



## ความเข้มข้นของปรอท ซีลีเนียม และค่าสัดส่วนโมลาร์ของซีลีเนียมและปรอท ในปลาหน้าดิน : ปลาหมูสีแก้มแดง ปลากะพงแดงข้างปาน และปลากะพงเหลืองข้างแถบ จากอ่าวไทย

### Mercury, Selenium Concentrations and Se:Hg Molar Ratios in Demersal Fishes: *Lethrinus lentjan*, *Lutjanus russelli* and *Lutjanus vitta* from the Gulf of Thailand

ยศกร ดวงหทัย<sup>1</sup>, นรินทรรัตน์ คงจันทร์ตรี<sup>2\*</sup>, สุชา มั่นคงสมบุญ<sup>3</sup> และ สุวรรณมา ภาณุตระกูล<sup>3</sup>

Yodsakorn Duanghathai<sup>1</sup>, Narinratana Kongjandtre<sup>2\*</sup>, Sucha Mankongsomboon<sup>3</sup> and Suwanna Panutrakul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย

<sup>2</sup>ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย

<sup>3</sup>สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย

<sup>1</sup>Graduate Program in Environmental Science, Faculty of Science, Burapha University, Thailand

<sup>2</sup>Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University, Thailand

<sup>3</sup>Institute of Marine Science, Burapha University, Thailand

Received : 31 January 2023

Revised : 27 March 2023

Accepted : 21 April 2023

#### บทคัดย่อ

การบริโภคปลาทะเลอาจทำให้ผู้บริโภคมีความเสี่ยงที่จะได้รับปรอทที่ปนเปื้อนในปลาทะเลได้ แต่ปลาทะเลก็เป็นแหล่งที่สำคัญของซีลีเนียมซึ่งเป็นธาตุปริมาณน้อยที่มีความจำเป็นต่อมนุษย์ ประกอบกับซีลีเนียมสามารถลดความเป็นพิษของปรอทได้ การศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของปรอทและซีลีเนียมในปลาทะเลหน้าดิน 3 ชนิด ได้แก่ ปลาหมูสีแก้มแดง (n = 22) ปลากะพงแดงข้างปาน (n = 19) และปลากะพงเหลืองข้างแถบ (n = 19) จากเกาะเสม็ด จ. ระยอง, เกาะหมาก จ. ตรวด, อำเภอขนอม จ. นครศรีธรรมราช และตลาดหนองมน จ. ชลบุรี ความเข้มข้นปรอทในปลาแต่ละชนิดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.231 \pm 0.147$ ,  $0.380 \pm 0.295$  และ  $0.237 \pm 0.219$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มก./กก.) น้ำหนักเปียก ตามลำดับ ปลากะพงแดงข้างปานเป็นปลาที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทสูงกว่าปลากะพงเหลืองข้างแถบ และปลาหมูสีแก้มแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ความเข้มข้นปรอทในเนื้อเยื่อปลาทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปลา มีขนาดใหญ่มากขึ้น ความเข้มข้นซีลีเนียมในปลาแต่ละชนิดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.759 \pm 0.102$ ,  $0.800 \pm 0.085$  และ  $0.796 \pm 0.058$  มก./กก. ตามลำดับ ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่าความเข้มข้นซีลีเนียมระหว่างชนิดปลาและสถานี และไม่พบแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซีลีเนียมกับความเข้มข้นปรอทในปลาและขนาดความยาวตัวปลา สัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ของตัวอย่างปลาทั้งหมดมีค่าระหว่าง 2.10 – 60.08 โดยสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นปรอทและขนาดความยาวตัวปลา



เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นปรอทในปลาจากการศึกษานี้เป็นไปตามมาตรฐานปรอทในอาหารของประเทศไทย (Ministry of Public Health, 2020) ประกอบกับไม่พบปลาที่มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ต่ำกว่า 1 บ่งชี้ว่าปลาทั้ง 3 ชนิดจากอ่าวไทยมีความปลอดภัยต่อการบริโภค

**คำสำคัญ :** สัดส่วนโมลาร์ของซีลีเนียมและปรอท ; ปลาทะเลหน้าดิน ; ความปลอดภัยของอาหารทะเล ; อ่าวไทย

### Abstract

Consuming marine fish could increase a person's exposure to mercury (Hg), a highly toxic trace element. Marine fish is also a main source of selenium (Se), an essential trace element, which counteract Hg toxicity. This study examines concentrations of Hg, Se and Se:Hg molar ratios in muscle tissue of 3 demersal fish species; pink ear emperor (*Lethrinus lentjan*) (n = 22), Russell's snapper (*Lutjanus russelli*) (n = 19) and brown stripe snapper (*Lutjanus vitta*) (n = 19) from Samet island, Rayong province, Mak island, Trat province, Khanom district, Nakhon Si Thammarat province and Nongmom market, Chonburi province. Mean Hg concentration in 3 fish species were  $0.231 \pm 0.147$ ,  $0.380 \pm 0.295$  and  $0.237 \pm 0.219$  mg/kg (ww), respectively. The mean Hg concentration of Russell's snapper was significantly higher than that of brown stripe snapper and pink ear emperor ( $p < 0.05$ ). Mercury concentration was found to increase with fish size. Mean Se concentration were  $0.759 \pm 0.102$ ,  $0.800 \pm 0.085$  and  $0.796 \pm 0.058$  mg/kg (ww), respectively. No significant difference in Se concentration among species and locations were found. Se concentration shows no correlation with neither Hg concentration nor fish length. Se:Hg molar ratios in all fish samples ranged from 2.10 to 60.08. Se:Hg molar ratio is negatively correlated with Hg concentration and fish length. Hg content in these fish is within the Thai maximum permissible Hg content in food (Ministry of Public Health, 2020) and none of these fish has Se:Hg molar ratios below 1. Therefore, these 3 demersal fish species from the Gulf of Thailand are safe for human consumption.

**Keywords :** Se:Hg molar ratios ; marine demersal fish ; seafood safety ; Gulf of Thailand



## บทนำ

ปลาทะเลเป็นแหล่งของโปรตีน กรดไขมันโอเมก้า 3 (Omega-3) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (Kris-Etherton *et al.*, 2002; Tilami & Sampels, 2018) จึงเป็นที่นิยมบริโภคของมนุษย์ แต่เนื้อเยื่อปลาทะเลยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ทั้งที่เป็นประโยชน์และโทษปนอยู่ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมธิลเมอร์คิวรี (Methyl mercury;  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) ซึ่งเป็นรูปแบบของปรอทที่มีความเป็นพิษสูง เมธิลเมอร์คิวรีสามารถจับตัวกับกรดอะมิโนซิสตีอีน (cysteine; Cys) กลายเป็นเมธิลเมอร์คิวรีซิสตีอีน ( $\text{CH}_3\text{Hg-Cys}$ ) ที่สะสมได้ดีในโปรตีนของสัตว์น้ำ และสามารถส่งผ่านห่วงโซ่อาหารได้ดี ดังนั้นสัตว์น้ำที่เป็นผู้บริโภคลำดับสูงและสัตว์น้ำที่มีอายุมากจึงมีแนวโน้มที่จะมีการสะสมปรอทสูง (Neff, 2002; Storelli *et al.*, 2006, 2007; Ralston & Raymond, 2018)

ปลาหน้าดินเป็นปลาที่ดำรงชีพอยู่บริเวณพื้นท้องน้ำ มีโอกาสสัมผัสกับดินตะกอนที่อาจจะปนเปื้อนปรอท นอกจากนี้ปลาหน้าดินมักจะกินสัตว์หน้าดิน และปลาหน้าดินขนาดเล็กเป็นอาหาร ปลาหน้าดินจึงมีโอกาที่จะมีการปนเปื้อนปรอทสูงกว่าปลากลุ่มอื่นๆ ยกเว้นปลาผู้ล่าขนาดใหญ่ ดังนั้นการบริโภคปลาหน้าดินจึงมีความเสี่ยงที่จะได้รับพิษของปรอทมากกว่าการบริโภคปลากลุ่มอื่นๆ (Neff, 2002; Copat *et al.*, 2014; Burger *et al.*, 2015, Barone *et al.*, 2021)

นอกจากปรอทแล้วปลาทะเลยังสะสมซีลีเนียม (Selenium) ซึ่งเป็นธาตุปริมาณน้อยที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต (Essential trace element) ในระดับที่ค่อนข้างสูง (Plessi *et al.*, 2001; Kaneko & Ralston, 2007; Yamashita *et al.*, 2011) ซีลีเนียมเป็นธาตุที่มีความจำเป็นในการสร้างซีลีโนโปรตีน (Selenoproteins) และซีลีโนเอนไซม์ (Selenoenzymes) ที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการทางชีวเคมีในร่างกายสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการต้านอนุมูลอิสระของเซลล์ประสาทและสมอง (Rayman, 2000; García-Sevillano *et al.*, 2015; Ralston & Raymond, 2010, 2018)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 เป็นต้นมา มีรายงานว่าซีลีเนียมสามารถลดพิษของปรอทในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก และปลา (Parizek & Ostadaloova, 1967; Ganther *et al.*, 1972; Watanabe *et al.*, 1999; Raymond & Ralston, 2004; Yang *et al.*, 2008) การศึกษาในระยะต่อมาพบว่าซีลีเนียมและปรอทที่มีค่าความสัมพันธ์ (affinity) สูง ส่งผลให้เมธิลเมอร์คิวรีจับตัวกับซีลีโนซิสตีอีน (Selenocysteine; Sec) เป็นเมธิลเมอร์คิวรีซีลีโนซิสตีอีน ( $\text{CH}_3\text{Hg-Sec}$ ) เมื่อโมเลกุลของเมธิลเมอร์คิวรีซีลีโนซิสตีอีนถูกย่อยสลายไป จะยังคงเหลือสารประกอบเมอร์คิวรีซีลีไนด์ ( $\text{HgSe}$ ) ที่เสถียร ไม่ละลายน้ำ และเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ความเป็นพิษของเมธิลเมอร์คิวรีลดลง ในทางกลับกันทำให้ปริมาณซีลีเนียมลดต่ำลงจนอาจจะไม่เพียงพอต่อการสร้างและการทำงานของซีลีโนโปรตีนและซีลีโนเอนไซม์ ทำให้เซลล์ประสาทและสมองถูกทำลายได้ (Raymond & Ralston, 2004; Ralston *et al.*, 2007, 2008; Ralston & Raymond, 2010, 2018)

เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากพิษของปรอทจากการบริโภคปลาทะเล ประเทศต่างๆ ใช้การกำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของปรอท หรือเมธิลเมอร์คิวรีที่ยอมให้มีได้ในอาหารในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค (Ministry of Public Health, 2020; FAO/WHO CODEX, 2019; US EPA, 2010; ANZECC, 2000) (Table 1) อย่างไรก็ตาม Kaneko & Ralston (2007) Ralston *et al.*, (2007) Ralston (2008) Peterson *et al.*, (2009) และ Ralston & Raymond (2009, 2010) เสนอว่าการป้องกันความเสี่ยงจากพิษของปรอทจากการบริโภคปลาทะเล ด้วยการกำหนดค่าความเข้มข้นของปรอท หรือเมธิลเมอร์คิวรีในอาหาร



ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภคอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อมูลในสัตว์ทดลอง และประชากรมนุษย์แสดงให้เห็นว่าเมื่อบริโภคปลาที่มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg (Se:Hg Molar Ratio) ไม่ต่ำกว่า 1 ความเป็นพิษของปรอทจะลดต่ำลง และจะได้รับซีลีเนียมในปริมาณที่สูงเพียงพอต่อการสร้างและการทำงานของซีลีโนโปรตีน และซีลีโนเอนไซม์ การศึกษาของ Ralston & Raymond (2009) ยังบ่งชี้ว่าเด็กที่เกิดจากแม่ที่บริโภคปลาทะเลที่มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg สูง มีแนวโน้มที่จะมีพัฒนาการที่ดีกว่าแม่ที่งดการบริโภคปลาทะเล หรือแม่ที่บริโภคปลาทะเลที่มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ต่ำ ดังนั้นจึงควรตรวจวัดค่าความเข้มข้นของซีลีเนียม และคำนวณค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลา เพื่อประกอบการประเมินความเสี่ยงจากพิษของปรอทจากการบริโภคปลาทะเลด้วย

เนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระดับความเข้มข้นของซีลีเนียม และค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลาทะเลในประเทศไทยมีน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นและความแปรปรวนของปรอทและซีลีเนียมในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดิน 3 ชนิด ได้แก่ ปลาหมูสีแก้มแดง (*Lethrinus lentjan*) ปลากะพงแดงข้างปาน (*Lutjanus russelli*) และปลากะพงเหลืองข้างแถบ (*Lutjanus vitta*) ซึ่งเป็นปลาหน้าดินที่เป็นที่นิยมบริโภค และมีแหล่งที่อยู่อาศัยกระจายอยู่ทั่วอ่าวไทย โดยทำการรวบรวมปลาจาก 4 สถานี โดยรอบอ่าวไทย ทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นปรอทจากการศึกษานี้กับค่ามาตรฐานปรอทในอาหารของประเทศไทย (Ministry of Public Health, 2020) และคำนวณค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในเนื้อเยื่อปลาทะเล เพื่อประเมินความเสี่ยงและประโยชน์จากการบริโภคปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิด

**Table 1** Examples of maximum allowed or recommended levels of Hg or methylmercury (mg/kg) in fish from various countries or organizations (Ministry of Public Health, 2020; FAO/WHO CODEX, 2019; US EPA, 2010; ANZECC, 2000)

Fish type	Country/organization			
	Thailand	FAO/WHO Codex	US EPA	Australia
Predatory fish*	1.0	1.0		1.0
Marlin	1.7	1.7		
Alfonsino	1.5	1.5		
Shark	1.6	1.6		
Tuna	1.2	1.2		
Other fish and seafood	0.5	0.5	1.0	0.5

\*except for Marlin fish, Alfonsino fish, Shark and Tuna

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

ดำเนินการเก็บรวบรวมตัวอย่างปลาทะเลหน้าดิน 3 ชนิดพันธุ์ ในช่วงเดือนมกราคมถึงตุลาคม พ.ศ. 2563 ด้วยวิธีการติดต่อบริษัทตัวอย่างจากชาวประมงที่ทำประมงด้วยวิธีตกเบ็ด จาก 3 สถานีในอ่าวไทย ได้แก่ (1) เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง (2) เกาะหมาก จังหวัดตราด (3) อ่าวเขาชะเมา จังหวัดนครศรีธรรมราช และสถานีที่ 4 ทำการสุ่มซื้อปลาทะเลที่มีวางจำหน่ายใน

ตลาดหนองมน จังหวัดชลบุรี (Figure 1) โดยเก็บตัวอย่างปลาอย่างน้อย 3 - 5 ตัวอย่าง ต่อชนิด ต่อสถานี จำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง ทำการจำแนกชนิดพันธุ์ปลา เพศ ซึ่งน้ำหนัก และวัดความยาวเหยียดของตัวปลา (Total length) แล้วตัดเนื้อเยื่อบริเวณกล้ามเนื้อขาวมัดที่อยู่ระหว่างครีบหลัง (Dorsal Fin) กับเส้นข้างลำตัว (Lateral Line) ด้วยมีดที่ทำจากวัสดุสแตนเลสตีลคุณภาพดี (US EPA, 2000) จากนั้นเก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อปลาลงในถุงพลาสติกซิปล็อค ตัดฉลาก และเก็บรักษาตัวอย่างในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณปรอทและซีลีเนียม

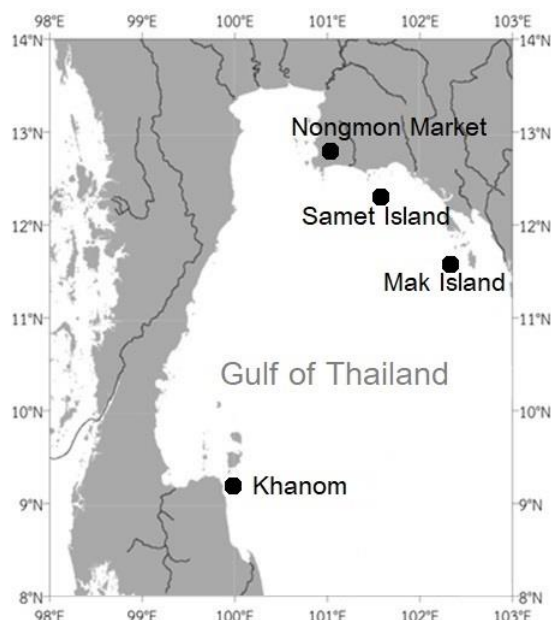


Figure 1 Sampling locations around the Gulf of Thailand

## 2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การย่อยตัวอย่างปลา ซึ่งน้ำหนักเนื้อเยื่อปลาที่บดละเอียดแล้วประมาณ 0.7 - 1 กรัม (น้ำหนักเปียก) ด้วยเครื่องซังทศนิยม 4 ตำแหน่ง ลงใน Teflon vessel เต็มกรดไนตริกเข้มข้น และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการย่อยเนื้อเยื่อปลาภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงด้วยเครื่อง Microwave Digestion (CEM; MARS 6) นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยแล้วมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง Cold Vapor - Atomic Fluorescence Spectrometer (CV-AFS; PS Analytical; Millennium Merlin) (US EPA, 1996) และวัดค่าความเข้มข้นของซีลีเนียมด้วยเครื่อง Hydride Generation - Atomic Fluorescence Spectrometer (HG-AFS; PS Analytical; Millennium Excaliber) (PS Analytical, 1997) คำนวณค่าความเข้มข้นปรอทและซีลีเนียมจากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานกับค่าความเข้มแสงของสารละลายตัวอย่างที่ตรวจวัดได้



ตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิควิเคราะห์ โดยในทุกกรอบที่ทำการย่อยตัวอย่างจะต้องมี Blank และวัสดุอ้างอิงที่ได้รับการรับรองค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก (Certified Reference Material; CRM) ชนิด IAEA-476 จาก International Atomic Energy Agency: Analytical Quality Control Service, Vienna, Austria นอกจากนี้ยังต้องสุ่มตัวอย่างปลาที่ย่อยในรอบนั้นอย่างน้อย 1 ตัวอย่างเพื่อทำซ้ำของตัวอย่าง (Replicate) ด้วย ทั้งนี้ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation; %RSD) ของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ซ้ำต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 10$  ในกรณีที่มีค่าเกินจะต้องทำการวิเคราะห์ซ้ำที่ 3 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์อีกครั้ง ค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) ของวัสดุอ้างอิง ต้องมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ (90-110%) ค่าพิกัดขีดจำกัดการตรวจพบ (Limit of Detection (LOD) และ Limit of Quantitation (LOQ) จาก 3 เท่าและ 10 เท่าของ Standard Deviation ของ Blank ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2

กระบวนการย่อยเนื้อเยื่อปลาและการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของปรอทและซีลีเนียมที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของปรอทรวม และซีลีเนียมรวม ในตัวอย่างเปียก เพื่อความกระชับในการนำเสนอข้อมูลในเนื้อหางานวิจัยนี้จะระบุเป็นค่าความเข้มข้นปรอท และซีลีเนียม ในรูปแบบมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มก./กก.) น้ำหนักเปียก ในกรณีที่มีความแตกต่างจะทำการระบุรูปแบบที่ถูกต้องไว้

**Table 2** %Recovery of mercury and selenium in certified reference material (IAEA-476), Relative standard deviation (%RSD), Limit of Detection (LOD) and Limit of Quantitation (LOQ).

Metal	Certified values (mg/kg)	Measured values (mg/kg)	<i>n</i>	%Recovery	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)
Hg	0.578	0.565 ± 0.013	10	97.83 ± 2.28	0.0015	0.0050
Se	2.12	2.11 ± 0.05	10	99.50 ± 2.39	0.0071	0.0237

### 3. การคำนวณและการวิเคราะห์สถิติ

คำนวณค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg (Se:Hg molar ratio) โดยการปรับค่าความเข้มข้นของซีลีเนียม ( $C_{Se}$ ) และปรอท ( $C_{Hg}$ ) ในหน่วยความเข้มข้นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้อยู่ในหน่วยโมล ตามสมการที่ (1) โดยมวลโมเลกุลของซีลีเนียม (Molar mass of Se) และมวลโมเลกุลของปรอท (Molar mass of Hg) ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 78.96 และ 200.59 g/mol ตามลำดับ

$$\text{Se:Hg molar ratio} = \frac{(C_{Se} / \text{Molar mass of Se})}{(C_{Hg} / \text{Molar mass of Hg})} \quad (1)$$

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของสถานีและชนิดปลาต่อความแปรปรวนของค่าความเข้มข้นของปรอท ซีลีเนียม ความยาวตัวปลา และสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg หากพบว่าข้อมูลมีความ



แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $p < 0.05$ ) จะทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons) โดยใช้สถิติทดสอบ Student-Newman-Keuls test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสถานีและชนิดปลา การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นปรอทรวม ซีลีเนียมรวม ความยาวตัวปลา และสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ด้วย Pearson's correlation การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistic 19.0 (SPSS (Thailand) Co., Ltd.)

## ผลการวิจัย

### 1. ความเข้มข้นของปรอท ความแปรปรวนระหว่างชนิดปลา และสถานี

ความเข้มข้นปรอทในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจาก 4 สถานี มีค่าระหว่าง 0.032 – 0.986 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (มก./กก.) (Table 3) ค่าเฉลี่ยรวมของปรอทในตัวอย่างปลาทั้งหมดเท่ากับ  $0.280 \pm 0.231$  มก./กก. โดยปลาหมูสีแก้มแดง ปลากระพงแดงข้างปาน และปลากระพงเหลืองข้างแถบ มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ  $0.231 \pm 0.147$ ,  $0.380 \pm 0.295$  และ  $0.237 \pm 0.219$  มก./กก. ตามลำดับ ไม่พบตัวอย่างปลาที่มีค่าความเข้มข้นปรอทสูงกว่าค่ามาตรฐานความเข้มข้นของเมธิลเมอร์คิวรีในปลาผู้ล่า (Table 1) (Ministry of Public Health, 2020)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) พบว่าชนิดปลาและสถานีมีอิทธิพลร่วมต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นปรอทอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) โดยค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทของปลากระพงแดงข้างปานจากสถานีเกาะหมากมีค่าสูงกว่าปลาทุกชนิดในทุกสถานี ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทของปลากระพงแดงข้างปาน และปลากระพงเหลืองข้างแถบจากสถานีตลาดหนองมนมีค่าสูงกว่าปลาทุกชนิดในทุกสถานี ยกเว้นปลากระพงแดงข้างปานจากสถานีเกาะหมาก ปลาทั้ง 3 ชนิดจากสถานีเกาะเสม็ดมีค่าต่ำกว่าปลาทุกชนิดจากทุกสถานี เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทระหว่างชนิดปลา พบว่าปลากระพงแดงข้างปานมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทสูงกว่าปลากระพงเหลืองข้างแถบและปลาหมูสีแก้มแดงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทของปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิด ระหว่างสถานี พบว่าสถานีเกาะหมากมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าสถานีอื่นๆ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยในสถานีเกาะเสม็ดมีค่าต่ำกว่าสถานีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) (Table 3 and Figure 2 (a))

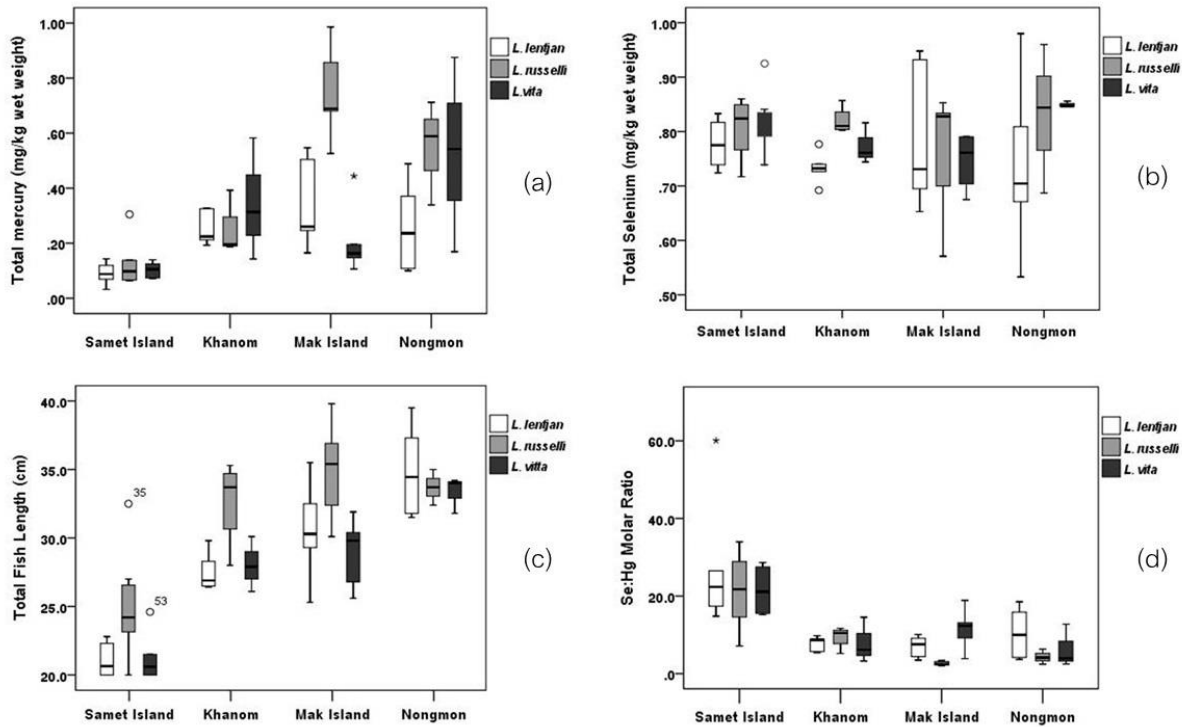


**Table 3** Mean  $\pm$ SD and minimum – maximum (Min - Max) of weight (g) and length (cm) of fishes, concentrations of total mercury and total selenium (mg/kg wet weight) and Se:Hg Molar Ratio in muscle tissues of 3 demersal fish species; pink ear emperor (*L. lentjan*), Russell's snapper (*L. russelli*) and brown stripe snapper (*L. vitta*) collected from 4 locations around the Gulf of Thailand

Species	Station	Number of fish	Fish weight (gram)	Total fish length (centimeter)	Total mercury (mg/kg wet weight)	Total selenium (mg/kg wet weight)	Se:Hg Molar Ratio
			Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
			Min - Max	Min - Max	Min - Max	Min - Max	Min - Max
Pink ear emperor ( <i>L. lentjan</i> )	Khanom	5	393 $\pm$ 79	27.6 $\pm$ 1.5	0.256 $\pm$ 0.065	0.734 $\pm$ 0.030	7.67 $\pm$ 1.99
			301 – 515	26.4 – 29.8	0.193 – 0.328	0.692 – 0.777	5.40 – 9.75
	Samet Island	6	160 $\pm$ 31	21.1 $\pm$ 1.3	0.090 $\pm$ 0.039	0.777 $\pm$ 0.046	27.25 $\pm$ 16.62
			130 – 206	20.0 – 22.8	0.032 – 0.143	0.724 – 0.833	14.82 – 60.08
	Mak Island	5	588 $\pm$ 188	30.6 $\pm$ 3.8	0.344 $\pm$ 0.170	0.792 $\pm$ 0.138	6.93 $\pm$ 2.88
			335 – 849	25.3 – 35.5	0.165 – 0.547	0.653 – 0.948	3.50 – 10.08
Nongmon Market	6	654 $\pm$ 237	34.8 $\pm$ 3.5	0.257 $\pm$ 0.156	0.734 $\pm$ 0.151	10.37 $\pm$ 6.56	
mean	22	445 $\pm$ 250	28.5 $\pm$ 5.9	0.231 $\pm$ 0.147	0.759 $\pm$ 0.102	13.58 $\pm$ 12.39	
			130 – 1021	20.0 – 39.5	0.032 – 0.547	0.533 – 0.981	3.50 – 60.08
Russell's snapper ( <i>L. russelli</i> )	Khanom	4	542 $\pm$ 140	32.7 $\pm$ 3.2	0.243 $\pm$ 0.100	0.820 $\pm$ 0.025	9.46 $\pm$ 2.89
			339 – 647	28.0 – 35.3	0.188 – 0.393	0.803 – 0.857	5.21 – 11.68
	Samet Island	7	245 $\pm$ 131	25.2 $\pm$ 4.0	0.125 $\pm$ 0.086	0.805 $\pm$ 0.055	21.39 $\pm$ 9.73
			118 – 522	20.0 – 32.5	0.064 – 0.305	0.717 – 0.860	7.13 – 33.98
	Mak Island	5	696 $\pm$ 224	34.9 $\pm$ 3.8	0.748 $\pm$ 0.177	0.757 $\pm$ 0.121	2.65 $\pm$ 0.57
			427 – 974	30.1 – 39.8	0.526 – 0.986	0.571 – 0.853	2.10 – 3.38
Nongmon Market	3	534 $\pm$ 47	33.7 $\pm$ 1.3	0.547 $\pm$ 0.190	0.830 $\pm$ 0.137	4.30 $\pm$ 1.94	
		480 – 568	32.4 – 35.0	0.339 – 0.712	0.687 – 0.960	2.45 – 6.32	
mean	19	472 $\pm$ 237	30.7 $\pm$ 5.4	0.380 $\pm$ 0.295	0.800 $\pm$ 0.085	11.25 $\pm$ 10.14	
			118 – 974	20.0 – 39.8	0.064 – 0.986	0.571 – 0.960	2.10 – 33.98
Brownstripe snapper ( <i>L. vitta</i> )	Khanom	3	352 $\pm$ 61	28.0 $\pm$ 2.0	0.346 $\pm$ 0.222	0.774 $\pm$ 0.038	7.98 $\pm$ 5.86
			293 – 414	26.1 – 30.1	0.143 – 0.583	0.744 – 0.816	3.24 – 14.54
	Samet Island	8	140 $\pm$ 30	21.1 $\pm$ 1.6	0.103 $\pm$ 0.027	0.816 $\pm$ 0.053	21.52 $\pm$ 5.79
			115 – 205	20.0 – 24.6	0.072 – 0.140	0.739 – 0.925	15.23 – 28.62
	Mak Island	5	435 $\pm$ 113	28.9 $\pm$ 2.6	0.211 $\pm$ 0.134	0.744 $\pm$ 0.052	11.48 $\pm$ 5.51
			294 – 575	25.6 – 31.9	0.106 – 0.444	0.675 – 0.791	3.86 – 18.90
Nongmon Market	3	568 $\pm$ 87	33.3 $\pm$ 1.3	0.528 $\pm$ 0.353	0.850 $\pm$ 0.005	6.40 $\pm$ 5.54	
		473 – 644	31.8 – 34.2	0.169 – 0.875	0.846 – 0.856	2.49 – 12.74	
mean	19	319 $\pm$ 181	26.2 $\pm$ 5.1	0.237 $\pm$ 0.219	0.796 $\pm$ 0.058	14.35 $\pm$ 8.33	
			115 – 644	20.0 – 34.2	0.072 – 0.875	0.675 – 0.925	2.49 – 28.62
All Species		60	414 $\pm$ 232	28.4 $\pm$ 5.7	0.280 $\pm$ 0.231	0.784 $\pm$ 0.085	13.09 $\pm$ 10.43
			115 – 1021	20.0 – 39.8	0.032 – 0.986	0.533 – 0.981	2.10 – 60.08
ANOVA-test	species*station	p-value	0.308	0.285	0.000**	0.465	0.557
	species		0.029*	0.001*	0.001**	0.233	0.336
	station		0.000**	0.000**	0.000**	0.553	0.000**

\* Significant differences at  $p < 0.05$  \*\* Significant differences at  $p < 0.01$





**Figure 2** Box plots of (a) total mercury and (b) total selenium concentrations, (c) total fish length and (d) Se:Hg Molar Ratio in muscle tissues of 3 demersal fish species; pink ear emperor (*L. lentjan*), Russell's snapper (*L. russelli*) and brown stripe snapper (*L. vitta*) from 4 stations around the Gulf of Thailand

**2. ความเข้มข้นของซีลีเนียม ความแปรปรวนระหว่างชนิดปลา และสถานี**

ความเข้มข้นซีลีเนียมในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจากทุกสถานีมีค่าระหว่าง 0.533 – 0.981 มก./กก. ค่าเฉลี่ยรวมของซีลีเนียมในตัวอย่างปลาทั้งหมดเท่ากับ  $0.784 \pm 0.085$  มก./กก. โดยปลาหมูสีแก้มแดง ปลากระพงแดงข้างปาน และปลากระพงเหลืองข้างแถบมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ  $0.759 \pm 0.102$ ,  $0.800 \pm 0.085$  และ  $0.796 \pm 0.058$  มก./กก. ตามลำดับ ระดับความเข้มข้นซีลีเนียมในปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงกว่า แต่มีความแปรปรวนน้อยกว่าค่าความเข้มข้นปรอทในเนื้อเยื่อปลา โดยค่าสูงสุด – ต่ำสุดของปรอทต่างกัน 30 เท่า ในขณะที่ซีลีเนียมต่างกันเพียง 1.8 เท่า เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเข้มข้นซีลีเนียมในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจากทั้ง 4 สถานี พบว่าชนิดปลาและสถานีไม่มีอิทธิพลร่วมต่อความเข้มข้นซีลีเนียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) และไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่าความเข้มข้นซีลีเนียมในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดินในแต่ละชนิดปลา และระหว่างสถานี ( $p > 0.05$ ) (Table 3 and Figure 2 (b))



## วิจารณ์ผลการวิจัย

### 1. ความเข้มข้นปรอทในปลา ความแปรปรวนระหว่างชนิดปลา และความสัมพันธ์กับขนาดปลา

เป็นที่ทราบกันดีว่าปลาแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่จะมีความเข้มข้นปรอทเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปลามีอายุมากขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น (Neff, 2002; Storelli *et al.*, 2006 & 2007; Ralston & Raymond, 2018) ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับที่พบในผลการศึกษานี้ ทั้งนี้ปลาทะเลน้ำจืด ปลากระพงเหลืองข้างแถบ และปลากระพงแดงข้างปาน เป็นปลาทะเลหน้าดินที่โตเต็มวัย (Adult fish) กินสัตว์ทะเลหน้าดิน เช่น ไล่เดือนทะเล กุ้ง ปู และปลาชนิดอื่นเป็นอาหาร มีค่า Trophic level เท่ากับ 3.9, 4.0 และ 4.1 ตามลำดับ (Froese & Pauly, 2022) จึงน่าจะเป็นสาเหตุให้มีความเข้มข้นปรอทค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Thongra-ar *et al.* (1988) Thongra-ar *et al.* (2014) Kan-atireklap *et al.* (1999) และ Hantow *et al.* (2008) (Table 4) ที่ตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นปลาผิวน้ำขนาดเล็กกินแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์เป็นอาหาร (Planktivore fish) มีแนวโน้มการสะสมปรอทต่ำ (Neff, 2002; Burger & Gochfeld, 2012) เช่น ปลาในตระกูลทู-ลิ่ง ปลาหลังเขียว และปลากะตัก เป็นต้น ถึงแม้จะมีตัวอย่างปลาขนาดใหญ่ที่กินสัตว์น้ำและปลาชนิดอื่นเป็นอาหาร (Carnivore fish) ซึ่งเป็นปลาที่มีแนวโน้มการสะสมปรอทสูง (Neff, 2002; Azad *et al.*, 2019) เช่น ปลาปากคม ปลาตาบ ปลาสาก ปลากระวัง และปลาช่อนทะเล ปนอยู่ แต่ก็เป็นส่วนน้อย ประกอบกับยังเป็นตัวอย่างปลาที่เป็นปลาวัยรุ่น (Juvenile fish) อีกด้วย จึงมีความเข้มข้นปรอทต่ำ

**Table 4** Comparison of mercury concentration (mg/kg wet weight) in muscle tissue of marine fish from different area in Thailand.

Study area	Fish type	n	Hg (mg/kg)		Fish length (cm)	References
			Mean ± SD	Range		
Gulf of Thailand	Demersal fish	60	0.280 ± 0.231	0.032 – 0.986	20.0 – 39.8	This study
Eastern coast of Thailand	Mixed Fish species	531	0.042 ± 0.040	0.002 – 0.343	5.5 – 65.0	Thongra-ar <i>et al.</i> (1988)
Map Ta Phut Industrial estate	Mixed Fish species	220	Not reported	<0.004 – 0.19	Not reported	Thongra-ar <i>et al.</i> (2014)
Eastern coast of Thailand	Mixed Fish species	361	Not reported	<0.001 – 0.251	7.5 – 40.0	Kan-atireklap <i>et al.</i> (1999)
Gulf of Thailand	<i>Nemipterus</i> spp.	296	0.115 ± 0.071	0.011 – 0.374	9.6 – 30.5	Ritonga <i>et al.</i> (2022a)
Upper Andaman Sea	Mixed Fish species	199	0.077 ± 0.055	0.026 – 0.539	13.4 – 71.4	Hantow <i>et al.</i> (2008)
Supermarket in Bangkok, Thailand	Mixed Fish species	47	0.29 ± 0.25	0.2 – 0.89	Not reported	Ritonga <i>et al.</i> (2022b)

ความเข้มข้นปรอทในตัวอย่างปลาจากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Ritonga *et al.* (2022b) ที่ทำการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างปลา เช่น ปลาทูน่า ปลากระพงขาว ปลาอินทรี ปลาเก๋า และปลาแซลมอน ที่จำหน่ายในตลาดกรุงเทพมหานคร แต่ก็มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นปรอทในปลาผิวน้ำและปลาหน้าดินขนาดใหญ่ เช่น ปลาทูน่า ปลากระพงแดงตาโต ปลากระโทงดาบ และปลาฉลาม ที่เป็นผู้บริโภคลำดับสูง หรือเป็นปลาผู้ล่า ที่มีการรายงานไว้ในการศึกษาจากพื้นที่อื่นๆ เป็นต้น (Kaneko & Ralston, 2007; Yamashita *et al.*, 2011; Perry *et al.*, 2012; Barone *et al.*, 2021) (Table 6) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นปรอทในปลาจากการศึกษานี้ กับปลาชนิดเดียวกันที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ (Thongra-ar *et al.*, 1988; Kan-atireklap, 1999; Kosanovic *et al.*, 2007;



Thiyagarajan *et al.*, 2012; Burger *et al.*, 2015) พบว่าปลาชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่ามีค่าความเข้มข้นปรอทต่ำกว่า ส่วนปลาที่มีขนาดใกล้เคียงกันก็มีค่าความเข้มข้นปรอทอยู่ในช่วงเดียวกัน (Table 5, Figure 3 (a)) หรือปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความเข้มข้นปรอทแตกต่างกันในปลาชนิดเดียวกันคืออายุและขนาดของปลา

**Table 5** Concentration of mercury in pink ear emperor (*L. lentjan*), Russell's snapper (*L. russelli*) and brown stripe snapper (*L. vitta*) reported previously in Thailand and elsewhere.

Scientific name	Hg (mg/kg wet weight)	Fish length (cm)	Locations	References
<i>Lethrinus lentjan</i>	0.231 ± 0.147 (0.032 – 0.547)	28.5 ± 5.9 (20.0 – 39.5)	Gulf of Thailand	This study
<i>L. lentjan</i>	0.090 ± 0.039 (0.032 – 0.143)	20.9 ± 1.3 (20.0 – 22.8)	Samet Island	This study
<i>Lethrinus</i> spp.	0.066 (0.056 – 0.091)	17.0 – 19.0	Eastern coast of Thailand	Kan-atireklap (1999)
<i>L. lentjan</i>	0.017 ± 0.026 (0.04 – 0.123)	16.1 (14.0 – 20.0)	Eastern coast of Thailand	Thongra-ar <i>et al.</i> (1988)
<i>L. lentjan</i>	0.036 – 0.068	Not reported	UAE	Kosanovic <i>et al.</i> (2007)
<i>L. lentjan</i>	0.18 ± 0.08 (0.04 – 0.32)	Not reported	Saudi Arabia	Burger <i>et al.</i> (2015)
<i>Lutjanus russelli</i>	0.380 ± 0.295 (0.064 – 0.986)	30.7 ± 5.4 (20.0 – 39.8)	Gulf of Thailand	This study
<i>L. russelli</i>	0.125 ± 0.086 (0.064 – 0.305)	25.2 ± 4.0 (20.0 – 32.5)	Samet Island	This study
<i>L. russelli</i>	0.09 ± 0.11	14.3 ± 2.3	South East India	Thiyagarajan <i>et al.</i> (2012)
<i>L. russelli</i>	0.522	66.0	West Peninsular, Malaysia	Anual <i>et al.</i> (2018)
<i>L. russelli</i>	0.112 (0.094 – 0.147)	26.0 – 31.0	Hong Kong, China	Centre for Food Safety (2008)
<i>Lutjanus vitta</i>	0.237 ± 0.219 (0.072 – 0.875)	26.2 ± 5.1 (20.0 – 34.2)	Gulf of Thailand	This study
<i>L. vitta</i>	0.103 ± 0.027 (0.072 – 0.140)	21.1 ± 1.6 (20.0 – 24.6)	Samet Island	This study
<i>L. vitta</i>	0.047 (0.018 – 0.123)	15.4 (12.3 – 17.5)	Eastern Coast of Thailand	Thongra-ar <i>et al.</i> (1988)

ค่าความเข้มข้นปรอทกับความยาวตัวปลาแต่ละชนิดในการศึกษานี้ มีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งทางสถิติ (Pearson's correlation) (Figure 3 (a)) โดยปลากะพงแดงข้างปาน ซึ่งเป็นปลาที่มีค่า Trophic level สูงกว่าปลา หมูสีแก้มแดง และปลากะพงเหลืองข้างแถบ มีแนวโน้มการสะสมปรอทสูงกว่าปลาอีก 2 ชนิด และเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทในปลาจากแต่ละสถานี น่าจะมีสาเหตุจากความแปรปรวนของขนาดปลา ในแต่ละชนิดในแต่ละสถานี ดังจะเห็นได้ในกรณีสถานีเกาะเสม็ดซึ่งเป็นสถานีที่ตัวอย่างปลาทุกชนิดมีขนาดเล็กกว่าตัวอย่าง ปลาจากสถานีอื่นๆ จึงมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทต่ำกว่าสถานีอื่นๆ ส่วนสถานีเกาะหมากและตลาดหนองมนเป็นสถานี ที่ตัวอย่างปลามีขนาดใหญ่กว่าสถานีอื่น จึงมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทสูงกว่าสถานีอื่นๆ (Figure 2 (a) & (c))

2. ความเข้มข้นซีลีเนียมในปลา ความแปรปรวนระหว่างชนิดปลา ความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปรอทและขนาดปลา

เนื่องจากประโยชน์ของซีลีเนียมในปลาทะเลเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ ประกอบกับเทคนิคการวิเคราะห์ค่อนข้าง ยุ่งยากจึงทำให้มีข้อมูลการศึกษาซีลีเนียมในปลาค่อนข้างน้อย ความเข้มข้นของซีลีเนียมในปลาทะเลหน้าดินจากการศึกษานี้ มีค่าปานกลางเมื่อเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ทั้งในไทยและต่างประเทศ (Table 6) โดยในประเทศไทยพบการรายงาน ค่าความเข้มข้นของซีลีเนียมในปลาทุ ปลาข้างเหลือง ปลาแป้น และปลาตาโต จากอ่าวไทยมีค่าระหว่าง 0.140 – 1.245 มก./กก. ทั้งนี้ไม่พบความแตกต่างระหว่างชนิดปลา (Sethanandha, 1980) ส่วน Sirichakwal *et al.* (2005) รายงานค่าความ

เข้มข้นซีลีเนียมมีค่าระหว่าง 0.365 – 1.137 มก./กก. โดยปลาที่มีค่าสูงกว่าปลาจะละเม็ดขาว จากข้อมูลใน Table 6 พบว่า ความเข้มข้นของซีลีเนียมในปลาจากพื้นที่ต่างๆ มีค่าแตกต่างกันมาก โดยปลาจากตอนเหนือของมหาสมุทรแอตแลนติก และ บริเวณทะเลเมดิเตอร์เรเนียน มีค่าความเข้มข้นซีลีเนียมค่อนข้างต่ำ (Plessi *et al.*, 2001; Burger & Gochfeld, 2012; Copat *et al.*, 2014; Azad *et al.*, 2019; Barone *et al.*, 2021) ส่วนปลาจากชายฝั่งประเทศตุรกีมีค่าค่อนข้างสูง (Ulusoy *et al.*, 2019) ในขณะที่ผลการศึกษานี้ รายงานค่าความเข้มข้นซีลีเนียมในช่วงกว้าง โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลอย่างละเอียด

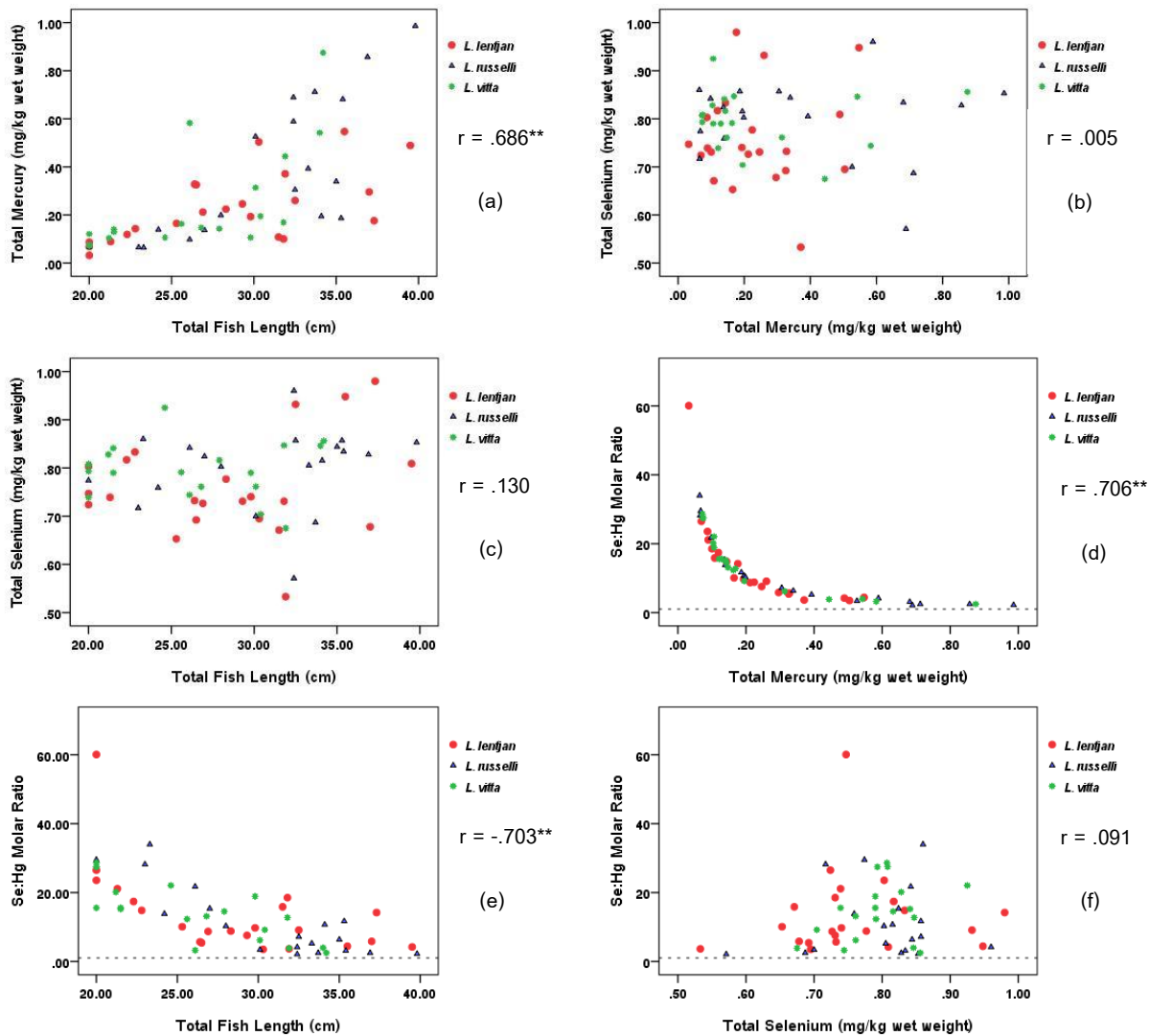


Figure 3 Scatter plots and Pearson's correlation coefficient (r) show correlations between (a) mercury concentration and fish length (b) mercury and selenium concentrations (c) selenium concentration and fish length (d) Se:Hg Molar Ratio and mercury concentration (e) Se:Hg Molar Ratio and fish length (f) Se:Hg Molar Ratio and selenium concentration (\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)). Dash line in figure d, e and f indicate Se:Hg Molar Ratio = 1

พบว่าความแตกต่างของค่าความเข้มข้นซีลีเนียมในปลาจากแต่ละการศึกษาน่าจะเป็นผลสืบเนื่องจากชนิดของปลาที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ปลาทะเลส่วนใหญ่มีค่าความเข้มข้นซีลีเนียมปานกลาง แต่มักจะพบค่าสูงในปลาทูน่า และปลากระโทงดาบ (Plessi *et al.*, 2001; Kaneko & Ralston, 2007; Yamashita *et al.*, 2011; Perry *et al.*, 2012; Ulusoy *et al.*, 2019) เนื่องจากความรู้ความเข้าใจในกระบวนการสะสมซีลีเนียมในปลาทะเลยังมีอยู่น้อย และค่อนข้างขัดแย้งกัน Besser *et al.* (1993) รายงานว่าปลาที่กินแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์สะสมซีลีเนียมสูง เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ดูดซับและสะสมซีลีเนียมทั้งในรูปของซีลีไนต์ (Selenite;  $\text{SeO}_3^{2-}$ ) ซีลีเนต (Selenate;  $\text{SeO}_4^{2-}$ ) และสารประกอบซีลีเนียมอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved organo-selenium compounds) จากมวลน้ำได้อย่างรวดเร็ว แต่ผลการศึกษาของ Kehrig *et al.* (2008) บ่งชี้ว่าปลาผิวน้ำที่กินปลาอื่นเป็นอาหาร (Pelagic carnivore fish) สะสมซีลีเนียมสูงกว่าปลาหน้าดินที่กินสัตว์อื่นเป็นอาหาร (Benthic carnivore fish) ในขณะที่ปลาที่กินแพลงก์ตอนเป็นอาหาร (Planktivore fish) สะสมซีลีเนียมต่ำที่สุด ส่วนการศึกษาของ Azad *et al.* (2019) พบว่าปลาผิวน้ำมีการสะสมซีลีเนียมสูงกว่าปลาหน้าดิน และปลาที่อาศัยอยู่เหนือพื้นทะเล (Benthopelagic fish) มีการสะสมซีลีเนียมต่ำที่สุด

Kehrig *et al.* (2008) ยังรายงานว่าซีลีเนียมสามารถสะสมผ่านผู้บริโภคลำดับต่ำไปยังผู้บริโภคลำดับสูงได้ หรือการสะสมซีลีเนียมสามารถเพิ่มขยายผ่านห่วงโซ่อาหารได้ แต่ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซีลีเนียมกับขนาดปลาทะเลมีน้อยมาก โดย Burger & Gochfeld (2011, 2012) รายงานว่าไม่พบแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นซีลีเนียมในเนื้อเยื่อปลากับขนาดความยาวตัวปลา ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลจากการศึกษาที่ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความเข้มข้นซีลีเนียมกับความเข้มข้นปรอท และความยาวตัวปลาแต่ละชนิด (Pearson's correlation) (Figure 3 (b) & (c))

เนื่องจากข้อมูลการสะสมตัวของซีลีเนียมในปลาทะเลมีอยู่จำกัด และข้อมูลยังมีทิศทางที่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มว่ารูปแบบการสะสมตัวของซีลีเนียมและปรอทในปลาทะเลน่าจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ซีลีเนียมเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต ประกอบกับมีข้อมูลบ่งชี้ว่าสิ่งมีชีวิตสามารถปรับสมดุลระดับความเข้มข้นของซีลีเนียมในร่างกายได้ (Homeostatic regulation) (Eisler, 2000; Thiry *et al.*, 2012) จึงมักจะไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นซีลีเนียมเมื่อสิ่งมีชีวิตมีขนาดใหญ่ขึ้นหรืออายุมากขึ้น (This study, Burger & Gochfeld, 2011, 2012; Azad *et al.*, 2019) ส่วนปรอทเป็นธาตุที่ไม่จำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต ระดับความเข้มข้นของปรอทมักจะสะท้อนการสะสมและเพิ่มขยายทางชีวภาพผ่านห่วงโซ่อาหาร ค่าความเข้มข้นปรอทจึงมักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสิ่งมีชีวิตมีอายุมากขึ้น หรือมีขนาดใหญ่ขึ้น (Neff, 2002; Storelli *et al.*, 2006, 2007)

### 3. ความเสี่ยงจากพิษของสารปรอทจากการบริโภคปลาทะเล ค่ามาตรฐานฯ และค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg

เมื่อพิจารณาความเสี่ยงที่จะเกิดพิษของปรอทจากการบริโภคปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิด โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปรอทในอาหารของประเทศไทย ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 414) พ.ศ. 2563 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน พบว่าความเข้มข้นปรอทในปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจากทุกสถานี มีค่าไม่เกินปริมาณสูงสุดของเมธิลเมอร์คิวรีในปลาผู้ล่า ซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.0 มก./กก. (Ministry of Public Health, 2020) และเมื่อพิจารณาจากค่าสัดส่วน



โมลาร์ Se:Hg พบว่าค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในตัวอย่างปลาจากการศึกษานี้มีค่าไม่ต่ำกว่า 1 เมื่ออ้างอิงตามเกณฑ์เหล่านี้ ปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจากการศึกษานี้จึงมีความปลอดภัยต่อการบริโภค

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg จากการศึกษานี้ และการศึกษาอื่นๆ ที่มีการรายงานก่อนหน้านี้ พบว่าค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg มีความแปรปรวนไปตามพฤติกรรมการดำรงชีพและการกินอาหาร โดย Sethanandha (1980) Yamashita *et al.* (2011) Burger & Gochfeld (2012) Copat *et al.* (2014) และ Azad *et al.* (2019) รายงานว่าปลาผิวน้ำที่กินแพลงก์ตอนเป็นอาหาร เช่น ปลาทู ปลากะตัก ปลาหลังเขียว ปลาบลูไวทิง และปลาเฮอริงแอตแลนติก ซึ่งเป็นปลาที่มีความเข้มข้นปรอทต่ำ แต่มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในระดับที่สูง (Table 6) ในขณะที่ Kaneko & Ralston (2007) Perry *et al.* (2012) และ Barone *et al.* (2021) พบค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลาผู้ล่าขนาดใหญ่ที่เป็นผู้บริโภคชั้นสูง เช่น ปลาซีกเดียว ปลาลูจิง กระโทงดาบ ปลากะพงแดงตาโตหรือปลาคินไดมะ และปลาฉลาม มีค่าความเข้มข้นปรอทสูง และค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ต่ำเข้าใกล้ 1 หรือต่ำกว่า ส่วนปลาหน้าดิน และปลาที่อาศัยอยู่เหนือพื้นทะเล (Benthopelagic fish) มักจะพบค่าความเข้มข้นปรอทและค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในระดับปานกลาง

ค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลาจากการศึกษานี้มีค่าระหว่าง 2.1 – 60.08 พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลากับค่าความเข้มข้นปรอท และความยาวตัวปลาแต่ละชนิด (Pearson's correlation) (Figure 3 (d) & (e)) แต่ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg กับค่าความเข้มข้นซีลีเนียมในปลา (Figure 3 (f)) หรือค่าความเข้มข้นปรอท และขนาดความยาวตัวปลาเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในปลา ดังจะเห็นได้จากสถานีเกาะเสม็ดซึ่งมีตัวอย่างปลาที่มีขนาดเล็กกว่าและมีค่าความเข้มข้นปรอทต่ำกว่าสถานีอื่นๆ มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg สูงกว่าสถานีอื่นๆ ในทางกลับกันปลาจากสถานีเกาะหมากและตลาดหนองมนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและมีค่าความเข้มข้นปรอทสูงกว่าสถานีอื่นๆ มีค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ต่ำกว่าสถานีอื่น ซึ่งข้อมูลจากการศึกษาอื่นๆ (Table 6) ก็รายงานว่าพบค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นปรอทในปลามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับที่พบในการศึกษานี้ (Sethanandha, 1980; Yamashita *et al.*, 2011; Burger & Gochfeld, 2012; Copat *et al.*, 2014; Azad *et al.*, 2019)

### สรุปผลการวิจัย

การตรวจวัดระดับความเข้มข้นปรอทในเนื้อเยื่อปลาทะเลหน้าดิน 3 ชนิด ได้แก่ ปลาหมูสีแก้มแดง ปลากะพงแดง ข้างปาน และปลากะพงเหลืองข้างแถบ จาก 4 สถานีโดยรอบอ่าวไทยในการศึกษานี้ พบว่าปลาทุกชนิดมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทไม่เกินปริมาณสูงสุดของเมธิลเมอร์คิวรีในปลาผู้ล่า ตามที่กำหนดไว้โดยกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย โดยความเข้มข้นปรอทในปลากะพงแดงข้างปานมีค่าสูงกว่า ปลากะพงเหลืองข้างแถบ และปลาหมูสีแก้มแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ความเข้มข้นปรอทในปลามีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันกับขนาดความยาวตัวปลา และปัจจัยที่ควบคุมความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นปรอทในปลาจากแต่ละสถานีคือ จำนวนตัวและขนาดปลาแต่ละชนิดในแต่ละสถานี ระดับความเข้มข้นซีลีเนียมในปลาจากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับปลาทะเลจากแหล่งต่างๆ ไม่พบความแตกต่างของค่าความ



เข้มข้นซีลีเนียมระหว่างชนิดปลา และไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซีลีเนียมในปลากับความเข้มข้นปรอทในปลา และความยาวตัวปลา ค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ในตัวอย่างปลาทั้งหมดจากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่า 1 ทั้งนี้ค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg มีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นปรอทในปลาที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาจากค่ามาตรฐานปรอทที่ปลอดภัยในอาหารและค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg ปลาทะเลหน้าดินทั้ง 3 ชนิดจากทุกสถานีในอ่าวไทยในการศึกษานี้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการบริโภค ข้อมูลความเข้มข้นซีลีเนียมในปลาจากการศึกษานี้ยังมีประโยชน์ในการเพิ่มข้อมูลให้แก่ฐานข้อมูลซีลีเนียมในอาหาร ซึ่งยังมีข้อมูลน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากประเด็นในการนำค่าสัดส่วนโมลาร์ Se:Hg มาใช้ประกอบในการพิจารณาประโยชน์และโทษจากการบริโภคปลาทะเล ยังเป็นประเด็นที่ค่อนข้างใหม่ ข้อมูลจากการวิจัยนี้จึงมีประโยชน์ต่อการวิจัยในประเด็นนี้ต่อไปในอนาคต

**Table 6** Comparison of Mean/(Range) of mercury and selenium concentrations (mg/kg wet weight) Se:Hg molar ratios in muscle tissue and fish length of marine fish from different area in Thailand and elsewhere

Study area	Fish type	n	Hg (mg/kg)	Se (mg/kg)	Se:Hg Molar Ratios	Fish length (cm)	References
Gulf of Thailand	3 Demersal fish species	60	0.280 ± 0.231 (0.032 – 0.986)	0.784 ± 0.085 (0.533 – 0.981)	28.4 ± 5.7 (2.10 – 60.08)	28.4 ± 5.7 (20.0 – 39.8)	This study
Gulf of Thailand	Mixed Fish species	87	0.019 ± 0.013 (0.001 – 0.059)	0.523 ± 0.258 (0.140 – 1.245)	116.8 ± 122.6 (15.7 – 718.9)	14.99 ± 3.80 (7.0 – 25.5)	Sethanandha (1980)
Markets, Bangkok, Thailand	Mixed Fish species	Not reported	Not reported	0.702 ± 0.234 (0.365 – 1.137)	Not reported	Not reported	Sirichakwal <i>et al.</i> (2005)
New Jersey Coast, North Atlantic Ocean	Mixed Fish species	1,258	(0.01 – 1.96)	(0.18 – 0.48)	(0.34 – 61.0)	Not reported	Burger & Gochfeld (2012)
North Atlantic Ocean	Mixed Fish species	8,459	0.17 (0.04 – 0.72)	0.41 (0.27 – 0.56)	17.7 (1.9 – 43)	(41.0 – 61.1)	Azad <i>et al.</i> (2019)
South Atlantic Ocean	Mixed Fish species	652	(0.006 – 0.957)	(0.024 – 1.485)	(3 - 33)	(2.0 – 150.0)	Kehring <i>et al.</i> (2013)
Northern Gulf of Mexico	Mixed Fish species	483	(0.15 – 12.20)	(0.05 – 4.12)	(0.38 – 3.3)	Not reported	Perry <i>et al.</i> (2012)
Central North Pacific near Hawaii	Mainly Predatory fish	420	(0.13 – 2.38)	(0.32 – 1.59)	(0.46 – 17.61)	(1.8 – 318.9)*	Keneko & Ralston (2007)
Mediterranean sea	Mixed Fish species	197	(0.03 – 0.64)	(0.15 – 0.58)	(1.75 – 12.7)	(12.0 – 70.2)	Barone <i>et al.</i> (2021)
Markets, Modena, Italy	Mixed Fish species	75	(0.057 – 0.579)	(0.073 – 0.734)	(1.23 – 12.5)	Not reported	Plessi <i>et al.</i> (2001)
Ionian sea, Gulf of Catania	Mixed Fish species	150	(0.064 – 2.81)	(0.213 – 0.473)	(1.94 – 17.08)	Not reported	Copat <i>et al.</i> (2014)
Turkish coast	Mixed Fish species	151	(0.01 – 0.45)	(0.96 – 1.86)	(5.5 - 393)	Not reported	Ulusoy <i>et al.</i> (2018)
Fish market in Japan	Mixed Fish species	60	(0.002 – 1.28)	(0.11 – 1.51)	(3 – 217)	(0.09 – 3.39)*	Yamashita <i>et al.</i> (2011)

\* Data represent weight in kilogram.



### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการสำหรับการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างมากไว้ ณ โอกาสนี้

### เอกสารอ้างอิง

- ANZECC. (2000). *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, volume 1*. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council.
- Azad, A. M., Frantzen, S., Bank, M. S., Nilsen, B. M., Duinker, A., Madsen, L., & Maage, A. (2019). Effects of geography and species variation on selenium and mercury molar ratios in Northeast Atlantic marine fish communities. *Science of the Total Environment*, 652, 1482-1496.
- Barone, G., Storelli, A., Meleleo, D., Dambrosio, A., Garofalo, R., Busco, A., & Storelli, M.M. (2021). Levels of mercury, methylmercury and selenium in fish: Insights into children food safety. *Toxics*, 9(39), 1-14.
- Besser, J.M., Canfield, T.J., & La-Point, T.W. (1993). Bioaccumulation of organic and inorganic selenium in a laboratory food chain. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 12(1), 57-72.
- Burger, J., & Gochfeld, M. (2011). Mercury and selenium levels in 19 species of saltwater fish from New Jersey as a function of species, size and season. *Science of the Total Environment*, 409, 1418 - 1429.
- Burger, J., & Gochfeld, M. (2012). Selenium and mercury molar ratios in saltwater fish from New Jersey: individual and species variability complicate use in human health fish consumption advisories. *Environmental research*, 114, 12-23.
- Burger, J., Gochfeld, M., Alikunhi, N., Al-Jahdali, H., Al-Jebreen, D., Al-Suwailem, A., Aziz, M. A. M., & Batang, Z. B. (2015). Human health risk from metals in fish from Saudi Arabia: consumption patterns for some species exceed allowable limits. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(3), 799-827.





- CODEX. (2019). *General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (CXS 193-1995)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Copat, C., Vinceti, M., D'Agati, M.G., Arena, G., Mauceri, V., Grasso, A., Fallico, R., Sciacca, S., & Ferrante, M. (2014). Mercury and selenium intake by seafood from the Ionian Sea: A risk evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 87-92.
- Eisler, R. (2000). *Handbook of chemical risk assessment: health hazards to humans, plants, and animals, volume 1-3*. CRC Press: Boca Raton.
- FAO/WHO. (2011). *Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third [73rd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. Geneva: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- García-Sevillano, M.A., Rodríguez-Moro, G., García-Barrera, T., Navarro, F., & Gómez-Ariza, J.L. (2015). Biological interactions between mercury and selenium in distribution and detoxification processes in mice under controlled exposure. Effects on selenoprotein. *Chemico-Biological Interactions*, 229, 82-90.
- Hantow, J., Sompongchaiyakul, P., Promjinda, S., Laongmanee, P., Khumthong, N., & Chanratchkij, I. (2008). Contamination of mercury in edible tissue of fishes from upper Andaman Sea. In *The 2008 Marine Science Conference*. (pp. 344-356).
- Kan-atireklap, S. (1999). *Contamination of heavy metals in some marine organisms along the East coast of Gulf of Thailand*. Department of Fisheries: Bangkok (Thailand). (in Thai)
- Kaneko, J.J., & Ralston, N.V.C. (2007). Selenium and mercury in pelagic fish in the Central North Pacific near Hawaii. *Biological Trace Element Research*, 119(3), 242-254.



- Kehrig, H.A., Seixas, T.G., Palermo, E.A., Baêta, A.P., Castelo-Branco, C.W., Malm, O., & Moreira, I. (2008). The relationships between mercury and selenium in plankton and fish from a tropical food web. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(1), 10-24.
- Kojadinovic, J., Potier, M., Le-Corre, M., Cosson, R.P., & Bustamante, P. (2006). Mercury content in commercial pelagic fish and its risk assessment in the Western Indian Ocean. *Science of the total environment*, 366(2-3), 688-700.
- Kosanovic, M., Hasan, M. Y., Subramanian, D., Al-Ahbab, A. A. F., Al-Kathiri, O. A. A., Aleassa, E. M. A. A., & Adem, A. (2007). Influence of urbanization of the western coast of the United Arab Emirates on trace metal content in muscle and liver of wild Red-spot emperor (*Lethrinus lentjan*). *Food and chemical toxicology*, 45(11), 2261-2266.
- Kris-Etherton, P.M., Harris, W.S., & Appel, L.J. (2002). Fish consumption, fish oil, omega-3 fatty acid, and cardiovascular disease. *Circulation*, 106(21), 2747-2757.
- Ministry of Public Health. (2020). *Notification No.414 Maximum Levels for Contaminants and Toxins in Food*. (2020, 20 May). *Ratchakitcha*, 137, 17-18. (in Thai)
- Neff, J.M. (2002). *Bioaccumulation in Marine Organisms: Effect of Contaminants from Oil well Produced Water*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Perry, H., Viskup, B., & Folmar, H. (2013). *Mercury and selenium in marine fishes: review of a special symposium examining issues associated with fish consumption and public health*. In *Proceedings of the 65<sup>th</sup> Gulf and Caribbean Fisheries Institute*. (pp. 168-170). Columbia: Santa Marta.
- Plessi, M., Bertelli, D., & Monzani, A. (2001). Mercury and Selenium content in selected seafood. *Journal of Food Composition and Analysis*, 14(5), 461-467.



- PS Analytical. (1997). *Determination of Selenium in Dogfish Muscle and Lobster Hepatopancreas; Application Note APP093*. England: PS Analytical.
- Ralston, N.V. (2008). Selenium health benefit values as seafood safety criteria. *EcoHealth*, 5(4), 442- 455.
- Ralston, N.V.C., & Raymond, L.J. (2010). Dietary selenium's protective effects against methylmercury toxicity. *Toxicology*, 278(1), 112-123.
- Ralston, N.V.C., & Raymond, L.J. (2018). Mercury's neurotoxicity is characterized by its disruption of selenium biochemistry. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1862(11), 2405-2416.
- Ralston, N.V.C., Blackwell, J.L., & Raymond, L.J. (2007). Importance of molar ratios in selenium-dependent protection against methylmercury toxicity. *Biological Trace Element Research*, 119(3), 255-268.
- Rayman, M.P. (2000). The importance of selenium to human health. *The lancet*, 356(9225), 233-241.
- Raymond, L.J., & Ralston, N.V.C. (2004). Mercury: selenium interactions and health implications. *Seychelles Medical and Dental Journal*, 7(1), 72-77.
- Sethanandha, A. (1980). *A Preliminary Study of the Concentration of Mercury and Selenium in Some Common Marine Fish in Thai Waters by Neutron Activation Technique*. Master's thesis, Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. (in Thai)
- Sirichakwal, P.P., Puwastien, P., Polngam, J., & Kongkachuichai, R. (2005). Selenium content of Thai foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(1), 47-59.
- Storelli, M.M., Barone, G., Piscitelli, G., & Marcotrigiano, G.O. (2007). Mercury in fish: concentration vs. fish size and estimates of mercury intake. *Food additives and contaminants*, 24(12), 1353-1357.



- Storelli, M.M., Giacomini-Stuffler, R., & Marcotrigiano, G.O. (2006). Relationship between total mercury concentration and fish size in two pelagic fish species: implications for consumer health. *Journal of food protection*, 69(6), 1402-1405.
- Thiry, C., Ruttens, A., Temmerman, L.D., Schneider, Y.J., & Pussemier, L. (2012). Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food. *Food Chemistry*, 130(4), 767-784.
- Thiyagarajan, D., Dhaneesh, K. V., Ajith, K., Thipramalai, T., Kumaresan, S., & Balasubramanian, T. (2012). Metals in fish along the southeast coast of India. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 88(4), 582-588.
- Thongra-ar, w., Tattawasart, P., Sangkasila, R., & Thitattammo, S. (1988). Total Mercury Contents in Economic Marine Fishes from the Eastern Coast of Thailand. *Institute of Marine Science*, 34, 1-29. (in Thai)
- Tilami, S.K., & Sampels, S. (2018). Nutritional values of fish: lipids, proteins, vitamins and minerals. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 26(2), 243-253.
- Ulusoy, S., Mol, S., Karakulak, F.S., & Kahraman, A.E. (2019). Selenium-mercury balance in commercial fish species from the Turkish waters. *Biological Trace Element Research*, 191(1), 207-213.
- US EPA. (1996). *Analysis of Fish for Total Mercury*. Michigan: U.S. Geological Survey Great Lakes Science Center.
- US EPA. (2000). *Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories Volume 1 Fish Sampling and Analysis Third Edition*. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- US EPA. (2010). *Guidance for Implementing the January 2001 Methylmercury Water Quality Criterion. Rep. EPA 823-R-10-001*. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency.



Watanabe,C., Yin, K., Kasaanuma, y., & Satoh, H. (1999) In Utero Exposure to Methylmercury and Se Deficiency Converge on the Neurobehavioral Outcome in Mice. *Neurotoxicology and Teratology*, 21 (1), 83 – 88.

Yamashita, Y., Amlund, H., Suzuki, T., Hara, T., Hossain, M.A., Yabu, T., Touhata, K., & Yamashita, M. (2011). Selenoneine, total selenium, and total mercury content in the muscle of fishes. *Fisheries Science*, 77(4), 679-686.

Yang, D.Y., Chen, Y.W., Gunn, J.M., & Belzile, N. (2008). Selenium and mercury in organisms: Interactions and mechanisms. *Environmental Reviews*, 16, 71-92.