารถเข้าไปแย่งจับที่ active site ของเนื้อเยื่อแทนโลหะหนัก ทำให้โลหะหนักสามารถเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้น้อยลง จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ Ca^{2+} จะไปลดการดูดซึมของแคดเมียมผ่านเหงือกปลา ลดการสะสมแคดเมียม และช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อปลา (Wicklund, 1990) ซึ่งสามารถจำแนกกลไกของแคลเซียมในการลดการดูดซึมแคดเมียมได้ 2 แบบ คือ อย่างแรก แคลเซียมจะไปยับยั้งการดูดซึมแคดเมียมสู่เนื้อเยื่อเหงือก ในขณะที่อย่างที่สองจะเกี่ยวข้องกับการปรับตัวเพื่อตอบสนองต่อปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้แมกนีเซียมก็สามารถลดการดูดซึมแคดเมียมผ่านเหงือกปลาได้เช่นกัน แต่จะต้องใช้ปริมาณมากกว่าแคลเซียมถึง 5 เท่า (Part *et al.*, 1985) นอกจากนี้แคลเซียมมีผลไปยับยั้งการดูดซึมสังกะสีได้ นอกจากนี้ยังพบว่าสังกะสีมีผลช่วยลดการดูดซึมแคดเมียมผ่านเหงือกอีกด้วย (Wicklund, 1990) โดยการศึกษาในปลาหลายชนิดพบว่าความกระด้างมีผลต่อความเป็นพิษของแคดเมียมโดย ความกระด้างที่เพิ่มขึ้นจาก 20 และ 360 มิลลิกรัม $CaCO_3$ ต่อลิตร ทำให้ค่า 96-h LC_{50} ของแคดเมียมในปลา fathead minnows (*Pimephales promelas*) เพิ่มขึ้นจาก 1.05 เป็น 72.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pickering and Henderson, 1966 อ้างถึงใน WHO, 1992) เช่นเดียวกับการทดลองในปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) ที่มีค่า 48-h LC_{50} เพิ่มขึ้นจาก 91 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ความกระด้าง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 3700 ไมโครกรัมต่อลิตรที่ความกระด้าง 320 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่านอกจากความกระด้างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นพิษลดลงแล้ว ปลาที่อยู่ในน้ำที่มีความกระด้างสูงสามารถทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมได้สูงขึ้นด้วย (Calamari *et al.*, 1980) นอกจากนี้ความกระด้างที่เพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้ระดับที่ไม่ทำให้เกิดการตายและไม่เกิดพฤติกรรมที่ผิดปกติ หรือ no-observed-adverse-effect level (NOAEL) ในปลา zebra fish (*Brachydanio rerio*), ปลา killifish (*Oryzias latipes*) และ สำหรับปลาหางนกยูง (*Poecilia reticulata*) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Canton and Slooff, 1982 อ้างถึงใน WHO, 1992) ส่วนการศึกษาผลของความกระด้างต่อความเป็นพิษของสังกะสีก็พบว่าความเป็นพิษของสังกะสีจะลดลง

เมื่อความกระด้างของน้ำเพิ่มมากขึ้น (Everall *et al.*, 1989) เช่นเดียวกับที่พบในแคดเมียม โดย Sayer *et al.* (1989) ทดลองให้สังกะสีกับ yolk-sac ของลูกปลา brown trout (*Salmo trutta*) ที่ระดับความเข้มข้น 4.9, 9.8 และ 19.5 ไมโครกรัมต่อลิตร (75, 150 และ 300 นาโนโมลต่อลิตร) ที่ pH 4.5 และความเข้มข้นของแคดเมียม เป็น 20 และ 200 ไมโครโมล เป็นเวลา 30 วัน พบว่ากลุ่มที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมต่ำจะมีการตายสูง (70–100%) ของสังกะสีทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น ส่วนในกลุ่มที่ความเข้มข้นของแคดเมียมสูง ไม่มีการตายเกิดขึ้น และพบว่าสังกะสีนั้นมีผลต่อการดูดซึมเกลือแร่ในปลาอย่างมีนัยสำคัญ

(3) สารประกอบอินทรีย์

อนุภาคของสารอินทรีย์ในน้ำสามารถนำพาไอออนของแคดเมียมและสังกะสีออกจากน้ำได้ เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ของแคดเมียมและสังกะสี ซึ่งอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้น ความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยสารอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ (เช่น NTA EDTA เป็นต้น) ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นอาจตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมก็จะแตกตัวออกจากสารประกอบเข้าสู่แหล่งน้ำได้อีก เช่นพบว่าการใช้ chelating agents เช่น EDTA และ DTPA สามารถป้องกันผลกระทบจากแคดเมียมในปลาใน (*Cyprinus carpio*) ได้ (Muramoto, 1981a) และ EDTA สามารถลดการสะสมแคดเมียมในลูกปลานิลได้อย่างมีนัยสำคัญ ถึง 34% และในการ rinse ด้วย EDTA เพื่อกำจัด surface-bound พบว่าลูกปลาที่ได้รับแคดเมียมมีปริมาณแคดเมียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับในกลุ่มที่ไม่มีการ rinse (Siriwardena, Rana and Baird, 1995)

(4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

การตกตะกอนของแคดเมียมและสังกะสีกับอนุภาคอื่นที่มีในแหล่งน้ำ เช่น คาร์บอเนต เหล็กไฮดรอกไซด์ และอนุภาคสารอินทรีย์ จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ยังมีผลต่อสภาวะการละลายของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเช่นกัน ในแหล่งน้ำที่มีความเป็นกรดทำให้แคดเมียมและสังกะสีละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้น และอยู่ในรูปที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้มากที่สุด เช่น pH ที่ลดลงมีผลทำให้ความเป็นพิษของสังกะสีปลา brown trout (*Salmo trutta*) เพิ่มขึ้นมากกว่า 80% (Reader *et al.*, 1989) พบว่าปลาที่รับสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 281 ไมโครกรัมต่อลิตรที่ pH 6.5 ในน้ำอ่อน (แคดเมียม 22 ไมโครโมลต่อลิตร) จะมีการตายลดลงในช่วงที่ได้รับสังกะสีเป็นเวลา 30 วัน ในขณะที่ปลาที่ได้รับสังกะสีความเข้มข้น 0.316 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ pH 4.5 จะมีการตายเพิ่มขึ้นมากกว่า 80%

2.6.3.2. ปัจจัยทางชีวภาพ

ปัจจัยทางชีวภาพที่มีผลต่อโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตนั้นอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายในของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นเอง หรือปัจจัยที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่อยู่ในแหล่งน้ำ ปัจจัยทางชีวภาพมีดังต่อไปนี้

(1) อายุ

อายุของสิ่งมีชีวิตนั้นมีผลต่อปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีที่มีอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถลดหรือเพิ่มปริมาณที่มีได้ พัฒนาการของร่างกายสิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น การลอกคราบ (ในกลุ่ม crustaceans) ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในร่างกายเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนการหาความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตในระยะต่าง ๆ ของปลา mummichog (*Fundulus heteroclitus*) พบว่าไข้อทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมสูงมากที่สุด ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 32 มิลลิกรัมต่อลิตรทำให้ไข่มไม่ฟักถึง 54% ในขณะที่ในกลุ่มควบคุมมีไข่มไม่ฟักเพียง 17% ส่วนในระยะตัวอ่อนมีความไวต่อการตอบสนองต่อแคดเมียมมากที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองกับปลา Atlantic silverside (*Menidia menidia*) (Middaugh and Dean, 1977), ปลา fathead minnow (*Pimephales promelas*) (Pickering and Gast, 1972) เช่นเดียวกับผลที่ได้ของสังกะสี ที่พบว่าปลา minnows (*Phoxinus phoxinus*) ที่มีวัย 1 ปี มีความไวต่อการตอบสนองต่อสังกะสีมากกว่าตัวเต็มวัย ส่วนการเจริญเติบโตจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้น 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร (Bengtsson, 1974) นอกจากนี้ขนาดของปลาไน (*Cyprinus carpio*) ที่เพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้ความเป็นพิษของสังกะสีลดลงด้วย (Alam and Maughan, 1992 อ้างถึงใน WHO, 2001)

(2) เพศ

พบว่าหลังจากได้รับสังกะสีเป็นเวลา 30 วัน การเจริญเติบโตของปลาเพศเมีย (อายุ 100 วัน) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.051 มิลลิกรัมต่อลิตร (Spehar, 1976 อ้างถึงใน WHO, 2001) ส่วนความเป็นพิษของสังกะสีต่ออวัยวะสืบพันธุ์ของปลา *Puntius conchoniis* ซึ่งได้รับสังกะสีที่ความเข้มข้น เศษ 1 ส่วน 3 ของค่า 96-h LC₅₀ (ซึ่งมีค่าประมาณ 33.26 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าในปลาเพศผู้จะมีการโป่งพองของเส้นเลือด และมีการตายของเซลล์เนื้อเยื่อในรังไข่ และการแตกของ seminiferous tubules นอกจากนี้ในปลาเพศเมียพบว่า oocytes ถูกทำลาย (Kumar and Pant, 1984)

(3) การปรับตัวของสิ่งมีชีวิต

หลังจากได้รับ Cd^{2+} ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ลูกปลา (*Oreochromis mossambicus*) ที่เคยได้รับ Cd^{2+} และ Cu^{2+} มาก่อนสามารถรอดชีวิตได้มากกว่าในกลุ่มที่ไม่เคยได้รับโลหะหนักมาก่อน และกลุ่มที่เคยได้รับ Cd^{2+} และ Cu^{2+} มาก่อนมีการสังเคราะห์ MT มากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับโลหะหนัก 1.8 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า MT เกี่ยวข้องกับการลดความเป็นพิษของโลหะหนักในปลา tilapia (Wu and Hwang, 2003) เช่นเดียวกับที่ผลการทดลองในปลา scorpionfish (*Scorpaena guttata*) ที่ได้รับแคดเมียมแบบเรื้อรัง พบว่าปลาจะมีความทนทานต่อแคดเมียมได้มากขึ้น (Brown, Steven and Hershelman, 1990) นอกจากนี้การได้รับแคดเมียมความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตรสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการคืนสู่สภาพสมดุลของแคลเซียมในปลา tilapia (*Oreochromis mossambicus*) ได้โดยปลาสามารถปรับฟื้นตัวจากสภาวะที่ขาดแคลเซียมเป็นเวลา 35 วัน เนื่องจากแคดเมียมมีผลต่อฮอร์โมน prolactin ทำให้เกิดการกระตุ้นการดูดซึม Ca^{2+} และลดการแพร่ของ Ca^{2+} ออกจากเหงือกปลา ร่วมกับ cortisol ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใน chloride cells และกระตุ้นการสังเคราะห์ metallothionein ในตับ ไต และในเหงือก (Huiguang, 1989)

2.7 ชีวิตบางประการของปลานิล

ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่ง อยู่ในตระกูลซิกลิดี (*Cichlidae*) มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกา พบทั่วไปตามหนอง บึง และทะเลสาบ ในประเทศชูดาน ยูกันดา แทนแกนยีกา โดยที่ปลาชนิดนี้เจริญเติบโตเร็วและเลี้ยงง่าย เหมาะสมที่จะนำมาเพาะเลี้ยงในบ่อได้เป็นอย่างดีได้รับความนิยมและเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในภาคพื้นเอเชีย แม้แต่ในสหรัฐอเมริกาที่นิยมเลี้ยงปลาชนิดนี้

ปลานิลมีนิสัยชอบอยู่รวมกันเป็นฝูง (ยกเว้นเวลาสืบพันธุ์) มีความอดทนและปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี จากการศึกษาพบว่าปลานิลทนต่อความเค็มได้ถึง 20 ส่วนในพัน ทนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ได้ดีในช่วง 6.5-8.3 และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส พบว่าปลานิลปรับตัวและเจริญเติบโตได้ไม่ดีนัก ทั้งนี้เป็นเพราะถิ่นกำเนิดเดิมของปลาชนิดนี้ อยู่ในเขตร้อน

รูปร่างลักษณะของปลานิลคล้ายกับปลาหมอเทศแต่ลักษณะพิเศษของปลานิลมีดังนี้คือ ริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน ที่บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ตามลำตัวมีลายพาดขวางจำนวน 9-10 แถบ

นอกจากนี้ลักษณะทั่วไปมีดังนี้ ครีบหลังมีเพียง 1 ครีบ ประกอบด้วยก้านครีบแข็งและก้านครีบอ่อน เป็นจำนวนมาก ครีบกันประกอบด้วยก้านครีบแข็งและอ่อนเช่นกันมีเกล็ดตามแนวเส้นข้างตัว 33 เกล็ด ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม ที่กระดุกแก้มมีมีจุดสีเข้มอยู่จุดหนึ่ง บริเวณส่วนอ่อนของครีบหลัง ครีบกัน และครีบหางนั้นจะมีจุดสีขาวและสีดำตัดขวางแลดูคล้ายลายข้าวตอกอยู่โดยทั่วไป ลักษณะรูปร่างภายนอกของปลานิลตัวผู้และตัวเมีย จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก แต่จะสังเกตลักษณะเพศได้ก็โดยการดูอวัยวะเพศที่บริเวณใกล้กับช่องทวาร โดยตัวผู้จะมีอวัยวะเพศในลักษณะเรียวยาวยื่นออกมา แต่สำหรับตัวเมียมีลักษณะเป็นรูค่อนข้างใหญ่และกลม ขนาดปลาที่จะดูเพศได้ชัดเจนนั้นต้องเป็นปลาที่มีขนาดยาวตั้งแต่ 10 เซนติเมตรขึ้นไป สำหรับปลาที่มีขนาดโตเต็มที่นั้น เราจะสังเกตเพศได้อีกวิธีหนึ่งด้วยการดูสีที่ลำตัว ซึ่งปลาตัวผู้ที่ได้วางและลำตัวจะมีสีเข้มต่างกับตัวเมีย ยิ่งเมื่อถึงฤดูผสมพันธุ์สีจะยิ่งเข้มขึ้น

การผสมพันธุ์และวางไข่ ปลานิลสามารถผสมพันธุ์ได้ตลอดปี โดยใช้เวลา 2-3 เดือนต่อครั้ง แต่ถ้าอาหารเพียงพอและเหมาะสม ในระยะเวลา 1 ปี จะผสมพันธุ์ได้ 5-6 ครั้ง ขนาดอายุและช่วงการสืบพันธุ์ของปลาแต่ละตัวจะแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม และสภาพทางสรีรวิทยาของปลาเอง การวิวัฒนาการของรังไข่และถุงน้ำเชื้อของปลานิล พบว่าปลานิลจะมีไข่และน้ำเชื้อเมื่อมีความยาว 6.5 เซนติเมตร โดยปกติปลานิลที่ยังโตไม่ได้ขนาดผสมพันธุ์หรือสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม เพื่อการวางไข่ ปลาจะรวมกันอยู่เป็นฝูง แต่ภายหลังที่ปลามีขนาดที่จะสืบพันธุ์ได้ ปลาตัวผู้จะแยกออกจากฝูงแล้วเริ่มสร้างรัง โดยเลือกเอาบริเวณเชิงลาดหรือก้นบ่อที่มีระดับน้ำลึกระหว่าง 0.5-1 เมตร ซึ่งตัวเมียจะวางไข่ครั้งละ 10-15 ฟอง ปริมาณไข่ที่วางรวมกันแต่ละครั้งมีประมาณ 50-600 ฟอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของแม่ปลา เมื่อปลาวางไข่แต่ละครั้งปลาตัวผู้จะว่ายน้ำไปเหนือไข่พร้อมกับปล่อยน้ำเชื้อลงไป ทำเช่นนี้จนกว่าการผสมพันธุ์แล้วเสร็จ โดยใช้เวลา 1-2 ชั่วโมง ปลาตัวเมียเก็บไข่ที่ได้รับการผสมแล้วอมไว้ในปากและว่ายน้ำออกจากรัง ไข่ปลาที่อมไว้ด้วยปลาตัวเมียจะวิวัฒนาการขึ้นตามลำดับ โดยแม่ปลาจะขยับปากให้น้ำไหลเข้าออกในช่องปากอยู่เสมอ เพื่อช่วยให้ออมไว้ได้รับน้ำที่สะอาด ทั้งยังเป็นการป้องกันศัตรูที่จะมากินไข่ ระยะเวลาที่ปลาตัวเมียใช้ฟักไข่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของน้ำ โดยในน้ำที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ไข่จะวิวัฒนาการเป็นลูกปลาวัยอ่อนภายใน 8 วัน ซึ่งในระบะเวลาดังกล่าวนี้ถุงอาหารยังไม่ยุบ และจะยุบเมื่อลูกปลามีอายุครบ 13-14 วัน นับจากวันที่แม่ปลาวางไข่ ในช่วงระยะเวลาที่ลูกปลาฟักออกเป็นตัวใหม่ ๆ ลูกปลานิลวัยอ่อนจะเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม โดยว่ายวนเวียนอยู่บริเวณหัวของแม่ปลา และเข้าไปหลบซ่อนอยู่ในช่องปากเมื่อมีภัยหรือถูกรบกวน โดยปลานิลด้วยกันเอง เมื่อถุงอาหารยุบลง ลูกปลานิลจะเริ่มกินอาหารจำพวกพืชและไรน้ำขนาดเล็กได้ และหลังจาก 3 สัปดาห์ไปแล้ว ลูกปลาก็จะกระจายแตกฝูงไปหากินเลี้ยงตัวเองได้โดยลำพัง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. ขั้นตอนเตรียมการทดลอง

3.1.1 การเตรียมน้ำเพื่อการทดลอง

นำน้ำประปาฆ่าเชื้อในถังพลาสติกขนาด 150 ลิตร และเติมอากาศตลอดเวลาอย่างน้อย 7 วัน เพื่อไล่คลอรีนให้หมด ก่อนใช้เลี้ยงลูกปลานิลก่อนการทดลอง ใช้น้ำที่เตรียมด้วยวิธีการเดียวกันนี้ ในการเตรียมสารละลายโลหะหนักและใช้ในการทดลองพิษเฉียบพลันทั้งนี้ทำการวิเคราะห์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลาย ความเป็นด่าง ความกระด้าง ปริมาณ แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และฟอสเฟต โดยวิธีมาตรฐานของ APHA and WEF (1995) เพื่อ ตรวจสอบคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองว่ามีสภาพใกล้เคียงกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันจะต้องทำการ ปรับสภาพของน้ำที่ใช้ในการทดลองให้ใกล้เคียงกันที่สุด เนื่องจากพารามิเตอร์ของน้ำทางเคมีและ กายภาพดังกล่าว มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นพิษของโลหะหนัก และการตายของสัตว์ทดลอง

3.1.2 การเตรียมลูกปลานิลเพื่อการทดลอง

ลูกปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดไม่เกิน 3 เซนติเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทกรุงเทพฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เลี้ยงลูกปลาไว้ในตู้ กระจกในห้องปฏิบัติการ ให้เคยชินกับสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง (acclimation) เป็นเวลา อย่างน้อย 7 วัน โดยการเลี้ยงปลาได้ให้พองอากาศในน้ำตลอด 24 ชั่วโมง เปลี่ยนน้ำทุกๆ 4 วัน และ ให้อาหารวันละ 1 ครั้ง โดยใช้ไรน้ำเค็ม (*Artemia salina*) และงดให้อาหารก่อนการทดลอง 1 วัน และไม่ให้อาหารและอากาศเลยในระหว่างการทดลอง

3.1.3 การเตรียมภาชนะสำหรับการทดลอง

นำเครื่องแก้วทุกชิ้นที่ใช้ในการทดลอง มาแช่ในสารละลายกรดไนตริกร้อยละ 10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า และแช่ด้วยน้ำกลั่นอีก 24 ชั่วโมง เพื่อขจัดโลหะหนักที่ สามารถดูดซับที่ผิวแก้วได้ (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2529 อ้างถึงใน โชคชัย ยะชูศรี, 2536)

3.1.4 การเตรียมสารละลายโลหะหนัก

เตรียมสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ ชนิด AR grade โดยมีความเข้มข้นของแคดเมียม และซิงค์เท่ากับ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ในน้ำที่ใช้สำหรับการทดลอง แล้วเก็บสารละลายทั้ง 2 ชนิดนี้ในขวด polyethylene เพื่อใช้เป็น stock solution ในการเตรียมสารละลายเจือจางต่อไป

การเตรียมสารละลายที่ใช้ทดสอบนั้น เตรียมจากการเจือจางด้วยน้ำที่เตรียมจากข้อ 3.1.1 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ตามสมการ (3.1)

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเบื้องต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ต้องการ

V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนักเบื้องต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะหนักที่ต้องการ

โดยก่อนทำการทดลองจะทำการวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียมและซิงค์ที่ละลายในน้ำที่ใช้ในการทดลองที่เตรียมได้จาก stock solution เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน เพื่อให้ทราบถึงระดับความเข้มข้นที่แท้จริงที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ด้วย Flame Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.5 การเตรียมสารละลายสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำ

เตรียมสารละลายเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำที่ใช้ในการทดลองตามวิธีมาตรฐานของ APHA and WEF (1995)

3.2. วิธีการทดลอง

การทดลองหาความพิษเฉียบพลันของแคดเมียม และซิงค์ ในสภาพสารละลายเดี่ยวที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ภายในระยะเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และการทดลองหาความเป็นพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมรวมของแคดเมียมและซิงค์ที่ระดับ

อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 24, 28 และ 34 องศาเซลเซียสโดยใช้วิธีการทดสอบชีววิเคราะห์แบบน้ำนิ่ง (Static bioassay) สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.2.1. การทดลองขั้นเริ่มต้น (screening test) เพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในสารละลายเพียงชนิดเดียวที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 0 ถึง 100 ในระยะเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้จะเตรียมสารละลายของโลหะที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ 5 ระดับ และ 1 ชุดควบคุม และทำการทดลองเปลี่ยนชุดความเข้มข้นใหม่ จนกว่าจะได้ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะสามารถไปใช้ทดลองในขั้นละเอียด

3.2.2. การทดลองขั้นละเอียด (Full scale test) เป็นการหาระดับความเข้มข้นของสารละลายของโลหะหนักที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ในระยะเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยนำช่วงความเข้มข้นซึ่งได้จากการทดลองขั้นเริ่มต้น มากำหนดให้ละเอียดยิ่งขึ้น โดยใช้ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ และ 1 ชุดควบคุม

3.2.3. การทดลองหาพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมร่วมของแคดเมียมและสังกะสี โดยใช้ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมของแคดเมียมและสังกะสีจากการทดลองขั้นละเอียด นำมาผสมกันที่สัดส่วนความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี ที่ระดับต่าง ๆ และที่ระดับอุณหภูมิ 24, 28 และ 32 องศาเซลเซียส

รูปแบบการทดลองจะเป็นแบบ Completely randomize design โดยมีระดับความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสีและอุณหภูมิเป็นปัจจัย (Factors) โดยแต่ละชุดการทดลองใส่ลูกปลานิลความเข้มข้นละ 10 ตัวแต่ละระดับความเข้มข้น ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และ 1 ชุดควบคุม สังเกตลักษณะและอาการของปลาที่ตอบสนองต่อสารพิษ และบันทึกจำนวนลูกปลานิลที่ตายที่ระยะเวลาต่าง ๆ คือ 3, 6, 12, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง โดยถือหลักเกณฑ์การตัดสินว่าปลาตายจากการเปิดปิดของกระพุ้งแก้ม (operculum) ลึกลงและไม่แสดงอาการตอบสนองเมื่อใช้เข็มเขี่ยตะกั่วปลา นำปลาที่ตายออกจากโหลทุกครั้งที่ตรวจพบ

3.3. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การทดสอบพิษเฉียบพลันต้องทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในช่วงก่อนทำการทดลอง และหลังการทดลอง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่

3.3.1 คุณภาพน้ำทางเคมี วิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐานของ APHA and WEF (1995) ดังนี้คือ

- ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ วัดโดยใช้ DO meter ของ HANNA Instrument (HI 9142)
- ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ วัดโดยใช้ pH meter ของ HANNA Instrument (HI 8424)
- ความเป็นด่างของน้ำ วิเคราะห์โดย ชุดทดสอบความเป็นด่าง (Total Alkalinity Test Kit) ของ AQUA-VBC
- ปริมาณแอมโมเนียที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดย ชุดทดสอบแอมโมเนียม (Ammonium Test Kit) ของ AQUA-VBC
- ปริมาณไนไตรท์ที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดย ชุดทดสอบไนไตรท์ (Nitrite Test Kit) ของ AQUA-VBC
- ปริมาณไนเตรทที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดยวิธี Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method
- ปริมาณฟอสเฟตที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดยวิธี Ascorbic Acid Method
- ปริมาณแคดเมียมที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดยใช้ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ของ VARIAN (SpectrAA 220 FS) ตามวิธีของ APHA and WEF (1995)
- ปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำ วิเคราะห์โดยใช้ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ของ VARIAN (SpectrAA 220 FS) ตามวิธีของ APHA and WEF (1995)

3.3.2 คุณภาพน้ำทางกายภาพ

- อุณหภูมิของน้ำ วิเคราะห์โดยใช้ เทอร์โมมิเตอร์

3.4. การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาค่า $96h-LC_{50}$ จากการทดสอบพิษเฉียบพลันของสารละลายแคดเมียม สังกะสี ใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยโพรบิต ซึ่งจะรายงานค่า LC_{50} ในช่วงเวลาต่าง ๆ และช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการศึกษาค่าของอุณหภูมิต่อความเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่สัดส่วนต่างๆ เพื่อคำนวณพิษสูงสุดโดย Response Surface Analysis (Mason *et al.*, 2003)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 พิษเฉียบพลันของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล

4.1.1. พิษเฉียบพลันของแคดเมียมต่อลูกปลานิล

ที่ระดับความเข้มข้น 5 – 25 mg Cd/l ไม่พบการตายของลูกปลานิลที่เวลา 24 ชั่วโมง แต่ที่ 48 ชั่วโมงเริ่มปรากฏว่ามีการตายเกิดขึ้น ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ที่เวลา 96 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 13.08 และมีพิสัยอยู่ในช่วง 9.94 ถึง 16.26 mg Cd/l (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันของแคดเมียมต่อลูกปลานิล

ความเข้มข้น(mg Cd/l)	จำนวนการตายสะสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ (%)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ชุดควบคุม	0	10 ± 1.15	10 ± 1.15	10 ± 1.15
5	0	5 ± 0.7	25 ± 2.12	35 ± 2.12
10	0	12.5 ± 0.95	22.5 ± 0.95	32.5 ± 0.95
15	0	10 ± 0	37.5 ± 1.5	55 ± 0.57
20	0	17.5 ± 1.25	45 ± 0.57	65 ± 1
25	0	26.7 ± 0.57	30 ± 0	36.7 ± 0.57
ค่า LC ₅₀ ที่ 96 ชั่วโมง	13.08 mg Cd/l			
ช่วงพิสัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %	9.94 – 16.26 mg Cd/l			

หมายเหตุ ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ

4.1.2. พิษเฉียบพลันของสังกะสีต่อลูกปลานิล

ที่ระดับความเข้มข้น 30 - 50 mg Zn/l พบว่าเริ่มปรากฏว่ามีการตายของลูกปลานิลเกิดขึ้นที่เวลา 24 ชั่วโมง ระดับความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ที่เวลา

96 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 40.49 และมีพิสัยอยู่ในช่วง 37.99 ถึง 43.07 mg Zn/l (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันของสังกะสีต่อลูกปลานิล

ความเข้มข้น(mg Cd/l)	จำนวนการตายสะสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ (%)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
ชุดควบคุม	0	0	0	0
30	6.7±1.15	10±1	16.7±0.57	16.7±0.57
35	15±0.7	15±0.7	30±2.82	30±2.82
40	13.4±1.52	26.7±0.57	30±1	33.4±1.52
45	25±2.12	55±2.12	75±2.12	80±1.41
50	56.7±2.08	73.4±1.15	76.7±0.57	76.7±0.57
ค่า LC ₅₀ ที่ 96 ชั่วโมง	40.49 mg Zn/l			
ช่วงพิสัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %	37.99 – 43.07 mg Zn/l			

หมายเหตุ ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ

4.2 พิษเฉียบพลันของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิล

จากผลการศึกษาระดับพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสี โดยใช้ช่วงความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 ภายในระยะเวลา 96 ชั่วโมงมาผสมกันทุกความเข้มข้น ดังตารางที่ 4.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่างๆ (24 องศาเซลเซียส, 28 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.3 การผสมสารละลายแคดเมียมและสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ค่าเป็นแคดเมียม : สังกะสี (mg Cd/mg Zn))

Cd (mg Cd/l)	Zn (mg Zn/l)				
	0	30	35	40	45
0	0:0	0:30	0:35	0:40	0:45
5	5:0	5:30	5:35	5:40	5:45
10	10:0	10:30	10:35	10:40	10:45
15	15:0	15:30	15:35	15:40	15:45
20	20:0	20:30	20:35	20:40	20:45

4.2.1. พืชเจริญพันธ์ของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่ทำการทดลองพบว่า เริ่มปรากฏว่ามีการตายของลูกปลานิลเกิดขึ้นที่เวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำอัตราการตายสะสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ ไปคำนวณด้วย Response Surface Analysis สามารถหาความสัมพันธ์ของความ เป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี ที่เวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ได้ดังสมการที่ 4.1 – 4.4 นอกจากนี้จากสมการยังสามารถสร้างกราฟแสดงอัตราการตายของลูกปลานิลที่ความเข้มข้นของ แคดเมียมและสังกะสีระดับต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.1 และกราฟแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและ สังกะสีได้ดังรูปที่ 4.4

$$M_{24} = 1.247604 + 0.755810 \text{ Cd} + 0.043642 \text{ Zn} - 0.00381 \text{ Cd}^2 + 0.003733 \text{ CdZn} + 0.00258 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.0867 \quad \dots\dots(4.1)$$

$$M_{48} = 0.670662 + 1.788190 \text{ Cd} - 0.313041 \text{ Zn} - 0.017143 \text{ Cd}^2 - 0.0024 \text{ CdZn} + 0.017041 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.3655 \quad \dots\dots(4.2)$$

$$M_{72} = 6.748246 + 1.503238 \text{ Cd} - 1.240846 \text{ Zn} + 0.001905 \text{ Cd}^2 + 0.015733 \text{ CdZn} + 0.058103 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6224 \quad \dots\dots(4.3)$$

$$M_{96} = 31.621804 - 0.153524 \text{ Cd} - 2.154992 \text{ Zn} + 0.030476 \text{ Cd}^2 + 0.0488 \text{ CdZn} + 0.058103 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6546 \quad \dots\dots(4.4)$$

โดยค่า M_{24}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 24 ชั่วโมง (%)
M_{48}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 48 ชั่วโมง (%)
M_{72}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 72 ชั่วโมง (%)
M_{96}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 96 ชั่วโมง (%)
Cd	คือ	ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายผสม (mg Cd/l)
Zn	คือ	ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายผสม (mg Zn/l)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าหลังจากได้รับสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1 (ก)) แคดเมียมจะมีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลมากกว่าสังกะสี คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียมจะทำให้เกิดการตายมากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสี แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็น 72 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1 (ค)) สังกะสีกลับเริ่มมีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลมากขึ้น จนที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1 (ง)) พบว่าสังกะสีมีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลมากกว่าแคดเมียม คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีจะทำให้เกิดอัตราการตายมากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียม ส่วนปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาตั้งแต่ 24 ถึง 96 ชั่วโมง จะเป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน คือ สารผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทำให้เกิดอัตราการตายของลูกปลานิลสูงกว่าแคดเมียมและสังกะสีในรูปสารละลายเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงคือความเข้มข้นของสังกะสี ส่วนที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง คือความเข้มข้นของสังกะสี ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี และปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับ ความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสี และจากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีที่อยู่ในสารละลายผสมและระยะเวลาที่ได้รับสารละลาย

4.2.2. พิษเฉียบพลันของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่ทำการทดลองพบว่า เริ่มปรากฏว่ามีการตายของลูกปลานิลเกิดขึ้นที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยอัตราการตายสะสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ นำไปคำนวณด้วย Response Surface Analysis สามารถหาความสัมพันธ์ของความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี ที่เวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ได้ดังสมการที่ 4.5 – 4.8 นอกจากนี้จากสมการยังสามารถสร้างกราฟแสดงอัตราการตายของลูกปลานิลที่ความเข้มข้นของแคดเมียมและ

สังกะสีระดับต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.2 และกราฟแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีได้ดังรูปที่ 4.5

$$M_{24} = 6.802911 - 0.545143 \text{ Cd} - 0.711415 \text{ Zn} + 0.022857 \text{ Cd}^2 + 0.080267 \text{ CdZn} + 0.024304 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6241 \quad \dots\dots(4.5)$$

$$M_{48} = 7.684863 + 0.004190 \text{ Cd} + 0.266992 \text{ Zn} - 0.003810 \text{ Cd}^2 + 0.069067 \text{ CdZn} + 0.01123 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6722 \quad \dots\dots(4.6)$$

$$M_{72} = 16.717863 - 0.669714 \text{ Cd} + 0.745301 \text{ Zn} + 0.034286 \text{ Cd}^2 + 0.0448 \text{ CdZn} + 0.006699 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6804 \quad \dots\dots(4.7)$$

$$M_{96} = 20.561982 - 0.453714 \text{ Cd} + 0.581789 \text{ Zn} + 0.034286 \text{ Cd}^2 + 0.034933 \text{ CdZn} + 0.0111 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.6744 \quad \dots\dots(4.8)$$

โดยค่า	M_{24}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 24 ชั่วโมง (%)
	M_{48}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 48 ชั่วโมง (%)
	M_{72}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 72 ชั่วโมง (%)
	M_{96}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 96 ชั่วโมง (%)
	Cd	คือ	ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายผสม (mg Cd/l)
	Zn	คือ	ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายผสม (mg Zn/l)

จากรูป 4.2 หลังจากได้รับสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 96 ชั่วโมง แคดเมียมจะมีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลมากกว่าสังกะสี ส่วนปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาตั้งแต่ 24 ถึง 96 ชั่วโมง จะเป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน คือ สารผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทำให้เกิดอัตราการตายของลูกปลานิลสูงกว่าแคดเมียมและสังกะสีในรูปสารละลายเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 24 ถึง 72 ชั่วโมง คือ ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี ส่วนที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง คือ ปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสี และจากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่อยู่ในสารละลายผสมและระยะเวลาที่ได้รับสารละลาย

4.2.3. พืชเทียบปล้นของสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่ทำการทดลองพบว่า เริ่มปรากฏว่ามีการตายของลูกปลานิลเกิดขึ้นที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยอัตราการตายสะสมที่ระยะเวลาต่าง ๆ นำไปคำนวณด้วย Response Surface Analysis สามารถหาความสัมพันธ์ของความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี ที่เวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ได้ดังสมการที่ 4.9 – 4.12 นอกจากนี้จากสมการยังสามารถสร้างกราฟแสดงอัตราการตายของลูกปลานิลที่ความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีระดับต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.3 และกราฟแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีได้ดังรูปที่ 4.6

$$M_{24} = 14.360666 - 0.564190 \text{ Cd} - 1.161951 \text{ Zn} + 0.003810 \text{ Cd}^2 + 0.0536 \text{ CdZn} + 0.030396 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.536 \quad \dots\dots(4.9)$$

$$M_{48} = 28.045343 + 0.151619 \text{ Cd} - 0.291252 \text{ Zn} - 0.019048 \text{ Cd}^2 + 0.040533 \text{ CdZn} + 0.019252 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.5417 \quad \dots\dots(4.10)$$

$$M_{72} = 46.627487 - 0.016762 \text{ Cd} + 0.054959 \text{ Zn} + 0.001905 \text{ Cd}^2 + 0.029067 \text{ CdZn} + 0.00993 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.47 \quad \dots\dots(4.11)$$

$$M_{96} = 53.988788 + 0.524571 \text{ Cd} - 0.082992 \text{ Zn} + 0.001905 \text{ Cd}^2 + 0.0048 \text{ CdZn} + 0.017214 \text{ Zn}^2 \quad r^2 = 0.4230 \quad \dots\dots(4.12)$$

โดยค่า M_{24}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 24 ชั่วโมง (%)
M_{48}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 48 ชั่วโมง (%)
M_{72}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 72 ชั่วโมง (%)
M_{96}	คือ	อัตราการตายของลูกปลานิลที่ 96 ชั่วโมง (%)
Cd	คือ	ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายผสม (mg Cd/l)
Zn	คือ	ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายผสม (mg Zn/l)

จากรูป 4.3 พบว่าหลังจากได้รับสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 96 ชั่วโมง สังกะสีจะมีผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลมากกว่าแคดเมียม ส่วนปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 24 ถึง 96 ชั่วโมง จะเป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน คือ สารผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทำให้เกิดอัตราการตายของลูกปลานิลสูงกว่าแคดเมียมและสังกะสีในรูปสารละลายเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยที่มี

ผลต่ออัตราการตายของลูกปลานิลอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง คือ ความเข้มข้นของ สังกะสี ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี และปัจจัยภายนอก ส่วนที่ระยะเวลา 48 ถึง 72 ชั่วโมง คือ ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี และปัจจัยภายนอก และที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง คือ ปัจจัย ภายนอกอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสี และจากรูปที่ 4.6 แสดงให้ เห็นว่าความเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่อยู่ในสารละลายผสมและระยะเวลาที่ได้รับสารละลาย

4.3 ผลของอุณหภูมิต่อพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสี

จากรูปที่ 4.1 - 4.3 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการตายของลูกปลานิลหลังจากได้รับสารละลาย ผสมของแคดเมียมและสังกะสีเป็นเวลา 24 ถึง 96 ชั่วโมง ของทั้ง 3 อุณหภูมิ ดังแสดงให้เห็นในรูป ที่ 4.7 - 4.10 ให้ผลออกมาใกล้เคียงกัน ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง สารผสมของแคดเมียมและสังกะสี ทุกอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการตายต่ำที่สุดรองลงมาเป็นที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และ 28 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการตายสูงที่สุด ตามลำดับ

เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็น 48 ชั่วโมง อัตราส่วนที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสี เป็น 5:30, 5:35, 5:40, 5:45, 10:30 และ 10:35 ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการตายต่ำ ที่สุด รองลงมาเป็น 28 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่อัตราส่วนอื่น ๆ ที่อุณหภูมิ 24 องศา เซลเซียสจะมีอัตราการตายต่ำที่สุดรองลงมาเป็นที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และ 28 องศา เซลเซียสจะมีอัตราการตายสูงที่สุด ตามลำดับ

ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ส่วนใหญ่อัตราส่วนที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการตาย ต่ำที่สุด รองลงมาเป็น 28 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยกเว้นที่อัตราส่วนที่มีความเข้มข้นของ แคดเมียมและสังกะสีเป็น 15:45, 20:35, 20:40 และ 20:45 ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสจะมีอัตรา การตายต่ำที่สุดรองลงมาเป็นที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และ 28 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการตาย สูงที่สุด ตามลำดับ

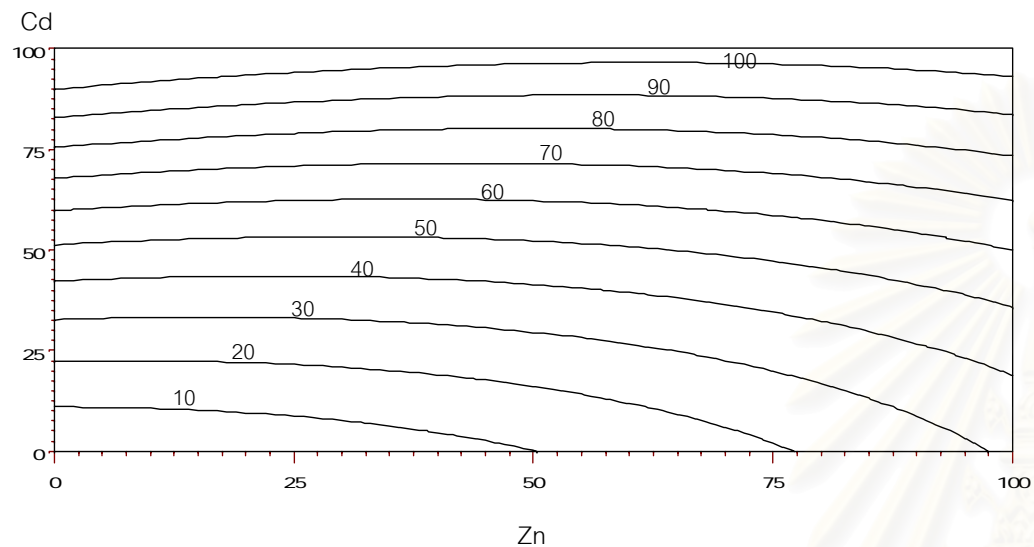
และที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง เกือบทุกอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการ ตายต่ำที่สุด รองลงมาเป็น 28 และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยกเว้นที่อัตราส่วนที่มีความเข้มข้น ของแคดเมียมและสังกะสีเป็น 20:40 และ 20:45 เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสจะมีอัตรา การตายต่ำที่สุดรองลงมาเป็นที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และ 28 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการตาย สูงที่สุด ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อลูกปลานิลได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีเป็นระยะ เวลานานมากขึ้น อัตราการตายมีแนวโน้มว่าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าว

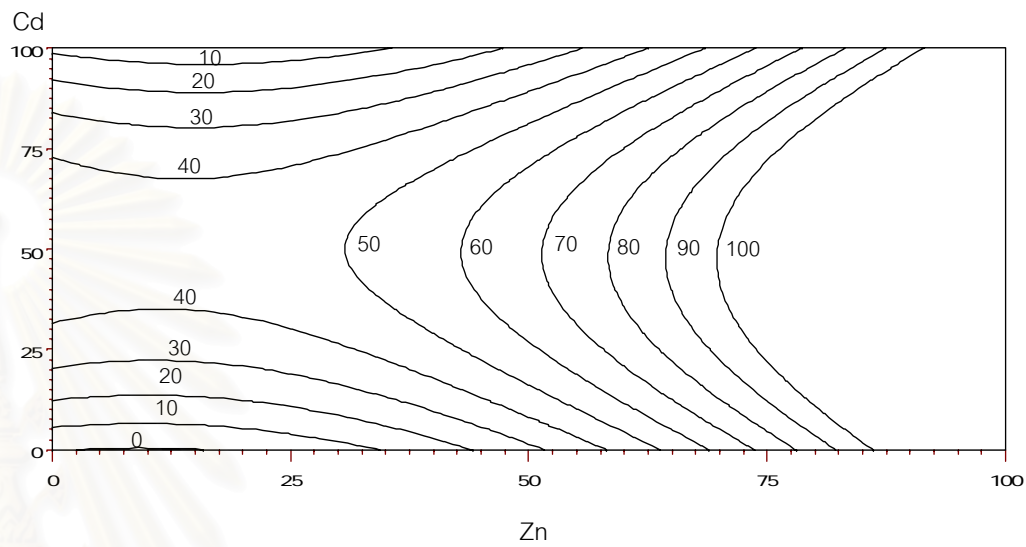
ได้ว่า อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ระดับความเป็นพิษของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลเพิ่มขึ้น

4.4 ผลของความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีต่อพฤติกรรมของลูกปลานิล

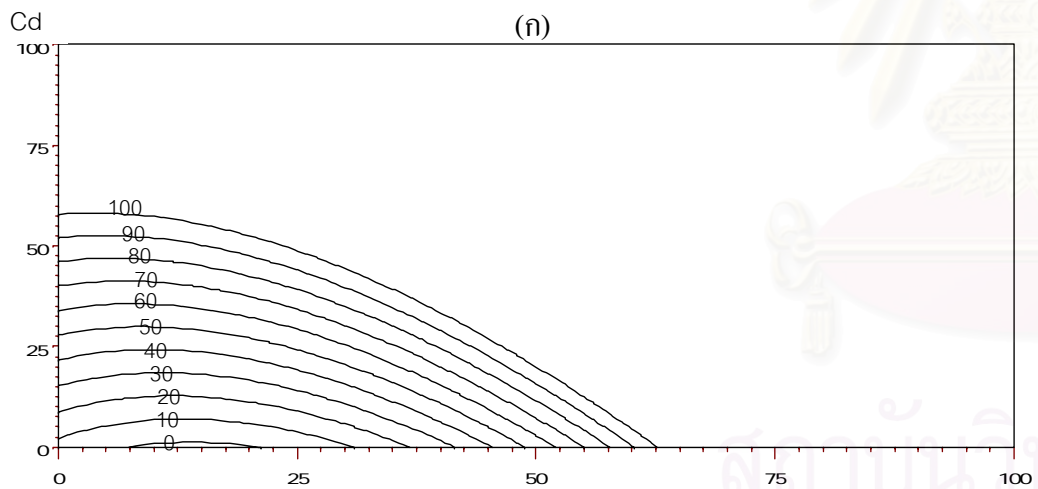
ลักษณะอาการและพฤติกรรมของปลาที่ตอบสนองต่อสารพิษ ไม่ว่าจะได้รับแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสม ปลาจะมีลักษณะอาการที่เหมือน ๆ กัน กล่าวคือ ในระยะแรกปลาจะมีอาการตื่นตกใจ วายน้ำไปมาอย่างรวดเร็ว อัตราการหายใจจะเร็วขึ้น โดยสังเกตได้จากการเปิดปิดของกระพุ้งแก้มจะเร็วกว่าปลาในกลุ่มควบคุมอย่างเห็นได้ชัด และจะวายขึ้นสู่วิวน้ำบ่อยครั้งเพื่อสูบเอาอากาศ และบางตัวจะอยู่นิ่ง ๆ ที่พื้น โหลทดลองเป็นเวลานาน ต่อมาสีของลำตัวจะเริ่มเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับในกลุ่มควบคุม และจะเริ่มสูญเสียการทรงตัว ลอยตัวอยู่ที่ระดับผิวน้ำ หลังจากนั้นก็จะจมแล้วนอนนิ่งอยู่ที่พื้น โหลทดลอง อัตราการหายใจเริ่มช้าลงและตายในที่สุด แต่สำหรับปลาที่ได้รับแคดเมียมจะเกิดอาการตกใจได้ง่าย เมื่อสิ่งแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งลักษณะนี้ไม่ค่อยพบในกลุ่มที่ได้รับสังกะสี หรือในกลุ่มควบคุม ลักษณะของปลาที่ตายจะพบว่าปากอ้า ครีบกาง และตาโปนพบทั้งลอยอยู่บนผิวน้ำและตายอยู่ที่พื้น โหลทดลอง ส่วนปลาที่รอดชีวิตพบว่าจะวายน้ำได้ช้าลงและพักตัวอยู่นิ่ง ๆ ที่พื้น โหลทดลอง



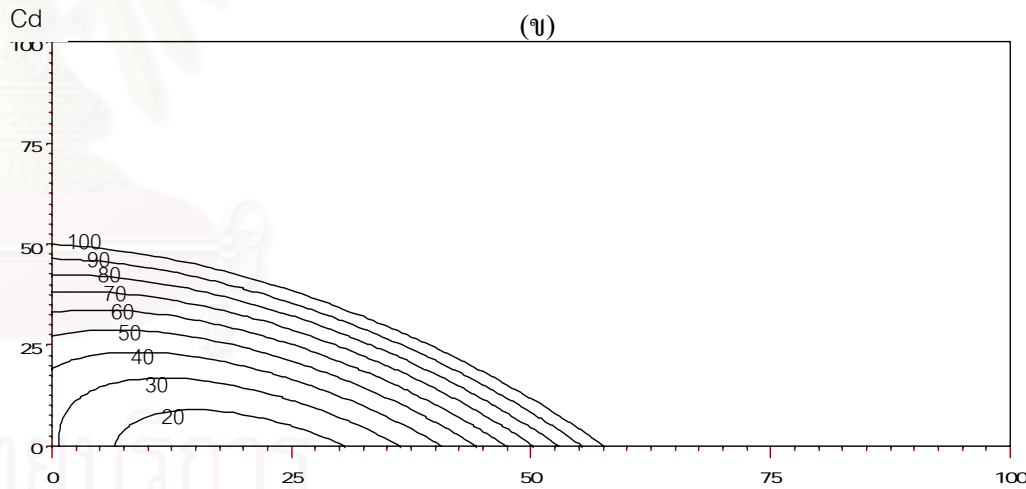
(ก)



(ข)



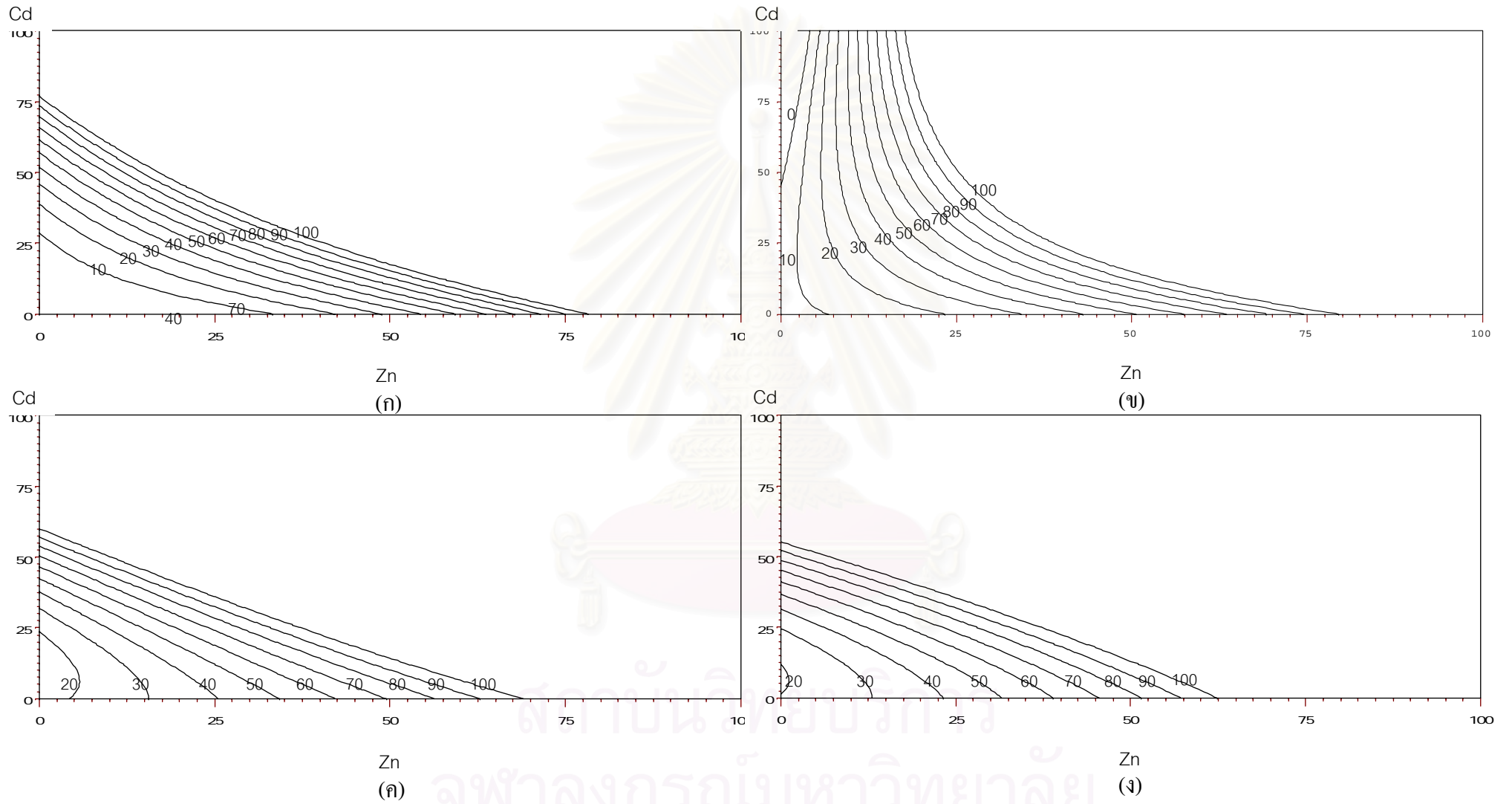
(ค)



(ง)

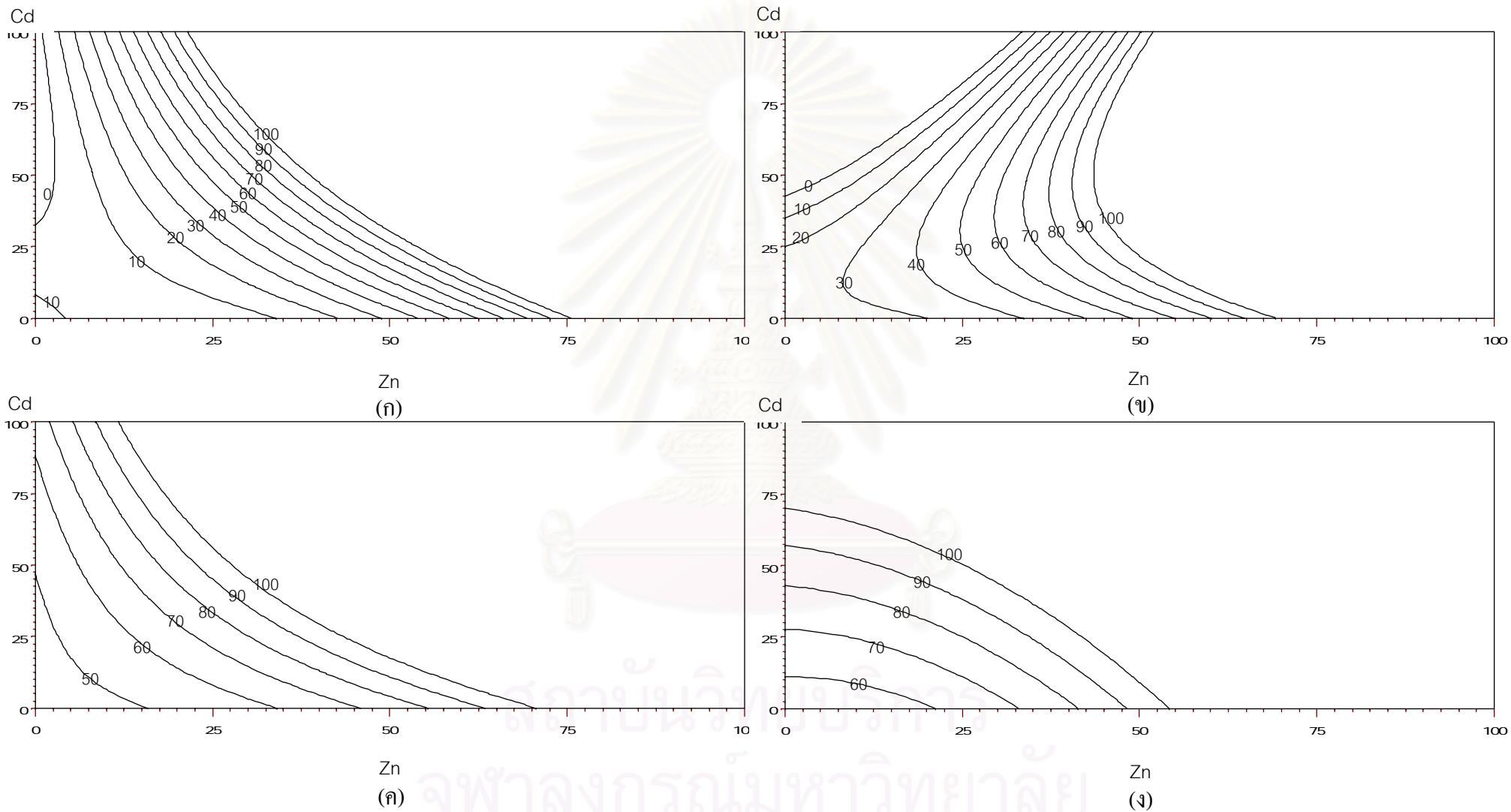
รูปที่ 4.1 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.



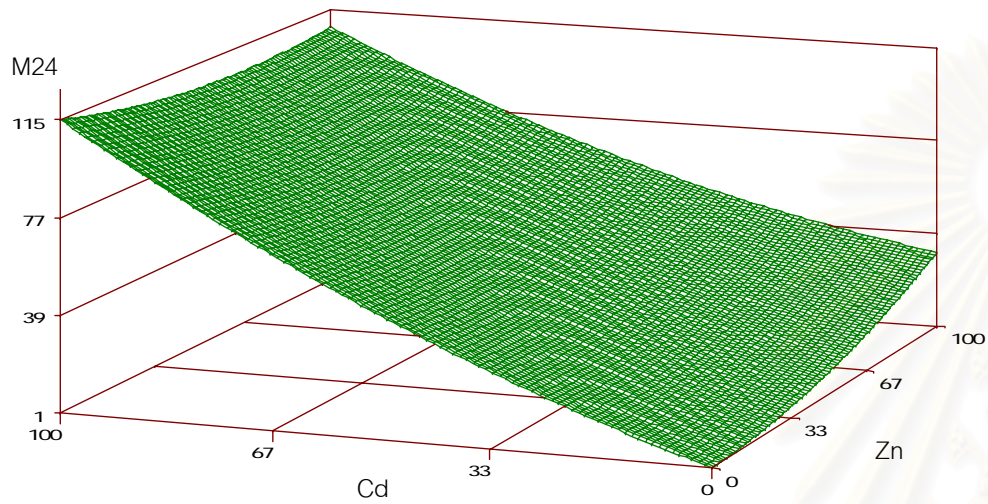
รูปที่ 4.2 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.

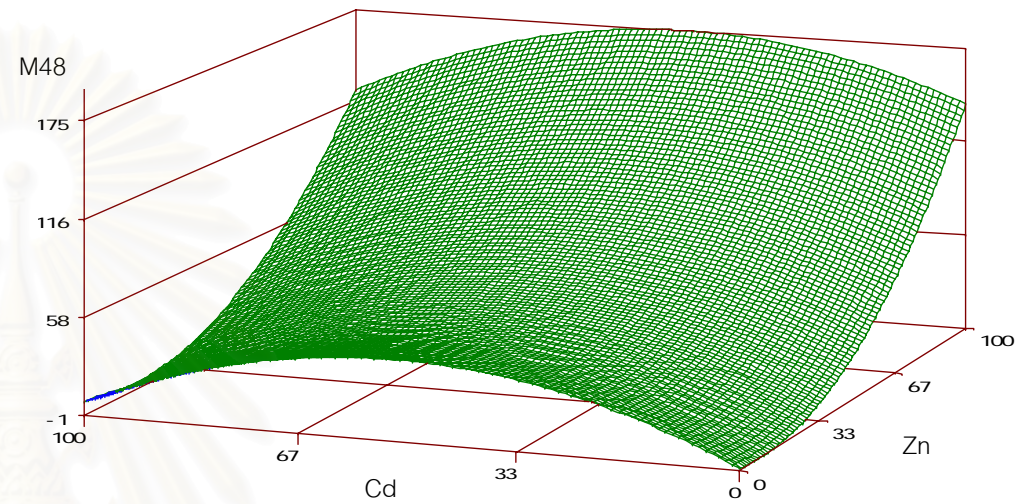


รูปที่ 4.3 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

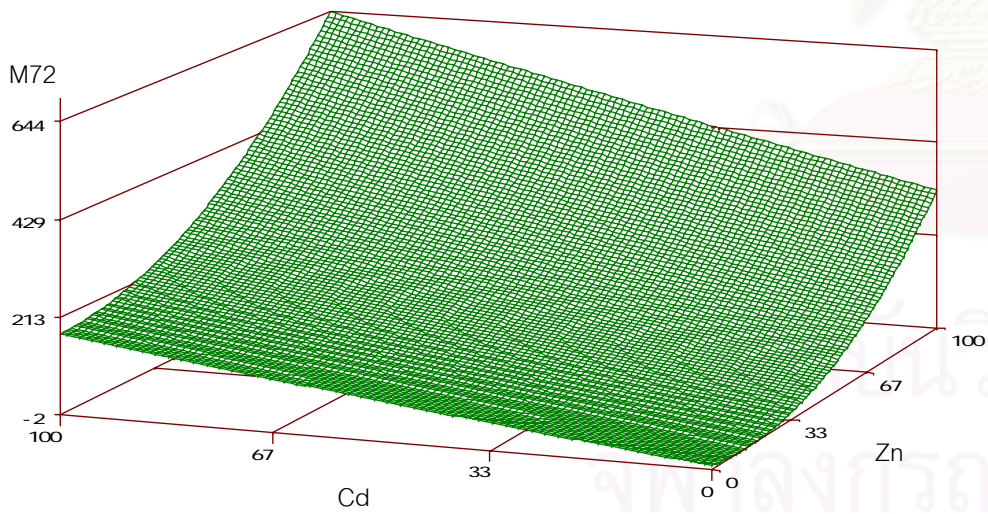
(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.



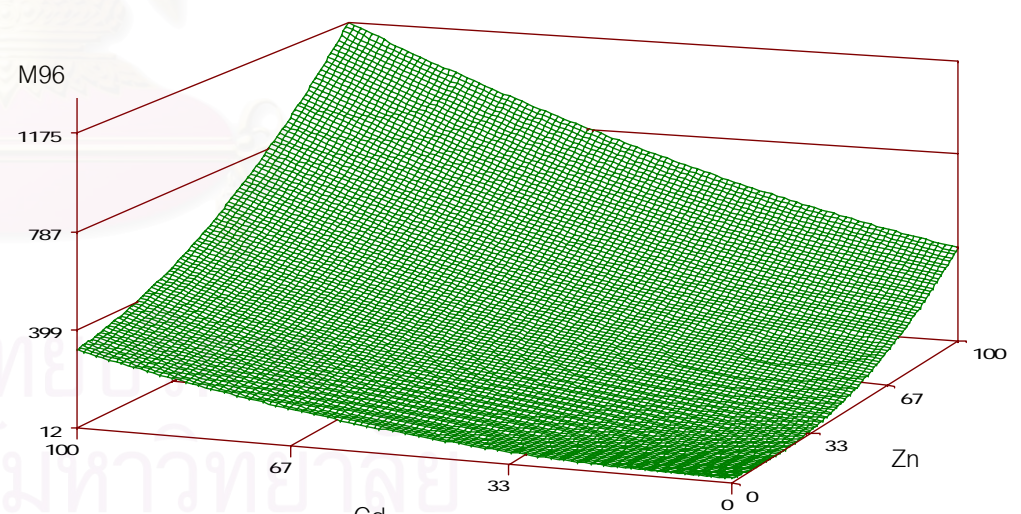
(ก)



(ข)



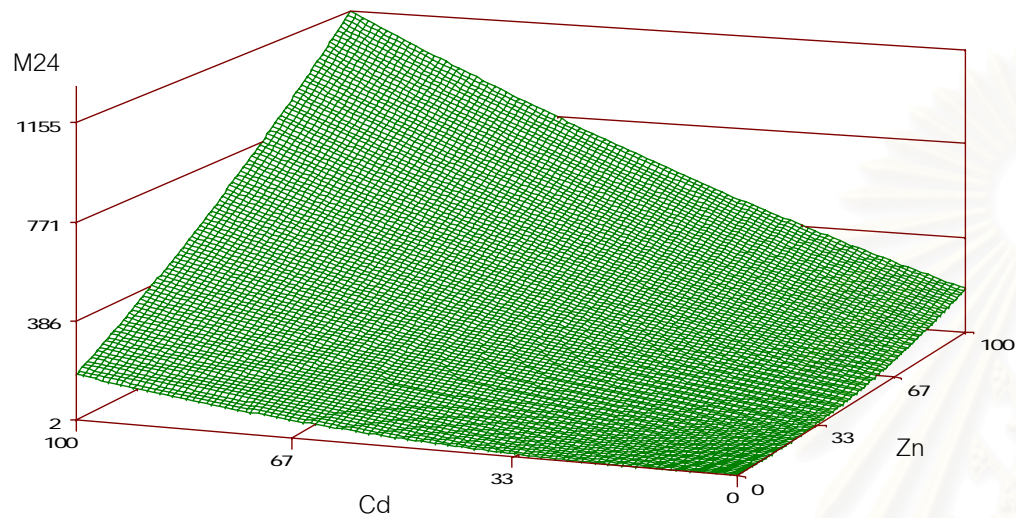
(ค)



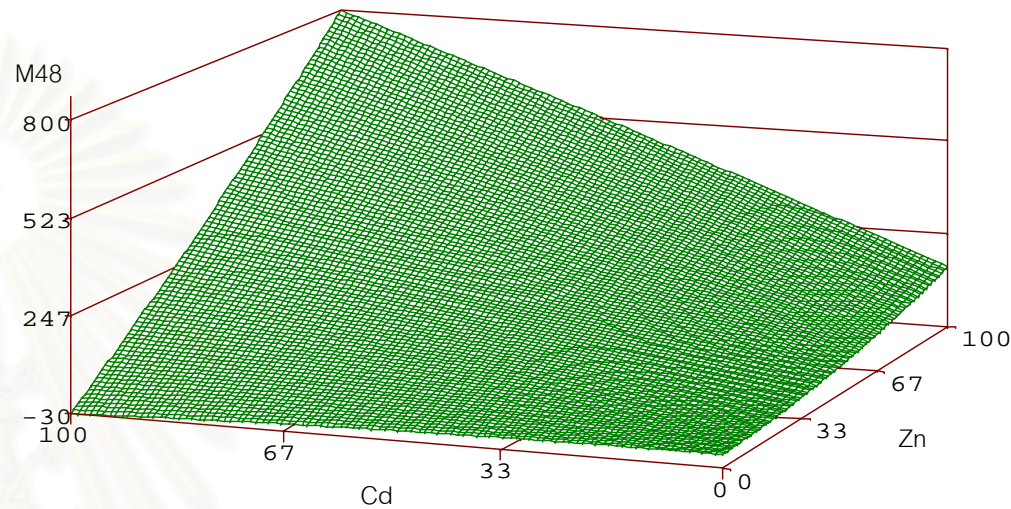
(ง)

รูปที่ 4.4 ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

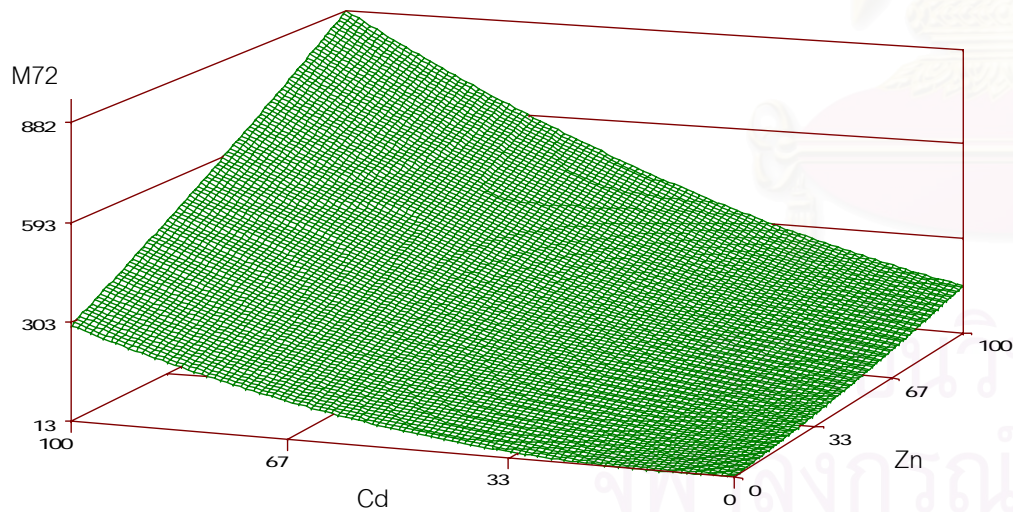
(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.



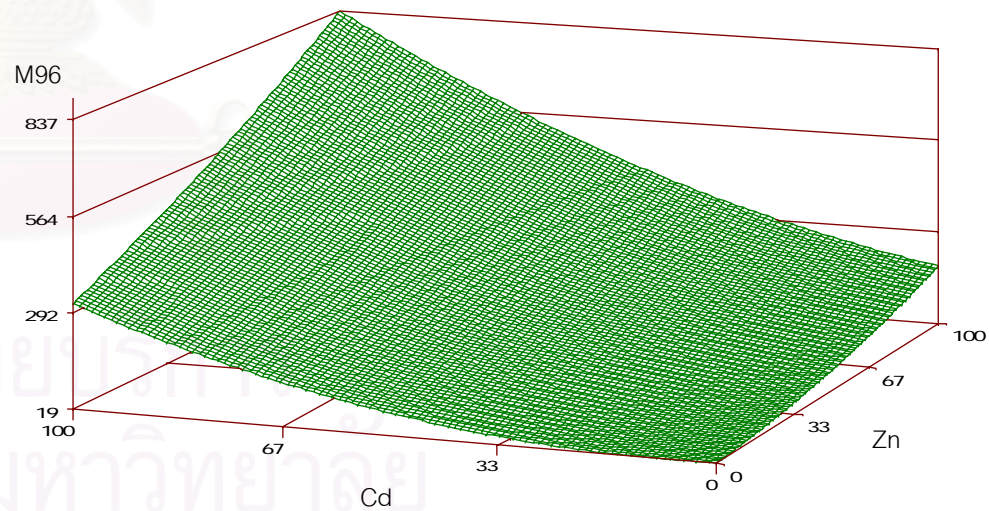
(ก)



(ข)



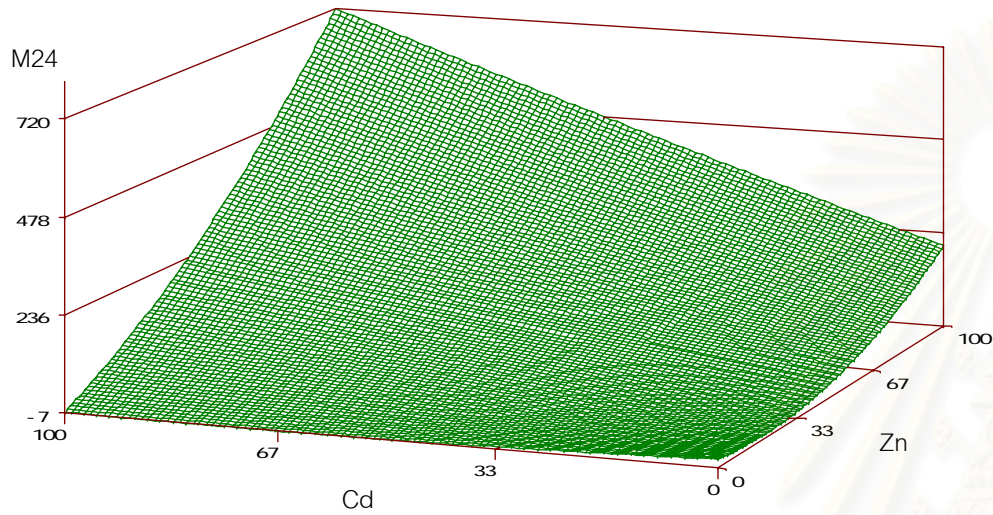
(ค)



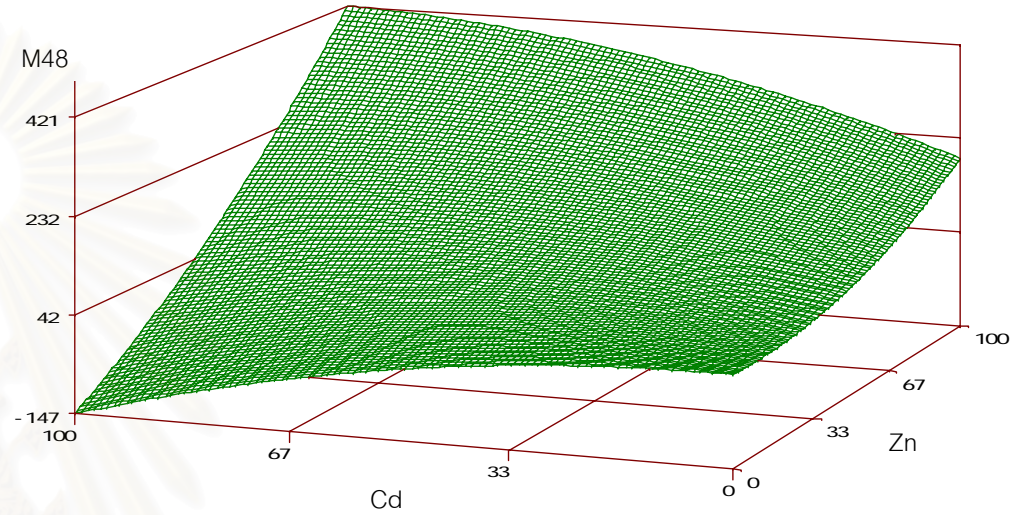
(ง)

รูปที่ 4.5 ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

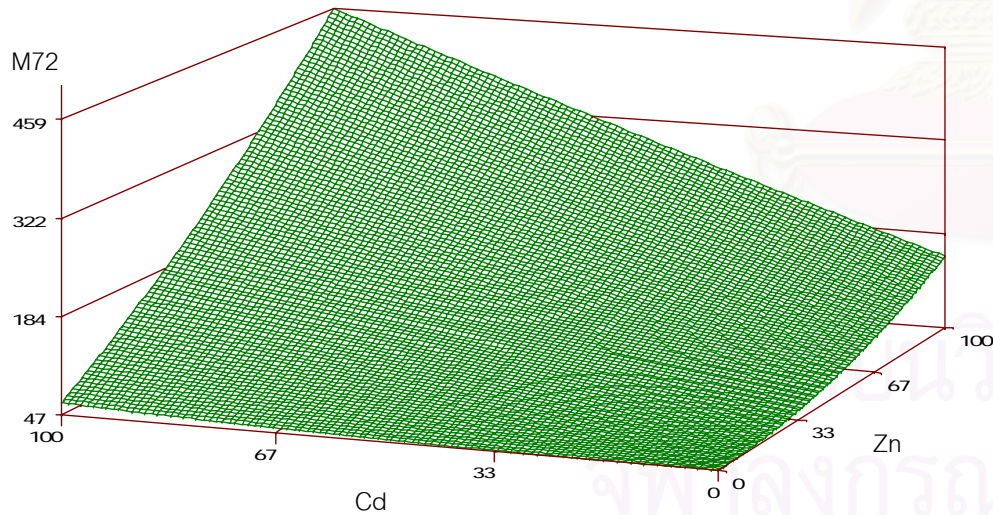
(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.



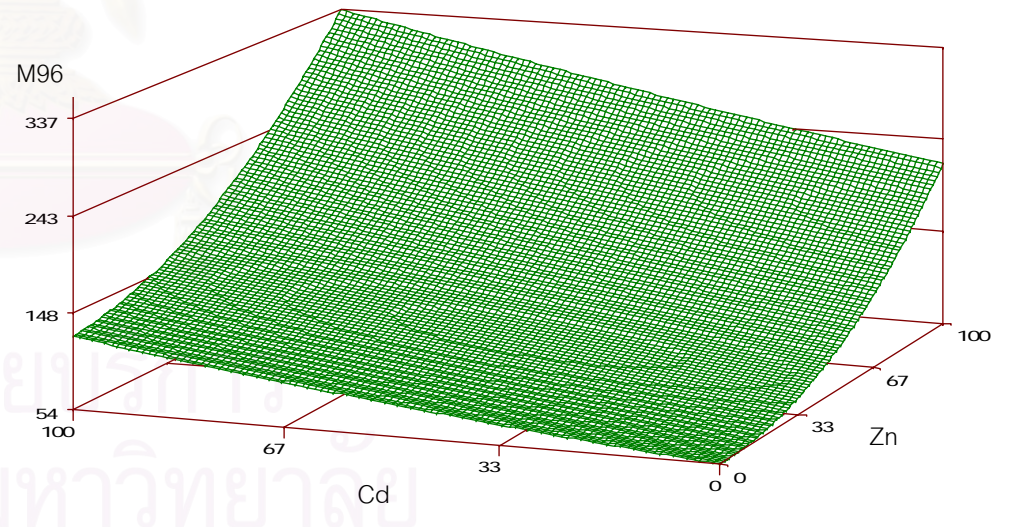
(ก)



(ข)



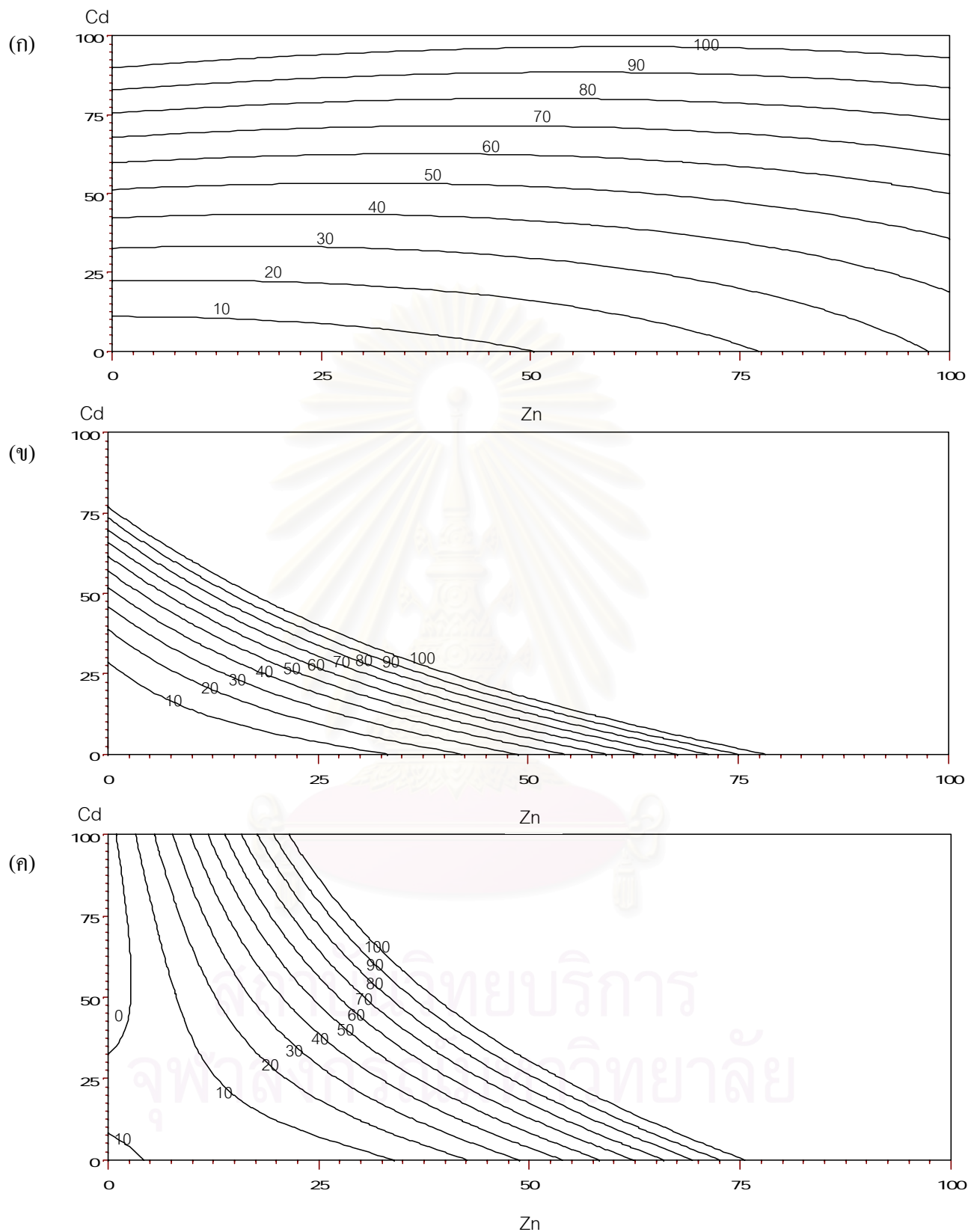
(ค)



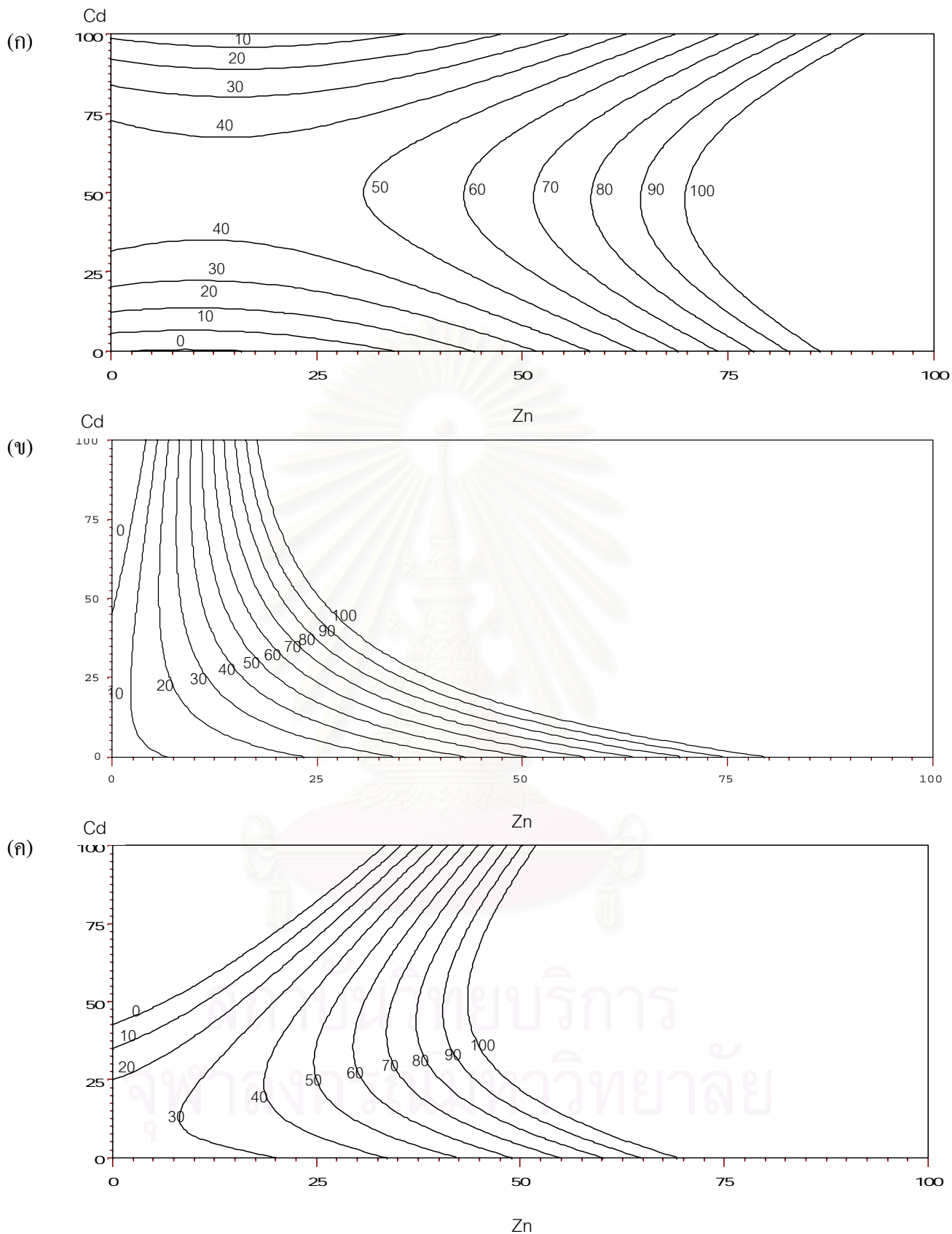
(ง)

รูปที่ 4.6 ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

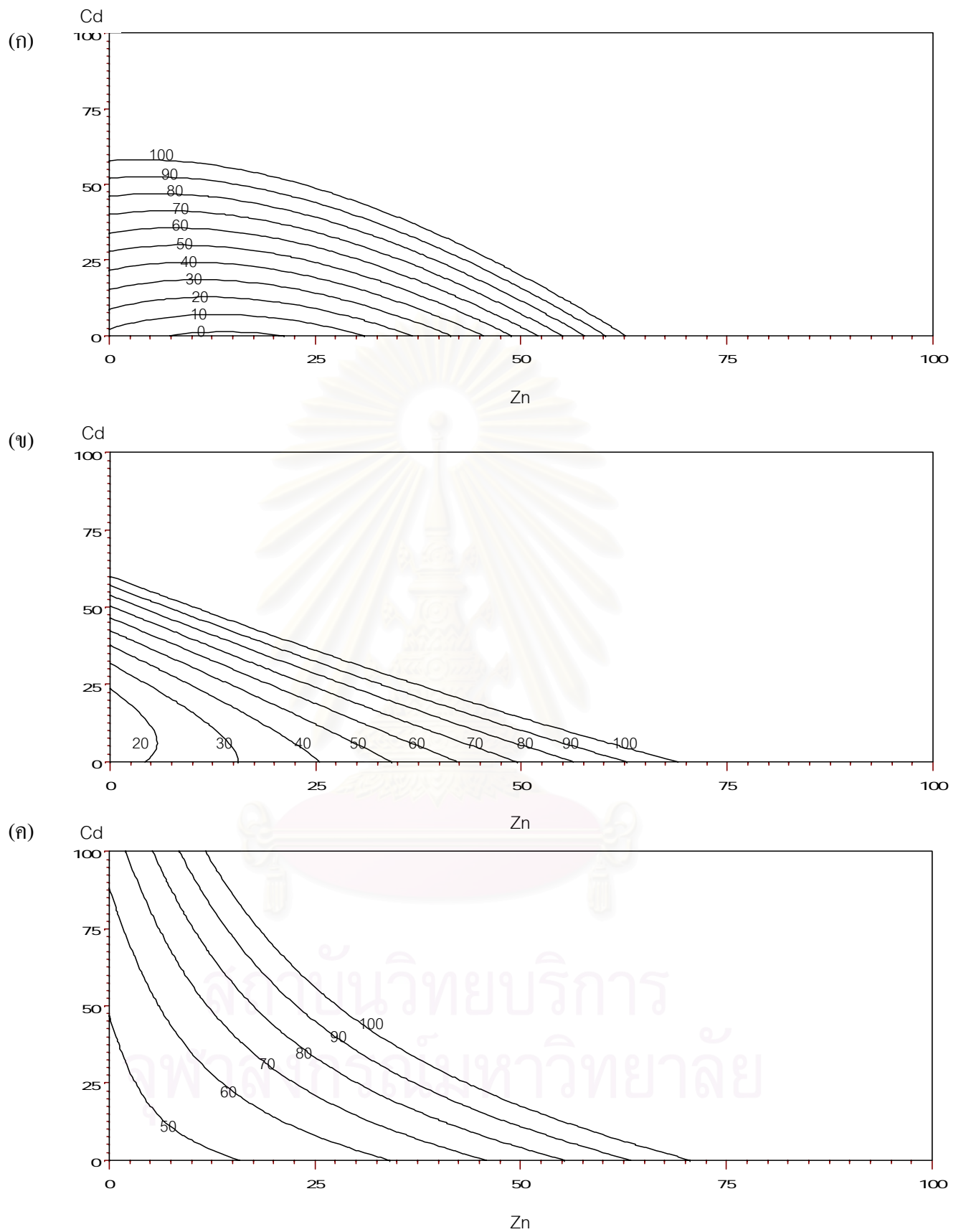
(ก) 24 ชม. (ข) 48 ชม. (ค) 72 ชม. และ(ง) 96 ชม.



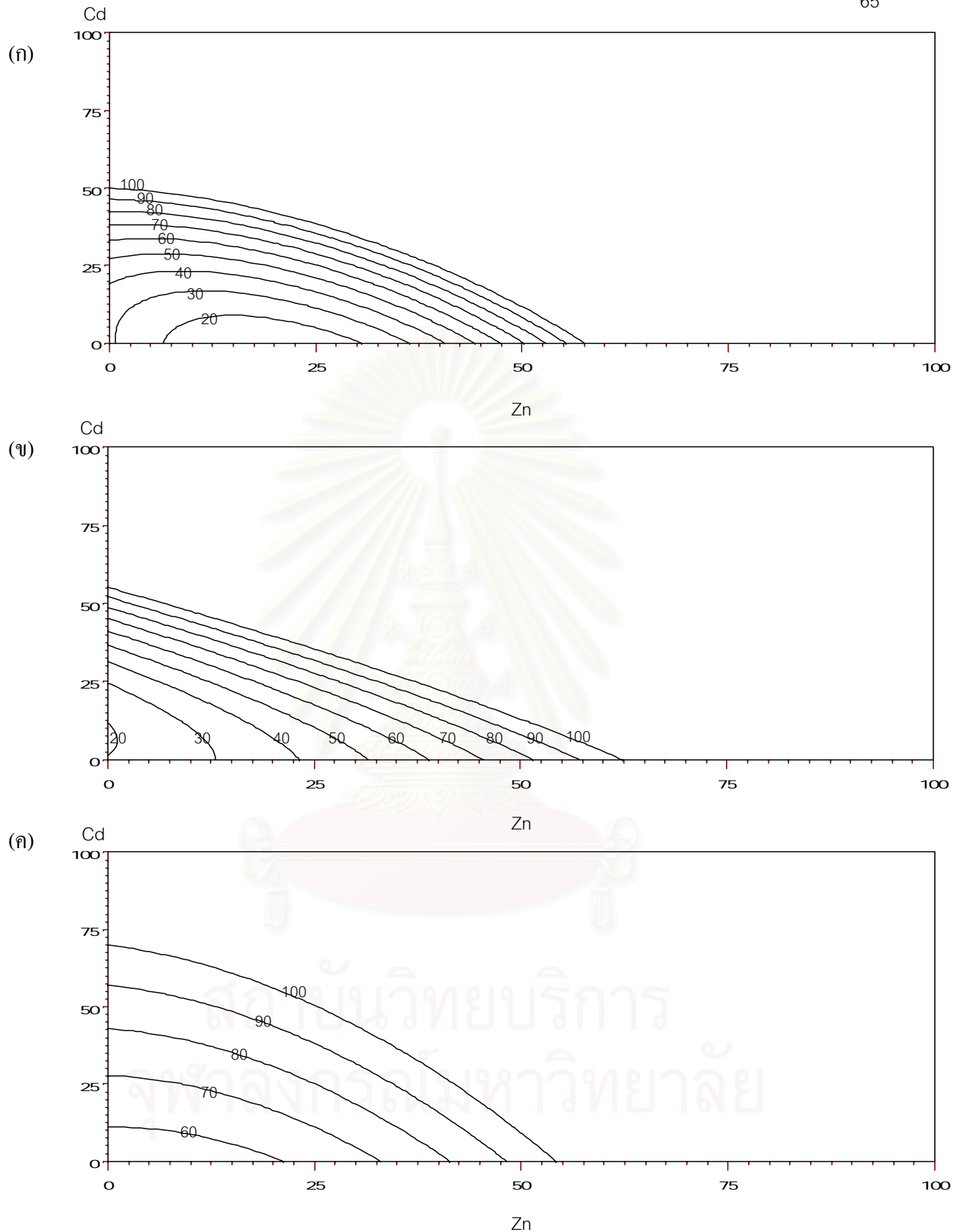
รูปที่ 4.7 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 24 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) 24°C (ข) 28°C และ (ค) 32°C



รูปที่ 4.8 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 48 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) 24 °C (ข) 28 °C และ (ค) 32 °C



รูปที่ 4.9 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีที่ระยะเวลา 72 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) 24°C (ข) 28°C และ (ค) 32°C



รูปที่ 4.10 อัตราการตายของลูกปลานิลเมื่อได้รับสารละลายผสมร่วมระหว่างแคดเมียมและสังกะสี ที่ระยะเวลา 96 ชม. ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) 24 °c (ข) 28 °c และ (ค) 32 °c

4.5 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลอง

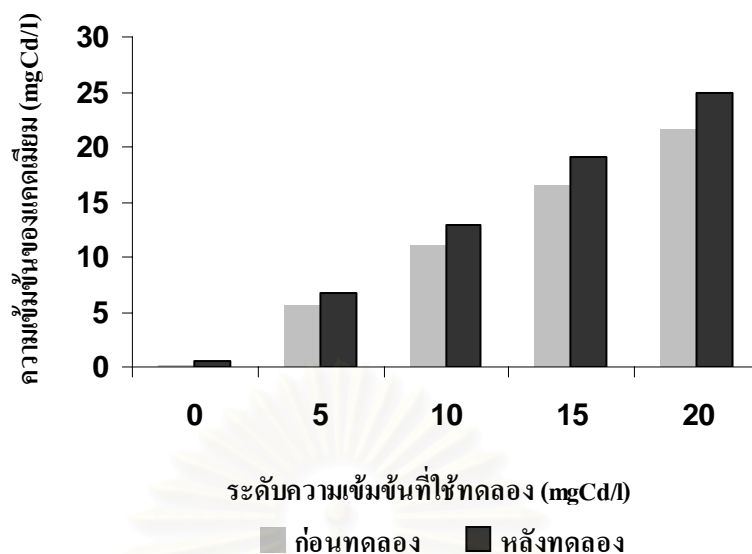
ในการทดลองพืชน้ำของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสม คุณภาพน้ำที่ใช้ใน
ทั้งก่อนและหลังการทดลองแสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณภาพน้ำที่ใช้ในระหว่างทำการทดลอง

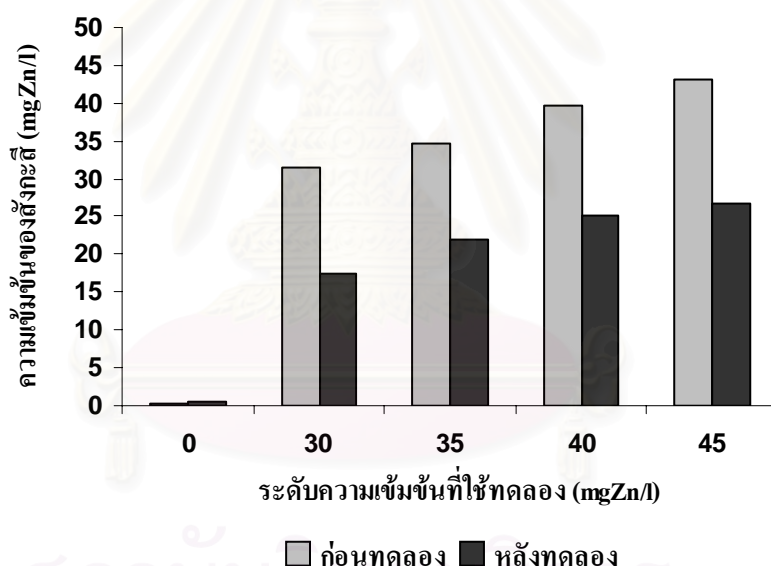
พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
อุณหภูมิ	24-32	24-32
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	7.63-7.66	7.31-7.53
ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l)	5.9-6.0	2.8-3.7
ความเป็นด่างของน้ำ	80	70
ปริมาณแอมโมเนียที่ละลายในน้ำ (mg/l)	0	2.41
ปริมาณไนไตรท์ที่ละลายในน้ำ (mg/l)	0	0.32
ปริมาณไนเตรทที่ละลายในน้ำ (mg/l)	0.84	5.41
ปริมาณฟอสเฟตที่ละลายในน้ำ (mg/l)	0.12	0.27

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีที่ละลายในน้ำทั้งก่อน
และหลังการทดลอง ด้วย Flame Atomic Absorption Spectrophotometer และเมื่อเปรียบเทียบความ
เข้มข้นก่อนการทดลองและหลังการทดลองของแคดเมียม พบว่า ภายหลังการทดลองแคดเมียมมี
ปริมาณเพิ่มมากขึ้นกว่าตอนก่อนการทดลองเล็กน้อย ส่วนสังกะสี พบว่า ความเข้มข้นของสังกะสี
หลังการทดลองลดลงกว่าตอนก่อนทดลองอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.11 - 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $CdCl_2$ ก่อนและหลังการทดลอง (96 ชั่วโมง)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ก่อนและหลังการทดลอง (96 ชั่วโมง)

4.6 ระดับที่ปลอดภัยของแคดเมียมและสังกะสี

เราสามารถหาระดับของแคดเมียมและสังกะสีที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ (No observed adverse effect level (NOAEL)) ต่อการดำรงชีวิตของลูกปลานิลได้โดยการประเมินจากความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50% หรือ LC_{50} ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ที่ได้ แล้วนำไปหารกับค่า safety factor หรือ uncertainty factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 (Sample et al., 1996) พบว่าได้ค่า NOAEL ของแคดเมียม ที่ระดับอนุกรมวิธาน 28 องศาเซลเซียส ในสภาพสารละลายเดี่ยวเป็น 0.13

มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตร และสังกะสีเป็น 0.4 มิลลิกรัมสังกะสีต่อลิตร ส่วนในสภาพสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่ระดับอนุภาคนั้นๆ นั้น ไม่สามารถหาความเข้มข้นที่แน่นอนได้ เนื่องจากความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50% หรือ LC_{50} ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคดเมียมและสังกะสี ที่อยู่ในสารละลายผสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ความเป็นพิษของแคดเมียมในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล

ความเข้มข้นของแคดเมียมในสภาพสารละลายเดี่ยวที่ทำให้ลูกปลานิลตาย 50 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส pH 7.6 มีค่า 13.08 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตร โดยมีช่วงพิสัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % อยู่ระหว่าง 9.94 - 16.26 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับปลาชนิดอื่น ๆ ที่มีรายงาน พบว่าผลจากการศึกษาครั้งนี้แคดเมียมมีความเป็นพิษที่ค่อนข้างต่ำกว่าที่พบในปลาชนิดอื่นๆ เช่น ในปลา Bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*), ปลา Goldfish (*Carassius auratus*) และปลา Guppy (*Poecilia reticulata*) ที่มีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 1.94, 2.34 และ 1.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Pickering and Henderson, 1966 อ้างถึงใน WHO, 1992) แต่สำหรับปลาตะเพียน (*Puntius arulius*) มีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 39 (36.5-41.7) มิลลิกรัมต่อลิตร (Shivaraj and Patil, 1988 อ้างถึงใน WHO, 1992) ซึ่งมีค่า 96-h LC₅₀ สูงกว่าที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าความเป็นพิษของแคดเมียมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของปลาที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนการศึกษาความเป็นพิษของแคดเมียมต่อลูกปลานิลที่ผ่านมา พบว่าค่า 96-h LC₅₀ ของแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 35.43 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเป็นการทดลองที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส pH 7.8 (นางลักษณ์ โปธาธนาพงษ์ และรามนรี เนตรวิเชียร, 2541) ซึ่งพบว่ามีค่า 96-h LC₅₀ แตกต่างจากในการศึกษาครั้งนี้ โดยอาจเป็นผลมาจากคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน เนื่องจากคุณภาพน้ำมีส่วนสำคัญต่อความเป็นพิษของแคดเมียม เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้สูงกว่ามีผลทำให้ปลาเมตาบอลิซึมสูงกว่า จึงสามารถรับเอาแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้มาก ดังนั้นความเป็นพิษจึงมากกว่า เช่นเดียวกับการศึกษาของ Douben (1989) ที่ทำการทดลองกับปลา stone loach (*Noemacheilus barbatulus*) โดยให้แคดเมียมซัลเฟตในน้ำที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อการดูดซึมและจับถ่ายที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ และในสถานะที่ให้อาหารและไม่ให้อาหาร พบว่าขนาดของปลา มีผลต่อการดูดซึมและการจับถ่ายแคดเมียม bioconcentration factors ลดลงตามขนาดของปลา การดูดซึมจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนถึงประมาณ 16 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่อปริมาณแคดเมียมในน้ำมีเพิ่มขึ้น ปลาที่ให้อาหารจะเพิ่มอัตราการดูดซึมแคดเมียมจากในน้ำ และสรุปได้ว่า metabolic rate เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซึมแคดเมียมเข้าสู่ปลา และรวมถึงการจับถ่ายแคดเมียมออกไปด้วย ประกอบกับค่า pH ของการทดลองครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าดังนั้นแคดเมียมจึง

สามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น ความเป็นพิษของแคดเมียมจึงเพิ่มขึ้น ทำให้การทดลองครั้งนี้มีค่า 96-h LC₅₀ ต่ำกว่า

ความกระด้างเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อความเป็นพิษของแคดเมียม จากการศึกษาในปลาหลายชนิดพบว่า ในน้ำอ่อนแคดเมียมจะมีความเป็นพิษมากกว่าในน้ำกระด้าง เช่น ปลา Rainbow trout (*Salmo gairdneri*) มีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 1.3 (ในน้ำอ่อน) เพิ่มขึ้นเป็น 2.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในน้ำกระด้าง) (Pascoe et al., 1986 อ้างถึงใน WHO, 1992) ปลา Fathead minnow (*Pimephales promelas*) 1.05 (ในน้ำอ่อน) เพิ่มขึ้นเป็น 72.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในน้ำกระด้าง), ปลา Green sunfish (*Lepomis cyanellus*) 2.84 (ในน้ำอ่อน) เพิ่มขึ้นเป็น 66 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในน้ำกระด้าง) (Pickering and Henderson, 1966 อ้างถึงใน WHO, 1992), ปลา Guppy 3.8 (ในน้ำกระด้าง 1 mM) เพิ่มขึ้นเป็น 11.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในน้ำกระด้าง 2 mM) (Canton and Slooff, 1982 อ้างถึงใน WHO, 1992)

นอกจากนี้ปัจจัยที่มาจากสัตว์ทดลอง เช่น ขนาด อายุ เพศ และสุขภาพของปลา ก็มีผลต่อความเป็นพิษของแคดเมียม โดย Middaugh and Dean (1977) ได้ทดลองหาความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตในระยะต่าง ๆ ของปลา Atlantic silverside (*Menidia menidia*) โดยพบว่าในระยะตัวอ่อนมีความไวต่อการตอบสนองต่อแคดเมียมมากที่สุด

สำหรับอาการของลูกปลานิลที่ได้รับสารละลายแคดเมียมจะมีอาการของการขาดออกซิเจน โดยมีการเปิดปิดของกระพุ้งแก้มเร็วขึ้น และมักลอยตัวอยู่ที่ผิวน้ำเพื่อรับอากาศโดยตรง เพราะแคดเมียมมีผลต่อระบบหายใจคือไปทำลายเนื้อเยื่อเหงือก และทำให้โครงสร้างของเหงือกเปลี่ยนไป Frerichs (1985) อ้างถึงใน ประกอบ ศรีจันทร์ (2529) อธิบายว่าการตอบสนองแบบเฉียบพลันของพิษแคดเมียม จะก่อให้เกิดอันตรายกับเหงือก โดยมีการบวมพองของเยื่อเมือ ทำให้มีปัญหาในการควบคุมการซึมผ่านสารของเซลล์ในเหงือกทำให้มีผลต่อการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและทำให้เกิดการสูญเสียเกลือแร่ในร่างกาย เช่นเดียวกับการศึกษาของ Verbost et al. (1988) พบว่าความเป็นพิษของแคดเมียมเกิดจากการที่แคดเมียมไอออนไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ Ca²⁺ATPase ในเซลล์ basolateral ของเหงือก ซึ่งทำให้การส่งผ่านแคลเซียมไอออนใน basolateral membrane ของ chloride cells ในเหงือกถูกยับยั้งยังผลให้เกิดภาวะ hypocalcaemia ในปลา

5.2 ความเป็นพิษของสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อลูกปลานิล

พบว่าระดับความเข้มข้นของสังกะสีเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายเดี่ยวนั้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมงเป็น 40.49 มิลลิกรัมสังกะสีต่อลิตร โดยมีช่วงพิสัยที่ระดับความเชื่อมั่นอยู่ระหว่าง 37.99 - 43.07 มิลลิกรัมสังกะสีต่อลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับปลาน้ำจืดชนิดอื่น ๆ ที่มีรายงาน พบว่าผลจากการศึกษาครั้งนี้สังกะสีมีความเป็นพิษที่ค่อนข้างต่ำกว่าที่พบในการศึกษาของ Rehwoldt et al. (1972) อ้างถึงใน WHO (2001) ในปลา Banded

killifish (*Fundulus diaphanus*) ปลา Striped bass (*Roccus saxatilis*) ปลา White perch (*Roccus americanus*) American eel (*Anguilla rostrata*) และปลาไน (*Cyprinus carpio*) ซึ่งได้ค่า 96-h LC₅₀ เป็น 19.2, 6.8, 14.4, 14.5 และ 7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนค่า 96-h LC₅₀ ในปลาทอง (*Carassius auratus*) เป็น 6.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ปลา Guppy (*Poecilia reticulata*) เป็น 1.27 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pickering and Henderson, 1966 อ้างถึงใน WHO, 2001) ในปลา Flagfish (*Jordanella floridae*) เป็น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Spehar, 1976 อ้างถึงใน WHO, 2001) ในปลา Channelfish (*Nuria denricus*) เป็น 6.06 มิลลิกรัมต่อลิตร (Abbasi and Soni, 1986 อ้างถึงใน WHO, 2001) และในปลาตะเพียนขาว (*Puntius gonionotus*) เป็น 34.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (เววตา ทองระอา, 2525) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเป็นพิษของสังกะสีจะแตกต่างกันไปตามชนิดของปลาที่ใช้ในการทดลอง

เช่นเดียวกับแคดเมียม คุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองก็มีส่วนทำให้ความเป็นพิษของสังกะสีแตกต่างกันได้ ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองในปลาชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน สังกะสีก็มีความเป็นพิษแตกต่างกัน โดยในการทดลองกับปลา *Tilapia zilli* ที่ระดับอุณหภูมิ 9.3 และ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า 96h-LC₅₀ ของสังกะสีเป็น 33 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองกับปลาคู Catfish (*Clarius lazera*) ที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่ามีค่า 96h-LC₅₀ เป็น 52 และ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Hilmy et al., 1987 อ้างถึงใน WHO, 2001) ส่วน pH ที่แตกต่างกันก็มีผลต่อค่า 96-h LC₅₀ โดยในปลา Bluegill (*Lepomis macrochirus*) ที่ระดับ pH 7.5 และ 8.2 มีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 4.85-5.82 และ 40.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความกระด้างเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อความเป็นพิษของแคดเมียม จากการศึกษาในปลา Rainbow trout (*O. mykiss*) ที่ความกระด้าง 26 และ 333 พบว่าค่า 96-h LC₅₀ เพิ่มขึ้นจาก 0.43 เป็น 7.21 มิลลิกรัมต่อลิตร (Sinley et al., 1974 อ้างถึงใน WHO, 2001) แสดงให้เห็นว่าความเป็นพิษของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และความเป็นพิษจะลดลงเมื่อ pH และ ความกระด้างเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ปัจจัยที่มาจากสัตว์ทดลอง โดยการศึกษาในปลาหลายชนิดพบว่า ขนาด อายุ เพศ และสุขภาพของปลา มีผลต่อความเป็นพิษของสังกะสี เช่น ปลาไน (*Cyprinus carpio*) ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 3.2 และ 6.0 เซนติเมตร พบว่ามีค่า 96h-LC₅₀ ของสังกะสีเป็น 0.45-1.34 และ 1.64-2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Alam and Maughan, 1992 อ้างถึงใน WHO, 2001) และ ปลา Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) ที่อยู่ในช่วง fry, alevin, 0.20 กรัม และ 0.85 กรัม มีค่า 96h-LC₅₀ เป็น 0.32, 2.92, 0.14 และ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

อาการของลูกปลานิลที่ได้รับสารละลายสังกะสีจะมีอาการคล้ายกับที่ได้รับแคดเมียมคือ อาการขาดออกซิเจนมีการเปิดปิดของกระพุ้งแก้มเร็วขึ้น มักลอยตัวอยู่ที่ผิวน้ำเพื่อรับอากาศโดยตรง เพราะสังกะสีมีผลต่อระบบหายใจคือ ทำลายเนื้อเยื่อเหงือก และทำให้โครงสร้างของเหงือกเปลี่ยนไป McDonald and Wood (1993) อธิบายว่าโลหะหนักส่วนใหญ่มีผลทำให้เกิดการบวมน้ำ

การอักเสบ เกิดการลอกหลุดของเซลล์ epithelium ในเหงือกทำให้การควบคุมการซึมผ่านสารของเซลล์ในเหงือกลดลง ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนออกซิเจนทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจน และนอกจากนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียเกลือแร่ในร่างกาย เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hogstrand et al. (1994,1996) พบว่าสังกะสีในรูปไอออนอิสระเป็นตัวขัดขวางที่สำคัญของการทำงานของเอนไซม์ Ca^{2+} ATPase ในเซลล์ basolateral ของเหงือก และที่ระดับความเข้มข้นที่ sublethal ไอออนของสังกะสีจะไปแย่งจับกับตัวที่รับแคลเซียมซึ่งทำให้การส่งผ่านแคลเซียมไอออนใน basolateral membrane ของ chloride cells ในเหงือกถูกยับยั้งมีผลให้เกิดภาวะ hypocalcaemia ในปลา เช่นเดียวกับกรณีของแคดเมียม

5.3 ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมต่อลูกปลานิล

เมื่อดูจากค่า 96-h LC_{50} ของทั้งแคดเมียมและสังกะสีจะพบว่าค่า 96-h LC_{50} ของแคดเมียมน้อยกว่า ค่า 96-h LC_{50} ของสังกะสี แสดงว่าแคดเมียมมีความเป็นพิษต่อลูกปลานิลมากกว่าสังกะสี ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาในสิ่งมีชีวิตในน้ำชนิดอื่นๆ ที่เคยมีรายงาน เช่น แมลงน้ำ *Ranatra elongata* (Shukla, Murti and Omkar , 1983), *Mysidopsis bahia* (Lussier , Gentile and Walker, 1985), กบ *Microhyla ornata* (Jayaprakash and Madhyastha, 1987), โปรีโตซัว (Madoni et. al., 1996) , *Chironomus plumosus* (Fargaová, 2001) และ *Neomysis integer* (Verslycke et. al., 2003) เนื่องจากสังกะสีนั้นพบว่าเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย และเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในฮอร์โมนหลายชนิด แต่การที่รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้ (Bambang et. al.,1995) ส่วนแคดเมียมนั้นยังไม่มีรายงานว่ามิมีประโยชน์ต่อร่างกายแต่อย่างใด ดังนั้นเมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับแคดเมียมเข้าไปก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้น

ส่วนความเป็นพิษของสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีต่อลูกปลานิลในการทดลองครั้งนี้พบว่าแคดเมียมและสังกะสีมีปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กันที่ทุกอัตราส่วน เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองสัตว์น้ำชนิดอื่น เช่น ในปลาคอกอ (Clarias macrocephalus) พบว่าที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1, 1:2 และ 2:1 แสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบมากกว่าผลบวก (เสริมฤทธิ์กัน) (Saisombat ,1983) ส่วนการทดลองกับปลา chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) พบว่าได้ผลแบบพิษรวมกัน ที่อัตราส่วนแคดเมียมต่อสังกะสี เป็น 1 ต่อ 0.008 (Finlayson and Verrue, 1982 อ้างถึงใน WHO, 1992) ส่วนในการทดลองกับปลา flagfish (*Jordanella floridae*) พบว่ามีความเป็นพิษแบบเป็นอิสระต่อกัน และมีความเป็นพิษค่อนข้างน้อย แต่ก็ยังมากกว่าพิษของสังกะสีเพียงชนิดเดียว (Spehar et al. ,1978 อ้างถึงใน WHO, 2001) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ ที่ผ่านมาพบว่าปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียมและสังกะสีสามารถเกิดหลายรูปแบบ แต่ส่วนมากจะเป็นแบบต้านฤทธิ์กัน ส่วนการทดลองถึงปฏิสัมพันธ์ของ

แคลเซียมและสังกะสีกับปลานิลที่ผ่านมา โดย Kargin and Cogun (1999) ซึ่งใช้สารผสมที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมที่ใช้ในการทดลองเป็น 0.1 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีเป็น 1 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับปลานิลขนาด 11.9 เซนติเมตร น้ำหนัก 46.5 กรัม ที่ระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส pH 8.1 ความเป็นด่างของน้ำเป็น 274.2 มิลลิกรัมต่อลิตรของ CaCO_3 พบว่า สังกะสีทำให้การสะสมของแคลเซียมในเนื้อเยื่อทั้งหมดของปลานิลลดลง ส่วนแคลเซียมทำให้การสะสมของสังกะสีในเนื้อเยื่อของปลานิลเพิ่มขึ้นในสารผสมที่มีระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น และปฏิสัมพันธ์ของแคลเซียมและสังกะสีก็เป็นแบบต้านฤทธิ์กัน ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่าความเป็นพิษของสารผสมระหว่างแคลเซียมและสังกะสีมีปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน โดยอาจมีสาเหตุมาจากระดับความเข้มข้นของทั้งแคลเซียมและสังกะสีที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ค่อนข้างสูง เพราะเป็นการทดลองแบบพิษเฉียบพลัน เมื่อปลาได้รับสารผสมของแคลเซียมและสังกะสี สารทั้งสองอาจเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อกัน เช่นเกิดการแย่งกันจับกับเอนไซม์หรือโปรตีนที่บริเวณ active site และเกิดการแทนที่ของสังกะสีโดยแคลเซียมซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าในเอนไซม์หรือโปรตีนที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ทำให้เอนไซม์หรือโปรตีนชนิดนั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ หรือการจับกับ metallothionien (MT) ซึ่งทำให้ความเป็นพิษลดลงได้และถึงแม้ว่าแคลเซียมและสังกะสีสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสังเคราะห์ MT ได้ แต่เนื่องจากระยะเวลาที่ได้รับสารพิษนั้นสั้นและความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นมีปริมาณมากทำให้ปริมาณที่สังเคราะห์ได้นั้นอาจมีไม่เพียงพอที่จะจับกับแคลเซียมและสังกะสีทั้งหมดได้ ดังนั้นอิออนของแคลเซียมและสังกะสีที่เหลืออยู่จึงทำให้เกิดความเป็นพิษได้ นอกจากนี้ความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง เช่น อุณหภูมิ pH และความเป็นด่างของน้ำ และปัจจัยจากปลาที่ใช้ในการทดลอง เช่น อายุ ขนาด และลักษณะทางสรีรวิทยาของปลา ก็มีส่วนสำคัญที่มีผลต่อความเป็นพิษโลหะหนักในรูปสารละลายผสม

5.4 ความเป็นพิษของแคลเซียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมต่อลูกปลานิล ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่าความเป็นพิษของแคลเซียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับที่ได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความเป็นพิษของแคลเซียมและสังกะสีในสัตว์น้ำชนิดอื่น เช่น Bervoets, Blust และ Verheyen (1996) ทดลองใน ตัวอ่อนแมลง (*Chironomus riparius*) พบว่าสัตว์ทดลองจะรับโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วน Rathore และ Khangarot (2002) ศึกษาใน freshwater tubificid sludge worm (*Tubifex tubifex* Muller) พบว่า พิษเฉียบพลันของแคลเซียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ตะกั่ว ปรอท นิกเกิล และสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และสรุปว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ

ต่อความเป็นพิษเฉียบพลันในระยะสั้น และยังมีรายงานว่าความเป็นพิษของแคดเมียมต่อปลาในน้ำจืด (Roch and Maly, 1979) และน้ำเค็ม (Eisler, 1971) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนการทดลองของ Hilmy et al. (1987) อ้างถึงใน WHO (2001) ในปลา *Tilapia zilli* ที่ระดับอุณหภูมิ 9.3 และ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 33 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในปลาคูก Catfish (*Clarius lazera*) ที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่ามีค่า 96-h LC₅₀ เป็น 52 และ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ Smith และ Heath (1979) ได้รายงานว่าผลของอุณหภูมิต่อความเป็นพิษของสังกะสีนั้นจะเฉพาะเจาะจงกับชนิดของสิ่งมีชีวิต ในขณะที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความเป็นพิษของสังกะสีเพิ่มขึ้นในปลา goldfish (*Carassius auratus*) และปลา bluegill (*Lepomis macrochirus*) ซึ่งจากการที่ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารผสมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีให้เพิ่มขึ้น โดยมีผลทำให้ทั้งแคดเมียมและสังกะสีสามารถแตกตัวได้ดีขึ้น ละลายน้ำได้มากขึ้น และอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถดูดซึมได้ง่าย ลูกปลานิลจึงสามารถดูดซึมแคดเมียมและสังกะสีเข้าสู่ร่างกายได้มาก และประกอบกับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีอัตราเมตาบอลิซึมสูงขึ้น เช่น ลูกปลานิลจะมีการเปิดปิดของกระพุ้งแก้มถี่ขึ้น ทำให้สามารถรับแคดเมียมและสังกะสีเข้าไปได้มากขึ้น และพิษของแคดเมียมและสังกะสีมีผลทำให้เซลล์ของเหงือกผิดปกติ จึงไม่สามารถทำหน้าที่ในการถ่ายเท และรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกาย รวมถึงไม่สามารถควบคุมการขับถ่ายน้ำและแร่ธาตุภายในร่างกาย (Osmoregulatory system) ได้ตามปกติ จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการตายขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิยังมีผลต่อความสามารถในการละลายก๊าซออกซิเจน โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำจะลดลง ซึ่งในขณะที่ลูกปลาที่ได้รับแคดเมียมและสังกะสีต้องการออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดปัญหาขาดแคลนออกซิเจนขึ้น ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดการตายได้

5.5 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระหว่างการทดลอง

ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 4.1-4.12 ว่ามีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการตายของลูกปลานิลนอกจากความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสี คุณภาพน้ำก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีผลต่อการตายของลูกปลานิลแล้ว ยังมีผลต่อความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีอีกด้วย เพราะการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองชีววิเคราะห์แบบน้ำนิ่ง ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ไม่ให้อากาศ และอาหารเลยในระหว่างที่ทำการทดลอง เป็นเวลา 4 วัน จึงทำให้คุณภาพน้ำระหว่างก่อนการทดลองกับหลังการทดลองแตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.7 โดยเฉพาะอุณหภูมิ ซึ่งจากสมการที่ 4.1-4.12 พบว่าการตายของลูกปลานิลจากปัจจัยอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณออกซิเจนละลายพบว่าหลังการทดลองมีค่าลดลงจากตอนก่อนทดลอง ซึ่งถ้าพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันพบว่าเป็นผลมาจากการใช้ออกซิเจนใน

การหายใจของปลา ประกอบกับการที่ปลาได้รับแคลเซียมและสังกะสีซึ่งไปขัดขวางการทำงานของเหงือก มีผลให้ปลาขาดออกซิเจนจึงจำเป็นต้องหายใจถี่ขึ้นเพื่อนำออกซิเจนจากน้ำมาใช้ให้มากที่สุด ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ส่วนถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ส่วนปริมาณแอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ที่วัดได้หลังการทดลองพบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการจับถ่ายของปลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิสูง ยิ่งพบว่ามีปริมาณแอมโมเนียมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นช่วยทำให้เมตาบอลิซึมของปลาเพิ่มขึ้น ปลาจึงมีอัตราการจับถ่ายที่สูงขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่า pKa ของแอมโมเนียอีกด้วย เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการตรวจวัดแล้วพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียจะขึ้นอยู่กับ ค่า pH และ อุณหภูมิ โดยเมื่อ pH และ อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเป็นพิษของแอมโมเนียเพิ่มขึ้น pH ในระหว่างการทดลองนี้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางทำให้ลูกปลานิลสามารถทนต่อความเป็นพิษของแอมโมเนียได้มากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าแอมโมเนียนั้นอาจมีผลต่อการตายของลูกปลานิลที่ทำการทดลองได้ (วิรัช, 2544) ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ความเป็นด่างของน้ำ ปริมาณไนโตรเจนในเตรต และฟอสเฟตที่ละลายในน้ำ พบว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

ส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมที่ละลายในน้ำนั้นอาจเป็นผลมาจากกระเหยของน้ำในโหลที่ทำการทดลอง โดยพบว่าปริมาณของน้ำที่อยู่ในโหลหลังการทดลองนั้นน้อยกว่าตอนก่อนทดลองเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมเพิ่มขึ้นได้ ส่วนปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำที่ลดลงนั้นอาจเป็นผลมาจากการลูกปลานิลสามารถนำเอาสังกะสีไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการดำรงชีวิต

จากผลการศึกษาครั้งนี้ ชี้ให้เห็นว่า แคลเซียมมีความเป็นพิษต่อลูกปลานิลมากกว่าสังกะสี ซึ่งเป็นผลมาจากสังกะสีนั้นเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของปลานิล แต่การได้รับปริมาณที่มากเกินไปสังกะสีทำให้เกิดความเป็นพิษได้ ส่วนในสภาพสารละลายผสมของแคลเซียมและสังกะสีพบว่ายังทำให้เกิดความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้นกว่าที่อยู่ในรูปสารละลายเพียงชนิดเดียว และอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมความเป็นพิษของแคลเซียมและสังกะสีให้เพิ่มมากขึ้น โดยในสภาพธรรมชาติแล้วแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักนั้นย่อมมีปริมาณของโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกันไป นอกจากนี้แหล่งน้ำในแต่ละที่ ในฤดูกาลที่แตกต่างกันก็มีอุณหภูมิที่ต่างกัน ดังนั้นการศึกษารุ่นนี้สามารถคาดการณ์ได้ว่า ในสภาวะดังกล่าวจะมีแนวโน้มของความเป็นพิษของแคลเซียม และสังกะสีเป็นอย่างไร

เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ที่กำหนดให้มีปริมาณแคลเซียม ในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO_3 ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนมาตรฐานน้ำทิ้ง

อุตสาหกรรมกำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสี ไม่เกิน 0.03 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระดับความเข้มข้นที่ทำให้ลูกปลานิลตายร้อยละ 50 (96-h LC₅₀) อยู่มาก ส่วนค่า NOAEL ที่ได้จากการประเมินของแคดเมียมนั้นสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำ ส่วนสังกะสีนั้นต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำ แสดงให้เห็นว่าอาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเป็นพิษของสังกะสีต่อการดำรงชีวิตต่อลูกปลานิลได้ แต่ค่าที่ได้จากการประเมินนั้นเป็นความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยว ที่ระดับอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสเท่านั้น ซึ่งคาดว่าในสภาพสารละลายผสมควรมีค่าน้อยกว่าในสภาพสารละลายเดี่ยว เนื่องจากผลทดลองครั้งนี้พบว่า แคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมนั้นมีปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่สามารถทนต่อความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสีและสารละลายผสมได้ค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณาในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำเบื้องต้นเท่านั้น แต่สำหรับการกำหนดคุณภาพน้ำเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำทุกชนิด นั้นจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอื่นๆ เช่น การหาความเป็นพิษในระยะยาวต่อการดำรงชีวิตของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมในสัตว์ทดลองชนิดอื่นที่มีความไวต่อการตอบสนองต่อความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมได้ดีที่สุด รวมถึงลักษณะทางกายภาพของแหล่งน้ำนั้น มาประกอบการพิจารณาด้วย เพื่อให้สามารถกำหนดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ๆ ได้อย่างถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียม สังกะสี และ สารละลายผสมร่วมต่อลูกปลานิลวัยอ่อน (*Oreochromis niloticus*) ที่ระดับอุณหภูมิ 24, 28 และ 32 องศาเซลเซียส ในสภาวะน้ำนิ่ง (static bioassay) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

(1) ค่า 96-h LC_{50} และช่วงพิสัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของแคดเมียมและสังกะสีใน สภาวะสารละลายเพียงชนิดเดียวต่อลูกปลานิลวัยอ่อนเป็น 13.08 (9.94 - 16.26) มิลลิกรัมแคดเมียม ต่อลิตร และ 40.49 (37.99 - 43.07) มิลลิกรัมสังกะสีต่อลิตร ตามลำดับ

(2) เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสีในรูปสารละลายผสมกับ สารละลายเพียงชนิดเดียว พบว่าสารผสมมีความเป็นพิษมากกว่า ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียม และสังกะสีในสารละลายผสมที่ทั้ง 3 อุณหภูมิ คือ 24, 28 และ 32 องศาเซลเซียส เป็นแบบเสริมฤทธิ์กันที่ทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง

(3) อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และสารละลาย ผสมร่วม โดยอัตราการตายของลูกปลานิลวัยอ่อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และ ระยะเวลาที่ได้รับสารพิษเพิ่มขึ้น

(4) ระดับของแคดเมียมและสังกะสีที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบ (NOAEL) ต่อการดำรงชีวิต ของลูกปลานิลวัยอ่อน ที่ได้จากการคำนวณเป็น 0.13 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรหาความเป็นพิษของสารผสมร่วมของโลหะหนักหลายชนิดในสัตว์น้ำ เนื่องจากในสภาพธรรมชาติของแหล่งน้ำนั้นประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิดผสมกันอยู่ ซึ่งปฏิสัมพันธ์ของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ อาจมีผลต่อความเป็นพิษให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

(2) ควรหาความเป็นพิษในระยะยาวของโลหะหนักหลายชนิดในสัตว์น้ำ เนื่องจากการได้รับโลหะหนักปริมาณน้อยเป็นเวลานานอาจมีผลต่อการเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ และความผิดปกติของตัวอ่อนได้

(3) ควรหาสัตว์น้ำชนิดอื่นที่มีความไวต่อการตอบสนองต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้ดีที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการประเมินถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

(4) ควรมีการศึกษาความเป็นพิษร่วมกันโลหะหนักหลายชนิด โดยใช้วิธีชีววิเคราะห์แบบน้ำไหล (continuous flow bioassay) และศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความกระด้าง รวมถึงลักษณะทางกายภาพของแหล่งน้ำ เพื่อให้สามารถประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ได้ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด

(5) ควรมีการศึกษากลไกของความเป็นพิษของโลหะหนักในระดับเซลล์ เพื่อให้สามารถพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ หรือในการตรวจวัดความเป็นพิษของโลหะหนัก เช่น การใช้ metallothionien ในการตรวจวัดระดับความเป็นพิษของโลหะหนัก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จารุวรรณ สมศิริ. 2523. การศึกษาผลในระยะสั้นของ $HgCl_2$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ที่มีต่อการรอดของปลานิล *Tilapia nilotica* Linn. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขา วิทยาศาสตร์การประมง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เจ้าท่า, กรม. 2543. รายงานผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา (ตอนล่างกลาง) ทำเงิน บางปะกง ป่าสัก แมกทอง ระยอง ประแสร์ ลำตะคอง มูล ชี และนครนายก ระหว่างเดือน กรกฎาคม-ธันวาคม พ.ศ.2542. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายสิ่งแวดล้อม กองวิชาการ กรมเจ้าท่า กระทรวงคมนาคม.
- โชคชัย ยะชูศรี. 2536. พิษของเนื้บพลันของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในสภาพสารละลายเดี่ยวต่อไรแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นงลักษณ์ โพธารณพงศ์ และ รามนรี เนตรวิเชียร. 2541. การศึกษาพิษเนื้บพลันของทองแดง แคดเมียม ต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเค็มและแหล่งน้ำจืด. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกอบ ศรีจันทร์. 2529. ความเป็นพิษของโลหะแคดเมียมต่อปลากระพงขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน.
- วิรัช จิวแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำ และการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แววตา ทองระอา. 2525. พิษเนื้บพลันของสารละลายผสมของสังกะสีและทองแดงที่มีต่อปลาตะเพียนขาว *Puntius gonionotus* Bleeker. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- Anadu, D. I., Chapman, G. A., Curtis, L. R., and Tubb, R. A. 1989. Effect of zinc exposure on subsequent acute tolerance to heavy metals in rainbow trout. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 43: 329-336.
- APHA, and WEF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edition. WA: American Public Health Association.

- Atli, G., and Canli, M. 2003. Natural occurrence of metallothionein-like proteins in the liver of fish *oreochromis niloticus* and effects of cadmium, lead, copper, zinc, and iron exposures on their profiles. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 70: 619–627.
- Bambang, Y., Thuet, P., Charmantier, D.T.J.P., and Charmantier, G. 1995. Effect of copper on survival and osmoregulation of various developmental stages of the shrimp *Penaes japonicus* Bate (Crustacea:Decapoda). Aquat. Toxicol. 33:125-139.
- Beliles, R. P. 1994. Zinc, Zn. In: G. D. Clayton, and F. E. Clayton (eds.), Patty's industrial hygiene and toxicology, pp. 2332–2342. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Bengtsson, B. E. 1974. Effect of zinc on growth of the minnow *Phoxinus phoxinus*. Oikos. 25: 370–373.
- Bengtsson, B. E., Carlin, C. H., Larsson, A., and Svanberg, O. 1975. Vertebral damage in minnows, *Phoxinus phoxinus* L., exposed to cadmium. Ambio. 4: 166-168.
- Benoit, D. A., and Holcombe, G. W. 1978. Toxic effects of zinc on fathead minnows *Pimephales promelas* in soft water. J. Fish. Biol. 13: 701–708.
- Benoit, D. A., Leonard, E. N., Christensen, G. M., and Fiandt, J. T. 1976. Toxic effects of cadmium on three generations of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Trans. Am. Fish. Soc. 105: 550-560.
- Bervoets, L., Blust, R., and Verheyen, R. 1996. Effect of temperature on cadmium and zinc uptake by the midge larvae *Chironomus riparius*. Archives Of Environmental Contamination And Toxicology. 31 (4): 502-511.
- Borgmann, U., and Ralph, K. M. 1986. Effects of cadmium, 2,4-dichlorophenol, and pentachlorophenol on feeding, growth, and particle-size-conversion efficiency of white sucker larvae and young common shiners. Arch. environ. Contam. Toxicol. 15: 473-480.
- Brown, D. A. , Steven M. B., and Hershelman, G. P. 1990. Exposure of scorpionfish (*Scorpaena guttata*) to cadmium: effects of acute and chronic exposures on the cytosolic distribution of cadmium, copper and zinc. Aquatic Toxicology. 16 (4): 295-310.
- Cakmak, J., and Marschner, H. 1988. Increase in membrane permeability and exudation in roots of zinc deficient plants. J. Plant. Physiol. 132: 356–361.
- Calamari, D., Marchetti, R., and Vailati, G. 1980. Influence of water hardness on cadmium toxicity to *Salmo gairdneri* Rich. Water. Res. 14: 1421-1426.

- Dawson, D. A., Stebler, E. F., Burks, S. L., and Bantle, J. A. 1988. Evaluation of the developmental toxicity of metal-contaminated sediments using short-term fathead minnow and frog embryo-larval assays. Environ. Toxicol. Chem. 7: 27–34.
- Douben, P. E. T. 1989. Uptake and elimination of waterborne cadmium by the fish *Noemacheilus barbatulus* L. (stone loach). Arch. Environ. Contam. Toxicol. 18: 576-586.
- Eisler, R. 1971. Cadmium poisoning in *Fundulus heteroclitus* (Pisces: Cyprinodontidae) and other marine organism. J. Fish. Res. Board Can. 28: 1225-1234.
- Everall, N. C., Macfarlane, N. A. A., and Sedgwick, R. W. 1989. The interactions of water hardness and pH with the acute toxicity of zinc to the brown trout, *Salmo trutta* L. J. Fish. Biol. 35: 27–36.
- EZI. 1996. Zinc recycling: history, present position and prospects. Brussels: European Zinc Institute.
- Fargaová, A. 2001. Winter third- to fourth-instar larvae of chironomus plumosus as bioassay tools for assessment of acute toxicity of metals and their binary combinations. Ecotoxicology and Environmental Safety. 48 (1): 1-5.
- Florence, T. M. 1977. Trace metal species in fresh waters. Water. Res. 11: 681–687.
- Florence, T. M. 1980. Speciation of zinc in natural waters. In J. O. Nriagu (ed.), Zinc in the environment. Part 1: Ecological cycling, pp. 199–227. New York: John Wiley.
- Hatakeyama, S., and Yasuno, M. 1987. Chronic effects of Cd on the reproduction of the guppy (*Poecilia reticulata*) through Cd-accumulated midge larvae (*Chironomus yoshimatsui*). Ecotoxicol. Environ. Saf. 14: 191-207.
- Hogstrand, C., and Haux, C. 1990. A radioimmunoassay for perch (*Perca fluviatilis*) metallothionein. Toxicol. Appl. Pharmacol. 103: 56-65.
- Hogstrand, C., Verboost, P. M., Wendelaar Bonga, S. E., and Wood, C. M. 1996. Mechanism of zinc uptake in gills of freshwater rainbow trout: interplay with calcium transport. Am.J.Physiol. 270: R1141-1147.
- Hogstrand, C., Willson, R. W., Polgar, D., and Wood, C.M. 1994. Effects of zinc on the branchial calcium uptake in freshwater rainbow trout during adaptation to waterborne zinc. J.Exp.Biol. 186: 55-73.
- Holcombe, G. W., Benoit, D. A., and Leonard, E. N. 1979. Long-term effects of zinc exposures on brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Trans. Am. Fish Soc. 108: 76–87.

- Huang, C. P., Elliott, H. A., and Ashmead, R. M. 1977. Interfacial reactions and the fate of heavy metals in soil-water systems. J. Water Pollut. Control Fed. 49: 745–756.
- Huiguang, F. 1989. Hormonal responses of fish to cadmium. Ph.D. Thesis, University of Nijmegen .Nijmegen: The Netherlands.
- Jayaprakash, R. I., and Madhyastha, M. N. 1987. Toxicities of some heavy metals to the tadpoles of frog, *Microhyla ornata* (dumeril and bibron), Toxicology Letters. 36 (2): 205-208.
- Kargin, F. 1996. Elimination of cadmium from Cd-contaminated *Tilapia zilli* in media containing EDTA and freshwater : changes in protein levels. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 57: 211-216.
- Kargin, F. , and Cogun, H. Y. 1999. Metal interactions during accumulation and elimination of zinc and cadmium in tissues of the freshwater fish *Tilapia nilotica*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 63: 511-519.
- Kendrick, M. J. 1992. Metals in biological systems. New York: E. Horwood.
- Kime, D. E., et al. 1996. Use of computer assisted sperm analysis (CASA) for monitoring the effects of pollution on sperm quality of fish; application to the effects of heavy metals Aquatic Toxicology. 36(3-4): 223-237.
- Knotkova, D., and Porter, F. 1994. Longer life of galvanised steel in the atmosphere due to reduced SO₂ pollution in Europe. Proceedings of Intergalva 1994. Paris: Birmingham. EGGA, pp GD 8/1–GD 8/20.
- Kumar, S., and Pant, S. C. 1984. Comparative effects of the sublethal poisoning of zinc, copper and lead on the gonads of the teleost *Puntius conchoniis* Ham. Toxicol. Lett. 23: 189–194.
- Lide, D. R. 1991. Physical constants of inorganic compounds. In D. R. Lide (ed.), CRC handbook of chemistry and physics, A ready-reference book of chemical and physical data, 71st ed. pp. 4/116–4/118. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lussier, S. M., Gentile, J. H., and Walker, J. 1985. Acute and chronic effects of heavy metals and cyanide on *Mysidopsis bahia* (crustacea: mysidacea). Aquatic Toxicology. 7 (1-2): 25-35
- Macinnes, J. R., Thurberg, F. P., Greig, R. A., and Gould, E. 1977. Long-term cadmium stress in the cunner, *Tautoglabrus adspersus*. Fish. Bull. 75: 199-203.
- Madoni, P., Davoli, D., Gorbi, G., and Vescovi, L. 1996. Toxic effect of heavy metals on the activated sludge protozoan community. Water Research. 30 (1): 135-141.

- Magliette, R. J., Doherty, F. G., McKinney, D., and Venkataramani, E. S. 1995. Need for environmental quality guidelines based on ambient freshwater quality criteria in natural waters – case study "zinc". Bull. Environ. Contam. Toxicol. 54: 626–632.
- Mason, R. L., Gunst, R. F., and Hess, J. L. 2003. Statistical Design and Analysis of Experiments. London: Wiley-Interscience.
- McDonald, D. G., and Wood, C. M. 1993. Branchial mechanisms of acclimation to metals in Freshwater fish. In J. C. Rankin and F. B. Jensen (eds.), Fish Ecophysiology, pp. 297-321. London: Chapman & Hall.
- Meteyer, M. J., Wright, D. A., and Martin, F. D. 1988. Effect of cadmium on early developmental stages of the sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*). Environ. Toxicol. Chem., 7: 321-328.
- Middaugh, D. P., and Dean, J. M. 1977. Comparative sensitivity of eggs, larvae, and adults of the estuarine teleosts, *Fundulus heteroclitus* and *Menidia menidia* to cadmium. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 17: 645-652.
- Muramoto, S. 1981a. Influence of complexans (EDTA, DTPA) on the toxicity of cadmium to fish at chronic levels. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 26: 641-646.
- Muramoto, S. 1981b. Variations of some elements in cadmium-induced malformed fish. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 27: 193-200.
- Norberg, T. J., and Mount, D. I. 1985. A new fathead minnow (*Pimephales promelas*) subchronic toxicity test. Environ. Toxicol. Chem. 4: 711–718.
- Nriagu, J. O., and Pacyna, J. M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature (Lond.). 333: 134-139.
- Part, P., Svanberg, O., and Kiessling, A. 1985. The availability of cadmium to perfused rainbow trout gills in different water qualities. Water Res. 19: 427-434.
- Part, P., and Wikmark, G. 1984. The influence of certain complexing agents (EDTA and citrate) on the uptake of cadmium in perfused rainbow trout gills. Aquat. Toxicol. 5: 277-289.
- Pattanee Saisombat. 1983. Synergistic Effect of Cadmium and Zinc to Walking Catfish, *Clarias macrocephalus* Gunther. Master's Thesis, Environmental Biology, Graduate school, Mahidol University.
- Pickering, Q. H., and Gast, M. H. 1972. Acute and chronic toxicity of cadmium to the fathead minnow *Pimephales promelas*. J. Fish Res. Board. Can. 29: 1099-1106.

- Rathore, R. S., Khangarot, B. S. 2002. Effects of temperature on the sensitivity of sludge worm *Tubifex tubifex* Muller to selected heavy metals. Ecotoxicology And Environmental Safety. 53 (1): 27-36.
- Reader, J. P., Overall, N. C., Sayer, M. D. J., and Morris, R. 1989. The effects of eight trace metals in acid soft water on survival, mineral uptake and skeletal calcium deposition in yolk-sac fry of brown trout, *Salmo trutta* L. J. Fish. Biol. 35: 187–198.
- Roch, M., and Maly, E. J. 1979. Relationship of cadmium-induced hypocalcemia with mortality in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and the influence of temperature on toxicity. J. Fish Res. Board Can. 36: 1297-1303.
- Sample, B. E., Opresko, D. M., and Suter G.W. 1996. Toxicological Benchmarks for Wildlife: 1996 Revision. Risk Assessment Program, Health Sciences Research Division, Oak Ridge Tennessee. Prepared for: U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management.
- Sastry, K. V., and Subhadra, K. M. 1983. Cadmium induced alterations in the intestinal absorption of glucose and fructose in a freshwater catfish *Heteropneustes fossilis*. Water Air Soil Pollut. 20: 293-297.
- Sayer, M. D. J., Reader, J. P., and Morris, R. 1989. The effect of calcium concentration on the toxicity of copper, lead and zinc to yolk-sac fry of brown trout, *Salmo trutta* L., in soft, acid water. J. Fish Biol. 35: 323–332.
- Shukla, O. S., Ram, M., and Omkar. Cadmium and zinc toxicity to an aquatic insect, *Ranatra elongata* (Fabr.). Toxicology Letters. 15 (1): 39-41.
- Siriwardena, P. P. G. S.N., Rana, K. J., and Baird, D. J.1995. A method for partitioning cadmium bioaccumulated in small aquatic organisms. Environmental Toxicology And Chemistry. 14 (9): 1575-1577.
- Smith, M. J., and Heath, A. G. 1979. Acute toxicity of copper, chromate, zinc, and cyanide to freshwater fish: effect of different temperatures. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 22: 113-119.
- Spehar, R. L., Leonard, E. N., and Defoe, D. L. 1978. Chronic effects of cadmium and zinc mixtures on flagfish (*Jordanella floridae*). Trans. Am. Fish. Soc. 107: 354-360.
- Spry, D. J., and Wood, C. M. 1989. A kinetic method for the measurement of zinc influx in vivo in the rainbow trout, and the effects of waterborne calcium on flux rates. J. exp. Biol. 142: 425-446.

- Stasinait, P. 1999. Long-term heavy metal mixture toxicity to embryos and alevins of rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*). Acta. Zoologica Lituanica. Hydrobiologia. 9(2): 153-162.
- Sylviane, L. G., and Gostan, N. M. 1994. In vitro dose-response study of the effect of cadmium on eel (*anguilla anguilla*) gill na^+/k^+ -atpase activities. Ecotoxicology and Environmental Safety. 28 (1): 43-52.
- Verbost, P. M., Van Rooij, J., Flik, G., Lock, R. A. C., and Wendelaar, B. S. E. 1989. The movement of cadmium through freshwater trout branchial epithelium and its interference with calcium transport. J.Exp. Biol. 145: 185-197.
- Verslycke, T., Vangheluwe, M., Heijerick, D., De Schampelaere, K., Van Sprang, P., Janssen C. R. 2003. The toxicity of metal mixtures to the estuarine mysid *Neomysis integer* (Crustacea : Mysidacea) under changing salinity. Aquatic Toxicology. 64 (3): 307-315.
- Viarengo, A., and Nott, J. A. 1993. Mechanisms of heavy metal cation homeosis in marine invertebrates. Comp. Biochem. Physiol. 104C : 355-372.
- Voyer, R. A. 1975. Effect of dissolved oxygen concentration on the acute toxicity of cadmium to the mummichog, *Fundulus heteroclitus* (L.), at various salinities. Trans. Am. Fish. Soc. 104: 129-134.
- Voyer, R. A., Yevich, P. P., and Barszcz, C. A. 1975. Histological and toxicological responses of the mummichog, *Fundulus heteroclitus* (L.), to combinations of levels of cadmium and dissolved oxygen in a freshwater. Water Res. 9: 1069-1074.
- Watson, T. A., and McKeown, B. A. 1976. The effect of sublethal concentrations of zinc on growth and plasma glucose levels in rainbow trout, *Salmo gairdneri* (Richardson). J. Wild. Dis. 12: 263-270.
- Wepener, V., Vuren, J. H. J. Van., and Preez, H. H. Du. 2001. Uptake and distribution of a copper, iron and zinc mixture in gill, liver and plasma of a freshwater teleost, *Tilapia sparrmanii*. Water S.A. 27(1): 546-551.
- Wicklund, A. 1990. Metabolism of cadmium and zinc in fish. Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science, University of Uppsala, Sweden: No. 250.
- WHO. 1992. Cadmium : environmental aspects (Environmental health criteria ; 135) [Online]. Available from: <http://www.intox.org/databank/documents/chemical/cadmium/ehc135.html>[2003, February 1]

WHO. 2001. Zinc (Environmental health criteria ; 135) [Online]. Available from:

<http://www.intox.org/databank/documents/chemical/zincsalt/ehc221.html>[2003, February 1]

Wu, S. M.,and Hwang, P. P. 2003. Copper or cadmium pretreatment increases the protection against cadmium toxicity in tilapia larvae (*Oreochromis mossambicus*). Zoological Studies, 42 (1): 179-185.



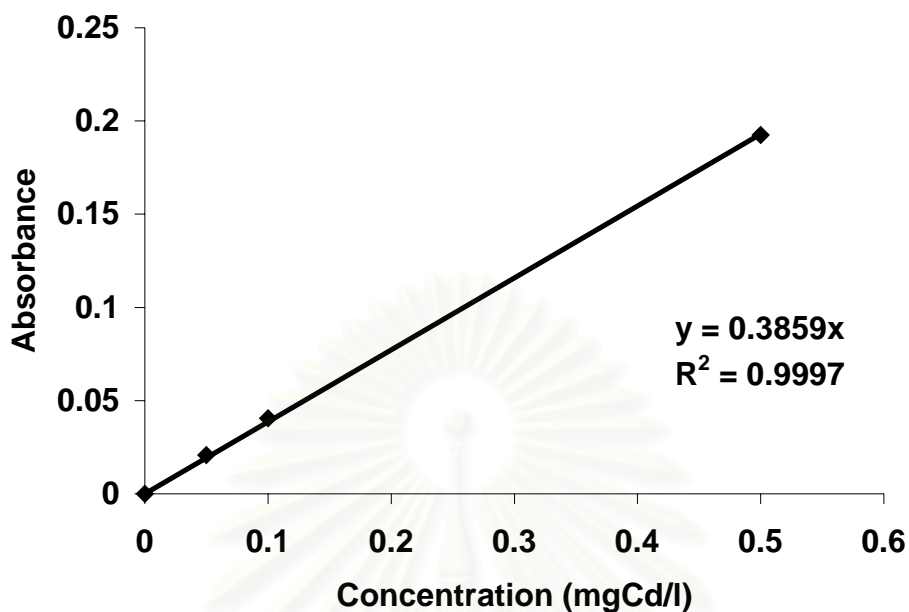
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

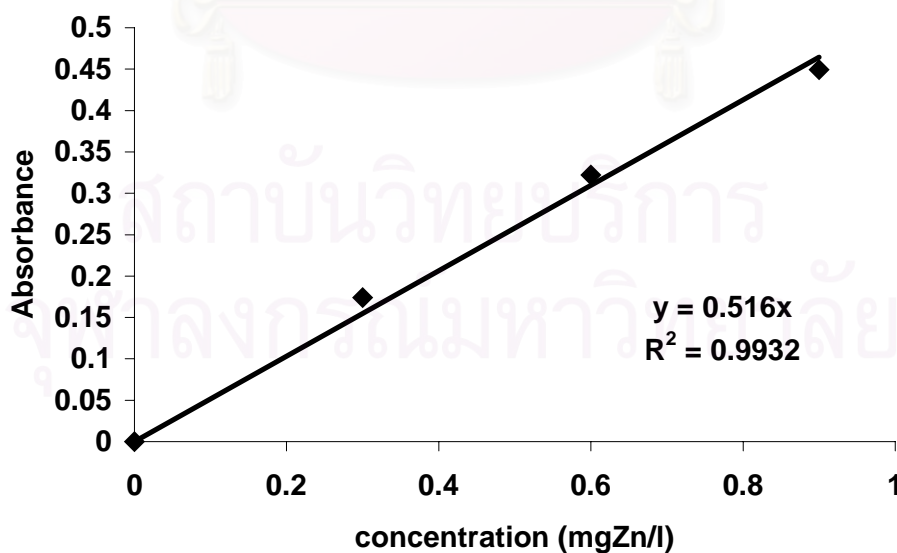
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมคลอไรด์



หมายเหตุ เนื่องจากความสามารถในการตรวจวัดของ AAS อยู่ในช่วง 0.02-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจะต้องทำการเจือจางระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองลง 50 เท่า

กราฟมาตรฐานของสารละลายซิงค์คลอไรด์



หมายเหตุ เนื่องจากความสามารถในการตรวจวัดของ AAS อยู่ในช่วง 0.01-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจะต้องทำการเจือจางระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองลง 50 เท่า

ผลการทดลองของแคดเมียมในสภาพสารละลายเดี่ยวโดยวิธี Probit analysis

Output from Probit Procedure

----- HR=96 -----

Probit Procedure
Probit Analysis on CONC

Probability	CONC	95 Percent Fiducial Limits	
		Lower	Upper
0.01	345.96363	136.18697	3158
0.02	209.56207	95.15623	1352
0.03	155.81861	76.93392	819.04165
0.04	125.99541	66.02991	572.17643
0.05	106.66832	58.55517	432.09215
0.06	92.96490	53.01007	342.76696
0.07	82.65865	48.67733	281.29347
0.08	74.57698	45.16494	236.64472
0.09	68.03931	42.23813	202.88766
0.10	62.62146	39.74657	176.55990
0.15	45.03089	31.13091	101.90021
0.20	35.13068	25.78013	67.68074
0.25	28.61739	21.93676	48.54547
0.30	23.92387	18.90733	36.59056
0.35	20.33154	16.34459	28.60807
0.40	17.46043	14.05023	23.06683
0.45	15.08890	11.92084	19.13010
0.50	13.07786	9.93700	16.26280
0.55	11.33485	8.13099	14.08424
0.60	9.79532	6.53376	12.33293
0.65	8.41208	5.15049	10.84402
0.70	7.14895	3.96677	9.51623
0.75	5.97645	2.96055	8.28337
0.80	4.86841	2.10956	7.09511
0.85	3.79807	1.39476	5.90250
0.90	2.73118	0.80231	4.63838
0.91	2.51370	0.69781	4.36722
0.92	2.29334	0.59795	4.08639
0.93	2.06912	0.50278	3.79347
0.94	1.83973	0.41240	3.48514
0.95	1.60339	0.32699	3.15662
0.96	1.35743	0.24682	2.80061
0.97	1.09763	0.17234	2.40481
0.98	0.81613	0.10438	1.94526
0.99	0.49436	0.04466	1.35994

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองของสิ่งกีดขวางในสภาพสารละลายเดี่ยวโดยวิธี Probit analysis

Output from Probit Procedure

HR=96

Probit Procedure

Probit Analysis on CONC

Probability	CONC	95 Percent Fiducial Limits	
		Lower	Upper
0.01	80.63124	67.63167	113.34198
0.02	72.56395	62.38857	96.99953
0.03	68.18030	59.46792	88.49235
0.04	65.20144	57.44941	82.86953
0.05	62.95781	55.90859	78.72258
0.06	61.16349	54.66215	75.46255
0.07	59.67073	53.61455	72.78999
0.08	58.39359	52.70982	70.53294
0.09	57.27781	51.91242	68.58405
0.10	56.28705	51.19839	66.87207
0.15	52.51620	48.41893	60.52753
0.20	49.84478	46.37109	56.21805
0.25	47.74112	44.69082	52.95531
0.30	45.97618	43.21574	50.32682
0.35	44.42976	41.85634	48.12375
0.40	43.02997	40.55592	46.22632
0.45	41.72916	39.27535	44.55824
0.50	40.49269	37.98658	43.06500
0.55	39.29286	36.66891	41.70260
0.60	38.10502	35.30560	40.43170
0.65	36.90450	33.87980	39.21459
0.70	35.66321	32.36965	38.01280
0.75	34.34478	30.74201	36.78317
0.80	32.89528	28.94198	35.46973
0.85	31.22195	26.86951	33.98454
0.90	29.13029	24.31146	32.15120
0.91	28.62641	23.70306	31.71104
0.92	28.07942	23.04666	31.23329
0.93	27.47843	22.33065	30.70814
0.94	26.80779	21.53848	30.12145
0.95	26.04376	20.64530	29.45169
0.96	25.14758	19.61098	28.66352
0.97	24.04886	18.36376	27.69231
0.98	22.59604	16.75210	26.39766
0.99	20.33527	14.33558	24.35304

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

โดยวิธี Response Surface Analysis

cd	zn	date	S24	S48	S72	S96
0	0	220803	10	10	9	5
5	0	220803	9	8	8	6
10	0	220803	10	8	8	7
15	0	220803	9	9	7	7
20	0	220803	6	5	5	4
0	30	220803	9	8	8	6
5	30	220803	9	9	8	8
10	30	220803	9	8	8	7
15	30	220803	7	6	6	6
20	30	220803	9	7	4	3
0	35	220803	10	10	9	9
5	35	220803	9	8	8	8
10	35	220803	10	10	10	6
15	35	220803	20	10	8	6
20	35	220803	10	10	5	2
0	40	220803	9	9	9	8
5	40	220803	10	9	7	6
10	40	220803	9	6	5	4
15	40	220803	8	7	4	3
20	40	220803	6	3	2	1
0	45	220803	9	9	6	6
5	45	220803	8	7	5	3
10	45	220803	9	8	6	2
15	45	220803	10	3	3	1
20	45	220803	7	6	4	1
0	0	250803	10	10	8	4
5	0	250803	10	10	10	8
10	0	250803	10	10	10	8
15	0	250803	10	9	9	9
20	0	250803	10	10	10	10
0	30	250803	10	10	10	9
5	30	250803	9	9	9	9
10	30	250803	9	9	8	7
15	30	250803	10	10	9	9
20	30	250803	9	6	5	4
0	35	250803	10	9	9	8
5	35	250803	10	9	9	7
10	35	250803	9	7	5	4
15	35	250803	8	8	6	3
20	35	250803	7	4	4	3
0	40	250803	10	8	7	3
5	40	250803	10	10	9	6
10	40	250803	7	6	5	3
15	40	250803	9	6	5	4
20	40	250803	8	7	4	2
0	45	250803	10	8	5	2
5	45	250803	8	6	4	3
10	45	250803	9	5	3	2
15	45	250803	7	5	3	1
20	45	250803	9	6	3	1
0	0	10903	10	10	10	10
5	0	10903	9	9	9	8
10	0	10903	7	6	5	4
15	0	10903	8	6	5	4
20	0	10903	8	6	4	4

0	30	10903	9	8	7	6
5	30	10903	10	10	9	9
10	30	10903	8	7	6	6
15	30	10903	6	6	5	5
20	30	10903	6	5	4	2
0	35	10903	9	9	8	8
5	35	10903	5	4	4	4
10	35	10903	7	5	4	4
15	35	10903	7	6	1	1
20	35	10903	7	5	3	2
0	40	10903	10	9	8	8
5	40	10903	8	7	5	4
10	40	10903	7	7	4	4
15	40	10903	7	6	4	4
20	40	10903	6	3	3	2
0	45	10903	9	7	6	6
5	45	10903	9	6	6	4
10	45	10903	9	8	1	1
15	45	10903	7	5	0	0
20	45	10903	9	9	1	0

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M24

Response Mean	12.533333
Root MSE	18.414633
R-Square	0.0867
Coef. of Variation	146.9253

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	2190.533333	0.0855	3.230	0.0456
Quadratic	2	17.255439	0.0007	0.0254	0.9749
Crossproduct	1	13.066667	0.0005	0.0385	0.8450
Total Regress	5	2220.855439	0.0867	1.310	0.2700

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	4997.811227	263.042696	0.715	0.7863
Pure Error	50	18400	368.000000		
Total Error	69	23398	339.098713		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	1.247604	8.404303	0.148	0.8824	10.634700
CD	1	0.755810	1.203912	0.628	0.5322	7.480000
ZN	1	0.043642	0.560022	0.0779	0.9381	2.754146
CD*CD	1	0.003810	0.050829	0.0749	0.9405	0.380952
ZN*CD	1	-0.003733	0.019019	-0.196	0.8450	-0.840000
ZN*ZN	1	0.002580	0.012126	0.213	0.8321	1.306098

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	1958.971429	652.990476	1.926	0.1335
ZN	3	274.950678	91.650226	0.270	0.8466

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-17.010708	-160.107081
ZN	-6.524452	-124.300165

Predicted value at stationary point -61.969996

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
1.468324	-0.360309	0.932833
0.218726	0.932833	0.360309

Stationary point is a minimum.
Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M48

Response Mean	25.466667
Root MSE	16.233709
R-Square	0.3655
Coef. of Variation	63.7449

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	9761.200000	0.3406	18.520	0.0000
Quadratic	2	708.268990	0.0247	1.344	0.2676
Crossproduct	1	5.400000	0.0002	0.0205	0.8866
Total Regress	5	10475	0.3655	7.950	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	4317.131010	227.217422	0.819	0.6749
Pure Error	50	13867	277.333333		
Total Error	69	18184	263.533300		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	0.670662	7.408945	0.0905	0.9281	17.881696
CD	1	1.788190	1.061328	1.685	0.0965	13.913333
ZN	1	-0.313041	0.493696	-0.634	0.5281	9.670244
CD*CD	1	-0.017143	0.044809	-0.383	0.7032	-1.714286
ZN*CD	1	-0.002400	0.016766	-0.143	0.8866	-0.540000
ZN*ZN	1	0.017041	0.010690	1.594	0.1155	8.626829

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	7116.638095	2372.212698	9.002	0.0000
ZN	3	3363.630894	1121.210298	4.255	0.0081

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	4.125992	51.259917
ZN	-0.431341	12.794830

Predicted value at stationary point 44.499259

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
8.633874	-0.026083	0.999660
-1.721330	0.999660	0.026083

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M72

Response Mean	39.600000
Root MSE	16.289741
R-Square	0.6224
Coef. of Variation	41.1357

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	25579	0.5275	48.198	0.0000
Quadratic	2	4366.924971	0.0901	8.228	0.0006
Crossproduct	1	232.066667	0.0048	0.875	0.3530
Total Regress	5	30178	0.6224	22.746	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	1776.208362	93.484651	0.283	0.9981
Pure Error	50	16533	330.666667		
Total Error	69	18310	265.355677		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	6.748246	7.434518	0.908	0.3672	19.620128
CD	1	1.503238	1.064991	1.412	0.1626	18.953333
ZN	1	-1.240846	0.495400	-2.505	0.0146	19.677073
CD*CD	1	0.001905	0.044964	0.0424	0.9663	0.190476
ZN*CD	1	0.015733	0.016824	0.935	0.3530	3.540000
ZN*ZN	1	0.043512	0.010727	4.056	0.0001	22.028049

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	15433	5144.403175	19.387	0.0000
ZN	3	14977	4992.438482	18.814	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-180.012117	-1790.121167
ZN	14.017715	337.898588

Predicted value at stationary point -1548.380896

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
22.170582	0.080268	0.996773
0.047943	0.996773	-0.080268

Stationary point is a minimum.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M96

Response Mean	51.466667
Root MSE	16.401232
R-Square	0.6546
Coef. of Variation	31.8677

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	25037	0.4659	46.538	0.0000
Quadratic	2	7907.704220	0.1472	14.698	0.0000
Crossproduct	1	2232.600000	0.0415	8.300	0.0053
Total Regress	5	35178	0.6546	26.154	0.0000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	3894.362447	204.966445	0.699	0.8022
Pure Error	50	14667	293.333333		
Total Error	69	18561	269.000422		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	31.621804	7.485402	4.224	0.0001	25.041502
CD	1	-0.153524	1.072280	-0.143	0.8866	15.540000
ZN	1	-2.154992	0.498791	-4.320	0.0001	21.321951
CD*CD	1	0.030476	0.045272	0.673	0.5031	3.047619
ZN*CD	1	0.048800	0.016939	2.881	0.0053	10.980000
ZN*ZN	1	0.058103	0.010800	5.380	0.0000	29.414634

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	16179	5392.834921	20.048	0.0000
ZN	3	21232	7077.244264	26.309	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-2.857313	-18.573125
ZN	0.170856	26.344263

Predicted value at stationary point 4.661677

Eigenvalues	Eigenvectors CD	Eigenvectors ZN
30.512057	0.196017	0.980600
1.950196	0.980600	-0.196017

Stationary point is a minimum.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

โดยวิธี Response Surface Analysis

cd	zn	date	S24	S48	S72	S96
0	0	160303	10	8	8	8
5	30	160303	8	5	5	4
10	30	160303	8	8	8	6
15	30	160303	8	8	7	6
20	30	160303	7	3	3	3
25	30	160303	5	2	2	2
5	35	160303	7	6	6	6
10	35	160303	7	5	3	3
15	35	160303	6	5	5	5
20	35	160303	4	1	1	1
25	35	160303	4	4	3	2
5	40	160303	8	3	2	1
10	40	160303	7	6	6	6
15	40	160303	9	6	6	6
20	40	160303	7	3	3	3
25	40	160303	2	0	0	0
5	45	160303	6	3	3	3
10	45	160303	7	5	4	4
15	45	160303	4	2	2	2
20	45	160303	2	0	0	0
25	45	160303	2	2	2	2
0	0	300503	10	8	8	8
5	30	300503	8	8	8	8
10	30	300503	7	5	5	5
15	30	300503	0	0	0	0
20	30	300503	0	0	0	0
25	30	300503	0	0	0	0
5	35	300503	4	4	4	4
10	35	300503	4	4	4	4
15	35	300503	2	2	2	2
20	35	300503	1	1	1	1
25	35	300503	0	0	0	0
5	40	300503	6	3	3	3
10	40	300503	4	4	4	4
15	40	300503	1	0	0	0
20	40	300503	0	0	0	0
25	40	300503	1	1	1	1
5	45	300503	6	5	5	5
10	45	300503	3	3	3	3
15	45	300503	0	0	0	0
20	45	300503	0	0	0	0
25	45	300503	0	0	0	0
5	50	300503	1	1	0	0
10	50	300503	1	1	1	1
15	50	300503	0	0	0	0
20	50	300503	0	0	0	0
25	50	300503	0	0	0	0
0	0	130603	10	10	10	8
5	0	130603	10	9	8	8
10	0	130603	10	10	9	9
15	0	130603	10	10	9	9
20	0	130603	10	10	9	5
0	30	130603	8	8	6	6
5	30	130603	9	7	4	4
10	30	130603	6	4	4	4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

15	30	130603	4	1	1	1
20	30	130603	0	0	0	0
0	35	130603	10	8	4	4
5	35	130603	8	4	3	3
10	35	130603	6	4	2	2
15	35	130603	1	0	0	0
20	35	130603	0	0	0	0
0	40	130603	9	5	2	2
5	40	130603	8	4	2	2
10	40	130603	4	0	0	0
15	40	130603	2	1	0	0
20	40	130603	0	0	0	0
0	45	130603	7	4	2	2
5	45	130603	2	1	0	0
10	45	130603	0	0	0	0
15	45	130603	0	0	0	0
20	45	130603	0	0	0	0
0	0	200603	9	9	7	7
5	0	200603	9	9	8	8
10	0	200603	9	8	8	7
15	0	200603	9	9	8	8
20	0	200603	10	10	9	9
0	30	200603	10	9	8	8
5	30	200603	9	9	7	6
10	30	200603	7	7	4	4
15	30	200603	9	7	5	4
20	30	200603	6	6	4	4
0	35	200603	9	6	4	3
5	35	200603	10	9	7	5
10	35	200603	7	5	5	3
15	35	200603	5	4	2	1
20	35	200603	6	3	2	2
0	40	200603	8	6	2	2
5	40	200603	10	9	5	5
10	40	200603	7	5	5	5
15	40	200603	8	6	5	5
20	40	200603	8	5	5	5
0	45	200603	9	7	2	0
5	45	200603	7	6	5	5
10	45	200603	9	7	5	4
15	45	200603	5	3	3	2
20	45	200603	3	2	0	0
0	0	250603	7	7	6	6
5	0	250603	10	9	9	8
10	0	250603	10	10	10	9
15	0	250603	10	9	8	8
20	0	250603	10	10	9	9
0	30	250603	10	10	9	9
5	30	250603	9	5	5	5
10	30	250603	10	8	7	7
15	30	250603	5	3	3	3
20	30	250603	3	2	2	2
0	35	250603	8	7	7	7
5	35	250603	9	8	8	7
10	35	250603	7	4	3	3
15	35	250603	2	0	0	0
20	35	250603	2	1	1	1
0	40	250603	8	4	4	4
5	40	250603	5	3	2	2
10	40	250603	4	2	2	2
15	40	250603	3	3	3	3
20	40	250603	3	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0	45	250603	7	6	6	5
5	45	250603	1	1	1	1
10	45	250603	5	5	4	3
15	45	250603	3	1	1	1
20	45	250603	1	0	0	0

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	12.500000	12.500000
ZN	25.000000	25.000000

Response Surface for Variable M24

Response Mean	45.000000
Root MSE	21.874906
R-Square	0.6266
Coef. of Variation	48.6109

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	85148	0.5728	88.971	0.0000
Quadratic	2	3003.066603	0.0202	3.138	0.0471
Crossproduct	1	4992.032308	0.0336	10.432	0.0016
Total Regress	5	93143	0.6266	38.930	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	28	9887.336657	353.119166	0.681	0.8749
Pure Error	88	45620	518.409091		
Total Error	116	55507	478.511523		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	0.351102	8.053543	0.0436	0.9653	30.633053
CD	1	0.695118	0.985281	0.706	0.4819	23.485724
ZN	1	-0.292086	0.483055	-0.605	0.5466	35.691355
CD*CD	1	-0.014918	0.037430	-0.399	0.6910	-2.330953
ZN*CD	1	0.062268	0.019278	3.230	0.0016	19.458652
ZN*ZN	1	0.018828	0.010128	1.859	0.0656	11.767430

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	44046	14682	30.683	0.0000
ZN	3	41550	13850	28.944	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value	
	Coded	Uncoded
CD	-0.290305	8.871184
ZN	-1.276507	-6.912668

Predicted value at stationary point 4.443911

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
16.732850	0.454578	0.890707
-7.296373	0.890707	-0.454578

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	12.500000	12.500000
ZN	25.000000	25.000000

Response Surface for Variable M48

Response Mean	57.459016
Root MSE	19.561384
R-Square	0.6685
Coef. of Variation	34.0441

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	84936	0.6343	111.0	0.0000
Quadratic	2	572.086975	0.0043	0.748	0.4758
Crossproduct	1	4017.327734	0.0300	10.499	0.0016
Total Regress	5	89525	0.6685	46.792	0.0000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	28	10177	363.469198	0.935	0.5650
Pure Error	88	34210	388.750000		
Total Error	116	44387	382.647737		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	6.688654	7.201789	0.929	0.3549	45.508568
CD	1	0.421278	0.881077	0.478	0.6335	18.744033
ZN	1	0.600210	0.431966	1.389	0.1673	38.624579
CD*CD	1	-0.012729	0.033471	-0.380	0.7044	-1.988930
ZN*CD	1	0.055859	0.017239	3.240	0.0016	17.455918
ZN*ZN	1	0.004931	0.009057	0.544	0.5872	3.081709

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	30229	10076	26.333	0.0000
ZN	3	50896	16965	44.336	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-1.697010	-8.712620
ZN	-1.460508	-11.512688

Predicted value at stationary point 1.398423

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
9.635125	0.600437	0.799672
-8.542346	0.799672	-0.600437

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	12.500000	12.500000
ZN	25.000000	25.000000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response Surface for Variable M72

Response Mean 64.098361
 Root MSE 18.160802
 R-Square 0.6539
 Coef. of Variation 28.3327

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	70339	0.6363	106.6	0.0000
Quadratic	2	796.306650	0.0072	1.207	0.3028
Crossproduct	1	1156.554946	0.0105	3.507	0.0636
Total Regress	5	72292	0.6539	43.838	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	28	10225	365.184868	1.146	0.3081
Pure Error	88	28033	318.560606		
Total Error	116	38259	329.814738		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	13.869267	6.686146	2.074	0.0403	50.915761
CD	1	-0.185419	0.817992	-0.227	0.8211	15.348939
ZN	1	0.959300	0.401038	2.392	0.0184	37.079275
CD*CD	1	0.026562	0.031075	0.855	0.3944	4.150302
ZN*CD	1	0.029971	0.016005	1.873	0.0636	9.366065
ZN*ZN	1	0.002985	0.008409	0.355	0.7233	1.865352

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	15687	5228.899129	15.854	0.0000
ZN	3	48686	16229	49.206	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value	
	Coded	Uncoded
CD	-5.110017	-51.375218
ZN	2.889932	97.248312

Predicted value at stationary point 65.277389

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
7.828205	0.786451	0.617653
-1.812551	-0.617653	0.786451

Stationary point is a saddle point.
Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	12.500000	12.500000
ZN	25.000000	25.000000

Response Surface for Variable M96

Response Mean	66.557377
Root MSE	17.389445
R-Square	0.6455
Coef. of Variation	26.1270

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	62639	0.6330	103.6	0.0000
Quadratic	2	744.356929	0.0075	1.231	0.2959
Crossproduct	1	493.355787	0.0050	1.632	0.2040
Total Regress	5	63877	0.6455	42.247	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	28	9360.898863	334.317817	1.144	0.3105
Pure Error	88	25717	292.234848		
Total Error	116	35078	302.392806		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	17.071311	6.402160	2.666	0.0088	53.788578
CD	1	0.008398	0.783249	0.0107	0.9915	15.453370
ZN	1	0.931867	0.384004	2.427	0.0168	34.579507
CD*CD	1	0.029540	0.029755	0.993	0.3229	4.615588
ZN*CD	1	0.019575	0.015325	1.277	0.2040	6.117221
ZN*ZN	1	0.004132	0.008052	0.513	0.6088	2.582801

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	13486	4495.301068	14.866	0.0000
ZN	3	42800	14267	47.179	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value	
	Coded	Uncoded
CD	12.831464	172.893299
ZN	-21.889496	-522.237393

Predicted value at stationary point -225.530732

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
6.822261	0.810972	0.585085
0.376129	-0.585085	0.810972

Stationary point is a minimum.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส

โดยวิธี Response Surface Analysis

cd	zn	date	S24	S48	S72	S96
0	0	250703	7	6	4	3
5	0	250703	9	6	4	3
10	0	250703	10	8	3	1
15	0	250703	8	8	6	6
20	0	250703	10	7	3	1
0	30	250703	10	8	3	2
5	30	250703	7	4	4	3
10	30	250703	10	4	1	0
15	30	250703	9	5	5	2
20	30	250703	7	5	0	0
0	35	250703	8	3	1	0
5	35	250703	8	3	2	1
10	35	250703	7	5	3	2
15	35	250703	9	6	2	1
20	35	250703	5	2	1	0
0	40	250703	10	4	3	0
5	40	250703	9	6	4	2
10	40	250703	6	3	2	1
15	40	250703	5	1	1	0
20	40	250703	4	1	0	0
0	45	250703	5	1	0	0
5	45	250703	7	1	1	0
10	45	250703	5	3	2	1
15	45	250703	4	2	1	1
20	45	250703	4	2	2	1
0	0	310703	10	7	6	6
5	0	310703	8	8	6	6
10	0	310703	10	8	7	6
15	0	310703	10	10	10	5
20	0	310703	9	6	5	5
0	30	310703	10	7	5	3
5	30	310703	9	7	4	4
10	30	310703	8	5	5	5
15	30	310703	6	4	2	1
20	30	310703	7	5	4	2
0	35	310703	6	5	4	4
5	35	310703	10	8	5	5
10	35	310703	9	5	2	2
15	35	310703	7	7	5	5
20	35	310703	7	3	1	0
0	40	310703	10	7	5	3
5	40	310703	5	5	2	1
10	40	310703	5	3	2	1
15	40	310703	4	4	4	3
20	40	310703	6	4	3	3
0	45	310703	9	7	4	1
5	45	310703	8	5	4	1
10	45	310703	6	3	1	0
15	45	310703	2	0	0	0
20	45	310703	1	0	0	0
0	0	60803	9	7	5	5
5	0	60803	9	8	6	3
10	0	60803	7	6	5	4
15	0	60803	10	6	4	2
20	0	60803	10	9	6	5

0	30	60803	10	8	6	4
5	30	60803	10	8	6	5
10	30	60803	8	2	1	1
15	30	60803	8	3	1	0
20	30	60803	6	3	2	2
0	35	60803	9	5	4	4
5	35	60803	8	7	6	5
10	35	60803	7	4	4	3
15	35	60803	5	3	3	2
20	35	60803	5	3	2	2
0	40	60803	6	6	5	5
5	40	60803	8	2	1	1
10	40	60803	8	5	3	3
15	40	60803	7	1	0	0
20	40	60803	9	6	2	1
0	45	60803	9	6	5	2
5	45	60803	5	3	2	1
10	45	60803	9	3	0	0
15	45	60803	6	5	2	0
20	45	60803	6	2	1	0

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M24

Response Mean	25.466667
Root MSE	14.934879
R-Square	0.5316
Coef. of Variation	58.6448

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	12642	0.3847	28.339	0.0000
Quadratic	2	2132.640805	0.0649	4.781	0.0114
Crossproduct	1	2693.400000	0.0820	12.075	0.0009
Total Regress	5	17468	0.5316	15.663	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	1990.492528	104.762765	0.391	0.9861
Pure Error	50	13400	268.000000		
Total Error	69	15390	223.050616		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	14.360666	6.816169	2.107	0.0388	10.403616
CD	1	-0.564190	0.976413	-0.578	0.5653	7.180000
ZN	1	-1.161951	0.454197	-2.558	0.0127	16.691707
CD*CD	1	0.003810	0.041224	0.0924	0.9266	0.380952
ZN*CD	1	0.053600	0.015425	3.475	0.0009	12.060000
ZN*ZN	1	0.030396	0.009834	3.091	0.0029	15.387805

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	7399.304762	2466.434921	11.058	0.0000
ZN	3	12762	4254.089792	19.072	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	0.161210	11.612099
ZN	-0.605541	8.875323

Predicted value at stationary point 5.928602

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
17.510505	0.332050	0.943262
-1.741748	0.943262	-0.332050

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M48

Response Mean	52.266667
Root MSE	16.444545
R-Square	0.5417
Coef. of Variation	31.4628

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	19613	0.4817	36.263	0.0000
Quadratic	2	902.409292	0.0222	1.669	0.1960
Crossproduct	1	1540.266667	0.0378	5.696	0.0198
Total Regress	5	22055	0.5417	16.312	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	4392.524042	231.185476	0.810	0.6849
Pure Error	50	14267	285.333333		
Total Error	69	18659	270.423054		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	28.045343	7.505169	3.737	0.0004	39.969942
CD	1	0.151619	1.075112	0.141	0.8883	6.826667
ZN	1	-0.291252	0.500108	-0.582	0.5622	22.059512
CD*CD	1	-0.019048	0.045391	-0.420	0.6761	-1.904762
ZN*CD	1	0.040533	0.016984	2.387	0.0198	9.120000
ZN*ZN	1	0.019252	0.010829	1.778	0.0798	9.746341

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	5238.552381	1746.184127	6.457	0.0006
ZN	3	18357	6119.063415	22.628	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-0.432648	5.673523
ZN	-0.929260	1.591657

Predicted value at stationary point 28.243663

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
11.318807	0.326000	0.945370
-3.477227	0.945370	-0.326000

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M72

Response Mean	68.533333
Root MSE	15.613046
R-Square	0.4700
Coef. of Variation	22.7817

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	13899	0.4379	28.508	0.0000
Quadratic	2	227.862640	0.0072	0.467	0.6286
Crossproduct	1	792.066667	0.0250	3.249	0.0758
Total Regress	5	14919	0.4700	12.240	0.0000

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	2953.270693	155.435300	0.560	0.9162
Pure Error	50	13867	277.333333		
Total Error	69	16820	243.767208		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	46.627487	7.125679	6.544	0.0000	59.453759
CD	1	-0.016762	1.020750	-0.0164	0.9869	6.753333
ZN	1	0.054959	0.474821	0.116	0.9082	17.830244
CD*CD	1	0.001905	0.043096	0.0442	0.9649	0.190476
ZN*CD	1	0.029067	0.016125	1.803	0.0758	6.540000
ZN*ZN	1	0.009930	0.010281	0.966	0.3375	5.026829

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	3785.209524	1261.736508	5.176	0.0028
ZN	3	11926	3975.195483	16.307	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface
(based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-1.250951	-2.509513
ZN	-0.959752	0.905572

Predicted value at stationary point 46.673404

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
6.675651	0.450230	0.892912
-1.458346	0.892912	-0.450230

Stationary point is a saddle point.

Coding Coefficients for the Independent Variables

Factor	Subtracted off	Divided by
CD	10.000000	10.000000
ZN	22.500000	22.500000

Response Surface for Variable M96

Response Mean	78.266667
Root MSE	15.046462
R-Square	0.4230
Coef. of Variation	19.2246

Regression	Degrees of Freedom	Type I Sum of Squares	R-Square	F-Ratio	Prob > F
Linear	2	10748	0.3970	23.737	0.0000
Quadratic	2	683.875648	0.0253	1.510	0.2280
Crossproduct	1	21.600000	0.0008	0.0954	0.7583
Total Regress	5	11453	0.4230	10.118	0.0000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residual	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
Lack of Fit	19	2621.324352	137.964440	0.531	0.9343
Pure Error	50	13000	260.000000		
Total Error	69	15621	226.396005		

Parameter	Degrees of Freedom	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T	Parameter Estimate from Coded Data
INTERCEPT	1	53.988788	6.867094	7.862	0.0000	67.352296
CD	1	0.524571	0.983708	0.533	0.5956	6.706667
ZN	1	-0.082992	0.457590	-0.181	0.8566	16.641951
CD*CD	1	0.001905	0.041532	0.0459	0.9636	0.190476
ZN*CD	1	0.004800	0.015540	0.309	0.7583	1.080000
ZN*ZN	1	0.017214	0.009908	1.737	0.0868	8.714634

Factor	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob > F
CD	3	1894.742857	631.580952	2.790	0.0469
ZN	3	9580.199458	3193.399819	14.105	0.0000

Canonical Analysis of Response Surface (based on coded data)

Factor	Critical Value Coded	Critical Value Uncoded
CD	-18.072936	-170.729361
ZN	0.165057	26.213779

Predicted value at stationary point 8.121151

Eigenvalues	Eigenvectors	
	CD	ZN
8.748707	0.062972	0.998015
0.156404	0.998015	-0.062972

Stationary point is a minimum.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรภรณ์ อธิธิโรจนกุล เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย