บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการศึกษาพิษเฉียบพลัน

จากผลการศึกษาระดับพิษเฉียบพลันของสารละลายแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในสภาพสารละลายคู่ผสม ที่ทำให้ไรแดงตายร้อยละ 50 ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง สามารถคำนวณหาค่า LC_{50} ได้โดยนำผลการตายสะสมของไรแดงในระยะเวลาต่าง ๆ มาคำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS for MS WINDOWS release 6.1 ซึ่งมีวิธีการหาดังรายละเอียดในภาคผนวก ง

4.1.1 พิษเฉียบพลันของสารคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง

จากการทดลอง พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่ทดลองไม่พบว่ามีการตายของไรแดงที่เวลา 3 และ 6 ชั่วโมง แต่ที่ 12 ชั่วโมงเริ่มปรากฏว่ามีการตายเกิดขึ้น ระดับความเข้มข้นในหน่วยความเป็นพิษ (toxic unit) ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 ที่ทำให้ไรแดงตายร้อยละ 50 ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 2.80 TU (2.76-2.84) และ 2.63 TU (2.60-2.66) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 สำหรับที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 มีค่าเท่ากับ 2.54 TU (2.50-2.59) และ 2.33 TU (2.29-2.36) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และที่สัดส่วน 2:1 มีค่าเท่ากับ 3.44 TU (3.39-3.50) และ 3.23 TU (3.18-3.27) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อนำค่า 48-h LC_{50} ของสารผสมแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มาประเมินลักษณะความเป็นพิษของสารผสมตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) โดยพิจารณาจากค่า TU ของสารผสม วิธีของ Marking และ Dawson (1975) ที่พิจารณาจากค่า AI และวิธีของ Konemann (1979) ที่พิจารณาจากค่า MTI โดยทั้งสามวิธีนี้ให้ผลของลักษณะความเป็นพิษของสารผสมแคดเมียมและทองแดง ในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ เป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวกหรือต้านฤทธิ์กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลาต่างๆ (ชั่วโมง)					
				12		24		48	
	Cd	Cu		จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0	0	0	0	0
2.2	0.154	0.0209	50	0	0	0	0	0	0
2.4	0.168	0.0228	50	0	0	0	0	4	8
2.6	0.182	0.0247	50	0	0	4	8	16	36
2.8	0.196	0.0266	50	0	0	27	54	45	90
3.0	0.210	0.0285	50	4	8	43	86	50	100
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				-		2.80 (2.76 - 2.84)		2.63 (2.60 - 2.66)	

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลาต่างๆ (ชั่วโมง)					
				12		24		48	
	Cd	Cu		จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0	0	0	0	0
2.10	0.098	0.0266	50	0	0	0	0	5	10
2.25	0.105	0.0285	50	0	0	4	8	18	36
2.40	0.112	0.0304	50	0	0	16	32	30	60
2.55	0.119	0.0323	50	0	0	27	54	43	86
2.70	0.126	0.0342	50	3	6	35	70	50	100
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				-		2.54 (2.50 - 2.59)		2.33 (2.29 - 2.36)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2:1

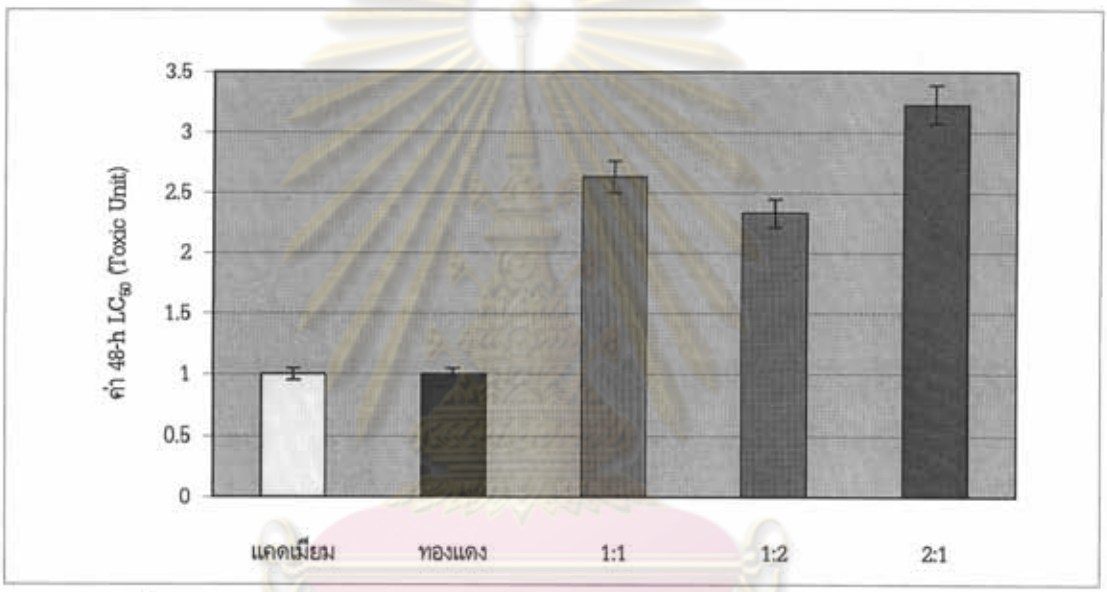
ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมในระยะเวลาต่างๆ (ชั่วโมง)					
				12		24		48	
	Cd	Cu		จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0	0	0	0	0
3.00	0.280	0.01900	50	0	0	1	2	9	18
3.15	0.294	0.01995	50	0	0	6	12	20	40
3.30	0.308	0.02090	50	0	0	14	28	24	48
3.45	0.322	0.02185	50	0	0	30	60	43	86
3.60	0.336	0.02280	50	0	0	33	66	57	94
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				-		3.44 (3.39 - 3.50)		3.23 (3.18 - 3.27)	

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะความเป็นพิษของสารคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง

สัดส่วนความเป็นพิษ	ค่า 48-h LC_{50} ของสารเดี่ยวในสารผสม		ผลรวมของ TU	AI	MTI	ลักษณะความเป็นพิษ
	หน่วย mg/l	หน่วย TU				
1:1						
แคดเมียม	0.1841	1.315	2.63	-1.63	-0.395	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0250	1.315				
1:2						
แคดเมียม	0.1087	0.776	2.33	-1.33	-1.086	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0295	1.553				
2:1						
แคดเมียม	0.3015	2.153	3.23	-2.23	-1.892	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0205	1.078				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากค่า 48-h LC_{50} ของแคดเมียมและทองแดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรแต่ละตัว เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ toxic unit ตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) จะมีค่าเท่ากับ 1 TU เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมและทองแดงระหว่างในสภาพสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมแล้ว พบว่า พิษเฉียบพลันของสารผสมของแคดเมียมและทองแดงในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ มีความรุนแรงของพิษน้อยกว่าแคดเมียมและทองแดงในสภาพสารละลายเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสารละลายผสมของแคดเมียมและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มีความรุนแรงของพิษเท่ากับ 0.38 , 0.43 และ 0.31 เท่าของแคดเมียมและทองแดงในสภาพสารละลายเดี่ยว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นพิษ (48-h LC_{50}) ของแคดเมียม ทองแดง และสารละลายผสมของแคดเมียมและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 1:2 และ 2:1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษต่าง ๆ จากตารางที่ 4.4 ถ้าพิจารณาจากค่า TU และ AI พบว่า ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 มีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมา คือ สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ และเปรียบเทียบความรุนแรงของความเป็นพิษจากค่า potency ratio พบว่า ที่สัดส่วน 1:2 มีความเป็นพิษรุนแรงเป็น 1.13 และ 1.39 เท่าของสัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ความรุนแรงของความเป็นพิษของสารละลายคู่ผสมนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความเป็นพิษของแคดเมียมและทองแดง แต่สำหรับค่า MTI ที่ได้ เมื่อนำมา

ประเมินระดับความรุนแรงของสารคู่ผสมแล้วมีความแตกต่างกับวิธีคิดจากทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตามวิธีของ Konemann มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการคิดโดยใช้สัดส่วนความเป็นพิษ และ Vouk (1987) ได้กล่าวไว้ว่า การคิดค่า MTI ของสารผสมจะมีข้อดีและเหมาะสมกับสารที่ผสมกันมากกว่า 2 ชนิด

4.1.2 พิษเฉียบพลันของสารคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสี

จากการทดลอง พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสีที่ทุกสัดส่วนความเป็นพิษ ไม่พบว่ามีการตายของไรแดงที่เวลา 3, 6, 12, และ 24 ชั่วโมง และพบว่า ระดับความเข้มข้นในหน่วยความเป็นพิษ (toxic unit) ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 ที่ทำให้ไรแดงตายร้อยละ 50 ในช่วงเวลา 48 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 2.65 TU (2.56-2.74) , 3.66 TU (3.53-3.80) และ 5.49 TU (5.38-5.61) ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 - 4.7

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1 : 1

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Cd	Zn		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
2.2	0.154	0.44	50	7	14
2.4	0.168	0.48	50	16	32
2.6	0.182	0.52	50	24	48
2.8	0.196	0.56	50	32	64
3.0	0.210	0.60	50	36	72
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				2.65 (2.56-2.74)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1 : 2

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Cd	Zn		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
3.0	0.140	0.80	50	9	18
3.3	0.154	0.88	50	16	32
3.6	0.168	0.96	50	23	46
3.9	0.182	1.04	50	31	62
4.2	0.196	1.12	50	37	74
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				3.66 (3.53-3.80)	

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2 : 1

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Cd	Zn		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
4.8	0.448	0.64	50	8	16
5.1	0.476	0.68	50	13	26
5.4	0.504	0.72	50	21	42
5.7	0.532	0.76	50	30	60
6.0	0.560	0.80	50	40	80
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				5.49 (5.38-5.61)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

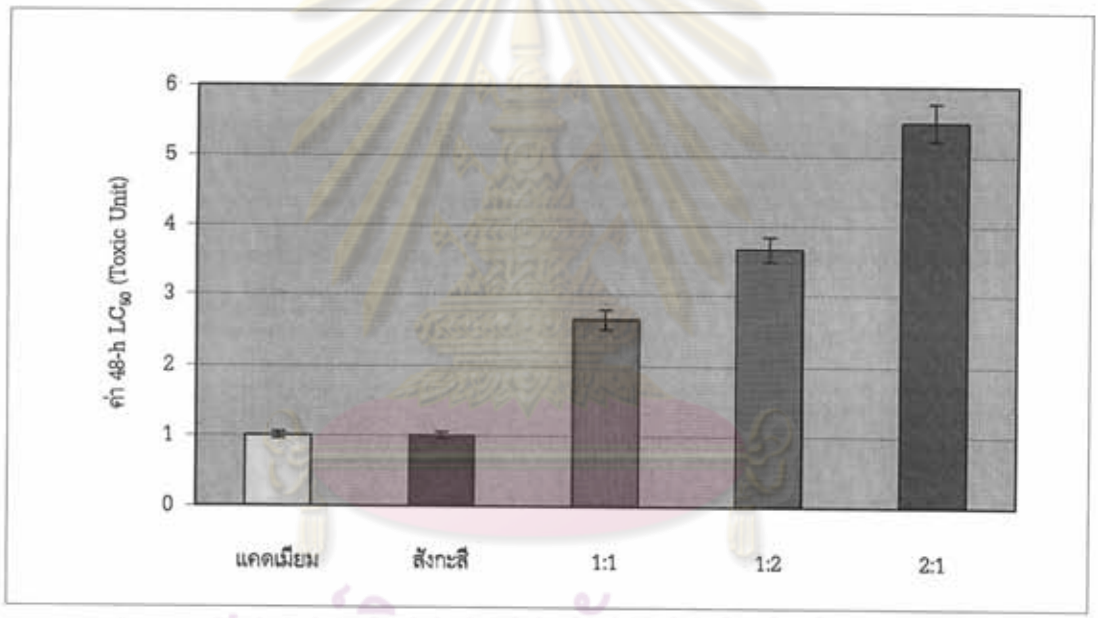
เมื่อนำค่า 48-h LC_{50} ของสารผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มาประเมินลักษณะความเป็นพิษของสารผสมตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) โดยพิจารณาจากค่า TU ของสารผสม วิธีของ Marking และ Dawson (1975) ที่พิจารณาจากค่า AI และวิธีของ Konemann (1979) ที่พิจารณาจากค่า MTI โดยทั้งสามวิธีนี้ให้ผลของลักษณะความเป็นพิษของสารผสมแคดเมียมและสังกะสี ในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ เป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวกหรือต้านฤทธิ์กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ลักษณะความเป็นพิษของสารคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี

สัดส่วนความเป็นพิษ	ค่า 48-h LC_{50} ของสารเดี่ยวในสารผสม		ผลรวมของ TU	AI	MTI	ลักษณะความเป็นพิษ
	หน่วย mg/l	หน่วย TU				
1:1						
แคดเมียม	0.1855	1.325	2.65	-1.65	-0.406	ต้านฤทธิ์กัน
สังกะสี	0.5300	1.325				
1:2						
แคดเมียม	0.1708	1.22	3.66	-2.66	-2.200	ต้านฤทธิ์กัน
สังกะสี	0.9760	2.44				
2:1						
แคดเมียม	0.5124	3.66	5.49	-4.49	-3.200	ต้านฤทธิ์กัน
สังกะสี	0.7320	1.83				

จากค่า 48-h LC_{50} ของแคดเมียมและสังกะสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรแต่ละตัว เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ toxic unit ตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) จะมีค่าเท่ากับ 1 TU เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมและสังกะสีระหว่างในสภาพสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมแล้วพบว่า พิษเฉียบพลันของสารผสมของแคดเมียมและสังกะสีในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ มีความรุนแรงของพิษน้อยกว่าแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งสารละลายผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มีความรุนแรงของพิษเท่ากับ 0.38 , 0.27 และ 0.18 เท่าของแคดเมียมและสังกะสีในสภาพสารละลายเดี่ยว

เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของสารละลายผสมแคดเมียมและสังกะสี ที่สัดส่วนความเป็นพิษต่าง ๆ จากตารางที่ 4.8 พิจารณาจากค่า TU และ AI พบว่า ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 มีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมา คือ สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ และเปรียบเทียบความรุนแรงของความเป็นพิษจากค่า potency ratio พบว่า ที่สัดส่วน 1:1 มีความเป็นพิษรุนแรงเป็น 1.38 และ 2.07 เท่าของสัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ สำหรับค่า MTI นั้นมีข้อจำกัดในการนำมาเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของความเป็นพิษด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในการทดลองในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม และทองแดง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความรุนแรงของความเป็นพิษของสารละลายผสมนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นพิษ (48-h LC_{50}) ของแคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมของแคดเมี่ยมและสังกะสีที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 1:2 และ 2:1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 พิษเฉียบพลันของสารคู่ผสมสังกะสีและทองแดง

จากการทดลองพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมสังกะสีและทองแดงที่ทดลอง ไม่พบว่ามีการตายของไรแดงที่เวลา 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง และพบว่าระดับความเข้มข้นในหน่วยความเป็นพิษ (toxic unit) ของสารละลายคู่ ผสมสังกะสีและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 ที่ทำให้ไรแดงตายร้อยละ 50 ในช่วงเวลา 48 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าเท่ากับ 4.22 TU (4.08-4.36) , 3.52 TU (3.43-3.60) และ 3.24 TU (3.11-3.40) ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9-4.11

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารผสมสังกะสี และทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1 : 1

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Zn	Cu		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
3.4	0.68	0.0323	50	6	12
3.8	0.66	0.0361	50	15	30
4.2	0.84	0.0399	50	26	52
4.6	0.92	0.0437	50	32	64
5.0	1.00	0.0475	50	41	82
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				4.22 (4.08-4.36)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารสังกะสี และทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1 : 2

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Zn	Cu		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
3.0	0.40	0.0380	50	7	14
3.3	0.44	0.0418	50	16	32
3.6	0.48	0.0456	50	27	54
3.9	0.52	0.0494	50	36	72
4.2	0.56	0.0532	50	48	96
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				3.52 (3.43-3.60)	

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองพิษเฉียบพลันแสดงจำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมงของสารผสมสังกะสี และทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2 : 1

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนไรแดง (ตัว)	จำนวนและเปอร์เซนต์การตายสะสมที่เวลา 48 ชั่วโมง	
	Zn	Cu		จำนวน	%
ชุดควบคุม	0	0	50	0	0
2.4	0.64	0.0152	50	5	10
2.7	0.72	0.0171	50	10	20
3.0	0.80	0.0190	50	18	36
3.3	0.88	0.0209	50	26	52
3.6	0.96	0.0228	50	35	70
ค่า LC_{50} และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 95 %				3.24 (3.11-3.40)	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำค่า 48-h LC_{50} ของสารผสมสังกะสีและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มาประเมินลักษณะความเป็นพิษของสารผสมตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) โดยพิจารณาจากค่า TU ของสารผสม วิธีของ Marking และ Dawson (1975) ที่พิจารณาจากค่า AI และวิธีของ Konemann (1979) ที่พิจารณาจากค่า MTI โดยทั้งสามวิธีนี้ให้ผลของลักษณะความเป็นพิษของสารผสมสังกะสีและทองแดง ในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ เป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวกหรือต้านฤทธิ์กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.12

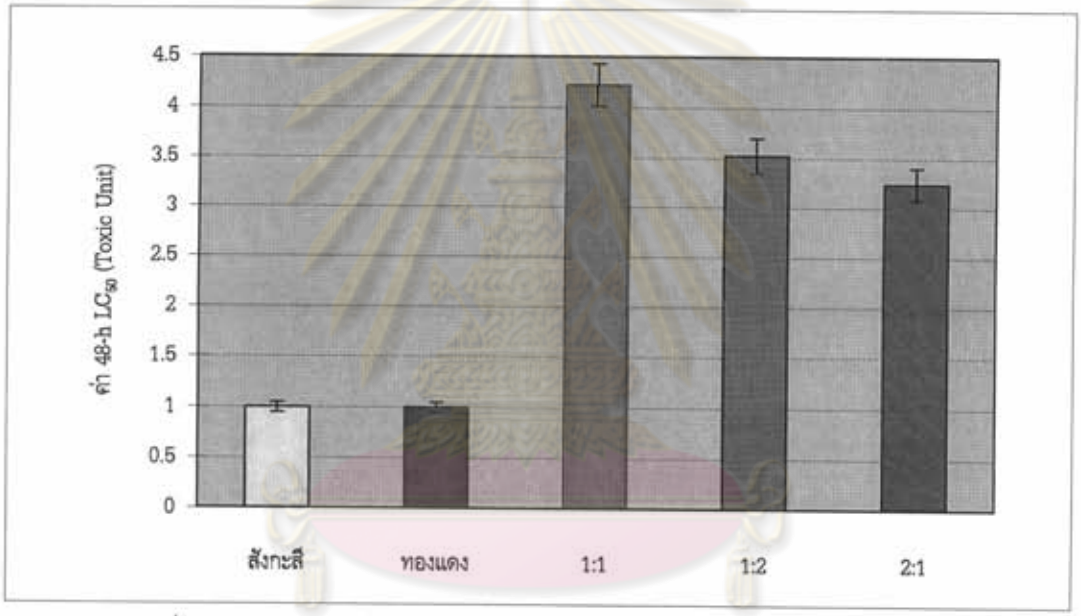
ตารางที่ 4.12 ลักษณะความเป็นพิษของสารคู่ผสมของสังกะสีและทองแดง

สัดส่วนความเป็นพิษ	ค่า 48-h LC_{50} ของสารเดี่ยวในสารผสม		ผลรวมของ TU	AI	MTI	ลักษณะความเป็นพิษ
	หน่วย mg/l	หน่วย TU				
1:1						
สังกะสี	0.8440	2.11	4.22	-3.22	-1.077	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0401	2.11				
1:2						
สังกะสี	0.4693	1.173	3.52	-2.52	-2.104	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0446	2.347				
2:1						
สังกะสี	0.8640	2.16	3.24	-2.24	-1.899	ต้านฤทธิ์กัน
ทองแดง	0.0205	1.08				

จากค่า 48-h LC_{50} ของสังกะสีและทองแดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรแต่ละตัว เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ toxic unit ตามวิธีของ Sprague และ Ramsay (1965) จะมีค่าเท่ากับ 1 TU เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของสังกะสีและทองแดงระหว่างในสภาพสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสมแล้วพบว่า พิษเฉียบพลันของสารผสมของสังกะสีและทองแดงในทุกสัดส่วนความเป็นพิษ มีความรุนแรงของพิษน้อยกว่าสังกะสีและทองแดงในสภาพสารละลายเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสารละลายผสมของสังกะสีและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 มีความรุนแรงของพิษเท่ากับ 0.24 , 0.28 และ 0.31 เท่าของสังกะสีและทองแดงในสภาพสารละลายเดี่ยว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบระดับความเป็นพิษเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมสังกะสีและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษต่าง ๆ จากตารางที่ 4.12 พิจารณาจากค่า TU และ AI พบว่า ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2:1 มีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมา คือ สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ และเปรียบเทียบความรุนแรงของความเป็นพิษจากค่า potency ratio พบว่า ที่สัดส่วน 2:1 มีความเป็นพิษรุนแรงเป็น 1.09 และ 1.30 เท่าของสัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ สำหรับค่า MTI มีข้อจำกัดในการนำมาเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของความเป็นพิษด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในการทดลองในสารละลายคู่ผสมทั้งสอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความรุนแรงของความเป็นพิษของสารละลายผสมนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความเป็นพิษของสังกะสีและทองแดง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นพิษ (48-h LC_{50}) ของสังกะสี ทองแดง และสารละลายผสมของสังกะสีและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 1:2 และ 2:1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 ผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีต่อพฤติกรรมของไรแดง

ผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีทั้ง 3 คู่ที่มีต่อไรแดงนั้นมีลักษณะการแสดงอาการตอบสนองที่คล้ายคลึงกัน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะอาการของกลุ่มทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กับกลุ่มควบคุมโดยสังเกตด้วยตาเปล่าแล้ว พบว่า ไรแดงในชุดทดลอง และชุดควบคุมจะมี

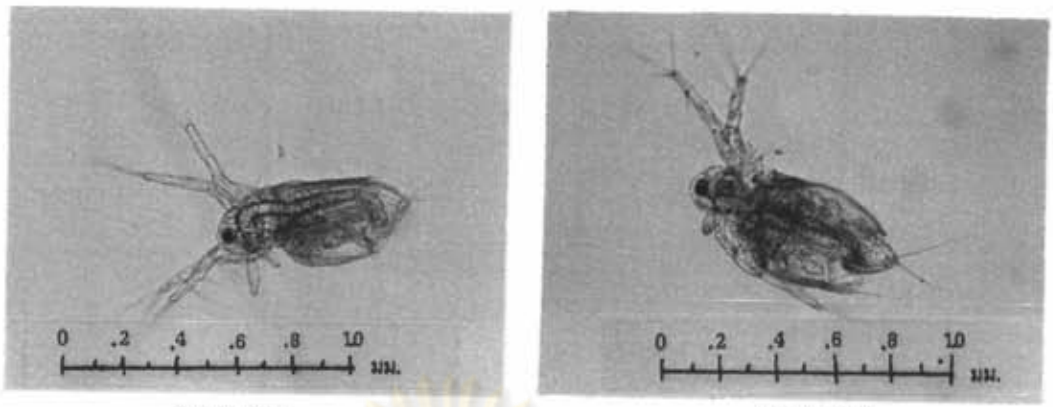
พฤติกรรมการลอกคราบหลังจากเริ่มทดสอบประมาณ 24 ชั่วโมง ไรแดงที่ได้รับสัมผัสกับโลหะหนักทุกคู่ผสมนั้น จะเคลื่อนที่ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง จังหวะในการเคลื่อนที่ขึ้นลงของหนวดคู่ที่ 2 หรือ antennae ช้ากว่าในกลุ่มควบคุม และเคลื่อนที่ไปในระยะสั้น ๆ ไรแดงจะหยุดนิ่งและลอยตัวอยู่ในน้ำเป็นระยะ ๆ ไม่มีการเคลื่อนไหวของ antennae หลังจากที่แสดงอาการดังกล่าวแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4-8 ชั่วโมง ไรแดงจะหยุดว่ายน้ำและจมลงอยู่บริเวณก้นบีกเกอร์ ซึ่งโดยส่วนมากแล้ว antennae จะหยุดทำงานและทุบลงข้างลำตัว ลักษณะลำตัวซีดและมีสีขาวขุ่นมากขึ้น บางตัวจะมองเห็นส่วนของเปลือกหุ้มทั้งสองด้าน (carapace) เปิดออก เมื่อนำไรแดงที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์สองตา พบว่า อวัยวะของไรแดงบางส่วนหยุดทำงานและไม่เคลื่อนไหวแล้ว แต่มีบางตัวที่พบว่าหัวใจของไรแดงยังเต้นอยู่ แต่เต้นในจังหวะที่ช้าลง สำหรับไรแดงที่อวัยวะทุกส่วนหยุดทำงานแล้วนั้น อวัยวะภายในจะเสียรูปร่างไปโดยเฉพาะตาประกอบ ซึ่งเดิมมีลักษณะค่อนข้างกลมแต่เมื่อตายแล้วเลนส์ของตาประกอบจะกระจายตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 - 4.6

4.1.5 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองและการเกิดตะกอน

ในการทดลองทั้งสามคู่ผสมโลหะหนัก ทุกสัดส่วนความเป็นพิษไม่ปรากฏตะกอนเกิดขึ้นแต่อย่างใด สำหรับคุณภาพน้ำที่ใช้ทดลองทั้งก่อนและหลังการทดลองในทุกชุดทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า พารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำที่ใช้ก่อนและหลังการทดลองซึ่งมีค่าอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ความกระด้าง และความเป็นด่าง มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งในชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม ถือว่าเป็นช่วงของคุณภาพน้ำที่ไม่มีผลกระทบต่อไรแดง

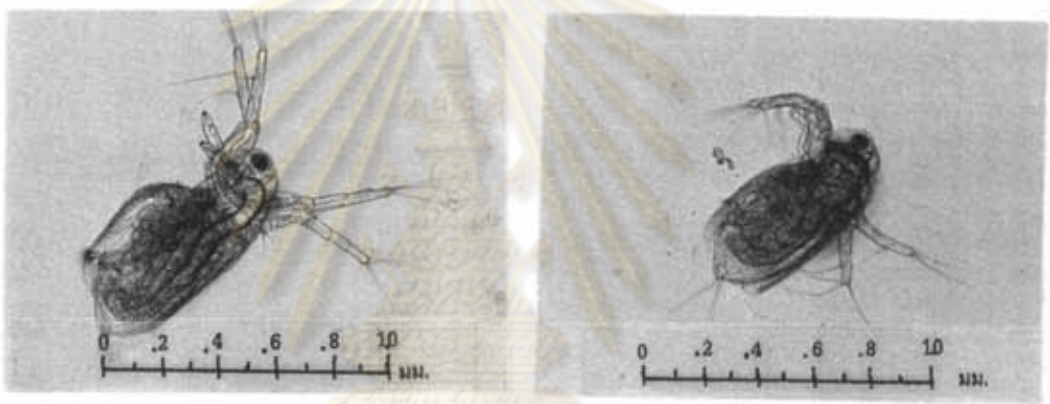
ตารางที่ 4.13 คุณภาพน้ำที่ใช้ในระหว่างทำการทดลองพิษเฉียบพลัน

พารามิเตอร์	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27.0 - 28.5	27.0 - 28.5
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	7.2 - 7.5	7.2 - 7.6
ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l)	6.78 - 7.27	6.60 - 7.30
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as $CaCO_3$)	102 - 113	100 - 117
ความเป็นด่าง (mg/l as $CaCO_3$)	60 - 81	57 - 87



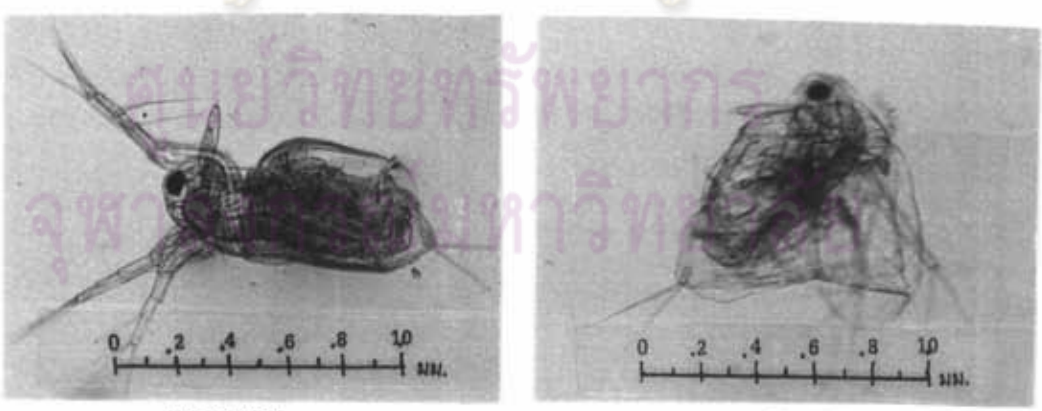
ชุดควบคุม ชุดทดลอง

รูปที่ 4.4 ลักษณะของไรแดงในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง และชุดควบคุม (40x)



ชุดควบคุม ชุดทดลอง

รูปที่ 4.5 ลักษณะของไรแดงในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี และชุดควบคุม (40x)



ชุดควบคุม ชุดทดลอง

รูปที่ 4.6 ลักษณะของไรแดงในสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดง และชุดควบคุม (40x)

4.2 วิจารณ์ผลการทดลองพิษเฉียบพลัน

จากการศึกษาความเป็นพิษของสารละลายคู่ผสมแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ที่มีต่อไรแดง พบว่า ทุกคู่ของสารละลายผสมและทุกสัดส่วนความเป็นพิษ มีความเป็นพิษร่วมกันแบบต้านฤทธิ์กัน หรือมีความเป็นพิษน้อยกว่าความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และทองแดง เมื่อทดสอบในสารละลายเดี่ยว และระดับความรุนแรงของความเป็นพิษของสารคู่ผสมนั้น ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารแต่ละตัว

จากผลการศึกษาพิษเฉียบพลันดังตารางที่ 4.4 , 4.8 และ 4.12 เมื่อพิจารณา ค่า 48-h LC_{50} ของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรที่อยู่ในสารผสม และนำมาเปรียบเทียบกับค่า 48-h LC_{50} ของโลหะทั้งสามชนิดในสภาพสารละลายเดี่ยว สามารถคิดความรุนแรงของความเป็นพิษของสารในสารผสมเป็นจำนวนเท่าของความเป็นพิษของสารเดี่ยวได้ดังนี้ คือ

ตารางที่ 4.14 ความรุนแรงของความเป็นพิษของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในสารผสมเทียบกับสารเดี่ยว

สัดส่วนความเป็นพิษ	สารผสม Cd และ Cu		สารผสม Cd และ Zn		สารผสม Zn และ Cu	
	จำนวนเท่าเทียบกับสารเดี่ยว		จำนวนเท่าเทียบกับสารเดี่ยว		จำนวนเท่าเทียบกับสารเดี่ยว	
	Cd	Cu	Cd	Zn	Zn	Cu
1:1	0.76	0.76	0.75	0.75	0.47	0.47
1:2	1.29	0.64	0.82	0.41	0.85	0.43
2:1	0.46	0.93	0.27	0.55	0.46	0.93

จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 พบว่า สารละลายคู่ผสมระหว่างสังกะสีและทองแดง สามารถต้านฤทธิ์กันได้ดีกว่าสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสี แต่แคดเมียมและสังกะสีสามารถต้านฤทธิ์กันได้ใกล้เคียงกับสังกะสีและทองแดง สำหรับที่สัดส่วนความเป็นพิษไม่เท่ากัน คือ ที่สัดส่วนความเป็นพิษของทองแดงเป็น 2 เท่าของแคดเมียมและสังกะสี พบว่า สารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงสามารถต้านฤทธิ์กันได้ดีกว่าแคดเมียมและทองแดง ที่สัดส่วนความเป็นพิษของแคดเมียมเป็น 2 เท่าของสังกะสีและทองแดง พบว่า สารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีสามารถต้านฤทธิ์กันได้ดีกว่าแคดเมียมและทองแดง และที่สัดส่วนความเป็นพิษของสังกะสีเป็น 2 เท่าของแคดเมียมและทองแดง พบว่า สารละลายคู่ผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสี สามารถต้านฤทธิ์ได้ดีกว่าสังกะสีและทองแดง แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากค่า 48-h LC_{50} ระหว่างสารคู่ผสมของทั้งสามคู่ผสม โดยเปรียบเทียบที่ค่า 48-h LC_{50} ของสารละลายคู่ผสมที่มีสัดส่วนความเป็นพิษรุนแรงที่สุดของแคดเมียมและทองแดง แคดเมียมและสังกะสี และสังกะสีและทองแดง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.33, 2.65 และ 3.24 TU ตามลำดับ สามารถจัดลำดับความรุนแรงของความเป็นพิษของสารคู่ผสมทั้งสามคู่ได้ดังนี้ คือ

แคดเมียมและทองแดง > แคดเมียมและสังกะสี > สังกะสีและทองแดง

จากการพิจารณาดังกล่าวข้างต้น พบว่า การทดสอบสารละลายคู่ผสมของโลหะทั้งสามชนิดในไรแดง สารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงมีความสามารถต้านฤทธิ์กันได้มากที่สุด รองลงมาคือ แคดเมียมและสังกะสี และแคดเมียมและทองแดง ตามลำดับ ซึ่งการศึกษาความเป็นพิษของสารคู่ผสมของโลหะทั้งสามชนิดกับสัตว์ทดลองชนิดอื่น ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ แต่ส่วนใหญ่พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันเป็นแบบพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก พิษร่วมกันมากกว่าผลบวกหรือเสริมฤทธิ์กัน

ตัวอย่างการศึกษาวิจัยในสารคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง ได้แก่ การทดสอบต่อกุ้งก้ามกราม Macrobrachium rosenbergii De Man ที่สัดส่วนความเป็นพิษของทองแดงต่อสังกะสีเท่ากับ 1:3, 1:1 และ 3:1 ซึ่งทุกสัดส่วนแสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบเสริมฤทธิ์กัน (Rojlertjanya, 1983) การทดสอบกับ Amphipod Gammarus lacustris (Sar) แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก (de March, 1988) และการทดสอบต่อ Copepod Tisbe holothuriae แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก (Verriopoulos และ Dimas, 1988) ตัวอย่างการทดสอบอิทธิพลร่วมของแคดเมียมและสังกะสี ได้แก่ การทดสอบกับปลาดุกอุย Clarias macrosephalus Gunther ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 , 1:2 และ 2:1 แสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบเสริมฤทธิ์กัน (Enserink, Maas-Diepeveen และ Leeuwen, 1991) การทดสอบกับ Amphipod Gammarus lacustris (Sar) (de March, 1988) และ Copepod Tisbe holothuriae (Verriopoulos และ Dimas, 1988) แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก และพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก ตามลำดับ และตัวอย่างการทดสอบอิทธิพลร่วมกันของสังกะสีและทองแดง ได้แก่ การทดสอบกับ Rainbow trout Salmo gairdnerii Richardson (Llooyd, 1961) Atlantic Salmon (Sprauge, 1964) juvenile Salmon Salmo Slar L. (Sprague Ramsay, 1965) juvenile Logfin dace Agosia chrysogaster (Lewis, 1978) Amphipod Gammarus lacustris (Sar) (de March, 1988) และ Copepod Tisbe holothuriae (Verriopoulos และ Dimas, 1988) แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก หรือเสริมฤทธิ์กัน จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาในโลหะชนิดเดียวกัน แต่ในสัตว์ทดลองต่างชนิดกับไรแดง ให้ผลของความเป็นพิษร่วมกันของสารผสมแตกต่างไปจากการศึกษาในครั้งนี้ ทั้งนี้อาจเนื่องจาก โครงสร้างของสัตว์ที่ใช้ทดลองดังกล่าวข้างต้นมี

กลไกในการแพร่กระจายโลหะไปยังอวัยวะเป้าหมายหรือตำแหน่งที่มีความไวต่อพิษได้ดีขึ้น หรือสามารถเพิ่มอัตราการแพร่ผ่านของโลหะได้มากขึ้น (Vouk และคณะ, 1987) และนอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตหลายประการที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเกิดพิษของโลหะ เช่น ระบบการหายใจที่ใช้เหงือก ลักษณะการกินอาหาร และอัตราการจำกัดโลหะออกร่างกาย เป็นต้น (Forstner และ Wittmann, 1981)

การศึกษาวิจัยความเป็นพิษร่วมกันของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม สังกะสี และทองแดงในสัตว์ทดลองชนิดอื่น ที่แสดงความเป็นพิษน้อยกว่าพิษของโลหะหนักแต่ละตัวหรือแบบต้านฤทธิ์กันนั้นมีน้อยมาก และที่พบจะเป็นโลหะชนิดอื่น เช่น อิทธิพลร่วมระหว่างตะกั่วและแคดเมียมที่มีต่อปลากระพงขาว (แววตา ทองระอา, 2529) อิทธิพลร่วมของปรอทและทองแดงต่อ Euryhaline amphipod Gammarus duebeni แสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบต้านฤทธิ์กัน และการศึกษาของชูชาติ ชัยรัตน์ (2528) พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างปรอทและตะกั่วที่มีต่อปลากระพงขาวที่สัดส่วน 1:1 มีความเป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก แต่ที่สัดส่วน 1:2 , 2:1 มีความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก การศึกษาในสัตว์ที่มีลักษณะคล้ายไรแดงกับสารละลายคู่ผสมของโลหะหนักทั้งสามชนิดนั้นยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน

จากผลการทดลองครั้งนี้ การรับโลหะแคดเมียม ทองแดงและสังกะสีเข้าสู่ภายในร่างกายของไรแดง สามารถรับได้โดยผ่านทางการกิน และผ่านทางการไหลเวียนของน้ำผ่านผนังด้านในเปลือกหุ้ม (carapace) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนกาซที่ใช้ในการหายใจ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เมื่อไอออนของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีผ่านเข้าไปในร่างกายของสัตว์ต่าง ๆ แล้วสามารถเข้าไปจับกับอะตอมของไนโตรเจน หรือซัลเฟอร์ที่อยู่ในโมเลกุลต่าง ๆ เช่น ซัลฟิดริล อะมิโน คาร์บอกซิล ไฮดรอกไซด์ และออกไซด์ ที่อยู่บนพื้นผิวเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และโมเลกุลของเอนไซม์บางชนิดได้ดี โดยเฉพาะไอออนของสังกะสีและทองแดงที่ถือว่าเป็นสารอาหารปริมาณน้อยที่มีบทบาทกับสัตว์ทั่ว ๆ ไป (Calow, 1993) ซึ่งจากกลไกดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้ โลหะทั้งสามชนิดสามารถทำให้ส่วนต่าง ๆ ของไรแดงได้รับผลกระทบและผิดปกติ จากพฤติกรรมการตอบสนองต่อสารทดลองของไรแดงที่แสดงในรูปที่ 4.4-4.6 จะพบว่า อวัยวะส่วนที่เริ่มหยุดการเคลื่อนที่และหยุดทำงานก่อนส่วนอื่น ๆ คือ หนวดคู่ที่ 2 ของไรแดง ทั้งนี้อาจเนื่องจาก โครงสร้างของกล้ามเนื้อที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของหนวดผิดปกติไป จากลักษณะทางสรีระของไรแดงที่ใกล้เคียงกับ Daphnia magna นั้น พบว่า บริเวณกล้ามเนื้อขนาดใหญ่ที่บริเวณฐานของหนวดคู่ที่ 2 มีส่วนประกอบที่เป็น Cytochrome ซึ่งสารตัวนี้มีโลหะทองแดงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (Waterman, 1960) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า เมื่อไรแดงได้รับโลหะแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีเข้าไปในระดับที่เกินความต้องการแล้ว โลหะเหล่านี้สามารถที่จะเข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกล้ามเนื้อบริเวณดังกล่าว ทำให้ไรแดงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และตายในที่สุด

ในสภาวะที่ปรากฏอิออนของโลหะ 2 ตัว ย่อมสามารถเกิดกลไกระหว่างโลหะทั้งสองในไรแดงได้ อาจเกิดการแทนที่กันของอิออนตัวใดตัวหนึ่ง ทำให้สามารถลดบทบาทของโลหะอีกชนิดหนึ่งที่ถูกแทนที่ ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นพบในการศึกษาใน Daphnia magna โดยพบว่า D. magna สามารถสร้างโปรตีนที่มีลักษณะคล้ายกับ metallothionein (MT) ในสัตว์ชั้นสูงได้ ซึ่งโปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเป็นส่วนที่เกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีได้ (Bodar, 1990) และการศึกษาของ Yamamura (1983) ได้ชี้ให้เห็นว่า แคดเมียมที่สะสมใน Moina macrocopa โดยมากจะจับอยู่ที่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสามารถเกิดการแทนที่กับโลหะชนิดอื่น ซึ่งเป็นการลดพิษของอีกตัวหนึ่งได้

แคดเมียมสามารถจะเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมและบทบาทของทองแดงและสังกะสีได้ ซึ่งปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียม สังกะสี และทองแดงจะเกิดขึ้นบริเวณ absorption site ของโปรตีน Viarengo และ Nott (1993) ได้กล่าวไว้ว่า ประสิทธิภาพในการแย่งจับกับหมู่ซัลฟิดริว (-SH) สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ คือ แคดเมียม > ทองแดง > สังกะสี ดังนั้น อิออนของแคดเมียมมีศักยภาพที่จะเข้าแทนที่อิออนของทองแดงและสังกะสี และอิออนของทองแดงสามารถเข้าแทนที่อิออนของสังกะสีได้เช่นกัน สำหรับสารคู่ผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี จากผลการทดลอง พบว่า โลหะทั้งสองตัวนี้สามารถลดความเป็นพิษซึ่งกันและกันได้ดีกว่าคู่ของโลหะแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสี ทั้งนี้อาจเนื่องจาก อิออนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างทองแดงและสังกะสีที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพมากกว่าและสามารถเข้าแทนที่ซึ่งกันและกันได้ดีกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการศึกษาพิษรองเฉียบพลัน

การทดลองพิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีต่อไรแดงนั้น กำหนดระดับความเข้มข้นพิษรองเฉียบพลัน โดยเลือกใช้สัดส่วนความเป็นพิษของสารคู่ผสมที่มีความรุนแรงมากที่สุด คือ สารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:2 (2.33 TU) แคดเมียมและสังกะสีที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 (2.65 TU) และสังกะสีและทองแดงที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2:1 (3.24 TU) ศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการสืบพันธุ์ โดยดูจากจำนวนลูกเฉลี่ยและจำนวนครั้งของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดงตัวแม่ 1 ตัว ผลต่อการเติบโตโดยดูจากขนาดความยาวของร่างกาย และผลต่ออายุของไรแดง แล้วนำข้อมูลจำนวนลูกมาคำนวณหาค่า 16% reproductive impairment ตามวิธีของ Biesinger และ Christensen (1972) เพื่อหาระดับ MATC และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อดูความแตกต่างระหว่างชุดทดลองและชุดควบคุมด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS for MS WINDOWS release 6.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมนี้แสดงในภาคผนวก จ

4.3.1 พิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดงต่อไรแดง

(1) การสืบพันธุ์

จากการศึกษาถึงการสืบพันธุ์ของไรแดงตั้งแต่รุ่น F1 ถึง F5 พบว่า ไรแดงมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยไรแดงที่เริ่มแยกเลี้ยงในหลอดทดลองมีการเจริญเติบโตจากวัยอ่อนถึงระยะตัวเต็มวัย มีการเริ่มสร้าง parthenogenetic eggs เมื่อมีอายุประมาณ 48-56 ชั่วโมง หลังจากนั้นเซลล์ไข่จะพัฒนาเกิดเป็นตัวอ่อนและออกจาก brood chamber ครั้งแรกเมื่อมีอายุประมาณ 60-66 ชั่วโมง และตัวแม่จะทำการลอกคราบทันทีและจะลอกคราบทุกครั้งที่ให้ตัวอ่อนออกจาก brood chamber แล้ว (เฉลี่ยประมาณวันละครั้ง) ตัวแม่ที่ให้ตัวอ่อนรุ่นแรกไปแล้วนั้นสามารถสร้าง parthenogenetic eggs ได้ใหม่และให้ลูกตัวอ่อนอีกครั้ง ซึ่งใช้เวลาห่างประมาณ 24 ชั่วโมง ไรแดงจะมีพฤติกรรมเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตาย จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในรุ่น F1 ของกลุ่มควบคุมและที่ระดับความเข้มข้นของสารผสม 0.24, 0.39 และ 0.57 TU มีแนวโน้มที่ลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยมีจำนวนลูกเฉลี่ยเท่ากับ 108.10, 95.80, 67.20 และ 42.60 ตัว ตามลำดับ ส่วนในรุ่น F2, F3, F4 และ F5 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ นั้น มีจำนวนลูกเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสูงขึ้นและน้อยกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.9

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนลูกเฉลี่ยระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละความเข้มข้น พบว่า ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสม จำนวนลูกไรแดงเฉลี่ยในรุ่น F2 มีมากกว่าในรุ่น F1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรุ่น F2 เกิดจากตัวแม่ที่เริ่มแยกเลี้ยงเดี่ยว มีอาหารที่สมบูรณ์ และระดับความเข้มข้นที่ทดลองนั้นยังไม่มีผลกระทบต่อจำนวนลูกของไรแดง สำหรับในกลุ่มควบคุม จำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F2, F3, F4 และ F5 มีจำนวนมากกว่า F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้น 0.24 TU พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F2 และ F1 ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากรุ่น F1 ส่วนในรุ่น F3 , F4 และ F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยน้อยกว่ารุ่น F1 และ F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ซึ่งในรุ่น F4 และ F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่มีแนวโน้มที่ลดลง ที่ระดับความเข้มข้น 0.39 TU พบว่า รุ่น F2 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่รุ่น F3 มีจำนวนลูกน้อยกว่า F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ไม่มีความแตกต่างกับรุ่น F1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรุ่น F4 และ F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน และมีค่าน้อยกว่า F1, F2 และ F3 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.57 TU พบว่า รุ่น F2, F3 และ F4 มีแนวโน้มของจำนวนลูกเฉลี่ยเช่นเดียวกับที่ระดับความเข้มข้น 0.39 TU สำหรับไรแดงรุ่น F5 ไม่สามารถสร้าง parthenogenetic eggs ได้จึงทำให้จำนวนลูกเป็น 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.15 ผลของสารผสมแคดเมียมและทองแดงต่อจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนลูกเฉลี่ย (ตัว) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 108.10 ± 20.69	a b 127.45 ± 14.72	a b 122.10 ± 20.94	a b 125.00 ± 17.81	a b 128.40 ± 15.00
0.24	0.0112	0.00304	b a 95.80 ± 10.63	b a 105.50 ± 17.37	b b 82.70 ± 14.19	b c 71.45 ± 15.61	b c 62.15 ± 19.50
0.39	0.0182	0.00494	c a 67.20 ± 13.34	c b 86.10 ± 13.31	c a 67.60 ± 13.93	c c 42.65 ± 11.73	c c 41.25 ± 10.63
0.57	0.0266	0.00722	d a 42.60 ± 11.36	d b 59.25 ± 11.18	d a 46.65 ± 8.52	d c 10.25 ± 2.15	0

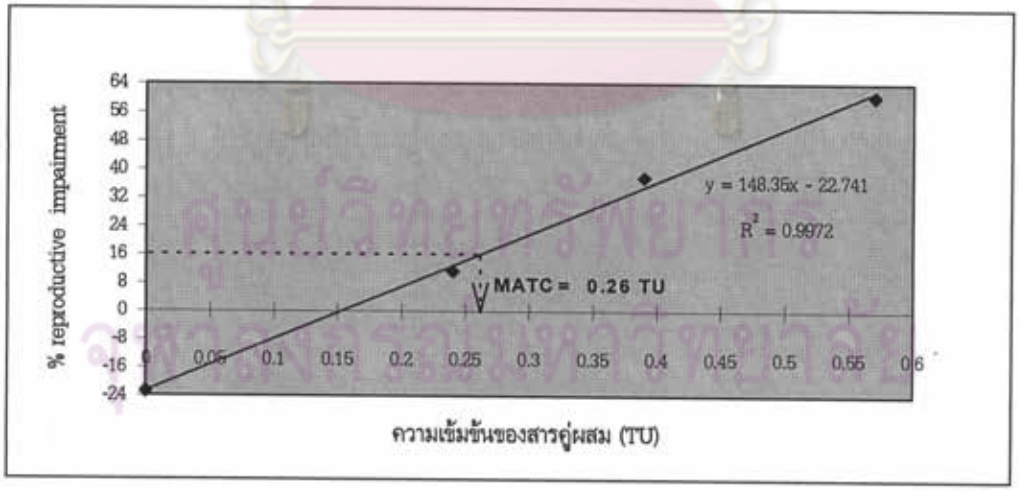
หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง

- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

เมื่อพิจารณาจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในรุ่น F1 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายคู่ผสม ซึ่งสามารถคิดเป็นเปอร์เซนต์ของจำนวนลูกที่ลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4.16 และนำค่าดังกล่าวมาวิเคราะห์หาระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมที่ทำให้จำนวนลูกเฉลี่ยลดลงร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายคู่ผสมที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำที่ไรแดงอาศัยอยู่ได้โดยไม่เป็นอันตราย ตามวิธีของ Biesinger และ Christensen (1972) จากรูปที่ 4.7 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.26 TU ซึ่งคิดเป็นระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและทองแดงได้เท่ากับ 0.0121 และ 0.00329 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ผลของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดงต่อจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงรุ่น F1 และเปอร์เซนต์ของจำนวนลูกไรแดงที่ลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัว (ตัว)	% reproductive impairment
	แคดเมียม	ทองแดง		
ชุดควบคุม	0	0	108.10	0
0.24	0.0112	0.00304	95.80	11.4
0.39	0.0182	0.00494	67.20	37.8
0.57	0.0266	0.00722	42.60	60.6



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า MATC ของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง

เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่า จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดงในทุกรุ่น มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมเพิ่มขึ้น ในรุ่น F1 และ F2 ที่ระดับความเข้มข้น 0.24 TU มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศที่ไม่แตกต่างกับชุดควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ที่ระดับความเข้มข้น 0.39 และ 0.57 TU มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าชุดทดลองและที่ระดับความเข้มข้น 0.24 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ส่วนในรุ่น F3, F4 และ F5 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.24 , 0.39 และ 0.57 TU มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.17 และในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.17 ผลของสารผสมแคดเมียมและทองแดงต่อจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 8.95 ± 1.23	a b 9.90 ± 1.07	a b 10.05 ± 1.99	a b 10.60 ± 1.70	a b 10.50 ± 1.32
0.24	0.0112	0.00304	a a 8.60 ± 0.60	a b 9.65 ± 1.57	b c 7.45 ± 1.32	b d 6.10 ± 1.16	b d 6.25 ± 1.74
0.39	0.0182	0.00494	b a 6.25 ± 1.07	b b 7.15 ± 0.81	c a 5.85 ± 1.27	c c 4.10 ± 1.07	c c 4.30 ± 1.08
0.57	0.0266	0.00722	c a 3.85 ± 1.04	c b 5.65 ± 0.67	d a 3.85 ± 0.59	d c 1.00 ± 0.00	0

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละความเข้มข้น พบว่า ในรุ่น F2 ของทุกระดับความเข้มข้นรวมทั้งชุดควบคุมมีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในชุดควบคุม พบว่า รุ่น F3, F4 และ F5 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ไม่แตกต่าง

กับรุ่น F2 เมื่อทดสอบทางสถิติ สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 0.24 , 0.39 และ 0.57 TU นั้น พบว่า รุ่น F3 F4 และ F5 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในรุ่น F2 และ F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และมีแนวโน้มที่ลดลง โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นสูงสุด คือ 0.57 TU ไรแดงในรุ่น F5 ไม่สามารถทำการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.17 และในรูปที่ 4.9

(2) ขนาดของไรแดง

การศึกษาด้านการเติบโตโดยการวัดขนาดความยาวลำตัวของไรแดงหลังจากที่ให้ลูกไรแดงออกมาครั้งแรก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ในรุ่น F1, F2 และ F3 ที่ทุกระดับความเข้มข้นและชุดควบคุม ไรแดงมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ ซึ่งมีขนาดความยาวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.283-1.320 มิลลิเมตร แต่ในรุ่น F4 และ F5 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารผสมมากขึ้น ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงลดลง ซึ่งในรุ่น F4 ที่ระดับความเข้มข้น 0.24 , 0.39 และ 0.57 TU มีขนาดความยาวเฉลี่ยไรแดงน้อยกว่าในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับรุ่น F5 ที่ระดับความเข้มข้น 0.39 และ 0.57 TU มีขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงน้อยกว่าในชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.24 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.18

เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 แล้ว พบว่า ชุดควบคุมมีขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงทุกรุ่นที่ไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ แต่ในชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ นั้น พบว่า ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงลดลงในรุ่น F4 และ F5 ในทุกระดับความเข้มข้นและชุดควบคุม หลังจากที่ไรแดงทำ parthenogenesis ครั้งแรกแล้ว ไรแดงมีการเติบโตมากขึ้น ซึ่งเมื่อวัดขนาดหลังจากวัดครั้งแรกแล้ว 7 วัน ไรแดงมีขนาดความยาวเฉลี่ยประมาณ 1.500 - 1.700 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ลูกไรแดงที่ออกจากตัวแม่จะมีขนาดความยาวเฉลี่ยเริ่มต้นประมาณ 0.6 - 0.9 มิลลิเมตร จากการทดลองที่ระดับความเข้มข้น 0.57 TU พบว่า รุ่น F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 0.985 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเริ่มต้นหลังจากออกจากตัวแม่ แสดงว่า ที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวมีผลในการยับยั้งการเติบโตของไรแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และในรูปที่ 4.8 และ 4.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18 ผลของสารผสมแคดเมียมและทองแดงต่อขนาดเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

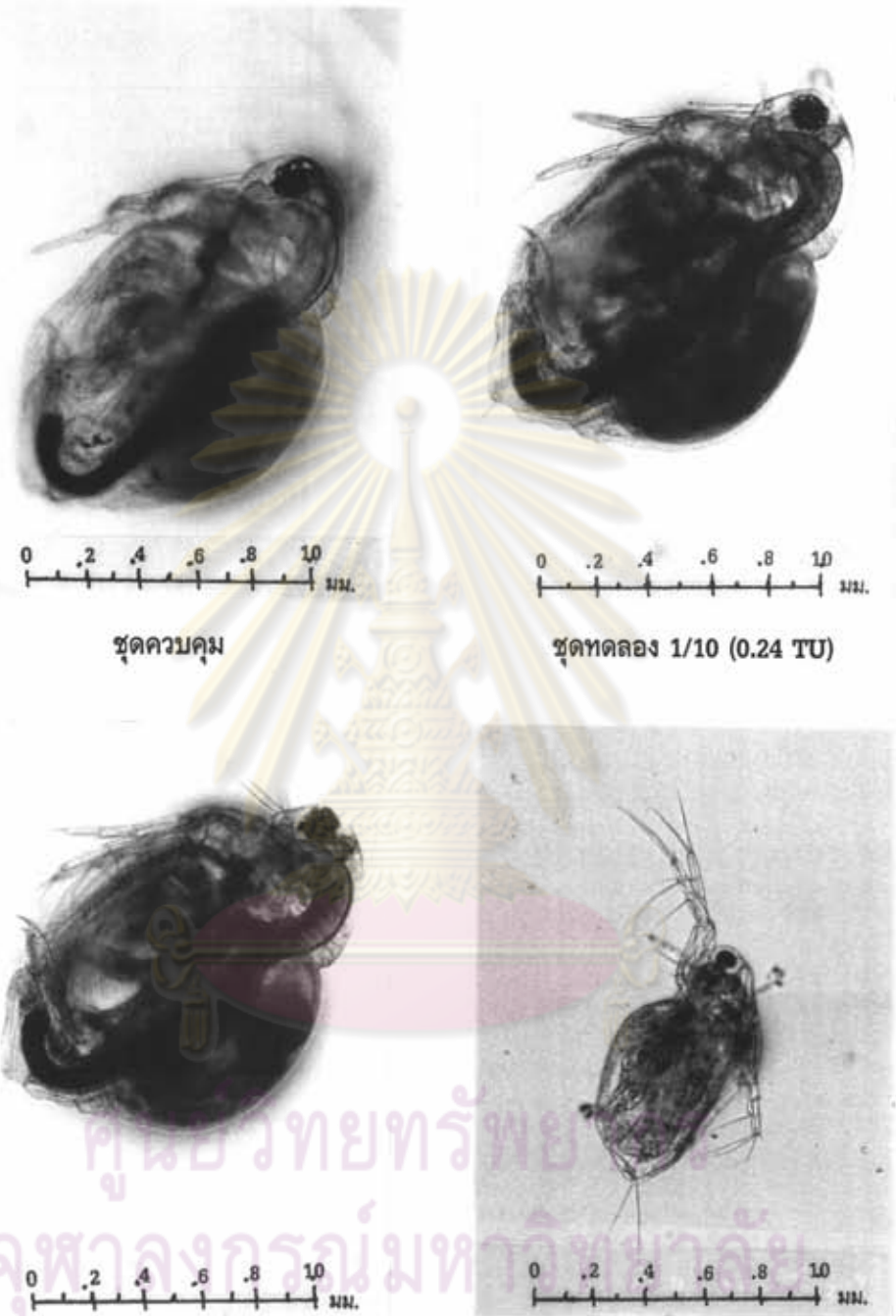
ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		ขนาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	1.300 ± 0.032	1.304 ± 0.068	1.320 ± 0.035	a 1.295 ± 0.050	a 1.294 ± 0.037
0.24	0.0112	0.00304	a 1.299 ± 0.050	a 1.309 ± 0.033	a 1.303 ± 0.068	b b 1.236 ± 0.053	a b 1.220 ± 0.034
0.39	0.0182	0.00494	a 1.296 ± 0.075	a 1.294 ± 0.030	a 1.303 ± 0.041	c b 1.196 ± 0.038	b c 1.094 ± 0.058
0.57	0.0266	0.00722	a 1.283 ± 0.041	a 1.278 ± 0.059	a 1.289 ± 0.047	c a 1.191 ± 0.037	c c 0.985 ± 0.316

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง

- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

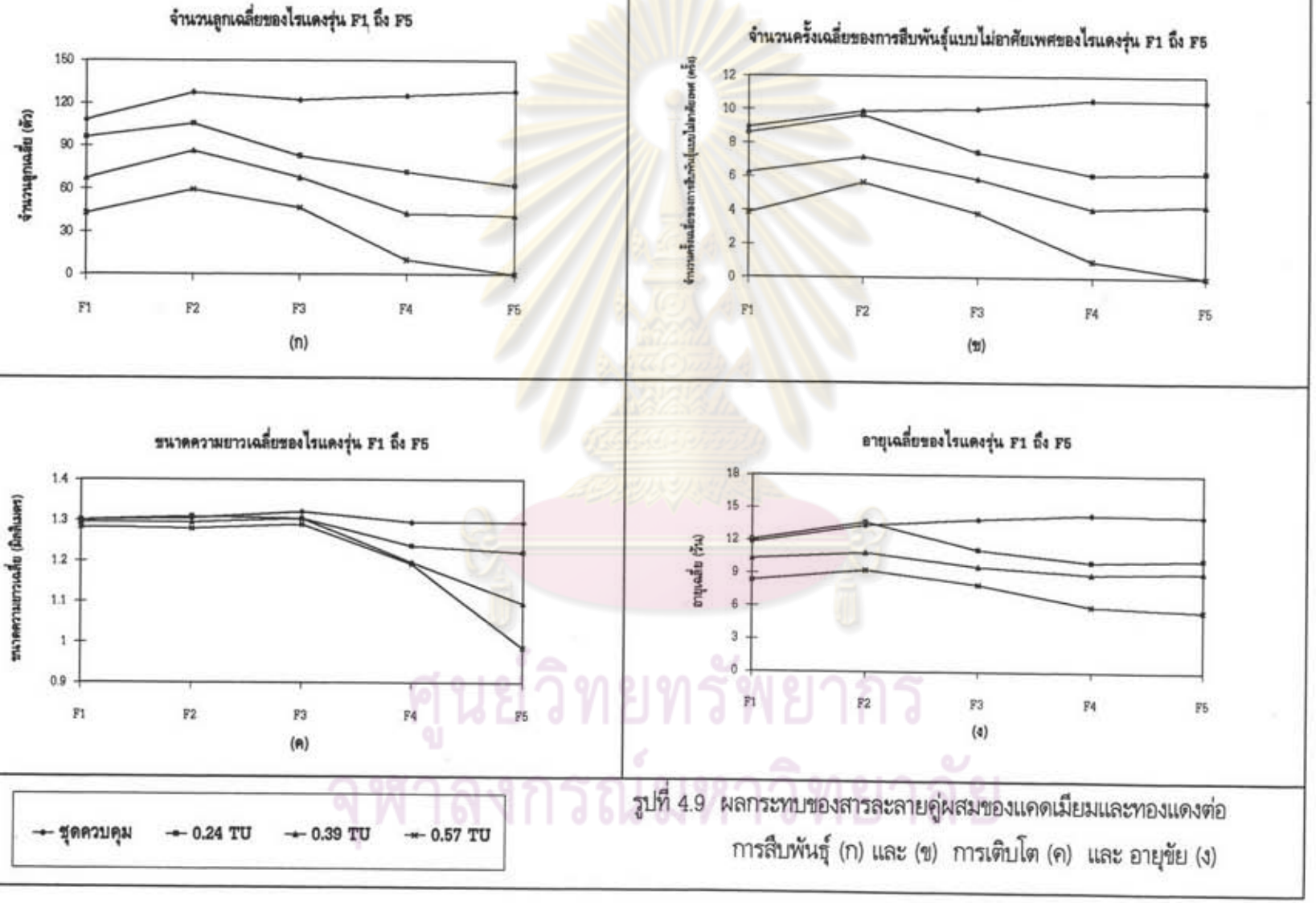
(3) อายุของไรแดง

ผลของสารคู่ผสมของแคดเมียม และทองแดงที่มีต่ออายุเฉลี่ยของไรแดง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม และที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมเพิ่มขึ้น อายุเฉลี่ยของไรแดงในทุก ๆ รุ่นมีแนวโน้มลดลง พิจารณารุ่น F1 และ F2 พบว่า ที่ระดับ 0.24 TU อายุเฉลี่ยของไรแดงไม่แตกต่างกับชุดควบคุมเมื่อทดสอบทางสถิติ แต่ที่ระดับความเข้มข้น 0.39 และ 0.57 TU มีอายุเฉลี่ยของไรแดงน้อยกว่าชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.24 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับในรุ่น F3 , F4 และ F5 ที่ระดับความเข้มข้น 0.24 ,0.39 และ 0.57 TU มีอายุเฉลี่ยของไรแดงน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบอายุเฉลี่ยของไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า ไรแดงในชุดควบคุมรุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 มีอายุเฉลี่ยมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 0.24 , 0.39 และ 0.57 TU พบว่า ในรุ่น F2 มีอายุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงในรุ่น F3, F4 และ F5 ดังแสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ลักษณะของแม่ไรแดงในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดงและชุดควบคุม (40x)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดงต่อการสืบพันธุ์ (ก) และ (ข) การเติบโต (ค) และ อายุขัย (ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 ผลของสารผสมแคดเมียมและทองแดงต่ออายุเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		อายุเฉลี่ย (วัน) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 11.80 ± 1.50	a b 13.35 ± 1.04	a b 13.95 ± 2.37	a b 14.35 ± 1.95	a b 14.20 ± 1.61
0.24	0.0112	0.00304	a a 12.05 ± 0.76	a b 13.65 ± 2.43	b ac 11.10 ± 1.94	b c 10.00 ± 1.21	b c 10.25 ± 1.68
0.39	0.0182	0.00494	b ab 10.30 ± 1.13	b a 10.85 ± 1.53	c bc 9.60 ± 1.63	c c 8.90 ± 1.12	c c 9.10 ± 1.52
0.57	0.0266	0.00722	c a 8.30 ± 1.34	c b 9.25 ± 1.41	d a 7.95 ± 0.89	d c 5.95 ± 0.89	d c 5.55 ± 1.05

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

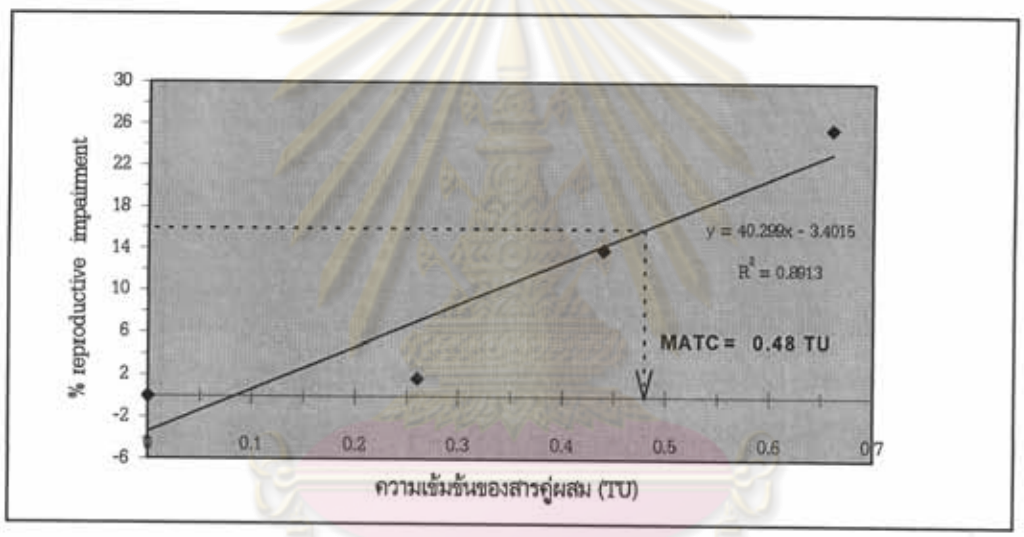
4.3.2 พิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสีต่อไรแดง

(1) การสืบพันธุ์

ลักษณะการสืบพันธุ์ของไรแดงที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี ตั้งแต่รุ่น F1 ถึง รุ่น F5 มีพฤติกรรมและลักษณะการสืบพันธุ์เช่นเดียวกับที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง เมื่อเปรียบเทียบจำนวนลูกเฉลี่ยระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F1 และ F2 ในชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU นั้นไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ แต่ที่ระดับความเข้มข้นมากขึ้นคือ 0.44 และ 0.66 TU มีจำนวนลูกเฉลี่ยน้อยกว่าในชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณารุ่น F3 , F4 และ F5 พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยที่ระดับความเข้มข้น 0.26 , 0.44 และ 0.66 TU มีจำนวนน้อยกว่าในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีเพิ่มขึ้น มีผลทำให้จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.21 ผลของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีต่อจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในรุ่น F1 และเปอร์เซนต์ของจำนวนลูกไรแดงที่ลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

ความเข้มข้นของสารผสม (TU)	ความเข้มข้นของสารเดี่ยว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัว (ตัว)	% reproductive impairment (%)
	แคดเมียม	สังกะสี		
ชุดควบคุม	0	0	88.20	0
0.26	0.0182	0.052	86.70	1.7
0.44	0.0308	0.088	75.90	13.9
0.66	0.0462	0.132	65.60	25.6



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า MATC ของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศในทุก ๆ รุ่นมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะรุ่น F3 , F4 และ F5 ในรุ่น F1 พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรุ่น F2 ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 และ

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนลูกเฉลี่ยระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละความเข้มข้น พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 ของชุดควบคุมมีค่ามากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ที่ระดับความเข้มข้น 0.26 และ 0.44 TU พบว่า ในรุ่น F2 มีจำนวนลูกเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากรุ่น F1 แต่อยู่ในระดับที่ไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ แต่ในรุ่น F3 , F4 และ F5 มีแนวโน้มที่ลดลงและมีจำนวนลูกเฉลี่ยน้อยกว่าในรุ่น F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU พบว่า รุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยน้อยกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยเฉพาะไรแดงในรุ่น F5 ไม่สามารถสร้าง parthenogenetic egg ได้ จึงมีจำนวนลูกเป็น 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12 ลักษณะผลกระทบที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับผลกระทบที่เกิดจากสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง

ตารางที่ 4.20 ผลของสารผสมแคดเมียมและสังกะสีต่อจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนลูกเฉลี่ย (ตัว) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Zn	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 88.20 ± 12.39	a b 113.60 ± 18.07	a b 112.00 ± 16.49	a b 110.25 ± 12.77	a b 110.85 ± 12.29
0.26	0.0182	0.052	a ac 86.70 ± 13.54	a b 118.40 ± 13.39	b c 94.00 ± 13.38	b c 90.95 ± 13.41	b a 81.55 ± 14.09
0.44	0.0308	0.088	b ab 75.90 ± 16.56	b a 85.50 ± 19.65	c ab 82.45 ± 18.65	c b 73.50 ± 18.07	c c 20.60 ± 11.95
0.66	0.0462	0.132	c a 65.60 ± 13.51	c b 56.40 ± 12.65	d b 53.35 ± 7.39	d c 39.25 ± 14.63	0

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

เมื่อพิจารณาจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในรุ่น F1 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสี โดยคิดเป็นเปอร์เซนต์ของจำนวนลูกไรแดงที่ลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4.21 สามารถนำมาวิเคราะห์หาระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมที่ทำให้จำนวนลูกเฉลี่ยลดลงร้อยละ 16 ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารคู่ผสมที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำที่ไรแดงอยู่ได้โดยไม่เป็นอันตรายตามวิธีการของ Biesinger และ Christensen (1972) จากรูปที่ 4.10 พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.48 TU ซึ่งคิดเป็นระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีได้เท่ากับ 0.0336 และ 0.096 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

0.66 TU พบว่า มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในชุดควบคุม และที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับรุ่น F3 , F4 และ F5 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.26, 0.44 และ 0.66 TU มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.22 ผลของสารผสมแคดเมียมและสังกะสีต่อจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Zn	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 7.30 ± 1.62	a b 9.50 ± 1.60	a b 8.85 ± 1.27	a b 8.75 ± 1.29	a b 9.05 ± 1.28
0.26	0.0182	0.052	ab a 7.10 ± 1.37	a b 9.65 ± 1.14	b a 7.60 ± 1.35	b a 7.55 ± 1.43	b a 7.40 ± 1.53
0.44	0.0308	0.088	ab ac 6.70 ± 1.56	b b 7.95 ± 1.54	b ab 7.20 ± 1.10	c c 5.85 ± 1.56	c d 2.15 ± 1.04
0.66	0.0462	0.132	b a 6.10 ± 1.48	c a 5.65 ± 1.66	c a 5.65 ± 1.22	d b 3.75 ± 1.25	0

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า ในชุดควบคุมรุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU พบว่า รุ่น F2 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมากกว่าในรุ่น F1 , F3 , F4 และ F5 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU พบว่า รุ่น F2 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมากกว่ารุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในรุ่น F3 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศที่มากกว่ารุ่น F1 แต่ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ ในรุ่น F4 มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่ารุ่น F2 และ F3 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ไม่แตกต่างกับรุ่น F1 สำหรับรุ่น F5 นั้นมีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบ

ไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในทุก ๆ รุ่น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU พบว่า จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมีแนวโน้มที่ลดลงจากรุ่น F1 ถึงรุ่น F5 โดยในรุ่น F2 และ F3 มีค่าน้อยกว่ารุ่น F1 แต่ไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ แต่ในรุ่น F4 และ F5 นั้น มีจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศน้อยกว่าในรุ่น F1 , F2 และ F3 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยเฉพาะในรุ่น F5 จะพบว่า ไรแดงไม่สามารถสร้าง parthenogenetic eggs ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.12

(2) ขนาดของไรแดง

การศึกษาการเติบโตของไรแดงที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี ได้วัดขนาดความยาวของไรแดงหลังจากการให้ลูกครั้งแรก เช่นเดียวกับการทดสอบในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวของไรแดงระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองทุกระดับความเข้มข้น พบว่า ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงในทุกรุ่นมีแนวโน้มลดลง เมื่อระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมเพิ่มขึ้น ไรแดงรุ่น F1 ที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU มีขนาดความยาวเฉลี่ยน้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU นั้น มีขนาดความยาวเฉลี่ยไม่แตกต่างกับชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้นอื่น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรุ่น F2 และ F3 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 และ 0.66 TU มีผลทำให้ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงน้อยกว่าในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU นั้น ไม่แตกต่างกับชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU เมื่อทดสอบทางสถิติ ในรุ่น F4 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 และ 0.66 TU มีขนาดความยาวเฉลี่ยน้อยกว่าในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU นั้น ขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงไม่มีความแตกต่าง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0.26 และ 0.66 TU และในรุ่น F5 พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมเพิ่มขึ้นขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงลดลงและมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.12

เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละความเข้มข้น พบว่า ในชุดควบคุม ไรแดงรุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากรุ่น F2 ถึง F5 ที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU พบว่า ไรแดงในรุ่น F1 ถึง F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยใกล้เคียงกัน และไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU พบว่า ไรแดงรุ่น F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยน้อยกว่าในทุกรุ่น แต่จะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับรุ่น F1 และ F4 และที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พบว่า รุ่น F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยน้อยกว่าในรุ่น F1 , F2 , F3 และ F4 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.23 หลังจากที่ไรแดงทำ parthenogenesis ครั้งแรกแล้ว ไรแดงยังมีการเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเมื่อวัดขนาดหลังจากวัดครั้งแรกแล้ว 7 วัน พบว่า ไรแดงมีขนาดความยาวเฉลี่ยประมาณ 1.500-1.700 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทุกระดับความเข้มข้น ไรแดงที่ออกจากตัวแม่จะมีขนาดความยาวเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 0.6-0.9 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับที่ทดลองในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง จากชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU พบว่า ไรแดงในรุ่น F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 0.979 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเริ่มต้นหลังจากออกจากตัวแม่ แสดงว่า ที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวมีผลในการยับยั้งการเติบโตของไรแดง เช่นเดียวกับสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.12

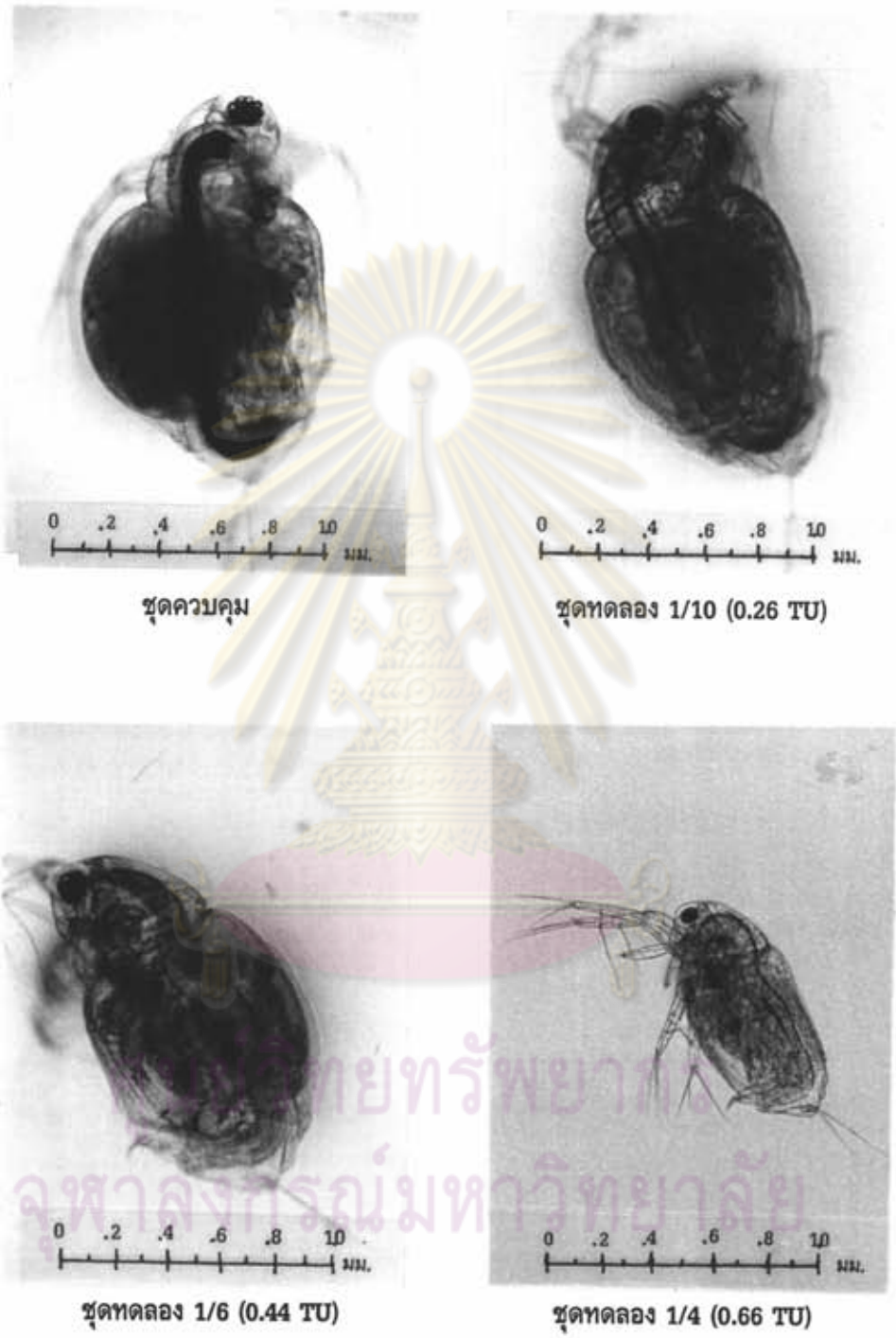
ตารางที่ 4.23 ผลของสารผสมแคดเมียมและสังกะสีต่อขนาดเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		ขนาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Zn	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	ab a 1.281 ± 0.039	a b 1.308 ± 0.035	a b 1.311 ± 0.043	a b 1.324 ± 0.037	a c 1.369 ± 0.047
0.26	0.0182	0.052	a a 1.296 ± 0.057	ab a 1.296 ± 0.031	ab a 1.301 ± 0.045	ab a 1.305 ± 0.038	b a 1.321 ± 0.060
0.44	0.0308	0.088	ab a 1.283 ± 0.051	b ab 1.279 ± 0.037	b ab 1.280 ± 0.045	bc a 1.284 ± 0.057	c b 1.245 ± 0.070
0.66	0.0462	0.132	b a 1.250 ± 0.051	c a 1.230 ± 0.057	c a 1.241 ± 0.046	c a 1.256 ± 0.047	d b 0.979 ± 0.089

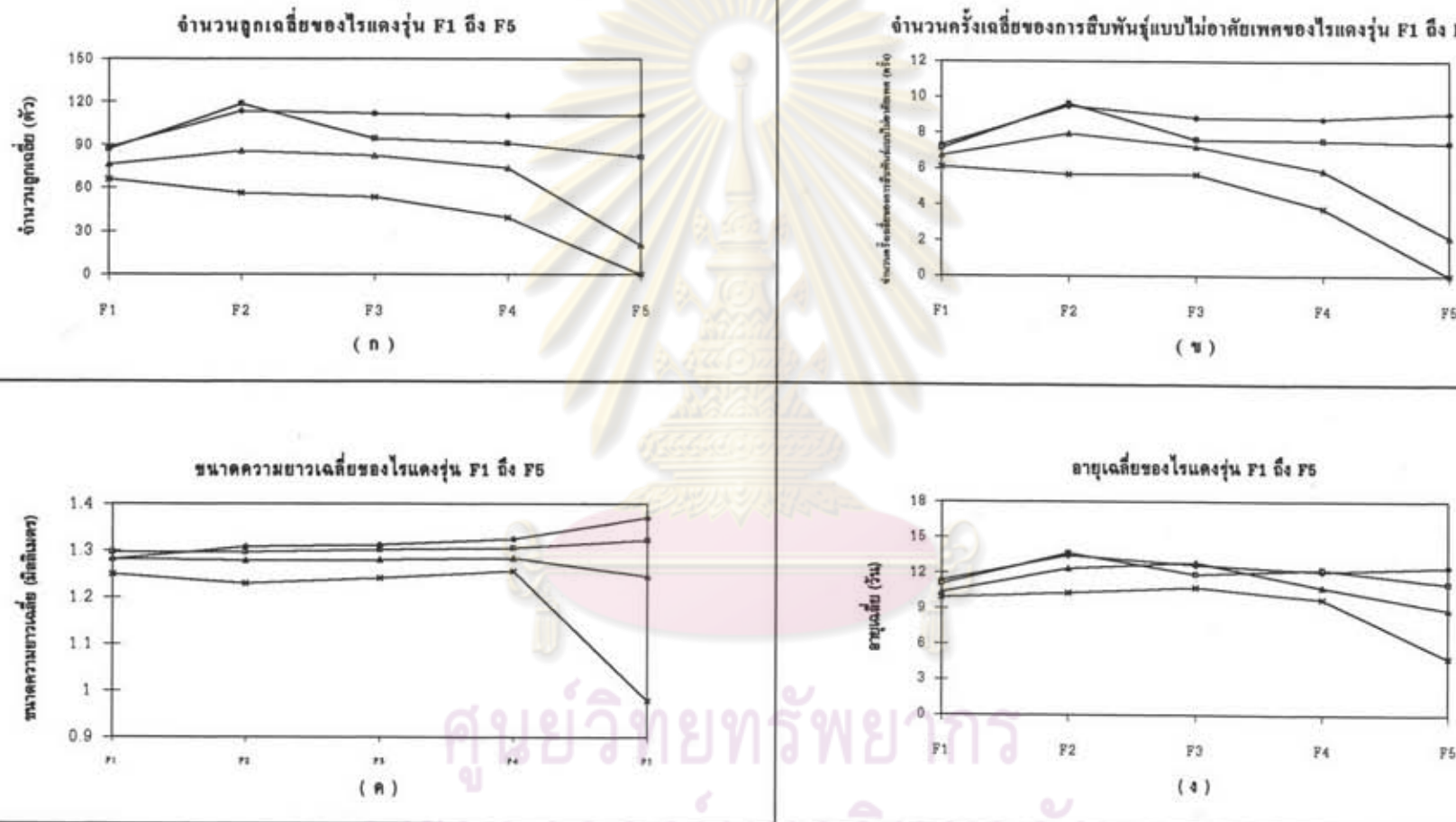
หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง

- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ลักษณะของแม่ไรแดงในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีและชุดทดลอง (40x)



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีต่อการสืบพันธุ์ (ก) และ (ข) การเติบโต (ค) และ อายุขัย (ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(3) อายุของไรแดง

ผลของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสีที่มีต่ออายุเฉลี่ยไรแดง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า อายุเฉลี่ยของไรแดงในทุก ๆ รุ่น มีแนวโน้มลดลง เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมเพิ่มขึ้น ไรแดงในรุ่น F1 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU มีอายุเฉลี่ยน้อยกว่าชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ไม่แตกต่างกับอายุเฉลี่ยของไรแดงที่ระดับความเข้มข้น 0.44 และ 0.26 TU และที่ระดับความเข้มข้น 0.26 และ 0.44 TU นั้น มีอายุเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกับชุดควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ไรแดงในรุ่น F2 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU มีอายุเฉลี่ยน้อยกว่าในชุดควบคุม และที่ระดับความเข้มข้น 0.26 และ 0.44 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในรุ่น F3 พบว่า ไรแดงที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU นั้น มีอายุเฉลี่ยน้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้นอื่น แต่จะมีความแตกต่างกับที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU และชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในรุ่น F4 พบว่า ไรแดงที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 0.44 และ 0.66 TU มีอายุเฉลี่ยน้อยกว่าในชุดควบคุมและที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับในรุ่น F5 นั้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.26, 0.44 และ 0.66 TU มีอายุเฉลี่ยของไรแดงน้อยกว่าในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และอายุเฉลี่ยของไรแดงที่ทดสอบที่ระดับความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับดังกล่าว อายุเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงและลดลงอย่างแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.24

เมื่อเปรียบเทียบไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละความเข้มข้น พบว่า ในชุดควบคุม ไรแดงในรุ่น F2 , F3 , F4 และ F5 มีแนวโน้มของอายุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากรุ่น F1 ซึ่งในรุ่น F2 และ F3 จะมีอายุเฉลี่ยมากกว่าในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่อายุเฉลี่ยในรุ่น F4 และ F5 ถึงจะมีมากกว่ารุ่น F1 แต่เมื่อทดสอบทางสถิติแล้ว พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.26 TU พบว่า ไรแดงในรุ่น F2 มีอายุเฉลี่ยมากกว่าในรุ่นอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ซึ่งในรุ่น F1 , F3 , F4 และ F5 จะมีอายุเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ที่ระดับความเข้มข้น 0.44 TU พบว่า ไรแดงรุ่น F2 และ F3 มีอายุเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ในรุ่น F4 และ F5 นั้น มีอายุเฉลี่ยลดลงและมีค่าน้อยกว่ารุ่น F2 และ F3 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 0.66 TU พบว่า อายุเฉลี่ยของไรแดงลดลงในรุ่น F5 และมีค่าน้อยกว่ารุ่นอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.24 และ รูปที่ 4.12 ลักษณะผลกระทบที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับผลกระทบที่เกิดจากสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง

ตารางที่ 4.24 ผลของสารผสมแคดเมียมและสังกะสีต่ออายุเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		อายุเฉลี่ย (วัน) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Cd	Zn	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a a 11.35 ± 2.11	a c 13.45 ± 2.01	a bc 12.65 ± 1.53	a ab 12.10 ± 1.52	a abc 12.45 ± 1.36
0.26	0.0182	0.052	ab a 11.05 ± 1.57	a b 13.65 ± 1.81	ab a 11.85 ± 2.58	a a 12.25 ± 1.89	b a 11.05 ± 1.50
0.44	0.0308	0.088	ab a 10.35 ± 1.72	a b 12.35 ± 2.34	a b 12.85 ± 1.50	b a 10.75 ± 1.89	c c 8.85 ± 1.31
0.66	0.0462	0.132	b a 9.90 ± 1.77	b a 10.30 ± 2.73	b a 10.75 ± 1.71	b a 9.75 ± 1.83	d b 4.80 ± 1.06

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

4.3.3 พิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงต่อไรแดง

(1) การสืบพันธุ์

ลักษณะการสืบพันธุ์ของไรแดงที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงตั้งแต่รุ่น F1 ถึง F5 มีพฤติกรรมและลักษณะการสืบพันธุ์เช่นเดียวกับที่ทดสอบในสารทดลองคู่อื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบจำนวนลูกเฉลี่ยระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่รุ่น F1 ถึง F5 พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในแต่ละรุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมก็ตาม และไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจำนวนลูกเฉลี่ยของรุ่น F1 มีค่าตั้งแต่ 99.30 - 104.55 ตัว รุ่น F2 มีค่าตั้งแต่ 106.15 - 112.20 ตัว รุ่น F3 มีค่าตั้งแต่ 111.95 - 116.00 ตัว รุ่น F4 มีค่าตั้งแต่ 109.50 - 118.55 ตัว และรุ่น F5 มีค่าตั้งแต่ 110.75 - 121.05 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.14 แสดงว่า ระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงที่ใช้ทดลอง ไม่มีผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ในด้านจำนวนลูกของไรแดง

ตารางที่ 4.25 ผลของสารผสมสังกะสีและทองแดงต่อจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนลูกเฉลี่ย (ตัว) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Zn	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	a 100.60 ± 11.83	b 112.20 ± 16.34	b 114.30 ± 13.56	ab 109.50 ± 14.44	b 113.95 ± 14.82
0.33	0.088	0.00209	a 99.30 ± 15.36	ab 106.15 ± 15.28	b 112.05 ± 14.95	b 110.45 ± 17.09	b 110.75 ± 18.06
0.54	0.144	0.00342	a 104.55 ± 11.57	ab 107.65 ± 13.87	bc 116.00 ± 15.39	bc 117.10 ± 17.99	c 120.00 ± 18. 45
0.81	0.216	0.00513	a 102.00 ± 16.08	ab 108.15 ± 15.96	abc 111.95 ± 17.14	bc 118.55 ± 17.27	c 121.05 ± 17.68

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ในชุดควบคุม ไรแดงในรุ่น F2 , F3 และ F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และในรุ่น F4 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 แต่ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.33 TU พบว่า รุ่น F2 มีจำนวนลูกเฉลี่ยที่มากกว่าในรุ่น F1 แต่ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนในรุ่น F3 , F4 และ F5 นั้น มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.54 TU พบว่า จำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F2 ไม่แตกต่างกับในรุ่น F1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรุ่น F3 และ F4 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่ไม่แตกต่างกับจำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F2 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับจำนวนลูกเฉลี่ยในรุ่น F5 มีค่ามากกว่าในรุ่น F1 และ F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และมีค่ามากกว่าในรุ่น F3 และ F4 แต่ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และที่ระดับความเข้มข้น 0.81 TU มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับที่ระดับความเข้มข้น 0.54 TU โดยที่ในรุ่น F2 และ F3 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 แต่ไม่แตกต่างกับในรุ่น F1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในรุ่น F4 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และมีค่ามากกว่าในรุ่น F2 และ F3 แต่ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับในรุ่น F5 มีจำนวนลูกเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F1 และ F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และมากกว่าในรุ่น F3 และ F4 แต่ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.14

เมื่อพิจารณาจำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงในรุ่น F1 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แล้ว พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมเพิ่มขึ้น จำนวนลูกเฉลี่ยของไรแดงไม่ได้ลดลงเหมือนกับที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสม 2 คู่ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้น จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์หาระดับความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำโดยที่ไม่ทำให้ไรแดงอาศัยอยู่โดยไม่เป็นอันตรายได้ แสดงว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสม 0.81 TU (1/4 ของค่า 48h-LC_{50}) ยังไม่เป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตและการแพร่พันธุ์ของไรแดงในแหล่งน้ำ

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และเปรียบเทียบกันระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 พบว่า จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดงมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10.30 - 11.60 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.14 แสดงว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายคู่ผสมที่ใช้ทดลองครั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ของไรแดง

ตารางที่ 4.26 ผลของสารผสมสังกะสีและทองแดงต่อจำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		จำนวนครั้งเฉลี่ยของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Zn	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	10.65 ± 1.78	11.25 ± 2.20	11.25 ± 1.77	11.00 ± 2.57	10.65 ± 2.13
0.33	0.088	0.00209	10.80 ± 2.28	10.65 ± 1.46	11.50 ± 1.73	11.10 ± 2.38	10.30 ± 2.18
0.54	0.144	0.00342	10.90 ± 2.02	10.40 ± 1.76	11.60 ± 2.04	11.50 ± 2.52	11.00 ± 2.27
0.81	0.216	0.00513	10.90 ± 1.91	10.70 ± 1.62	11.50 ± 1.73	11.60 ± 1.98	11.60 ± 1.90

(2) ขนาดของไรแดง

การวัดขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดง มีวิธีการวัดเช่นเดียวกับที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมทั้ง 2 คู่ที่ได้กล่าวข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ในรุ่น F1 , F2 , F3 , F4 และ F5 มีขนาดความยาวใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งในรุ่น F1 มีขนาดความยาวเฉลี่ยตั้งแต่ 1.261 - 1.278 มิลลิเมตร รุ่น F2 มีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.259 - 1.269 มิลลิเมตร รุ่น F3 มีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.284 - 1.305 มิลลิเมตร รุ่น F4 มีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.290 - 1.299 มิลลิเมตร และรุ่น F5 มีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.290 - 1.310 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.27 ผลของสารผสมสังกะสีและทองแดงต่อขนาดเฉลี่ยของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		ขนาดเฉลี่ย (มิลลิเมตร) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Zn	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	1.278 ± 0.018 ab	1.266 ± 0.032 a	1.308 ± 0.047 c	1.299 ± 0.051 bc	1.310 ± 0.032 c
0.33	0.088	0.00209	1.264 ± 0.038	1.265 ± 0.050	1.285 ± 0.046	1.290 ± 0.058	1.296 ± 0.054
0.54	0.144	0.00342	1.271 ± 0.042	1.269 ± 0.038	1.295 ± 0.046	1.293 ± 0.042	1.291 ± 0.050
0.81	0.216	0.00513	1.261 ± 0.031 a	1.259 ± 0.031 a	1.284 ± 0.031 b	1.299 ± 0.040 b	1.290 ± 0.043 b

หมายเหตุ - ตัวอักษรที่มุมซ้ายบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวตั้ง
- ตัวอักษรที่มุมขวาบนที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวเฉลี่ยของไรแดงระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 ในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า ในชุดควบคุม ไรแดงรุ่น F2 มีขนาดความยาวเฉลี่ยไม่แตกต่างกับรุ่น F1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่รุ่น F3 , F4 และ F5 นั้นมีขนาดความยาวเฉลี่ยมากกว่าในรุ่น F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.33 , 0.54 TU นั้น พบว่า ขนาดความยาวเฉลี่ยในทุกรุ่นของไรแดงไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ระดับความเข้มข้น 0.81 TU พบว่า รุ่น F1 มีขนาดความยาวเฉลี่ยไม่แตกต่างกับรุ่น

F2 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ไรแดงรุ่น F3 , F4 และ F5 มีขนาดความยาวเฉลี่ยมากกว่ารุ่น F1 และ F2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.14 ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทุกระดับความเข้มข้น ไรแดงที่ออกจากตัวแม่จะมีขนาดความยาวเริ่มต้นเฉลี่ยประมาณ 0.6-0.9 มิลลิเมตร และหลังจากที่ไรแดงตัวแม่ทำการสืบพันธุ์แบบ parthenogenesis ครั้งแรกแล้ว ไรแดงยังมีการเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเมื่อวัดขนาดความยาวเฉลี่ยได้ประมาณ 1.600-1.700 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13

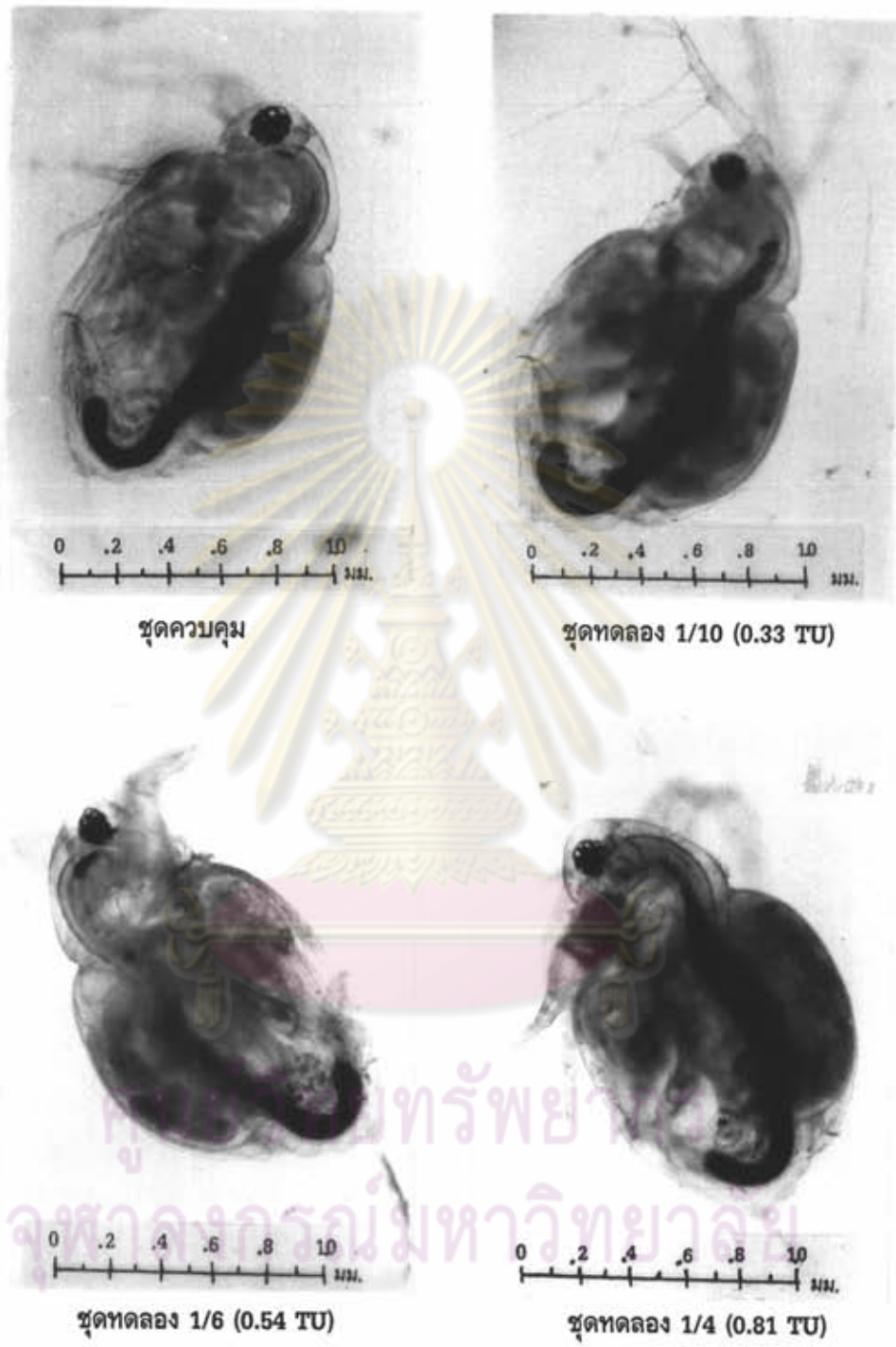
(3) อายุของไรแดง

เมื่อเปรียบเทียบอายุเฉลี่ยของไรแดง ที่ทดสอบในสารละลายคู่ผสมสังกะสีและทองแดงระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลอง และเปรียบเทียบระหว่างรุ่น F1 ถึง F5 พบว่า อายุเฉลี่ยของไรแดงมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งอายุเฉลี่ยของไรแดงมีค่าตั้งแต่ 13.20 - 14.75 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.14

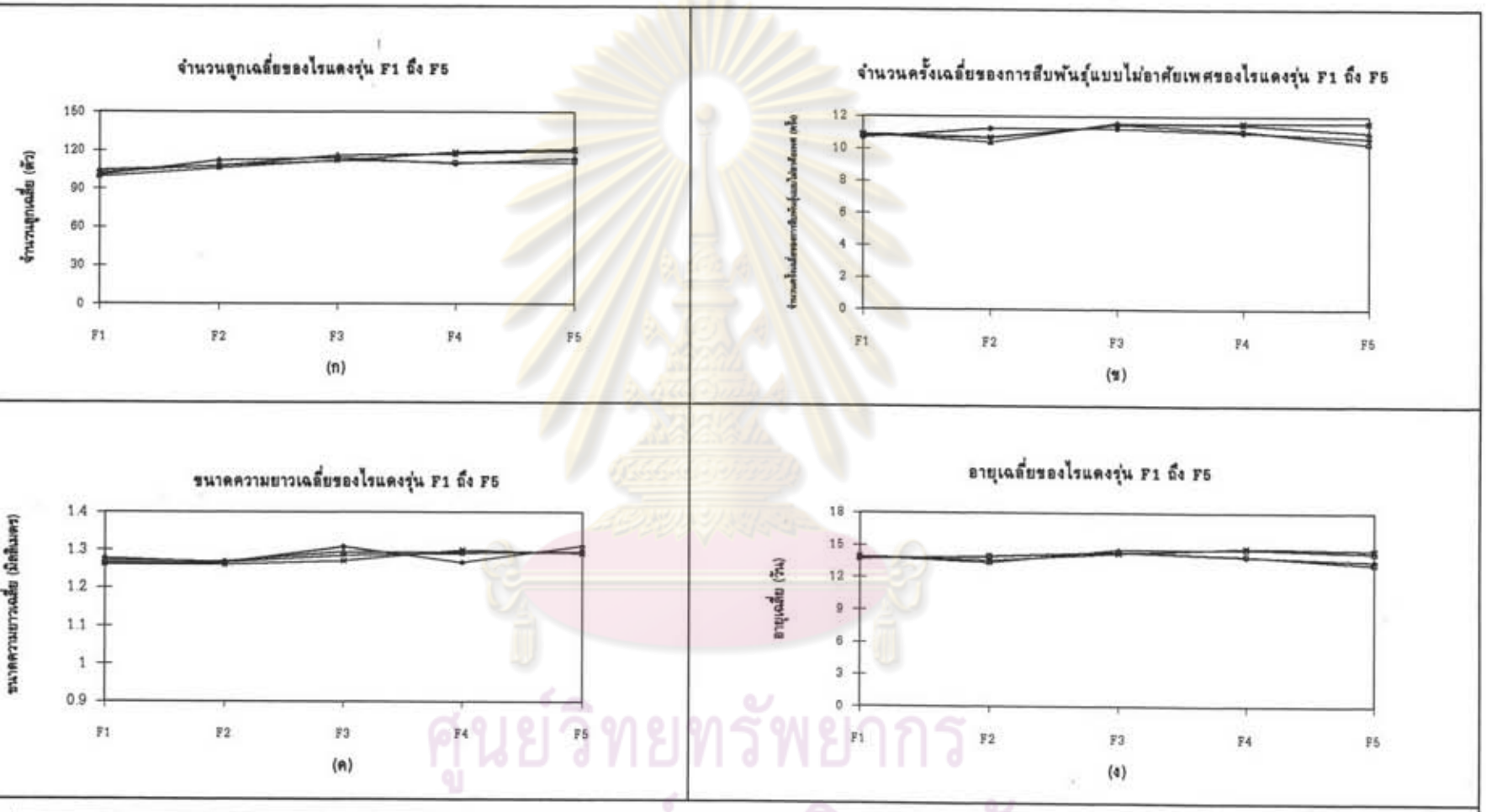
ตารางที่ 4.28 ผลของสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงที่มีต่ออายุเฉลี่ยของไรแดง

ความเข้มข้นสารผสม (TU)	ความเข้มข้นสารเดี่ยว (mg/l)		อายุเฉลี่ย (วัน) ของไรแดง 1 ตัวในแต่ละรุ่น (mean ± SD)				
	Zn	Cu	F1	F2	F3	F4	F5
ชุดควบคุม	0	0	13.75 ± 1.71	13.90 ± 2.40	14.30 ± 1.59	13.90 ± 2.69	13.50 ± 2.78
0.33	0.088	0.00209	13.65 ± 2.47	13.95 ± 2.09	14.35 ± 1.75	13.95 ± 2.23	13.20 ± 2.78
0.54	0.144	0.00342	13.90 ± 1.20	13.35 ± 1.75	14.55 ± 2.09	14.60 ± 2.46	14.25 ± 2.73
0.81	0.216	0.00513	13.90 ± 1.89	13.55 ± 1.85	14.20 ± 1.76	14.75 ± 2.15	14.50 ± 1.96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ลักษณะของแม่ไรแดงในสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดง และชุดควบคุม (40x)



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและแคดเมียมต่อการสืบพันธุ์ (ก) และ (ข) การเติบโต (ค) และ อายุขัย (ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองพิษรองเฉียบพลันของทั้งสามคู่ผสมโลหะหนัก คุณภาพน้ำที่ใช้ระหว่างทดลองในทุกชุดทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.29 พบว่า พารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำที่ใช้ระหว่างการทดลองซึ่งมีค่าอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ความกระด้าง และความเป็นด่าง มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งในชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม และในการทดลองมีการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 24 ชั่วโมง คุณภาพน้ำที่ใช้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของไรแดงและไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นพิษและผลกระทบต่อไรแดง

ตารางที่ 4.29 คุณภาพน้ำที่ใช้ในระหว่างทำการทดลองพิษรองเฉียบพลัน

พารามิเตอร์	ระหว่างทำการทดลอง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27.0 - 28.5
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	7.0 - 7.5
ปริมาณออกซิเจนละลาย (mg/l)	6.80 - 7.35
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as $CaCO_3$)	102 - 105
ความเป็นด่าง (mg/l as $CaCO_3$)	72 - 81

4.4 วิจารณ์ผลการทดลองพิษรองเฉียบพลัน

จากผลการศึกษาโดยรวมในระดับพิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีต่อไรแดง พบว่า สารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสีมีผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ การเติบโต และอายุขัยของไรแดงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ในการทดลองในสารละลายคู่ผสมของสังกะสีและทองแดงนั้น ไม่ปรากฏว่ามีผลกระทบต่อไรแดงแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ระดับความเข้มข้นของสารคู่ผสมระหว่างสังกะสี และทองแดงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของไรแดง และจากคุณสมบัติของโลหะทั้งสองที่ถือเป็นสารอาหารปริมาณน้อยที่สิ่งมีชีวิตต้องการ

Mwangi และ Alikhan, 1993 ได้กล่าวไว้ว่า ทองแดงถือเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดในกลุ่ม crustaceans และมีความจำเป็นต่อการเติบโตและพัฒนาการของร่างกาย และยังเป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่มีส่วนสำคัญในการเคลื่อนที่ของออกซิเจน (haemolymph oxygen-transport protien) ของ crustaceans ซึ่งไรแดงก็จัดอยู่ในกลุ่มสัตว์จำพวกนี้ด้วยเช่นกัน และสังกะสีก็เช่นกัน ในกลุ่ม crustaceans ถือเป็นธาตุที่จำเป็น ซึ่งทำให้เกิดความเสถียรและเกิดสมดุลในโครงสร้างของ haemocyanin แต่ถ้าในกรณีที่โลหะทั้งสองตัวนี้มีปริมาณที่มากเกินความจำเป็นต่อสัตว์แล้ว ย่อมส่งผลกระทบต่อสัตว์ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น จากการศึกษาผลกระทบของทองแดงต่อ Daphnia magna พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของทองแดง 0.020 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ขนาดของ brood chamber ลดลง และในน้ำที่มีความกระด้างต่ำและมีปริมาณของทองแดง 0.022 และ 0.035มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้จำนวนลูกลดลงไป 16 % และ 50 % ตามลำดับ (Spear และ Pierce, 1979) และจากการศึกษาของ Biesinger และ Christensen (1972) พบว่าสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.175 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทดสอบกับ Daphnia เป็นเวลาสามสัปดาห์ มีผลทำให้น้ำหนักลดลงไปร้อยละ 28 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ซึ่งระดับที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าระดับของสังกะสีและทองแดงที่ใช้ในการทดลองในสารละลายคู่ผสมครั้งนี้ คือ 0.216 และ 0.00513 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้น ระดับความเข้มข้นที่ใช้ทดลองจึงไม่มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของไรแดง

สำหรับสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและสังกะสี และแคดเมียมและทองแดง ถึงแม้ในระดับพิษเฉียบพลันจะมีอิทธิพลร่วมกันแบบต้านฤทธิ์ก็ตาม แต่จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า ในระดับพิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมทั้งสองคู่นี้ สามารถที่จะส่งผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ การเติบโต และอายุขัยของไรแดง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ในสารละลายแต่ละคู่นั้นมีองค์ประกอบของแคดเมียม ซึ่งแคดเมียมถือเป็นธาตุที่ไม่มีความจำเป็นต่อสัตว์รวมทั้งไรแดงด้วย เช่น การศึกษาของ Kuhn และคณะ (1989) พบว่า การสืบพันธุ์ของ Daphnia magna จะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ ถ้ามีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 0.0032 มิลลิกรัมต่อลิตร (3.2 ไมโครกรัมต่อลิตร) และจากการศึกษาของ Bertram และ Hart (1979) พบว่า แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 1 ถึง 30 ไมโครกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ขนาดของ brood chamber จำนวน brood chamber ต่อตัว และจำนวนครั้งในการออกลูกลดลง ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ใช้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายผสมสูงกว่าจากการศึกษาดังกล่าว และ Hamelink และคณะ (1994) ได้กล่าวไว้ว่า แคดเมียมสามารถจับตัวกับหมู่ฟังชั่น (fuctional group) ที่มีในเซลล์ไข่ นอกจากนี้ แคดเมียมสามารถเข้าจับในโมเลกุลโปรตีนได้ ทำให้เปลี่ยนแปลงกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเติบโต และการอยู่รอดของสัตว์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า MATC ของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสี พบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ได้จากการทดลองในสารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.0121 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ได้จากการทดลองในสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและสังกะสีมีค่าเท่ากับ 0.0336 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่า ดังนั้น ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในสภาพสารละลายผสม ที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำและปลอดภัยต่อการการดำรงชีวิตของไรแดง มีค่าเท่ากับ 0.0121, 0.00329 และ 0.096 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.5 การวิเคราะห์ผลโดยรวมของการศึกษาพิษเฉียบพลัน และพิษรองเฉียบพลัน

จากผลการศึกษาครั้งนี้ การศึกษาพิษเฉียบพลันโดยใช้สัดส่วนความเป็นพิษของสารละลายคู่ผสมนั้น ชี้ให้เห็นว่า ระดับความรุนแรงของความเป็นพิษของสารผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งในสภาวะแหล่งน้ำที่มีปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักย่อมมีสัดส่วนของโลหะแต่ละตัวแตกต่างกันไป และในแหล่งน้ำมีสภาวะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของโลหะแต่ละชนิดได้ตลอดเวลา ดังนั้น เมื่อมีการติดตามตรวจสอบปริมาณการปนเปื้อนของโลหะที่ผสมกันแล้ว สามารถชี้ให้เห็นได้ว่า ในสภาวะดังกล่าวจะมีแนวโน้มของความเป็นพิษต่อสัตว์ในแหล่งน้ำอย่างไร

เมื่อพิจารณาการศึกษาผลกระทบของสารละลายคู่ผสมของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในระยะสั้น (พิษเฉียบพลัน) และระยะยาว (พิษรองเฉียบพลัน) แล้ว ให้ผลที่มีความสัมพันธ์กัน คือ การทดสอบในระดับพิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดงนั้นมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของไรแดงมากกว่าในสารแคดเมียมและสังกะสี และสังกะสีและทองแดง เช่นเดียวกับการทดลองในระดับพิษเฉียบพลัน และข้อสังเกตที่ได้ คือ ถึงแม้ว่าในระดับพิษเฉียบพลัน อิทธิพลร่วมกันของสารละลายคู่ผสมจะเป็นแบบพิษร่วมกันแบบต้านฤทธิ์กัน แต่เมื่อนำมาทดสอบในระดับพิษรองเฉียบพลันแล้วสารคู่ผสมนั้น ยังสามารถส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของไรแดงได้ ดังเช่น สารละลายคู่ผสมของแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสี ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพิษรองเฉียบพลัน น่าจะมีความสำคัญต่อการพิจารณาระดับความปลอดภัยของโลหะที่อยู่รวมกันมากกว่าหนึ่งชนิดได้ดีกว่าในระดับพิษเฉียบพลัน

จากการศึกษาพิษรองเฉียบพลันที่ได้ศึกษาถึงการสืบพันธุ์ การเติบโต และอายุขัยของไรแดง ซึ่งถือว่าเป็นการศึกษาผลกระทบต่อประชากรของไรแดง ซึ่งข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการดำรงชีวิตของประชากรไรแดง ยกตัวอย่างเช่น ผลของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดงที่ระดับความเข้มข้น

เท่ากับ 0.0266 และ 0.00722 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีผลในการยับยั้งการสืบพันธุ์ การเติบโต และทำให้อายุขัยของไรแดงในรุ่นที่ 5 สั้นลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ในแหล่งน้ำที่มีปริมาณของแคดเมียมและทองแดงเท่ากับหรือมากกว่าระดับดังกล่าวนี้ ย่อมมีผลกระทบทำให้ประชากรของไรแดงลดลงได้ นอกจากผลกระทบที่เกิดขึ้นกับไรแดงในระดับ individual แล้ว ยังสามารถส่งผลกระทบในระดับ population, community และอาจทำให้โครงสร้างระบบนิเวศแหล่งน้ำ (ecosystem) เปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของสารผสมของโลหะหลายชนิด ได้แก่ อาเซนิค แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท นิเกิล และสังกะสีในสภาพสารผสมที่มีต่อ Daphnia magna โดยกำหนดระดับความเข้มข้นของโลหะแต่ละตัวที่ทดลองตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำของ Dutch ซึ่งพบว่า มีความเป็นพิษรุนแรงต่อ Daphnia magna และ Salmo gairdneri โดยภายหลังจากทดสอบแล้วเป็นเวลา 60 วัน ทำให้ตายร้อยละ 50 และเมื่อทดสอบที่ระดับความเข้มข้นลดลงจากเดิม 5 เท่าแล้ว ยังมีผลทำให้ประชากร Daphnia magna ลดลงร้อยละ 10 (Enserink, Maas-Diepeveen และ Leeuwen, 1991) จากการศึกษาดังกล่าวเมื่อนำมาพิจารณาของประเทศไทย พบว่า เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน กำหนดให้มีปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีไม่เกิน 0.05, 0.1 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกำหนดให้มีปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีไม่เกิน 0.03, 1.0 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2534) ซึ่งพบว่า ค่าดังกล่าวที่กำหนดขึ้นนั้นมีค่ามากกว่าระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ทดลองในระดับพิษรองเฉียบพลันของสารละลายคู่ผสมแคดเมียมและทองแดง และแคดเมียมและสังกะสี ดังนั้น ค่าที่กำหนดเป็นมาตรฐานดังกล่าวนั้น อาจส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของไรแดง และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำได้

ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการทดลองแล้ว พบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในสภาพสารละลายคู่ผสม ที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำและถือว่าปลอดภัยต่อการดำรงชีวิตของไรแดงซึ่งเป็นสัตว์ในระดับต้นของระบบนิเวศแหล่งน้ำ และกำหนดเป็นมาตรฐานคุณภาพน้ำของประเทศไทย ควรมีค่าเท่ากับ 0.0121, 0.00329 และ 0.096 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาความเป็นพิษของสารละลายคู่ผสมหรือสารผสม มีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณากำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำได้ดีขึ้น