

Mercury Emission from Coal Plants in Thailand  
รายงานการปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย

GREENPEACE



## ทีมวิจัย

ผศ.ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ดร.วิน ไตรวิทยานุรักษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
นายกฤษณะดิณณ์ เป็รียวหวาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
นางสาวนวพร อาดำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
นายภากร ป้อมกระสันต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
นางสาววรากร มณีชูเกตุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
นายธนีสร ศรีสวัสดิ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
Mr.Daoheuang Keochanh คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

**กองบรรณาธิการเขียนและเรียบเรียง:** กรวรรณ บัวดอกตูม / สนทยา แสงเพชร / วริษา สี่  
หิรัญวงศ์ / อลลिया เหมือนอบ / สมฤดี ปานะศุทธะ

**บรรณาธิการ:** ผศ.ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ / Kevin Brigden / Aidan Farrow / ธารา บัวคำศรี  
/ จริยา เสนพงศ์

**จัดทำ โดย:** กรีนพีซประเทศไทย และมหาวิทยาลัยนเรศวร

## สารบัญ

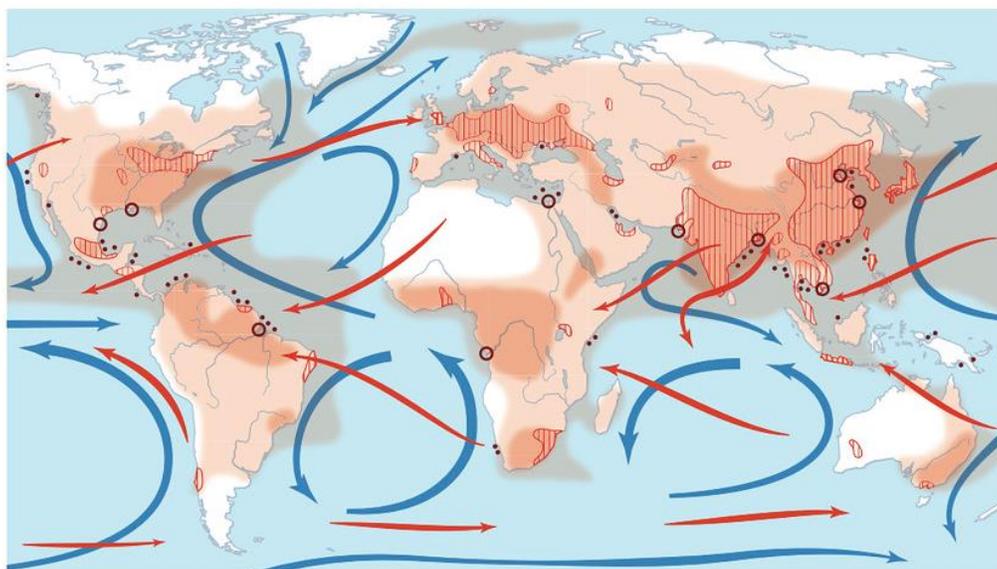
บทที่ 1	ปรอท: มลพิษข้ามพรมแดนระดับโลกตัวจริง	1
บทที่ 2	การปลดปล่อยและความเสี่ยงต่อพิษปรอทของนานาประเทศ	15
บทที่ 3	ต้นทุนภาวะภายนอกของพิษปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน	31
บทที่ 4	การศึกษาการแพร่กระจายและการตกสะสมของปรอท ในประเทศไทยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน	45
บทที่ 5	ข้อเสนอเชิงนโยบาย	83
	อ้างอิง	87
	ภาคผนวก	95

## บทที่ 1 พรอท: มลพิษข้ามพรมแดนระดับโลกตัวจริง

ปรอท (Mercury) ถูกจัดอยู่ในลำดับที่ 80 ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Hg มาจากภาษาละตินคำว่า “Hydrargyrum” ที่แปลว่า “เงินเหลว”<sup>1</sup> บ่งบอกถึงความแวววาวของผิวหน้าของปรอทที่มีสถานะของเหลว ณ อุณหภูมิห้อง มีหลักฐานการใช้ประโยชน์จากปรอทในภาคอุตสาหกรรมมาอย่างยาวนานและแพร่หลาย เช่น ใช้ผลิตเทอร์โมมิเตอร์ที่เราคุ้นเคยกัน หรือการใช้งานใกล้ตัวที่เราอาจจะไม่ทราบ อย่างการใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ผลิตสวิตช์อัตโนมัติสำหรับตู้เย็นและไฟฟ้ากระแสตรง หรือการใช้สกัดทองคำและเงินออกมาจากการทำเหมืองแร่เป็นต้น<sup>2</sup>

อย่างไรก็ดีการรั่วไหลของปรอทสู่สิ่งแวดล้อมไม่ได้มาจากการใช้ปรอทในอุปกรณ์ดังกล่าวหรือจากกิจกรรมเหมืองแร่เพียงเท่านั้น แต่ปรอทจำนวนมากถูกปลดปล่อยออกมาจากการเผาเชื้อเพลิงที่มีปรอทปนเปื้อน เช่น ถ่านหินและน้ำมัน<sup>3</sup> การรั่วไหลของปรอทสู่ระบบนิเวศเป็นภาวะคุกคามต่อสุขภาพมนุษย์และสังคม ด้วยปรอทเป็นสารอันตรายที่สามารถทำลายระบบประสาทส่วนกลาง พัฒนาการทางสมอง และ ความฉลาดทางสติปัญญา (IQ) ของมนุษย์ดังที่ท่านอาจจะได้ชมแล้วจากภาพยนตร์เรื่องมินามาตะ (Minamata) ที่เข้าฉายในไทยในปี 2564 นี้ นอกจากนี้ปรอทยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ และสามารถสะสมและขยายทางชีวภาพ (Biomagnification) ในสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศอีกด้วย<sup>4</sup> เพราะเหตุนี้การรับสัมผัสปรอททั้งของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศมักเกิดจากการปนเปื้อนปรอทในห่วงโซ่อาหาร

ปรอทสามารถแพร่กระจายได้ในระยะไกลมาก เรียกได้ว่าแม้จะถูกปลดปล่อยภายในประเทศหนึ่งแต่ก็สามารถเดินทางข้ามประเทศ ข้ามทวีปไปตกสะสมและสร้างผลเสียต่อสุขภาพแก่คนในอีกประเทศ อีกทวีปได้เลยทีเดียว เรียกได้ว่าเป็น “มลพิษข้ามพรมแดนระดับโลกตัวจริง” (True Global Pollutants)<sup>5</sup> ฉะนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าห่วงโซ่อาหารของคนทั้งโลกตกอยู่ภายใต้ความเสี่ยงจากการปนเปื้อนปรอท<sup>6</sup> ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งแสดงการตกสะสมของปรอทในภูมิภาคต่าง ๆ ในโลก ทั้งบนพื้นดิน แหล่งน้ำจืด และมหาสมุทร



**Long-range mercury transport**

- Major emission areas
- Mercury deposition > 20 g/km<sup>2</sup>/year
- Mercury deposition > 12 g/km<sup>2</sup>/year
- High annual mercury fluxes to oceans
- High annual mercury fluxes in major river mouths
- Major winds
- Major ocean currents

Source: Adapted from AMAP/UNEP 2008, Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment; UNEP, Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport, 2013  
Designed by Zoi Environment Network / GRID-Arendal, December 2012

รูปที่ 1-1 แผนที่การปลดปล่อยและการตกสะสมของปรอทพร้อมทิศทางของลมและการไหลเวียนของมหาสมุทรที่พัดพาปรอทไปทั้งทางอากาศและน้ำ<sup>7</sup>

ปรอทเกิดการสะสมในระบบนิเวศและเคลื่อนที่ไปยังชั้นบรรยากาศซึ่งสามารถสะสมเป็นระยะเวลานาน แม้จะตกลงสู่พื้นดินหรือพื้นน้ำก็มีกระบวนการทางธรรมชาติที่ทำให้ปรอทฟุ้งกระจายกลับสู่ชั้นบรรยากาศได้อีก<sup>8</sup> ปรอทเป็นโลหะหนักจึงไม่สามารถถูกทำลายให้สลายหายไปเป็นธาตุอื่นได้ ปรอทจากใต้ดินลึกถูกขุดขึ้นมาและปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศด้วยอัตราการปลดปล่อยถึงปีละประมาณ 2,169 ตัน อันเกิดจากกิจกรรมมนุษย์ทั้งโดยตั้งใจและไม่ตั้งใจ และยังเกิดการปลดปล่อยปรอทจากการเผาชีวมวล (เศษวัสดุทางการเกษตร) หรือการปลดปล่อยตามธรรมชาติจากพื้นดินและมหาสมุทรกลับขึ้นไปในบรรยากาศอีกปีละประมาณ 4,337 ตัน (ซึ่งแม้จะเป็นกระบวนการปลดปล่อยตามธรรมชาติแต่ปรอทที่ถูกปลดปล่อยคือปรอทที่ตกสะสมลงสู่ดินและน้ำจากกิจกรรมมนุษย์ดังจะกล่าวต่อไป หากใช้ปรอทที่มีอยู่เดิมในธรรมชาติอยู่แล้ว) อย่างไรก็ตาม อัตราธรรมชาติบำบัดที่จะส่งปรอทกลับไปอยู่ใต้ดินหรือใต้ทะเลลึกหรือกลับไปเป็นถ่านหินหรือน้ำมันครั้ง

นั้นกลับเข้ามา (ใช้เวลาหลายล้านปี)<sup>9</sup> ทำให้ปรอทที่มนุษย์ปลดปล่อยไปสู่บรรยากาศ ประมาณร้อยละ 60 วนเวียนตกสะสมและฟุ้งกระจายอยู่ในระบบนิเวศที่เราอยู่อาศัยกัน และจะเข้าสู่ร่างกายเราผ่านทางห่วงโซ่อาหารในที่สุด

ด้วยเหตุนี้ องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency หรือ USEPA) ได้จัดสารปรอทและสารประกอบของปรอทว่าเป็น มลพิษทางอากาศที่เป็นอันตราย (Hazardous Air Pollutants หรือ HAPs) โดยงานศึกษา ทั่วโลกที่จัดทำโดยโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme หรือ UNEP) ได้ยืนยันว่าการปล่อยมลพิษปรอททั่วโลกนั้น เป็นอันตราย และจำเป็นต้องมีมาตรการจัดการในระดับสากล<sup>10</sup> ภายใต้อนุสัญญาที่มีชื่อว่า “อนุสัญญามินามาตะ” ที่ประเทศไทยได้ร่วมลงนามให้สัตยาบันเมื่อปี 2560 โดยการให้ คำมั่นสัญญาว่าจะปฏิบัติตามอนุสัญญา ภายหลังจากการลงนาม 2 ปี โดยมีการจัดตั้ง คณะอนุกรรมการอนุสัญญามินามาตะว่าด้วยปรอทภายใต้คำสั่งคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติ

## 1.1 ปรอทในสิ่งแวดล้อม

แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ (รูปที่ 1-2) ได้แก่

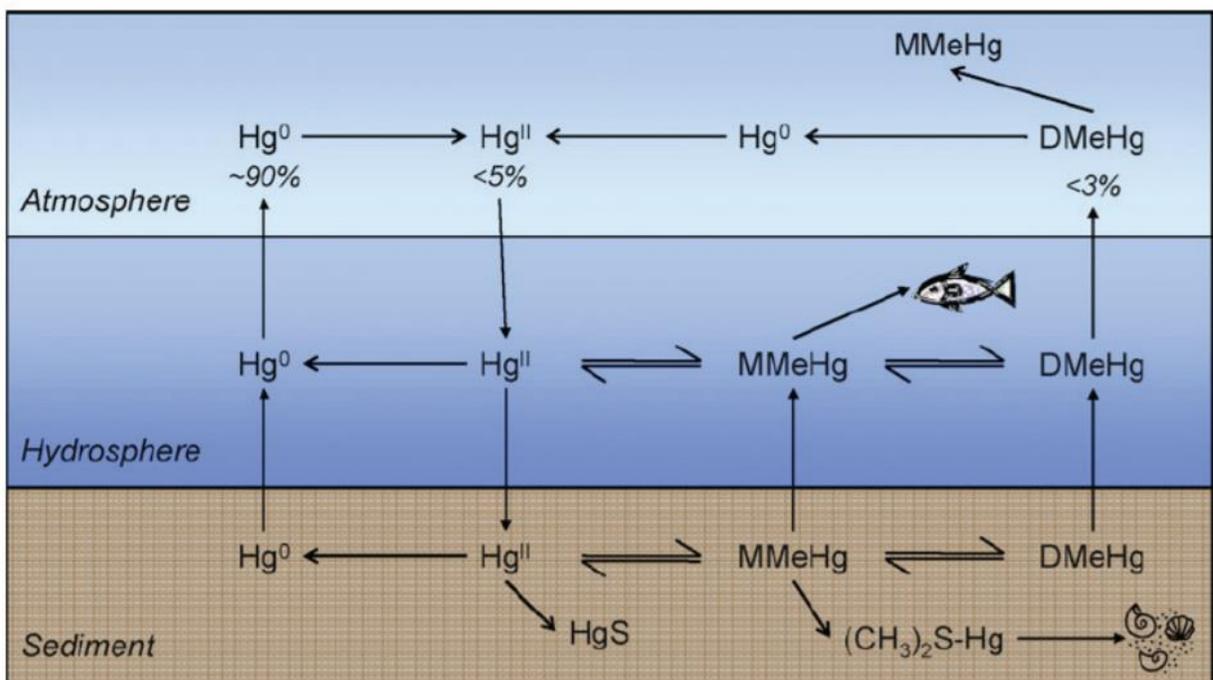
1.1.1 ไอปรอท หรือ โลหะปรอท (Metallic Mercury;  $Hg^0$ ) เป็นสารปรอทประเภทอนินทรีย์ มีสถานะตามธรรมชาติเป็นไอ ละลายน้ำได้น้อย จึงถูกพัดพาเคลื่อนย้ายไปได้ใน ระยะที่ไกลมากในบรรยากาศ ถือเป็นมลพิษข้ามพรมแดน และอยู่ในบรรยากาศได้เป็น ระยะเวลานานถึง 1 - 2 ปี ซึ่งสามารถตกสะสมเข้าสู่แหล่งน้ำและดินโดยผ่านกระบวนการ ตกสะสมแบบเปียก (Wet Deposition) และตกสะสมแบบแห้ง (Dry Deposition)<sup>11</sup> โดย กระบวนการตกสะสมจะมากขึ้นหาก  $Hg^0$  ถูกแปรสภาพเป็นไอออนของสารปรอท ( $Hg^{2+}$ ) ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ในบรรยากาศดังจะกล่าวต่อไป

1.1.2 ไอออนของสารปรอท (Mercury Ion;  $Hg^{2+}$ ) เป็นสารปรอทประเภทอนินทรีย์ เช่นเดียวกับ  $Hg^0$  แต่จะเกิดขึ้นเมื่อ  $Hg^0$  ถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศ โดยอาจเกิดจากการ ทำปฏิกิริยากับโอโซน ( $O_3$ ) หรือ อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical;  $\cdot OH$ ) ใน บรรยากาศนั่นเอง การที่ไอปรอทกลายเป็นไอออนของปรอททำให้ละลายน้ำได้ดี และ สามารถทำปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ ในบรรยากาศได้ง่าย  $Hg^{2+}$  อยู่ในบรรยากาศได้นาน 3 วันถึง 3 สัปดาห์ สามารถควบแน่นหรือถูกดูดซับในอนุภาคกลายเป็นอนุภาคแขวนลอยของ

ปรอท (Particulate Mercury;  $Hg^P$ ) ได้ง่าย สามารถตกลงสู่พื้นและถูกชะล้างลงมากับฝน ได้ง่ายกว่าไอปรอท  $Hg^0$  ดังนั้นจึงถูกพัดพาไปได้ไม่ไกลจากแหล่งกำเนิดมากนักและเมื่อตกลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำ อาจแปรสภาพเป็นสารประกอบอนินทรีย์ของปรอท (Inorganic Mercuric Salt) ได้แก่ เมอร์คิวริกคลอไรด์ (Mercuric Chloride;  $HgCl_2$ ) เมอร์คิวรีไฮดรอกไซด์ (Mercury Hydroxide;  $Hg(OH)_2$ ) และเมอร์คิวรีซัลไฟด์ (Mercury Sulphide;  $HgS$ )<sup>11</sup>

1.1.3 สารปรอทอินทรีย์ (Organic Mercury Compound) มักอยู่ในรูปของ เมทิลเมอร์คิวรี หรือ ปรอทเมทิล ( $MeHg$ ) ประกอบด้วย โมโนเมทิลเมอร์คิวรี ( $MMeHg$ ) และไดเมทิลเมอร์คิวรี ( $DMeHg$ )

เมื่อปรอทอนินทรีย์ตกลงสู่แหล่งน้ำจะถูกจุลชีพบางชนิดเปลี่ยนให้เป็นปรอทในรูปสารอินทรีย์ ทั้งโมโนเมทิลเมอร์คิวรี ( $MMeHg$ ) และไดเมทิลเมอร์คิวรี ( $DMeHg$ ) ซึ่งเป็นสารปรอทรูปที่เป็นพิษสูงและสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตผ่านห่วงโซ่อาหาร อีกทั้งการถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นของห่วงโซ่อาหารทำให้ค่าความเข้มข้นของเมทิลเมอร์คิวรี ( $MeHg$ ) ในสิ่งมีชีวิตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 5 เท่า ไปจนถึงกว่า 100,000 เท่าในแต่ละขั้นตอนการถ่ายเท โดยเรียกว่ากระบวนการขยายทางชีวภาพ (Biomagnification)<sup>12</sup> ดังจะกล่าวต่อไป

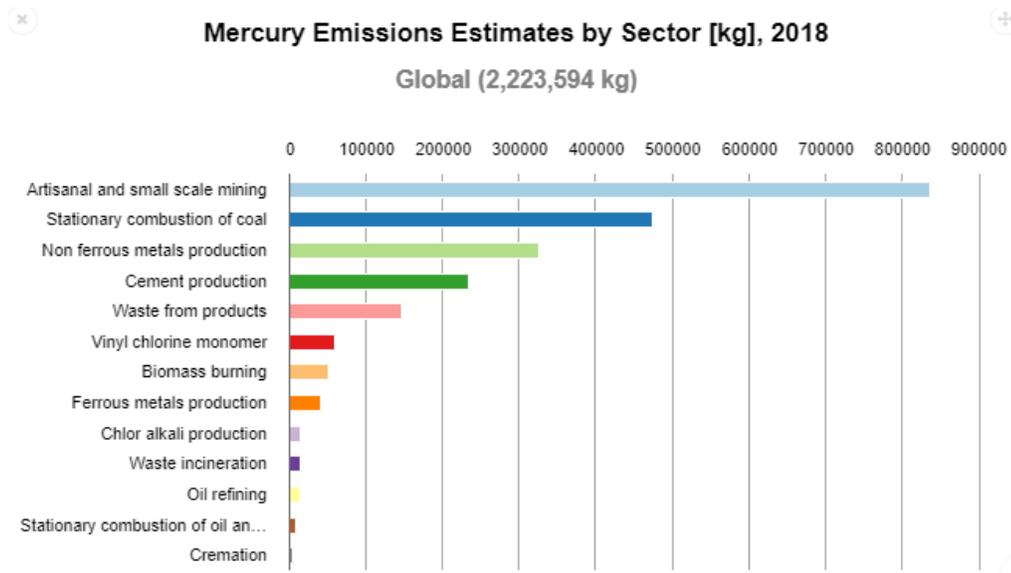


รูปที่ 1-2 ปรอทรูปต่าง ๆ และการพบในตัวกลางสิ่งแวดล้อมทั้ง 3 แห่ง

## 1.2 การปนเปื้อนปรอทในบรรยากาศ และ อิทธิพลจากภาวะโลกรวน

การเผาไหม้ รวมทั้งจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน คือกิจกรรมมนุษย์หลักที่การปลดปล่อยปรอทที่เคยอยู่ใต้ดินออกสู่ชั้นบรรยากาศ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2) แหล่งกำเนิดการปนเปื้อนปรอทที่แตกต่างกันอาจปลดปล่อยปรอทประเภทต่าง ๆ ในสัดส่วนแตกต่างกันไป (สัดส่วนของ  $Hg^0$ :  $Hg^{2+}$ :  $Hg^p$ ) ทำให้ปรอทจากแต่ละแหล่งกำเนิดมีความสามารถในการถูกพัดพาไปในบรรยากาศในระยะทางที่ไกลไกลที่แตกต่างกัน มีอัตราการตกสะสมจากบรรยากาศสู่ผิวดินและน้ำที่แตกต่างกัน และมีอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศที่แตกต่างกันตามรูปแบบทางเคมีของปรอทดังกล่าวข้างต้น<sup>11</sup>

ในปี 2561 UNEP ได้จัดทำรายงาน Global Mercury Assessment 2018 เพื่อประเมินสถานการณ์มลพิษปรอททั่วโลกและการกำหนดนโยบายเกี่ยวกับปรอทของแต่ละประเทศ โดยในรายงานระบุว่า เมื่อปี 2558 มีการปล่อยปรอททั่วโลกประมาณ 2.22 ล้านกิโลกรัม โดยสาธารณรัฐประชาชนจีน คือประเทศที่ปล่อยมลพิษปรอทมากที่สุดในโลก รองลงมาคือ อินเดีย อินโดนีเซีย บราซิล และเปรู ตามลำดับ โดยแต่ละประเทศได้ปล่อยมลพิษปรอทจากแหล่งที่มาแตกต่างกัน ทั้งจากเหมืองทองคำขนาดเล็ก อุตสาหกรรมเหมือง อุตสาหกรรมถ่านหิน และอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น (ดูรูปที่ 1-3)



รูปที่ 1-3 กิจกรรมมนุษย์ที่ปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศ

นอกจากการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมของมนุษย์แล้ว จะสังเกตได้จากรายงานดังกล่าวว่าการปลดปล่อยปรอทอาจเกิดจากการเผาชีวมวล (Biomass Burning) เช่น ไม้ ไม้ ตัดไม้ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่าง ๆ ทั้งจากการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหรือจากการเผาเพื่อเตรียมพื้นที่เกษตรกรรม

แม้ต้นไม้ ไม้ และพืชพรรณต่าง ๆ จะเป็นสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ แต่ทำไมถึงสามารถปลดปล่อยปรอทได้อย่างมีนัยสำคัญ? สาเหตุเกิดจากการตกสะสมของปรอทจากกิจกรรมมนุษย์สู่ดินและต้นไม้ ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ทำให้ชั้นผิวดินปนเปื้อนปรอท และต้นไม้ดูดซับปรอทผ่านทางรากจากดินปนเปื้อน หรือจากการตกสะสมของปรอทสู่ต้นไม้ใบไม้โดยตรง จึงทำให้การเผาต้นไม้ ไม้ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศได้<sup>13</sup>

นอกจากนี้ปัญหาภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ทำให้เกิดการตกสะสมแบบเปียกมากขึ้นผนวกกับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการแปรสภาพปรอทอนินทรีย์ในแหล่งน้ำเป็นเมทิลเมอร์คิวรีมากขึ้นและอาจเกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหารมากขึ้น<sup>14</sup> ขณะที่ภาวะโลกรวนทำให้น้ำแข็งในอาร์กติกละลาย ปรอทที่สะสมในน้ำแข็งมานานหลายล้านปีอาจถูกปลดปล่อยสู่ดินและแหล่งน้ำ<sup>15,16</sup> ทำให้ปรอทอาจถูกดูดไปสะสมในต้นไม้เพิ่มเติมได้อีก ด้วยเหตุนี้กิจกรรมของมนุษย์จึงเป็นตัวการในการทำให้ปรอทที่อยู่ใต้ดินขึ้นมาวนเวียนในวัฏจักร เป็นความจริงที่ขัดแย้งกับความเข้าใจอันคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากที่ว่าปรอทถูกปลดปล่อยและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

### 1.3 การตกสะสมของปรอทจากบรรยากาศ

ปรอทสามารถตกสะสมลงสู่ดินและแหล่งน้ำได้ 2 แบบ คือ

1.3.1 การตกสะสมแบบแห้ง (Dry Deposition) เกิดขึ้นเมื่อไอปรอท ไอออนของปรอท และอนุภาคของปรอท ตกลงสู่พื้นโลกโดยการยึดเกาะกับอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศ เช่น เหม่า ฝุ่น PM10 และ PM2.5 ซึ่งตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยที่ไม่รวมตัวกับน้ำ สามารถตกสะสมบนผิวดิน แหล่งน้ำ ต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง รวมถึงเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงจากการหายใจ<sup>17</sup>

1.3.2 การตกสะสมแบบเปียก (Wet Deposition) เกิดจากหยาดน้ำฟ้าประเภทต่าง ๆ ละอองสารปรอททั้งประเภทไอออน และปรอทที่เป็นอนุภาคให้ตกสู่พื้นโลก ในกระบวนการการตกสะสมแบบเปียก มี 2 แบบ คือ การตกเป็นฝน (Rainout) เป็นกระบวนการที่เกิดในก้อนเมฆ เกิดขึ้นในขณะที่น้ำในบรรยากาศเกิดการควบแน่นและกลั่นลงมาเป็นฝน โดยมีอนุภาคก๊าซ และมวลสารต่าง ๆ ในบรรยากาศ ทำหน้าที่เป็นแกนกลางให้กับหยดน้ำรวมตัวตกลงมากลายเป็นเม็ดฝน<sup>18</sup> และการล้างด้วยฝน (Washout) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อยู่ต่ำกว่าก้อนเมฆ โดยอนุภาคจะถูกชะล้างตกสู่พื้นด้วยน้ำจากน้ำฝน<sup>19</sup>

#### 1.4 การปนเปื้อนปรอทในแหล่งน้ำ การปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร และการขยายทางชีวภาพ (Biomagnification)

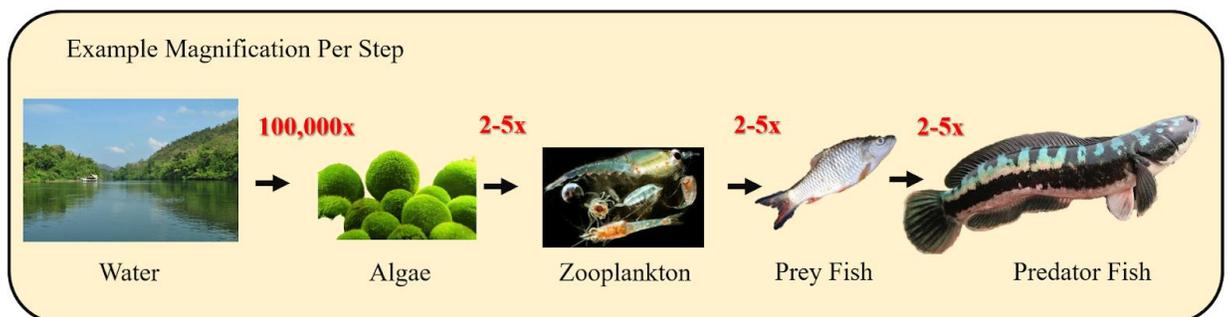
ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ปรอทอนินทรีย์เมื่อตกลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติทั้งจากการตกสะสมแบบเปียกและแบบแห้งอาจถูกแปรสภาพโดยกระบวนการทางชีวเคมีให้เป็นปรอทอินทรีย์ เช่น โมโนเมทิลเมอร์คิวรี (MMeHg) และไดเมทิลเมอร์คิวรี (DMeHg) ทั้งนี้ เมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) มีพิษมากกว่าและสะสมในสิ่งมีชีวิตทำให้เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้มากกว่าปรอทอนินทรีย์ กระบวนการแปรสภาพปรอทอนินทรีย์เป็นปรอทอินทรีย์เรียกว่ากลไกการทำให้เป็นเมทิล (Methylation) หมายถึงการเติมหมู่เมทิลบนสารตั้งต้นหรือการแทนที่ของอะตอม (หรือกลุ่ม) ด้วยหมู่เมทิล โดยมีจุลชีพในน้ำและในตะกอนเป็นผู้เร่งปฏิกิริยาชีวเคมีดังกล่าว<sup>20</sup> ทั้งนี้เมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ที่ถูกสร้างในตะกอนท้องน้ำจะถูกปลดปล่อยย้อนกลับสู่น้ำ ผ่านกระบวนการแพร่จากตะกอน (Sediment Flux) สู่สิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น แพลงก์ตอน (Plankton) ซึ่งจะกินน้ำหรือตะกอนปนเปื้อนเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ทำให้แพลงก์ตอนปนเปื้อนปรอทอินทรีย์<sup>21</sup> ปรอทอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกถ่ายทอดสู่สัตว์น้ำขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ เช่นจากแพลงก์ตอนสู่แมลงน้ำ (Aquatic Insects) ที่กินแพลงก์ตอน สู่ปลากินแมลง และปลากินเนื้อปลาตามลำดับจากกระบวนการกินกันตามห่วงโซ่อาหาร (ดูรูปที่ 1-4) โดยความเข้มข้นของเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ที่ถ่ายทอดในแต่ละชั้นของห่วงโซ่อาหารจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 5 เท่า ถึงกว่า 100,000 เท่า เรียกว่ากระบวนการขยายทางชีวภาพ (Biomagnification)

ในปี 2562 Pianpian และคณะ ได้ทำการวิเคราะห์การสะสมของปรอทในห่วงโซ่อาหารของแพลงก์ตอนพืช/สัตว์ และปลา โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาวิจัยกว่า 32 ชิ้นที่มีข้อมูลระบบนิเวศทางน้ำ 59 แห่งใน 22 ประเทศทั่วโลกครอบคลุมตั้งแต่พื้นที่เขตร้อนในซีกโลกใต้ไปจนถึงซีกโลกเหนือ โดยส่วนใหญ่มาจากเขตอบอุ่น จากการวิเคราะห์งานวิจัย

ทั้ง 32 ชิ้น Pianpian พบว่าปริมาณความเข้มข้นของปรอทในน้ำไม่สามารถบ่งชี้ได้ถึงปริมาณของปรอทที่สะสมในตัวปลาได้ เนื่องจากปัจจัยทางชีววิทยาและรูปแบบการกินอาหารของปลาเป็นปัจจัยสำคัญในการสะสมของปรอทในเนื้อปลา นอกจากนี้ปริมาณของปรอทที่สะสมในตัวของแพลงก์ตอนมีความสัมพันธ์กับการสะสมที่เพิ่มมากขึ้นของปรอทในเนื้อปลาอย่างมีนัยสำคัญเล็กน้อยเท่านั้น บ่งชี้ว่าการสะสมของปรอทในแพลงก์ตอนนั้นมีส่วนเพิ่มเติมปรอทในตัวปลาเพียงเล็กน้อย แต่ในการถ่ายทอดผ่านทางห่วงโซ่อาหารเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการสะสมของปรอทในตัวปลาอย่างมีนัยสำคัญ<sup>21</sup>

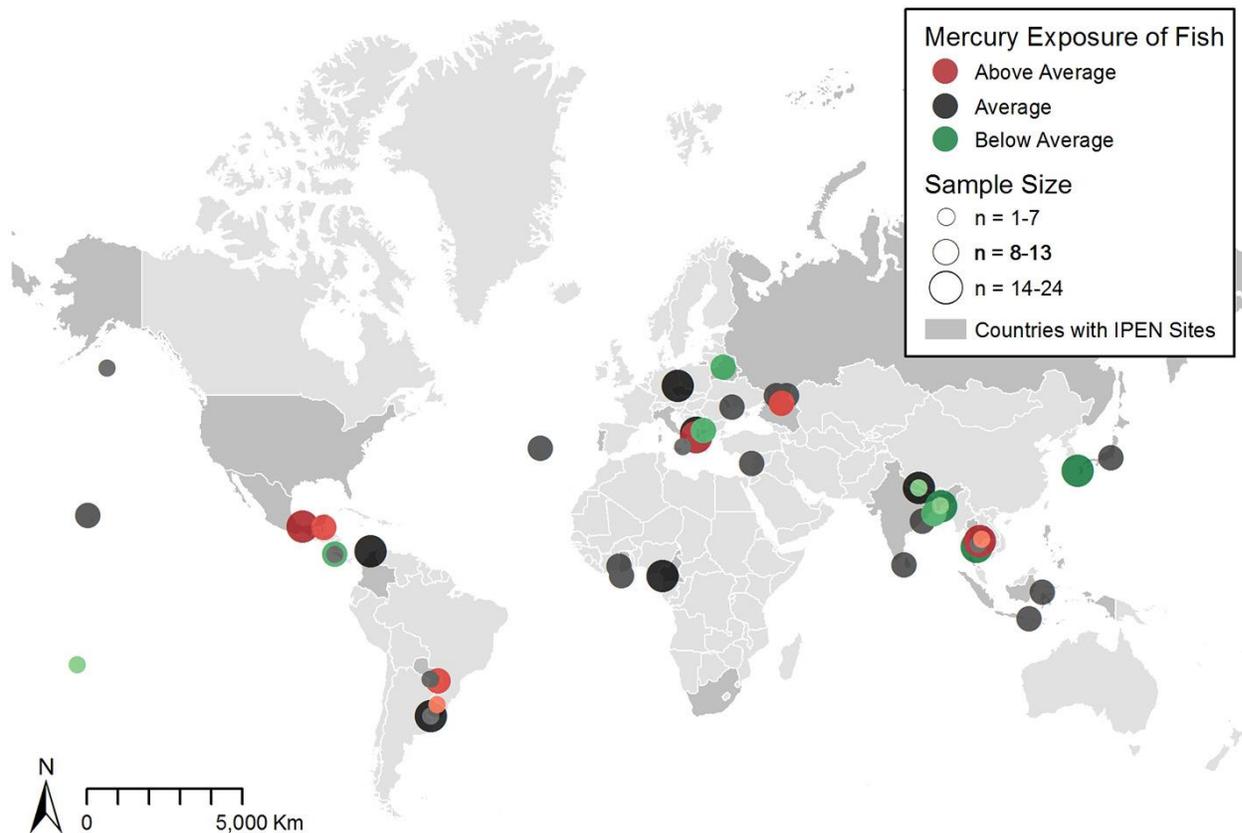
ในทำนองเดียวกัน งานศึกษาของ Filipe ในปี 2563 พบว่าปริมาณการสะสมของปรอทในปลาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของปลา อายุของปลา ความลึกของแหล่งน้ำ (ซึ่งมีผลในการแปรสภาพของปรอทอนินทรีย์เป็นปรอทอินทรีย์) รวมถึงขนาดของพื้นที่เก็บน้ำ ขนาดของปลา (โดยปลาที่มีขนาดใหญ่จะมีการสะสมปรอทสูงกว่าปลาขนาดเล็ก) และลำดับชั้นของปลาในห่วงโซ่อาหาร เช่น ปลาผู้ล่าชั้นบนของห่วงโซ่อาหารที่มีการเคลื่อนไหวเร็วจะมีการสะสมปรอทในเนื้อเยื่อสูงกว่าปลากินพืชเป็นต้น รูปที่ 6 แสดงแผนที่สรุปพื้นที่วิจัยจาก 40 พื้นที่ใน 26 ประเทศจากงานวิจัยของ Buck และ คณะที่ประเมินการตกสะสมของปรอทในเนื้อปลา แบ่งเป็นตกสะสมมากกว่าค่าเฉลี่ย (Above Average) ตกสะสมประมาณค่าเฉลี่ย (Average) และตกสะสมต่ำกว่าค่าเฉลี่ย โปรตสังเกตว่าบริเวณประเทศไทยทางภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคกลาง มีการคาดการณ์การตกสะสมของปรอทมากกว่าค่าเฉลี่ย<sup>23</sup> นอกจากนี้ รูปที่ 1-4 แสดงค่าเฉลี่ยของปรอทที่สะสมในเนื้อปลาประเภทต่าง ๆ จากต่ำไปสูง โดยปลาหลายชนิดมีปรอทปนเปื้อนในเนื้อเกินค่าที่ยอมรับได้ในอาหารคือ 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียกเมื่ออ้างอิงค่ามาตรฐาน US.EPA

## Hg Biomagnification



รูปที่ 1-4 กระบวนการขยายทางชีวภาพ (Biomagnification)

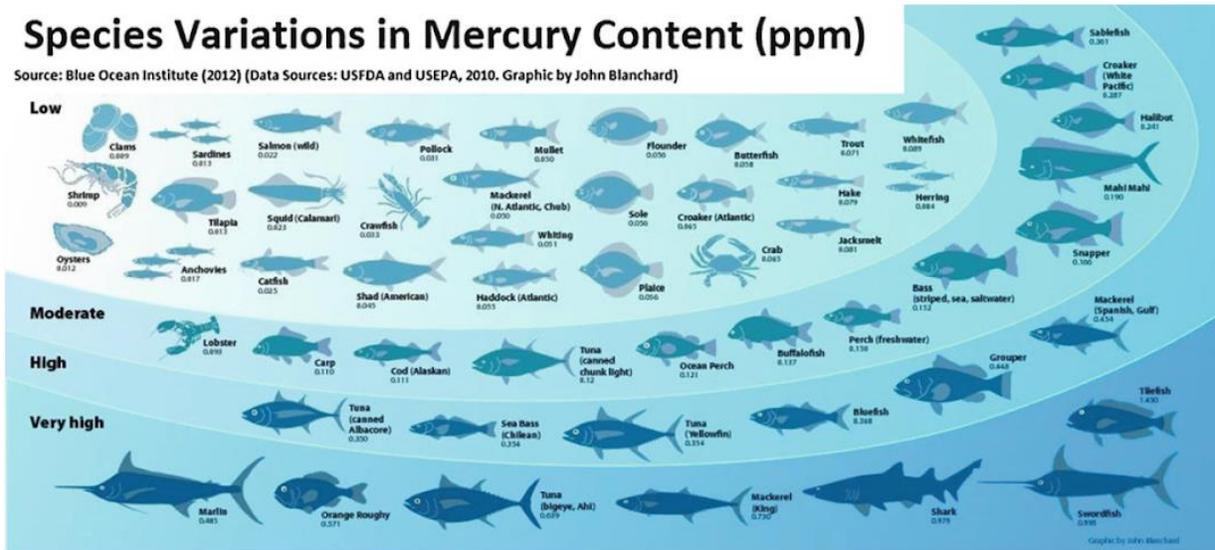
นอกจากการตกสะสมของปรอทจากบรรยากาศสู่แหล่งน้ำแล้ว น้ำทิ้งอุตสาหกรรมหรือน้ำชะจากการกองถ่านหินหรือจากกองเศษดินทิ้งหรือหางแร่จากเหมืองถ่านหิน หากไม่มีการจัดการที่ดี อาจเกิดการรั่วไหลทำให้ปรอทในน้ำชะดังกล่าวปนเปื้อนแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินได้เช่นเดียวกัน<sup>24</sup> ยกตัวอย่างเช่น การปล่อยน้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์ของปรอทปนเปื้อนจากบริษัทซิสโธะระบายลงในอ่าวมินามาตะ ในช่วงปี 2493 ที่เป็นเหตุนำไปสู่การเกิดโรคอับัติใหม่ที่พบครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น คือ โรคมินามาตะ หรือโรคพิษปรอท ดังนั้นมนุษย์ผู้อยู่ลำดับขั้นสูงสุดในห่วงโซ่อาหารเมื่อรับประทานปลาหรือสัตว์น้ำที่ปนเปื้อนเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) เข้าไป สารปรอทความเข้มข้นสูงจะถูกถ่ายเทมาสะสมในร่างกาย เนื่องจากเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) สามารถสะสมอยู่ในไขมันปลาและสัตว์น้ำซึ่งผู้ที่บริโภคสัตว์น้ำที่มีการปนเปื้อนปรอทจะไม่มีทางทราบได้เลย จนกระทั่งมีการสะสมปรอทถึงจุดที่มีการแสดงอาการออกมา เนื่องจากร่างกายของสิ่งมีชีวิตไม่สามารถที่จะขับปรอทออกมาทางของเสียได้ ทำให้มีการสะสมปรอทจนถึงขั้นแสดงอาการออกมาในที่สุด<sup>25</sup> เช่น โรคมินามาตะหรือการลดลงของไอคิว (IQ) ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้



รูปที่ 1-5 การประเมินการตกสะสมของปรอทในพื้นที่วิจัยความเข้มข้นของปรอทในปลา

## Species Variations in Mercury Content (ppm)

Source: Blue Ocean Institute (2012) (Data Sources: USFDA and USEPA, 2010. Graphic by John Blanchard)



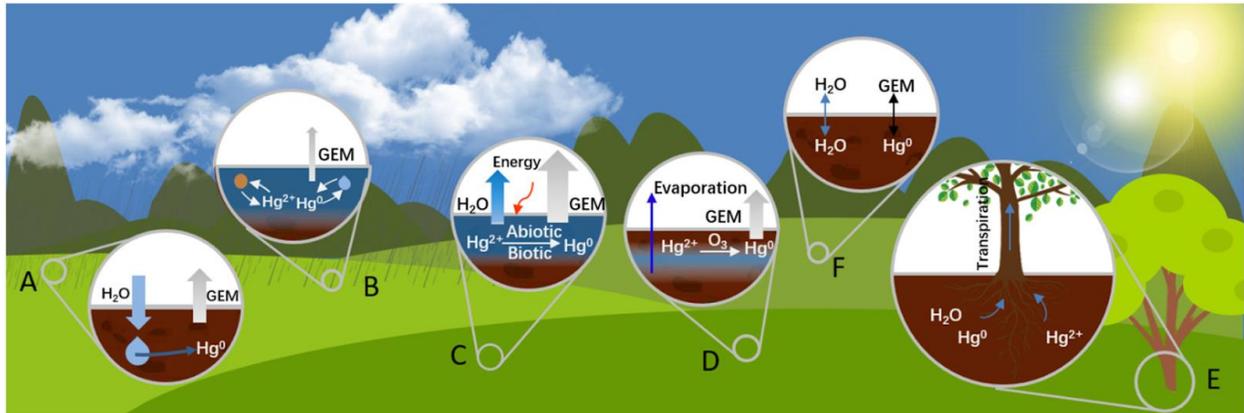
รูปที่ 1-6 ความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลาชนิดต่าง ๆ<sup>26</sup>

### 1.5 การปนเปื้อนปรอทในดิน

ปรอทจากบรรยากาศสามารถตกสะสมสู่ดินได้ทั้งแบบเปียกและแบบแห้งดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยประเมินว่ามีปรอทจากบรรยากาศถึง 86,000 ตันที่ตกสะสมอยู่บนผิวดิน โดยปรอทอนินทรีย์ที่ตกสะสมอาจถูกดูดซับโดยดินแต่ก็อาจจะถูกชะละลายออกมาได้จากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางธรณีเคมีของดิน นอกจากนี้ปรอทที่ตกสะสมสู่ดินอาจผสมและทำปฏิกิริยากับไอออนลบอื่น ๆ ในดินกลายเป็นสารประกอบร่วมของปรอทกับสารอื่นในดินที่ละลายน้ำได้น้อยและสะสมในดินชั่วคราวได้ เช่น HgS HgSO<sub>4</sub> หรือ CH<sub>3</sub>HgCl เป็นต้น

อย่างไรก็ดีเมื่อมีกิจกรรมการใช้ที่ดิน เช่น การเกษตร การขุดดินที่มีการเปิดหน้าดิน และมีฝนตก หรือมีการรดน้ำเพื่อการเกษตรกรรม อาจทำให้ปรอทถูกชะล้างและรั่วไหลออกมาเป็นไอออนของปรอทอนินทรีย์อีกครั้งได้ นอกจากนี้สารประกอบปรอทในดินอาจถูกทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือ รีดักชันทำให้เปลี่ยนรูปทางเคมีได้โดยอาจจะทำให้ปรอทเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำได้ดีขึ้น ปรอทที่รั่วไหลออกมาจากดินอาจไหลลงสู่แหล่งน้ำและระเหยกลับไปในบรรยากาศได้อีกครั้ง เช่น Hg<sup>0</sup> ซึ่งสามารถระเหยกลับไปในบรรยากาศได้ด้วยการชะละลายโดยน้ำฝนตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพและเคมี ภายภาคที่เป็นไปได้ถึง 6 รูปแบบ (จาก A ถึง E ในรูปที่ 1-7) จึงทำให้ปรอทเป็นมลพิษในระดับโลกที่ธรรมชาติบำบัดโดยการตกสะสมและการดูดซับโดยดินไม่สามารถบำบัดการ

ปนเปื้อนปรอทได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับโลหะหนักประเภทอื่น ๆ ปรอทที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศจากกิจกรรมมนุษย์แม้จะตกสะสมสู่ดินและน้ำ แต่ก็จะถูกปลดปล่อยกลับไปสู่บรรยากาศและเคลื่อนที่ข้ามพรมแดนไปรอบโลกในที่สุด



รูปที่ 1-7 การชะละลายของปรอทในดินโดยน้ำฝนและการปลดปล่อยปรอทจากดินสู่บรรยากาศ ( $Hg^0$  ในรูปคือปรอทรูป  $Hg^0$  ที่อยู่ในดิน ส่วน GEM คือ ปรอท  $Hg^0$  ที่ในรูปแก๊ส)<sup>27</sup>

## 1.6 ผลกระทบของปรอทต่อสุขภาพ

เมื่อมนุษย์ได้รับสัมผัสปรอทเข้าสู่ร่างกาย อาจเกิดผลกระทบต่อสุขภาพจากพิษปรอทแบบเรื้อรังหรือแบบเฉียบพลัน โดยมีอาการดังต่อไปนี้

### 1.6.1 ผลกระทบต่อสุขภาพแบบเฉียบพลัน

1. การหายใจสูดไอปรอทเข้าไปในร่างกายเกินค่าที่จะทำให้เกิดผลกระทบเฉียบพลัน (0.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อาจทำให้เกิดอาการไอ หอบเหนื่อย แน่นหน้าอก หนาวสั่น มีไข้ อ่อนเพลีย มีการหลั่งน้ำลายเพิ่มขึ้น ปวดท้อง ท้องเสีย ลิ้นได้รับรสรโลหะ กรณีรุนแรงจะทำให้เกิดเนื้อเยื่อปอดอักเสบ อาจมีอาการปวดศีรษะ และการมองเห็นผิดปกติ<sup>28</sup>

2. การได้รับปรอทอนินทรีย์ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงทางปาก จะมีอาการปวดแสบปวดร้อน ในช่องปาก คลื่นไส้ อาเจียนเป็นเลือด ปวดท้อง ท้องเสีย อูจจาระเป็นเลือด เนื้อในกระพุ้งแก้มกลายเป็นสีเทา บางรายมีกลิ่นไอของโลหะ กรณีรุนแรงเมื่อเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิตปรอท ระบบการทำงานของไตจะถูกทำลาย ทำให้ปัสสาวะไม่ออกหรือปัสสาวะเป็นเลือด เกิดอาการไตวาย และทำให้เสียชีวิตได้

## 1.6.2 ผลกระทบต่อสุขภาพแบบเรื้อรัง

การหายใจเอาปรอทความเข้มข้นต่ำ (แต่สูงกว่า 0.03 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เข้าไปในร่างกายเป็นระยะเวลาต่อเนื่องยาวนาน และการบริโภคเนื้อปลาปนเปื้อนปรอทอินทรีย์เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักเปียก) อย่างต่อเนื่องอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแบบเรื้อรังได้ โดยการรับสารพิษเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจจะทำให้ได้รับพิษที่มากถึง ร้อยละ 80 ส่วนการกลืนกินสารปรอทเข้าสู่ร่างกายในรูปแบบของการกินปลาปนเปื้อนปรอทในรูปของเมทิลเมอร์คิวรีจะรับสารพิษเข้าไปในร่างกายได้ถึงร้อยละ 95

เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกายที่ความเข้มข้นต่ำ แต่รับสัมผัสต่อเนื่องยาวนาน ปรอทจะเข้าไปจับตัวกับเนื้อเยื่อสมองและไขสันหลัง กระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เสียการควบคุมการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียไป เช่น การได้ยิน และการมองเห็น อันตรายเหล่านี้เมื่อเป็นแล้วไม่สามารถรักษาให้กลับมามีดังเดิมได้เนื่องจากระบบประสาท ไขสันหลัง และเนื้อเยื่อสมองถูกทำลาย การสะสมปรอทในร่างกายโดยเฉพาะเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) เป็นเวลานาน ทำให้เกิดอาการทางระบบประสาทเรื้อรัง เช่น กลืนยาก เดินเซ ลานสายตาแคบและมีจุดบอด มีอาการชาตามปลายมือ ปลายเท้า อารมณ์เศร้าหมอง ขาดแรงกระตุ้น อ่อนเพลีย สมรรถภาพทางเพศลดลง การผลิตอสุจิผิดปกติ การได้ยินเสื่อมลง ปวดตามตัว หลงลืม ซึม หลงเวลา อารมณ์แปรปรวน จนถึงเป็นอัมพาต หมดสติ และถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้การรับสัมผัสปรอทอินทรีย์ในรูปของเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) จะทำให้เพิ่มความเสี่ยงเกี่ยวกับโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ใหญ่<sup>29</sup> อีกด้วย

การรับสัมผัสปรอทอย่างต่อเนื่องยาวนาน ยังก่อให้เกิดโรคมินามาตะ โดยจะมีอาการทั่วไป ได้แก่ หายใจลำบาก หายใจติดขัด เจ็บแน่นหน้าอก มีไข้ พบอาการเหงือกอักเสบ มีเส้นสีเงินที่ขอบเหงือก เหงือกบวม และเลือดออก ปากเป็นแผลอักเสบเรื้อรัง ซีฟจรต้นอ่อน หัวใจเต้นผิดจังหวะ สูญเสียการรับรู้ สูญเสียการได้ยิน และการมองเห็น มีอาการซึมเศร้า บางครั้งพบน้ำลายฟูมปาก กล้ามเนื้อสั่นกระตุก มือเท้าหยิกงอ เป็นอัมพาต อาการที่เกิดกับมนุษย์ถูกพบครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น ในบริเวณอ่าวมินามาตะที่มีการลักลอบปล่อยน้ำหล่อเย็นที่มีการปนเปื้อนของปรอทลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้มีการสะสมของปรอทในปลา และมีการบริโภคปลาจากแหล่งนั้น จนทำให้แสดงอาการผ่านร่างกายของผู้บริโภค

การรับสัมผัสปรอทจากเนื้อปลาในขณะตั้งครรภ์จะทำให้เกิดผลเสียต่อพัฒนาการทางสมองของทารก ปรอทที่แม่บริโภคผ่านเนื้อปลาปนเปื้อนจะถ่ายทอดสู่ทารกทางเลือดและรก ทำให้ปรอทเข้าไปกระทบการเจริญเติบโตของระบบประสาทของทารกในช่วงที่

สมองกำลังสร้าง ทำให้เกิดความบกพร่องทางสติปัญญา อาจมีอาการปัญญาอ่อน และมีพัฒนาการที่ช้ากว่าเด็กวัยเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเจริญเติบโตในช่วง 3 ปีแรก<sup>30</sup>

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของปรอทต่อการเกิดโรคอัลไซเมอร์ โดยมีการศึกษาในคนวัย 91 ปีที่ถูกวินิจฉัยว่าเป็นโรคอัลไซเมอร์ พบว่าผู้ป่วยรายนี้มีระดับการสะสมของปรอทสูงขึ้นอย่างมากแบบผิดปกติ เนื่องจากการบริโภคปลาที่มีสารปรอทสูง ภายหลังจากการปรับเปลี่ยนอาหารและการล้างพิษ ความบกพร่องทางสติปัญญาของผู้ป่วยรายนี้ก็กลับดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนของระดับเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ที่ลดลง<sup>29</sup>

## บทที่ 2 การปลดปล่อยและความเสี่ยงต่อพิษปรอทของนานาชาติ

ปรอทเป็นมลพิษข้ามพรมแดนระดับโลกดังที่ได้แสดงรายละเอียดกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่กำหนดการแปรสภาพ แพร่กระจาย และฟุ้งกระจายกลับไปกลับมาของปรอทในบทที่ 1 ด้วยพิษของปรอทต่อระบบประสาทและพัฒนาการของทารก รวมถึงการตกสะสมในสิ่งแวดล้อมและการขยายทางชีวภาพในสิ่งมีชีวิตของปรอททำให้การปนเปื้อนปรอทในสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของมวลมนุษยชาติในระดับที่น่ากังวล ที่สำคัญผลกระทบนี้ไม่ได้จำกัดวงแค่บริเวณที่มีการปลดปล่อยปรอทเท่านั้น แต่กระทบไปในระดับประเทศ ระดับภูมิภาค และระดับโลก จึงเป็นเรื่องยากที่จะจำกัดขอบเขตของผลกระทบดังกล่าวไว้ในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง การแก้ไขปัญหามลพิษปรอทจึงต้องอาศัยความร่วมมือของทุกประเทศทั่วโลก

ความตระหนักร่วมต่อการลดการปลดปล่อยปรอทเป็นเรื่องของนานาชาติทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยที่ต้องดำเนินการโดยเร่งด่วนเพื่อปกป้องความมั่นคงของสังคมมนุษย์จากภัยของปรอท บทนี้จะชี้ให้เห็นถึงมุมมองในระดับโลก ว่าประเทศใด กิจกรรมใดปลดปล่อยปรอทออกมามากที่สุด ประเทศไหนจะได้รับผลกระทบจากมลพิษข้ามพรมแดนนี้มากที่สุด ประเทศไทยอยู่ตรงไหนในสมการความเสี่ยงนี้ ประเทศไทยปลดปล่อยมากน้อยเท่าใด และน่าจะได้รับผลกระทบมากน้อยเท่าใด

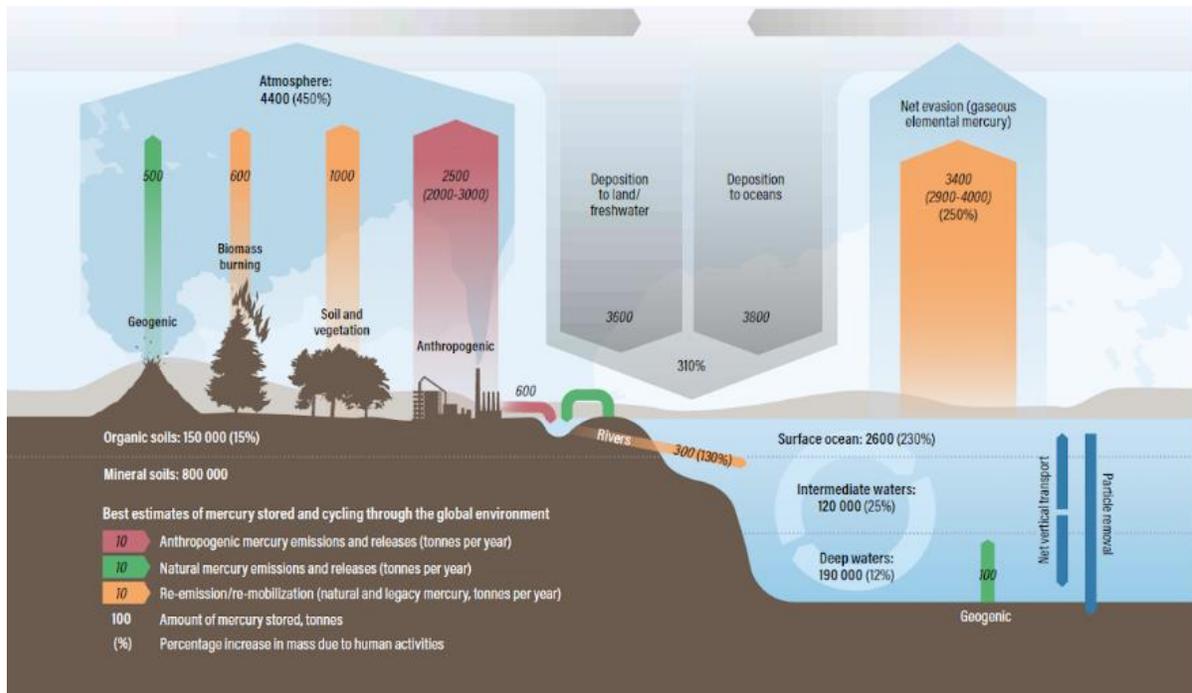
### 2.1 แหล่งปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศ<sup>31</sup>

ขยายความต่อเนื่องจากบทที่ 1 ในหัวข้อนี้ จะลงรายละเอียดของแหล่งปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศทั้งแหล่งปลดปล่อยตามธรรมชาติ(Natural Emission) แหล่งปลดปล่อยจากกิจกรรมมนุษย์ (Anthropogenic Emission) และแหล่งปลดปล่อยตามกลไกธรรมชาติแต่ปรอทที่ถูกปลดปล่อยนี้เป็นผลพวงมาจากการตกสะสมของปรอทจากกิจกรรมมนุษย์และจากธรรมชาติก่อนหน้า (Re-emission/Re-mobilization of Legacy and Natural Hg)

#### 2.1.1 แหล่งปลดปล่อยปรอทตามธรรมชาติ

สารปรอทมีอยู่แล้วตามธรรมชาติ แต่กระบวนการปลดปล่อยปรอทจากใต้ดินใต้ทะเลสู่บรรยากาศที่จะนำมาสู่ความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศนั้นสามารถเกิดขึ้นได้โดยผ่านกิจกรรมมนุษย์หรือโดยผ่านกระบวนการทางธรรมชาติการปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศตามธรรมชาติมักเกิดจากการผุกร่อนของหินหรือการปะปนมากับก๊าซ

ที่ระบายออกมาจากปล่องภูเขาไฟ รวมทั้งการคายความร้อนของเปลือกโลกในรูปของไอปรอทเนื่องมาจากบางพื้นที่อาจมีสินแร่ที่มีปรอทเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของเปลือกโลก ในบริเวณดังกล่าว หรือจากการปลดปล่อยมาจากพื้นมหาสมุทรที่มีสินแร่ของปรอทอยู่ในเปลือกโลกเช่นกัน อาจเกิดการชะละลายออกมาเป็นไอออนของปรอทก่อนเกิดการแปรสภาพเป็นไอปรอทที่ระเหยสู่บรรยากาศได้ โดยประเมินว่ามีการปลดปล่อยปรอทจากกระบวนการทางธรรมชาติดังกล่าวประมาณปีละ 600 ตัน (ลูกศรสีเขียว)



รูปที่ 2-1 การปลดปล่อยปรอทจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ<sup>32</sup>

### 2.1.2 แหล่งปลดปล่อยปรอทสู่ชั้นบรรยากาศจากกิจกรรมมนุษย์

ดังที่ได้กล่าวโดยสังเขปในบทที่ 1 เรื่องความหลากหลายของกิจกรรมของมนุษย์ที่ปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศ บทนี้จะลงรายละเอียดเพิ่มเติมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีการปลดปล่อยปรอทและมีการแสดงการวิเคราะห์สัดส่วนการปลดปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ประเภทต่าง ๆ ในแต่ละประเทศในหัวข้อถัดไป

การปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมของมนุษย์มีปริมาณแตกต่างกันไปในแต่ละประเภทกิจกรรม การผลิตในภาคอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นกิจกรรมสำคัญที่มีการปลดปล่อยสารปรอทสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Coal-Fired Power Plants) หม้อต้มไอน้ำในอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหิน (Coal-Fired Industrial Boilers)

การผลิตปูนซีเมนต์ (Cement Production) ที่ใช้ถ่านหินและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนปรอท โรงเผาขยะ (Waste Incineration Facilities) และการเผาของเสียและของเสียอันตราย (Waste and Hazardous Waste Incineration) รวมไปถึงการกลั่นและการใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ

นอกจากอุตสาหกรรมที่มีการเผาเชื้อเพลิงแล้ว การทำเหมืองและการแปรรูปแร่ การถลุงเหล็กและโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น สังกะสีและตะกั่ว ก็สามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยปรอทเป็นปริมาณมากได้เช่นเดียวกันจากการเผาไหม้สารประกอบที่ไม่บริสุทธิ์ในสินแร่ (Impurity) การใช้ปรอทในการสกัดแร่เงินและทองคำทำให้เกิดการปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ยิ่งไปกว่านั้นการทำเหมืองยังเร่งให้เกิดการผุกร่อนของหินซึ่งเร่งกระบวนการการปลดปล่อยปรอทตามธรรมชาติให้ผิดธรรมชาติ ปรอทถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศจากกิจกรรมมนุษย์มากถึง 2,500 ตันต่อปี รูปที่ 2-2 แสดงสัดส่วนการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์จากการประมาณการของการปลดปล่อยทั่วโลกในปี 2558 โดยเหมืองทองคำขนาดเล็กรวมกันแล้วปลดปล่อยปรอทมากที่สุด ตามมาด้วยโรงไฟฟ้าถ่านหิน

▼ Quantities of mercury emitted to air from anthropogenic sources in 2015, by different sectors.

Sector	Mercury emission (range), tonnes	Sector % of total
Artisanal and small-scale gold mining (ASGM)	838 (675-1000)	37.7
Biomass burning (domestic, industrial and power plant) *	51.9 (44.3-62.1)	2.33
Cement production (raw materials and fuel, excluding coal)	233 (117-782)	10.5
Cremation emissions	3.77 (3.51-4.02)	0.17
Chlor-alkali production (mercury process)	15.1 (12.2-18.3)	0.68
Non-ferrous metal production (primary Al, Cu, Pb, Zn)	228 (154-338)	10.3
Large-scale gold production	84.5 (72.3-97.4)	3.8
Mercury production	13.8 (7.9-19.7)	0.62
Oil refining	14.4 (11.5-17.2)	0.65
Pig iron and steel production (primary)	29.8 (19.1-76.0)	1.34
Stationary combustion of coal (domestic/residential, transportation)	55.8 (36.7-69.4)	2.51
Stationary combustion of gas (domestic/residential, transportation)	0.165 (0.13-0.22)	0.01
Stationary combustion of oil (domestic/residential, transportation)	2.70 (2.33-3.21)	0.12
Stationary combustion of coal (industrial)	126 (106-146)	5.67
Stationary combustion of gas (industrial)	0.123 (0.10-0.15)	0.01
Stationary combustion of oil (industrial)	1.40 (1.18-1.69)	0.06
Stationary combustion of coal (power plants)	292 (255-346)	13.1
Stationary combustion of gas (power plants)	0.349 (0.285-0.435)	0.02
Stationary combustion of oil (power plants)	2.45 (2.17-2.84)	0.11
Secondary steel production *	10.1 (7.65-18.1)	0.46
Vinyl-chloride monomer (mercury catalyst) *	58.2 (28.0-88.8)	2.6
Waste (other waste)	147 (120-223)	6.6
Waste incineration (controlled burning)	15.0 (8.9-32.3)	0.67
Total	2220 (2000-2820)	100

Colour coding indicates main sector groups  
(Stationary combustion, dark blue; Industry, light blue; Sectors associated with Intentional use, dark orange; ASGM, light orange).

\* Sectors included for the first time in the 2015 inventory.

## รูปที่ 2-2 ปริมาณการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมมนุษย์ในปี 2558<sup>32</sup>

นอกจากกิจกรรมดังรูปที่ 2-2 ซึ่งปลดปล่อยปรอทปริมาณมากในปัจจุบันแล้ว ยังมี การนำสารปรอทไปใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในอดีต แต่ได้ มีการยกเลิกการใช้งานไปแล้วหรือมีแนวโน้มที่จะถูกยกเลิกการใช้ในหลายประเทศใน ปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น แม้แบตเตอรี่บางประเภทยังคงใช้สารปรอทเป็นส่วนประกอบ แต่ ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปสู่การใช้แบตเตอรี่ไร้สารปรอทแทนที่ เนื่องจาก

หลายประเทศมีนโยบายบังคับใช้เพื่อจัดการกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของปรอทที่อยู่ในแบตเตอรี่ โดยในถ่านกระดุมหรือถ่านนาฬิกาที่ถูกผลิตในประเทศต่าง ๆ จะถูกจำกัดสัดส่วนส่วนผสมของสารปรอทในผลิตภัณฑ์ ในทำนองเดียวกัน หลอดไฟหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นฟลูออเรสเซนต์ (หรือหลอดนีออน) หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดคอมแพค และหลอดปล่อยประจุนั้นมีปรอทอยู่ ทางผู้ผลิตมีความพยายามในการลดการใช้ปรอทลง เนื่องจากมีกระแสต่อต้านที่มีความต้องการซื้อหลอดไฟที่ปราศจากปรอทเป็นทางเลือกใหม่อย่างหลอดแอลอีดีที่มีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเพิ่มมากขึ้น ในยุโรปมีข้อกำหนดที่ 2002/95/EC ของสหภาพยุโรป (EU) ว่าด้วยเรื่องของการใช้สารอันตรายในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกบังคับใช้ เช่นเดียวกันที่ประเทศญี่ปุ่น จีน และรัฐแคลิฟอร์เนียที่ได้รับการสนับสนุน และมีการใช้อุปกรณ์ที่ปราศจากปรอทมาทดแทนมาเป็นเวลาหลายปีแล้ว

นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและควบคุมหลายประเภท เช่น เทอร์โมมิเตอร์ บารอมิเตอร์ และมาโนมิเตอร์ยังคงมีการผลิตขึ้นมาในหลายแห่งทั่วโลก แต่ผู้ผลิตสินค้าได้มีการเสนอทางเลือกที่ปลอดภัยจากปรอทออกในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับกฎเกณฑ์ของทวีปยุโรปที่ถูกพัฒนาขึ้นให้มีการปลดปล่อยการใช้อุปกรณ์ที่มีส่วนผสมของปรอทและส่งเสริมให้เกิดทางเลือกในการใช้อุปกรณ์ที่ปลอดภัยจากปรอท ในขณะที่แม้จะยังคงมีการนำสารปรอทไปใช้ในทางทันตกรรม เช่น อะมัลกัมที่ใช้ในทางทันตกรรม (Dental Amalgam) ซึ่งเป็นวัสดุบูรณะฟัน แต่ในประเทศสวีเดน ญี่ปุ่น เดนมาร์ก และฟินแลนด์ มีมาตรการบังคับใช้ที่ลดการใช้สารอุดฟันที่มีส่วนผสมของปรอทอย่างจริงจัง โดยที่ปัจจุบันในประเทศสวีเดนและนอร์เวย์ได้ยุติการใช้แล้ว

### 2.1.3 แหล่งปลดปล่อยปรอทที่ตกสะสมจากกิจกรรมมนุษย์ในอดีต

ดังแสดงในรูปที่ 2-1 การปลดปล่อยปรอทตามกลไกธรรมชาติแต่เป็นปรอทที่เป็นผลพวงมาจากการตกสะสมของปรอทจากกิจกรรมมนุษย์และกิจกรรมทางธรรมชาติก่อนหน้านี้ (Re-emission/re-mobilization of Legacy and Natural Hg)<sup>32</sup> (แสดงด้วยลูกศรสีส้ม) เป็นการปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศที่มากที่สุด (ถึง 5,000 ตันต่อปี) ในบรรดา 3 ประเภทของการปลดปล่อยที่แสดงในบทนี้ ฉะนั้นแม็กไนไทต์ที่ทำให้ปรอทถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศจะเป็นกลไกตามธรรมชาติ เช่น การระเหยจากมหาสมุทร การระเหยจากดินหรือต้นไม้ และการเผาชีวมวล เช่น ไฟป่า แต่ปรอทที่ถูกปลดปล่อยก็มาจากกิจกรรมมนุษย์ที่ทำให้เกิดการตกสะสมในช่วงเวลาที่ผ่านมา โดยกิจกรรมมนุษย์ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาทำให้เกิดการปลดปล่อยตามธรรมชาตินี้สูงกว่าที่ควรจะเป็นจากธรรมชาติจริง ๆ ถึงร้อยละ 250 (ดูรูปที่ 2-1) และจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไปตามการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมของมนุษย์เข้าสู่บรรยากาศที่มากขึ้นทุกวัน การปลดปล่อยปรอทที่มากขึ้นจากกิจกรรมมนุษย์ในแต่ละปีทำให้ปรอทตกสะสมลงสู่ผิวดินและพื้นน้ำเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 310

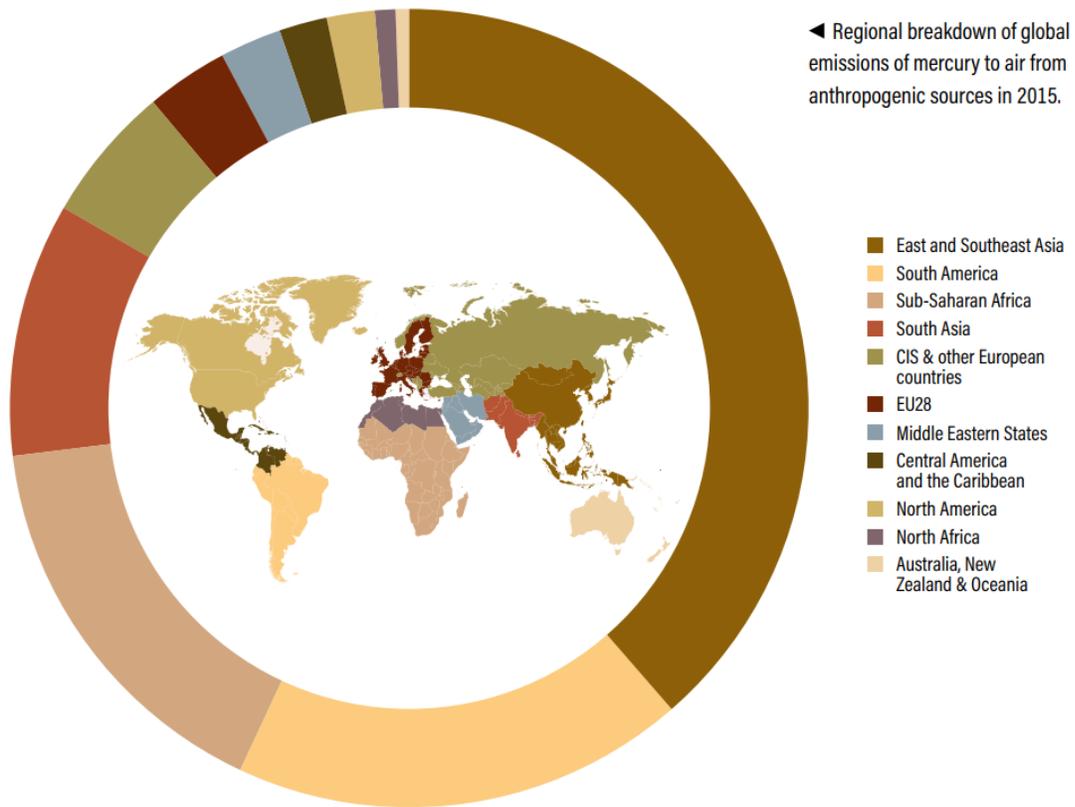
ด้วยเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ปรอทที่ปลดปล่อยจากกิจกรรมมนุษย์จึงสะสมที่ต้นและไหลวนเวียนสร้างผลกระทบต่อที่เพิ่มขึ้นอยู่ในระบบนิเวศและบรรยากาศของโลกเพิ่มขึ้นทุกวันตราบไต่ที่กิจกรรมอุตสาหกรรมของมนุษย์ยังคงขุดปรอทขึ้นมาจากพื้นพิภพและปลดปล่อยมันออกสู่บรรยากาศไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรือไม่ก็ตาม

## 2.2 การปลดปล่อยปรอทจากนานาประเทศทั่วโลก

รูปที่ 2-3 แสดงการปลดปล่อยปรอทจากทวีปต่าง ๆ ทั่วโลกโดยอิงข้อมูลการปลดปล่อยจากกิจกรรมมนุษย์ประจำปี 2558 ในขณะที่รูปที่ 2-4 แสดงการจำแนกแต่ละกิจกรรมสำคัญของมนุษย์ที่ปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศในแต่ละทวีป โดยทวีปที่ปลดปล่อยปรอทมากที่สุดคือทวีป เอเชียตะวันออกและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ร้อยละ 38.6 ของการปลดปล่อยปรอททั้งโลก) และรองลงมาคือทวีปอเมริกาใต้ (ร้อยละ 18.4 ของการปลดปล่อยปรอททั้งโลก) นอกจากนี้กิจกรรมที่ปลดปล่อยปรอทมากที่สุดสำหรับทวีปเอเชียตะวันออกและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ กิจกรรมภาคอุตสาหกรรม (ประมาณ 307 ตันต่อปี หรือร้อยละ 35.73 ของทวีป) ตามมาด้วยการปลดปล่อยจากการเผาเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน (ประมาณ 229 ตันต่อปี หรือร้อยละ 26.66 ของทวีป) ในทางตรงกันข้าม สำหรับทวีปอเมริกาใต้ที่ปลดปล่อยปรอทมากเป็นลำดับ 2 ของโลก การปลดปล่อยปรอทสูงสุดเกิดจากเหมืองแร่ขนาดเล็ก (ประมาณ 340 ตันต่อปี หรือร้อยละ 83.13 ของทวีป) ตามมาด้วยกิจกรรมภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีการปลดปล่อยปรอทเพียง (ประมาณ 43.7 ตันต่อปี หรือร้อยละ 10.68 ของทวีป)

อย่างไรก็ดีหากต้องการทราบการปลดปล่อยปรอทต่อปีในแต่ละประเทศ แยกรายประเทศ ก็สามารถทำได้ดังแสดงได้ในรูปที่ 2-5 ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเชิงโต้ตอบให้ผู้ใช้สามารถเข้าไปเลือกดูการปลดปล่อยปรอทของแต่ละประเทศได้ (รวมทั้งประเทศไทย) โดยการเลือกจากแผนที่ในฐานข้อมูล ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวเป็นการปลดปล่อยระหว่างปี 2553 - 2556 จะเห็นได้ว่าประเทศจีนปลดปล่อยปรอทมากที่สุดในโลกอยู่ที่ 575.20 ตันต่อปี ตามด้วยประเทศอินเดียที่ 114.73 ตันต่อปี และประเทศอินโดนีเซียที่ 78.20 ตันต่อปี

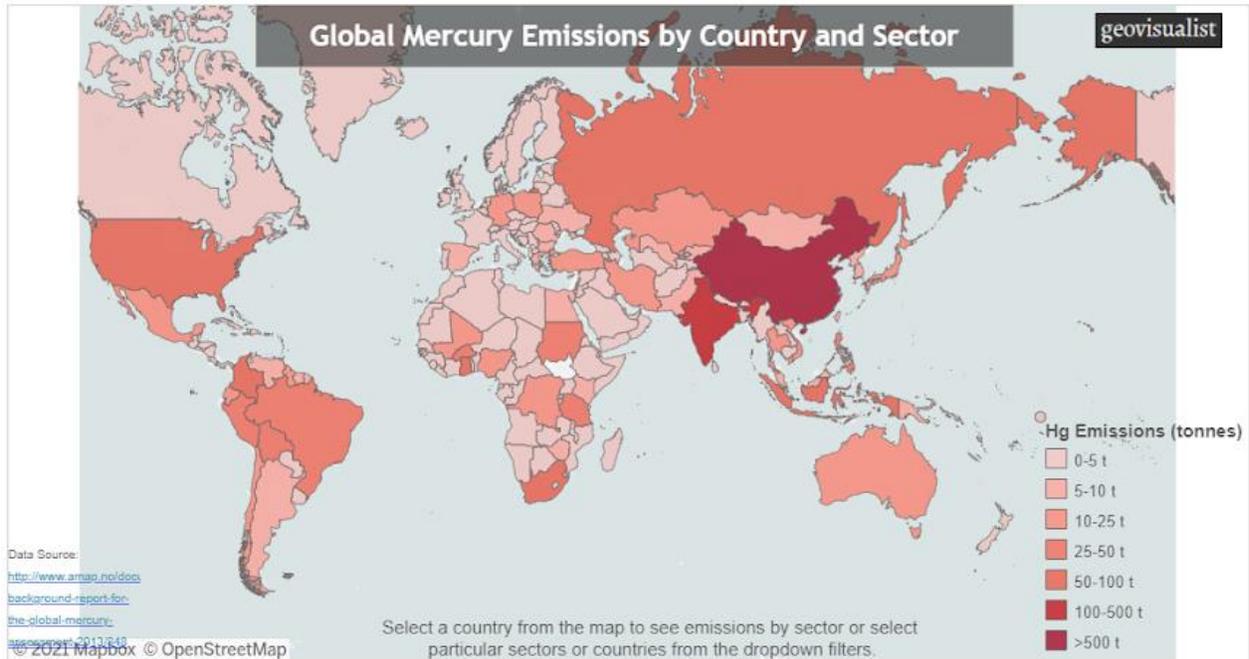
จากทั้ง 2 ฐานข้อมูลทำให้เห็นได้ว่าในส่วนต่าง ๆ ของโลกมีแหล่งปลดปล่อยปรอทที่แตกต่างกันไป ประเทศในทวีปเอเชียตะวันออกและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่มีการเติบโตทางอุตสาหกรรมสูงก็จะปลดปล่อยปรอทจากการใช้งานเชื้อเพลิงทางอุตสาหกรรมและการผลิตไฟฟ้า ในขณะที่ประเทศในภูมิภาคอเมริกาใต้ซึ่งมีการทำเหมืองแร่มากก็จะปลดปล่อยปรอทส่วนใหญ่ก็มาจากเหมืองแร่เงินและทองขนาดเล็กที่กระจายอยู่ทั่วทั้งภูมิภาคนั่นเอง



รูปที่ 2-3 การปลดปล่อยปรอทจากทวีปต่างๆทั่วโลกโดยอิงข้อมูลการปลดปล่อยจากกิจกรรมมนุษย์ประจำปี 2558<sup>32</sup>



รูปที่ 2-4 การจำแนกแต่ละกิจกรรมสำคัญของมนุษย์ที่ปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศ  
ในแต่ละทวีป<sup>32</sup>



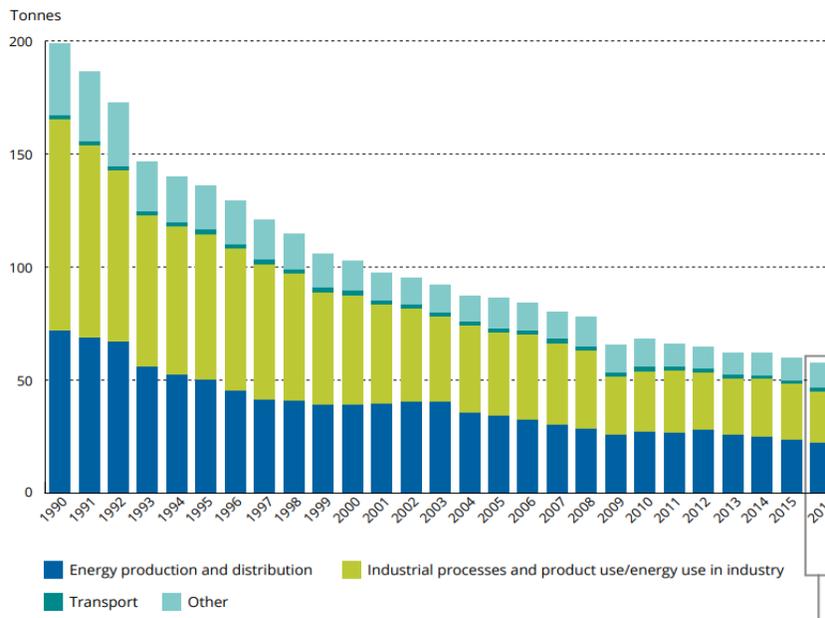
รูปที่ 2-5 ฐานข้อมูลเชิงโต้ตอบ แสดงการปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศรายประเทศ โดยอ้างอิงข้อมูลปี 2553 - 2556 (<https://geovisualist.com/2014/05/09/updated-global-mercury-pollution-viz-and-graphics/>)

สำหรับทวีปอเมริกาเหนือ โรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นตัวการหลักในการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจำนวนมหาศาลในแต่ละปี ซึ่งรวมถึงการปลดปล่อยสารปรอทออกมาด้วย 27.0 ตัน ในปี 2015 คิดเป็นร้อยละ 66.83 ของทั้งทวีป ซึ่งมากกว่าแหล่งปลดปล่อยปรอทลำดับ 2 คืออุตสาหกรรมอย่างมีนัยสำคัญที่ 7.63 ตัน ในปี 2558 คิดเป็นร้อยละ 18.89 ของทั้งทวีป<sup>32</sup> สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกาเอง จากข้อมูลในปี 2553 โรงไฟฟ้าถ่านหินปลดปล่อยมลพิษปรอทออกสู่บรรยากาศ 29.9 ตันคิดเป็นสัดส่วนถึง 2 ใน 3 ของการปล่อยทั้งหมด สอดคล้องกับข้อมูลของทั้งทวีปที่ว่าโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นตัวการปลดปล่อยปรอทเข้าสู่ชั้นบรรยากาศปริมาณที่มากกว่าอุตสาหกรรมอื่น ๆ โรงไฟฟ้าถ่านหินบิกบราวน์ และเหมืองถ่านหินลิคไนต์ในเมืองแฟร์ฟิลด์ปลดปล่อยมลพิษปรอทกว่า 0.7 ตัน ในปี 2553 รัฐเท็กซัสเป็นรัฐที่ปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ นอกจากนี้ 5 บริษัทในสหรัฐอเมริกาปลดปล่อยปรอทมากกว่าหนึ่งในสามของการปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าทั้งหมดในปี 2553 โดยบริษัทอเมริกัน อิเล็กทริก พาวเวอร์ (American Electric Power) ได้ปล่อยสารปรอทออกมากถึง 2.8 ตัน<sup>33</sup>

ในทำนองเดียวกันกับทวีปอเมริกาเหนือ จากข้อมูลในปี 2558 แหล่งปลดปล่อยปรอทสูงสุดในทวีปยุโรปคือโรงไฟฟ้าถ่านหินโดยปลดปล่อยปรอท 46.5 ตัน คิดเป็นร้อยละ 60.23 ของทั้งทวีป ซึ่งมากกว่าการปลดปล่อยอันดับที่ 2 อย่างโรงงานอุตสาหกรรมที่ 22

ต้นต่อปี คิดเป็นร้อยละ 28.50 ของทั้งทวีป อย่างมีนัยสำคัญ<sup>32</sup> โปแลนด์เป็นประเทศที่มีการปล่อยปรอทออกสู่ชั้นบรรยากาศมากที่สุดในทวีปยุโรป ซึ่งอยู่ระหว่าง 10-20 ตันในแต่ละปี ซึ่งการปลดปล่อยปรอทออกสู่ชั้นบรรยากาศหลัก ๆ ของโปแลนด์มาจากการเผาไหม้ถ่านหิน เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อน ในปี 2556 ประเทศโปแลนด์ผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนด้วยการเผาไหม้ถ่านหินซับบิทูมินัสประมาณ 35 ล้านตันและลิกไนต์ประมาณ 62 ล้านตัน

Trend in EU mercury emissions to air, 1990-2016



รูปที่ 2-6 อัตราการปล่อยปรอทของกลุ่มประเทศ EU<sup>34</sup>

สำหรับประเทศจีน ถ่านหินมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม ถ่านหินในประเทศจีนโดยเฉลี่ยมีปริมาณสารปรอทอยู่ที่โลกรั่มละ 144 ไมโครกรัม ซึ่งปริมาณสารจะแตกต่างกันในโรงไฟฟ้าแต่ละแห่ง โดยจะมีปรอทอยู่ในช่วงกิโลกรั่มละ 10 ถึง 385 ไมโครกรัม จากการคาดการณ์ปริมาณการปล่อยสารปรอทรายปีจากการเผาไหม้ถ่านหินของประเทศจีนอยู่ที่ 575.20 ตันต่อปี ถูกประเมินว่าเป็นประเทศที่ปลดปล่อยสารปรอทจากกิจกรรมมนุษย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลกเพราะนอกจากถ่านหินจะถูกใช้ในอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าแล้ว ถ่านหินยังถูกใช้ในครัวเรือนในแถบชนบท เนื่องจากถ่านอัดจากถ่านหินมีราคาที่ถูกกว่าถ่านจากไม้ แต่ก็มี การปล่อยมลพิษทางอากาศที่สูงกว่าเช่นกัน โดยงานศึกษาการใช้ถ่านหินภายในครัวเรือนพบแนวโน้มระดับของมลพิษทางอากาศที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นซัลเฟอร์ (Sulfur) สารหนู (Arsenic) ฟลูออรีน (Fluorine) และปรอท (Mercury) ในช่วงปี 2534 ถึงปี 2558 มีความสอดคล้องกับปริมาณการใช้ถ่านหินใน

ครัวเรือนที่เพิ่มขึ้น โดยในปี 2558 การปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้ถ่านหินในครัวเรือนมี ปริมาณซัลเฟอร์ 0.88 ล้านตัน สารหนู 213.28 ตัน ฟลูออรีน 11,618.73 ตัน และปรอท 15.89 ตัน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงการปลดปล่อยมลพิษที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในแถบ ชนบท นับตั้งแต่ปี 2545 และมีปริมาณรวมที่มากกว่าการปล่อยในเมืองถึง 5 เท่าในปี 2558<sup>35</sup>

สำหรับประเทศอินเดียที่กำลังเติบโตอย่างรวดเร็วทั้งในแง่ของการเพิ่มขึ้นของ ประชากร (ปัจจุบันมีจำนวนประชากรมากกว่าหนึ่งพันล้านคนและยังคงเพิ่มขึ้นอย่าง ต่อเนื่อง) ในแง่ของเศรษฐกิจและการผลิตไฟฟ้า (Stationary Combustion) จึงเป็นแหล่ง ปล่อยมลพิษที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาคืออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จากงานศึกษาของ Mukherjee และคณะ ในปี 2553 พบว่าในปี 2547 ประเทศอินเดียปล่อยมลพิษปรอท รวมถึง 222–310 ตันต่อปี ซึ่งสูงกว่าที่ AMAP/UNEP คาดการณ์ไว้เล็กน้อย<sup>36</sup> ทั้งนี้ เนื่องจากในปี 2558 ประเทศอินเดียใช้ถ่านหินเป็นลำดับที่ 4 ของโลก โดยสูงถึง 790 ตัน ต่อปี และอาจจะเป็นประเทศที่ใช้ถ่านหินมากที่สุดในโลกในปี 2563

สำหรับประเทศไทย จากข้อมูลการประมาณการระหว่างปี 2553 ถึง 2556 พบว่ามี การปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศประมาณ 14.86 ตันต่อปี โดยกิจกรรมที่ปล่อย ปรอทมากที่สุดคือการกลั่นน้ำมันที่ปล่อยปรอทประมาณ 6.56 ตันต่อปี ตามมาด้วย โรงไฟฟ้าถ่านหินที่ปล่อยปรอทประมาณ 3.10 ตันต่อปี ในทำนองเดียวกันโดยอ้างอิง บัญชีการปล่อยมลพิษอากาศ (ปี 2548) ของโครงการ Arctic Monitoring and Assessment Programme หรือ AMAP (2008) พบว่าประเทศไทยมีแหล่งการปล่อยสาร ปรอทที่ใหญ่ที่สุดมาจากการเผาไหม้ถ่านหินในเป็นเชื้อเพลิง เช่น โรงไฟฟ้า (6,083.5 กิโลกรัมต่อปี หรือร้อยละ 60 ของการปล่อยทั้งหมด) อีกทั้งการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอีก แหล่งการปล่อยที่สำคัญ (3,032 กิโลกรัมต่อปี หรือร้อยละ 30 ของการปล่อยทั้งหมด) ในขณะที่ในปี 2551 ประเทศไทยผลิตถ่านหินราว ๆ 18 – 19 ตันต่อปี และมีความต้องการ ใช้ภายในประเทศอยู่ที่ 32 – 36 ตัน ปัจจุบันการผลิตกระแสไฟฟ้าร้อยละ 70 มาจาก เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ เป็นหลักและจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำที่มีสัดส่วนเพียง ร้อยละ 12.6 และร้อยละ 8.2 มาจากถ่านหินนำเข้า สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมผลิต ปูนซีเมนต์มีส่วนสำคัญในการปล่อยสารปรอท ถึงแม้ว่าโรงปูนหลายแห่งจะใช้น้ำมันเป็น เชื้อเพลิงเป็นสัดส่วนหลักที่มากกว่าถ่านหินก็ตาม การผลิตปูนซีเมนต์ในปี 2549 มีการ ปล่อยปรอทอยู่ที่ 39.4 ตัน และการผลิตปูนเม็ด หรือคลิงเกอร์มีค่าการปล่อยอยู่ที่ 40.8 ตัน จากการคาดการณ์การของโครงการ AMAP (2008) พบว่า การปล่อยสารปรอทจาก ระบบเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าและการผลิตปูนซีเมนต์จะนำไปสู่การปล่อยสารปรอทสู่ บรรยากาศรวมเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 43 ภายในปี 2563<sup>37</sup>

## 2.3 ความเสี่ยงต่อพิษปรอทของนานาประเทศทั่วโลก

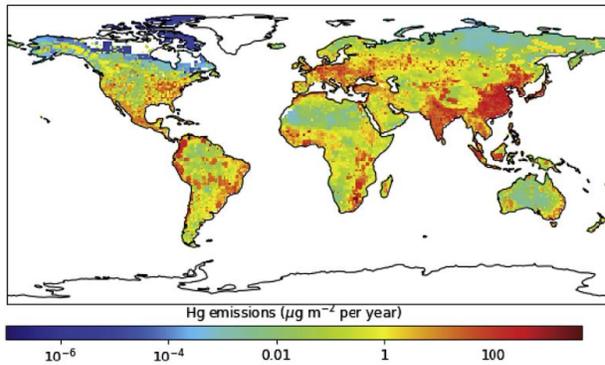
เกือบทุกประเทศทั่วโลกปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศจากกิจกรรมของมนุษย์มากน้อยต่างกัน คำถามคือประเทศต่าง ๆ เหล่านั้นเสี่ยงต่อพิษของปรอทที่ตกสะสมสู่ระบบนิเวศและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารมากน้อยแตกต่างกันอย่างไร แล้วประเทศไทยเองมีความเสี่ยงมากน้อยแค่ไหน หลากหลายงานวิจัยทำแบบจำลองการปลดปล่อยและฟุ้งกระจายของปรอทเพื่อหาคำตอบในประเด็นนี้อันจะนำมาสู่ความเข้าใจและการวางนโยบายในระดับโลกเพื่อการลดผลกระทบจากปรอทแก่มวลมนุษยชาติดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

รูปที่ 2-7 แสดงการปลดปล่อยปรอทในปี 2553 ของนานาประเทศ (รูป A) และความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศในแต่ละประเทศในปี 2553 (รูป C) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่สำคัญคือการวิเคราะห์การรับสัมผัสปรอทที่เพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยปรอทที่เพิ่มขึ้นในแต่ละประเทศซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากการพิจารณาการปลดปล่อยปรอทที่เพิ่มขึ้นในปี 2558 ในแต่ละประเทศเมื่อเทียบกับปี 2553 (รูป B) พร้อมกับความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศในแต่ละประเทศปี 2558 เมื่อเทียบกับปี 2553 (รูป D)<sup>38</sup> จากรูป B จะเห็นได้ว่าประเทศที่ปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมมนุษย์เพิ่มขึ้นคือประเทศจีน อินเดีย รวมถึงประเทศไทยด้วย ในขณะที่ประเทศที่ปลดปล่อยปรอทลดลงคือหลายประเทศในทวีปยุโรปและประเทศแคนาดา แม้ความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศในบางบริเวณของประเทศจีนและประเทศอินเดียจะเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับบริเวณที่ปลดปล่อยปรอทเพิ่มขึ้น แต่ก็มีหลายบริเวณทั้งในประเทศจีนและประเทศอื่น ๆ รวมถึงประเทศแคนาดาที่ไม่มีการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมมนุษย์เพิ่มขึ้นแต่กลับมีความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันสำหรับประเทศไทย แม้บางบริเวณจะไม่ได้ปลดปล่อยปรอทเพิ่มจากปี 2553 แต่ก็ได้รับผลกระทบเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญทั่วทั้งประเทศ แสดงให้เห็นว่าปรอทเป็นมลพิษข้ามพรมแดนที่แพร่กระจายวงเวียนในบรรยากาศโลกและตกสะสมในบริเวณต่าง ๆ ได้ แม้ว่าชุมชนบริเวณนั้น ๆ ไม่ได้มีส่วนในการปลดปล่อยปรอทเลยก็ตาม นอกจากนื่องานวิจัยของ Zhang และคณะในปี 2563 สรุปว่าหากแต่ละประเทศยังปลดปล่อยปรอทเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มที่เป็นอยู่ในปัจจุบันจะเกิดการตกสะสมของปรอทจากบรรยากาศลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำทำให้เกิดการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมและห่วงโซ่อาหารเป็นอย่างมากในปี 2593 ดังแสดงในรูปที่ 2-8

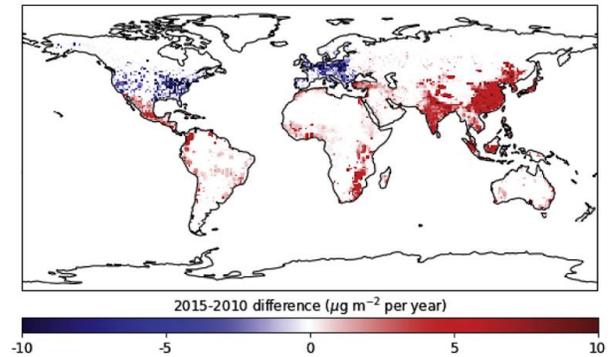
ท้ายที่สุดความเสี่ยงจากการตกสะสมของปรอทคือการปนเปื้อนของปรอทในห่วงโซ่อาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งปลาที่มนุษย์บริโภค ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการสะสมในปลาและการบริโภคโดยมนุษย์นั้นยังมีปัจจัยสำคัญนอกเหนือจากปริมาณการตกสะสม เช่น อุณหภูมิ (ด้วยบริเวณที่มีอากาศอุ่นหรือร้อนจะเกิดกระบวนการ Methylation ได้ไวกว่าบริเวณที่อากาศเย็น) และ บริเวณที่มีความหลากหลายทางชีวภาพมากจะมีความเสี่ยงต่อการสะสมในห่วงโซ่อาหารมากกว่า รูปที่ 2-9 แสดงการคำนวณดัชนีความเสี่ยงต่อการ

ปนเปื้อนปรอทในปลาซึ่งคำนึงถึงการตกสะสมของปรอทในบริเวณดังกล่าว อุณหภูมิ และความหลากหลายทางชีวภาพ จะเห็นได้ว่าแต่ละประเทศมีความเสี่ยงไม่เท่ากัน แต่ประเทศไทยอยู่ในกลุ่มประเทศที่ได้รับผลกระทบปานกลางถึงสูง ทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยต้องร่วมกับนานาชาติประเทศในการลดการปลดปล่อยปรอทและลดการปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร

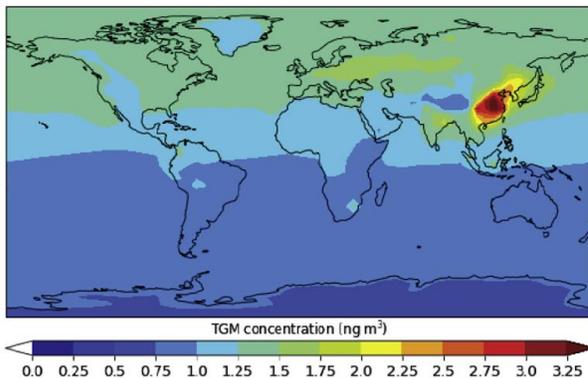
(A) 2010 Global Anthropogenic Emissions



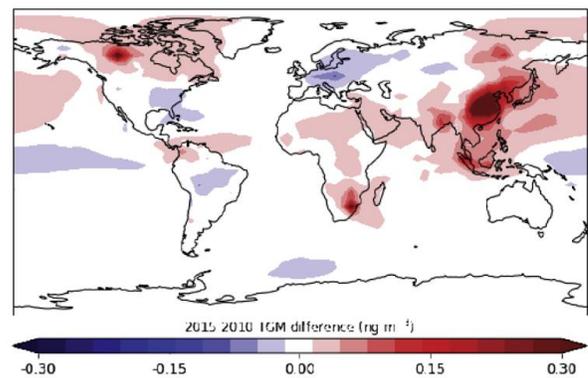
(B) 2015-2010 Global Anthropogenic Emissions



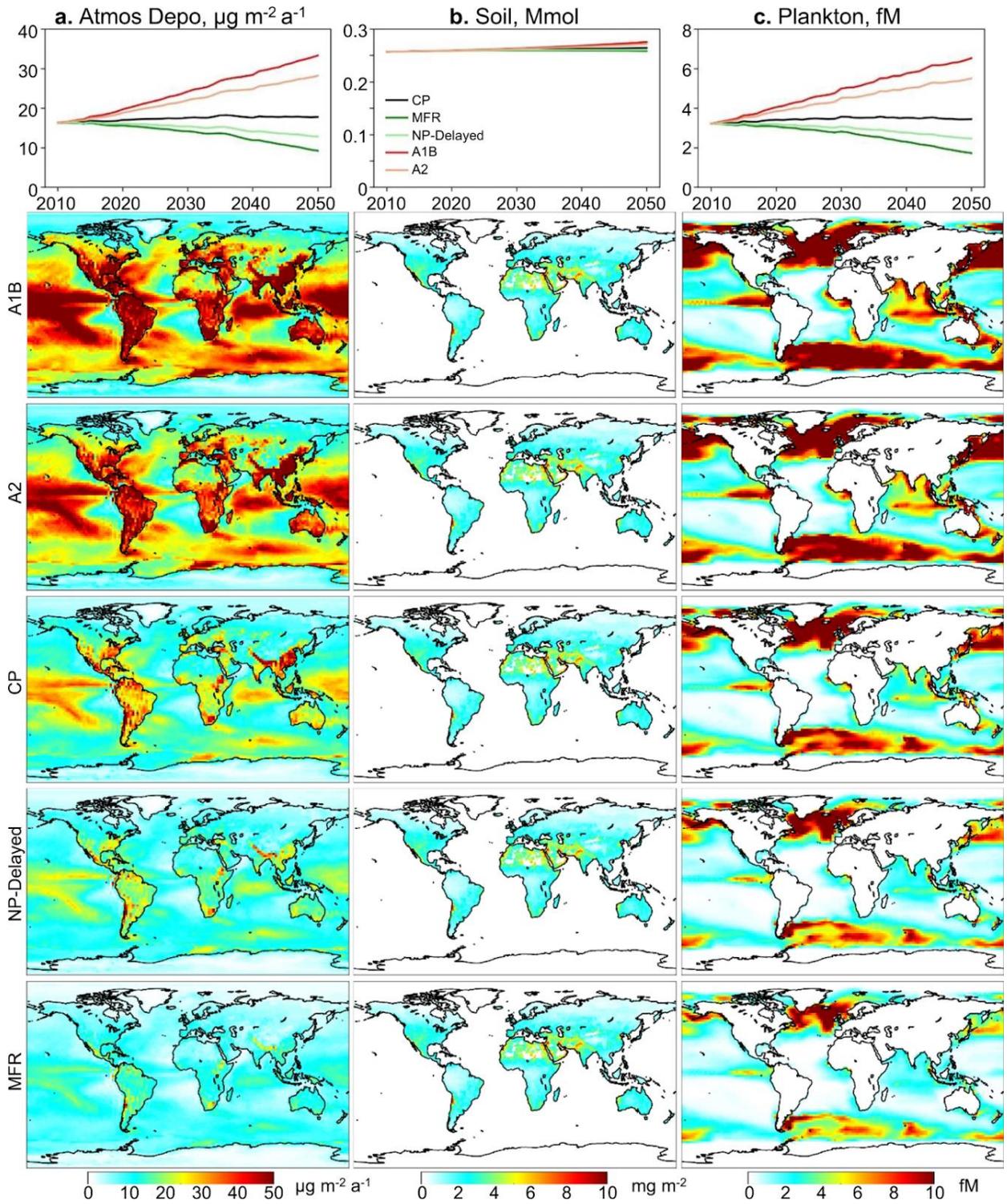
(C) 2010 TGM Surface Concentrations

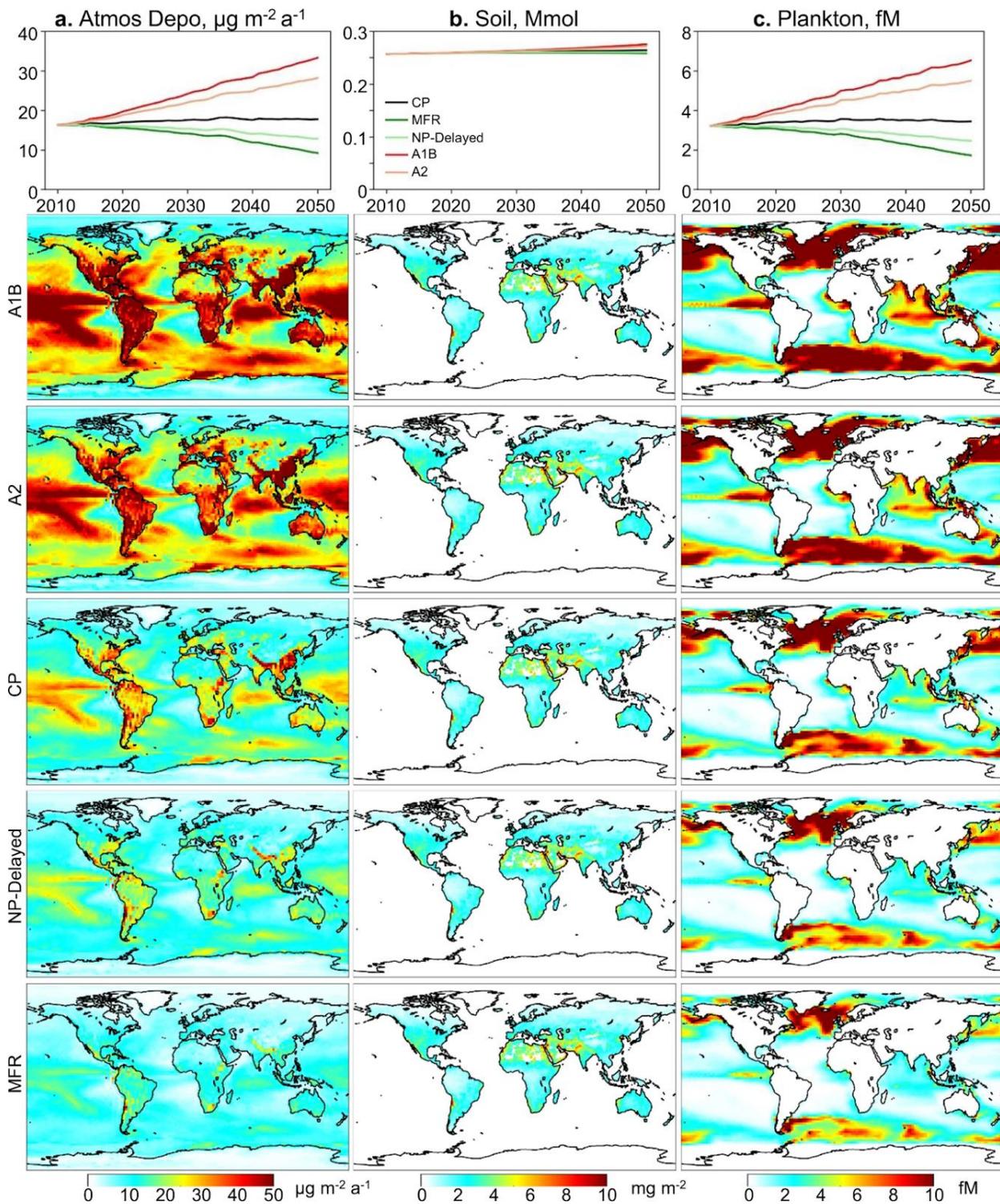


(D) 2015-2010 TGM Surface Concentrations

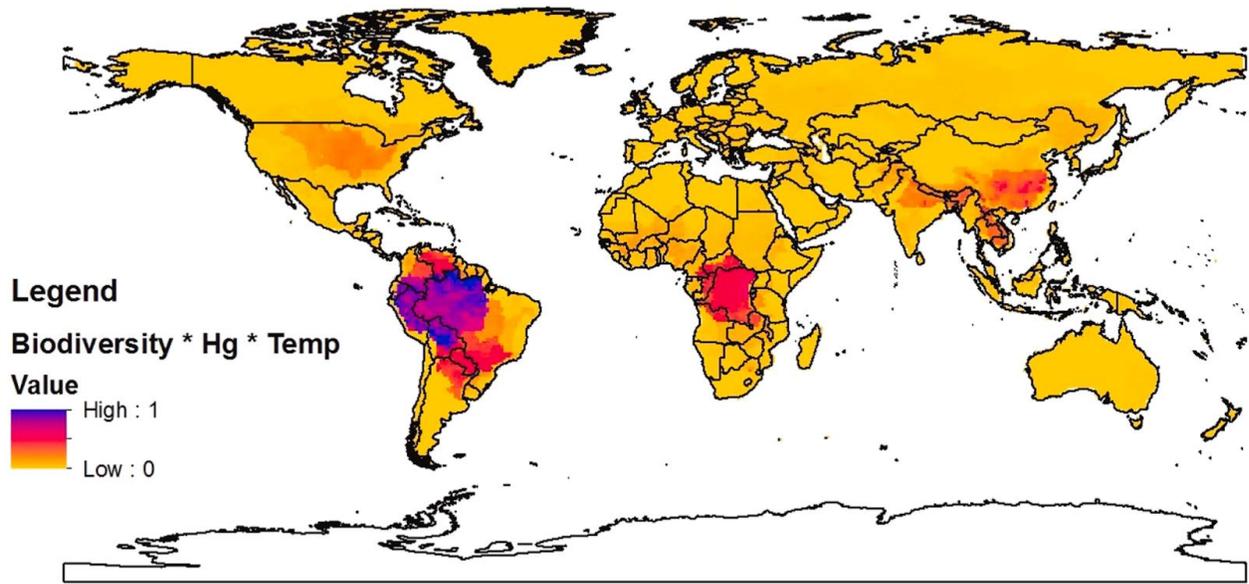


รูปที่ 2-7 การปลดปล่อยปรอทในปี 2553 ของนานาชาติประเทศ (รูป A) และความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศในแต่ละประเทศปี 2553 (รูป C) การปลดปล่อยปรอทที่เพิ่มขึ้นในปี 2558 ในแต่ละประเทศเมื่อเทียบกับปี 2553 (รูป B) พร้อมกับความเข้มข้นของปรอทในบรรยากาศในแต่ละประเทศปี 2558 เมื่อเทียบกับปี 2553 (รูป D)





รูปที่ 2-8 แบบจำลอง (a) การตกสะสมของปรอทจากบรรยากาศ, (b) การปนเปื้อนปรอทในดิน และ (c) การปนเปื้อนปรอทในแพลงก์ตอนในปี 2593<sup>39</sup>



รูปที่ 2-9 ดัชนีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนปรอทในปลาซึ่งคำนึงถึงการตกสะสมขอปรอทในบริเวณดังกล่าว อุณหภูมิ และความหลากหลายทางชีวภาพ<sup>40</sup>

## บทที่ 3 ต้นทุนการภายนอกของพิษปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน

### 3.1 ถ่านหินและปรอท

จากบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าถ่านหินที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมมนุษย์อันดับ 1 หรือ 2 ในหลายทวีปและหลายประเทศทั่วโลก เช่น ทวีปเอเชียตะวันออกและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทวีปอเมริกาเหนือ ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศโปแลนด์ ประเทศจีน ประเทศอินเดีย รวมถึงประเทศไทย แต่เพราะเหตุใดถ่านหินจึงมีปรอทสูง? และเพราะเหตุใดโรงไฟฟ้าถ่านหินจึงปลดปล่อยปรอทปริมาณมากสู่บรรยากาศ?

จะเข้าใจที่มาของปรอทในถ่านหินได้ อันดับแรกต้องเข้าใจธรณีวิทยาในการเกิดถ่านหินเสียก่อน<sup>41</sup> ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการแปรสภาพทางเคมีและกายภาพของซากพืชใต้พื้นพิภพ โดยซากพืชมักจะถูกพัดพามาตกตะกอนทับถมกันในหนองน้ำที่สภาพทางอุทกวิทยาเอื้อต่อการตกตะกอน โดยทั่วไปซากพืชจะถูกจุลชีพย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อมีซากพืชทับถมกันเป็นจำนวนมากจนจุลชีพไม่สามารถย่อยสลายได้ทันเนื่องจากใช้ออกซิเจนสำหรับการย่อยสลายไปจนหมด ทำให้จุลชีพต้องทำการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งมีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าแบบใช้ออกซิเจนมาก จึงทำให้ซากพืชตกตะกอนทับถมกันกับซากพืชที่ถูกย่อยสลายแล้วบางส่วน จนเกิดเป็นแอ่งของซากพืช เมื่อเวลาผ่านไปอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางธรณี (รูปที่ 3-1) เช่น การพัดพาของตะกอนดินมาตกตะกอนทับถมบริเวณที่มีซากพืชทับถมกันอยู่ หรือการยุบตัว และพังทลายของดินทำให้เกิดชั้นดิน ชั้นหินหนาปิดทับแอ่งซากพืชที่ตกตะกอนอยู่ก่อนหน้า และการก่อตัวเป็นชั้น ๆ ของชั้นดินและชั้นหินนี้อาจก่อให้เกิดแรงดันจากการกดทับรวมทั้งได้รับความร้อนจากภายในโลกทำให้ซากพืชเปลี่ยนเป็นพีท (Peat) เรียกว่ากระบวนการ Peatification (รูปที่ 3-1) (ที่เวลานานพอ เช่น ประมาณ 5,000 ปี) ต่อมาเมื่อพีทได้รับความร้อนและความดันที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับการตกตะกอนของดินและหินจะทำให้พีทแปรสภาพไปเป็นถ่านหิน เรียกว่ากระบวนการแปรสภาพไปเป็นถ่านหิน (Coalification) โดยการแปรสภาพจะเกิดขึ้นเป็นลำดับจากพีทไปเป็นลิกไนต์ (หลายล้านปี) ไปซับบิทูมินัส ไปบิทูมินัส (ในชั้นหินตะกอน) มักเกิดขึ้นที่ความลึกไม่เกิน 6 กิโลเมตรจากผิวโลก และความร้อนไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส ถ้าความลึกและอุณหภูมิมากกว่านี้ บิทูมินัสจะแปรสภาพไปเป็นแอนทราไซต์และแกรไฟต์ในที่สุด (เกิดในชั้นหินแปร ไม่ใช่หินตะกอน)

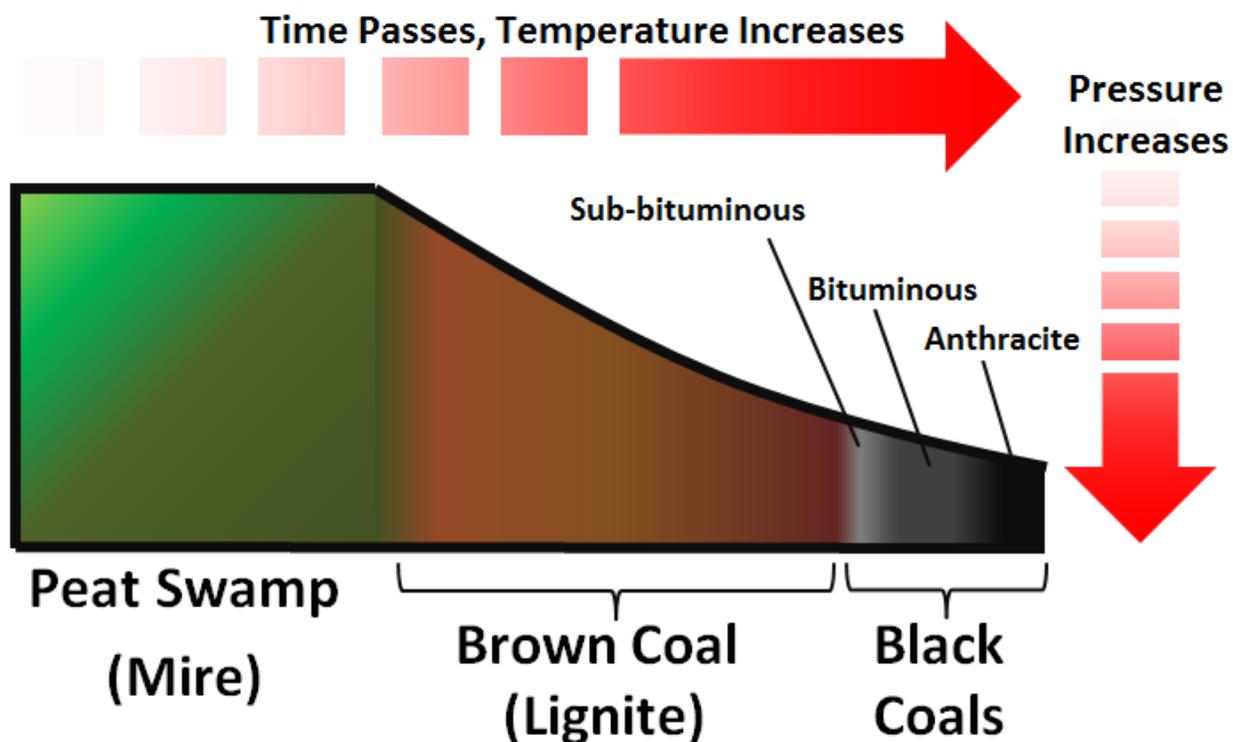
โดยอ้างอิงกระบวนการแปรสภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า ถ่านหินสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท<sup>42</sup> (รูปที่ 3-2)

1) ลิกไนต์ (Lignite) จัดเป็นถ่านหินที่มีค่าชั้นคุณภาพต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินประเภทอื่น ๆ (ให้พลังงาน 4-8 บีทียูต่อปอนด์) มีสีน้ำตาลผิวด้าน มีซากพืชหลงเหลืออยู่เล็กน้อย มีคาร์บอนร้อยละ 60 - 75 มีออกซิเจนค่อนข้างสูง มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 30 - 70 เมื่อติดไฟจะมีควันและเถ้าถ่านปริมาณมาก และมีความชื้นสูง เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้

2) ซับบิทูมินัส (Subbituminous) (ให้พลังงาน 8 - 13 บีทียูต่อปอนด์) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าลิกไนต์ มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ผิวมีลักษณะทั้งด้านและเป็นมัน มีทั้งเนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง มีความชื้นประมาณร้อยละ 25 - 30 มีคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและงานอุตสาหกรรม

3) บิทูมินัส (Bituminous) (ให้พลังงาน 11-15 บีทียูต่อปอนด์) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าซับบิทูมินัส เนื้อแน่น แข็ง มีสีน้ำตาลถึงสีดำสนิท ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาว ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ และเป็นวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงอื่น ๆ

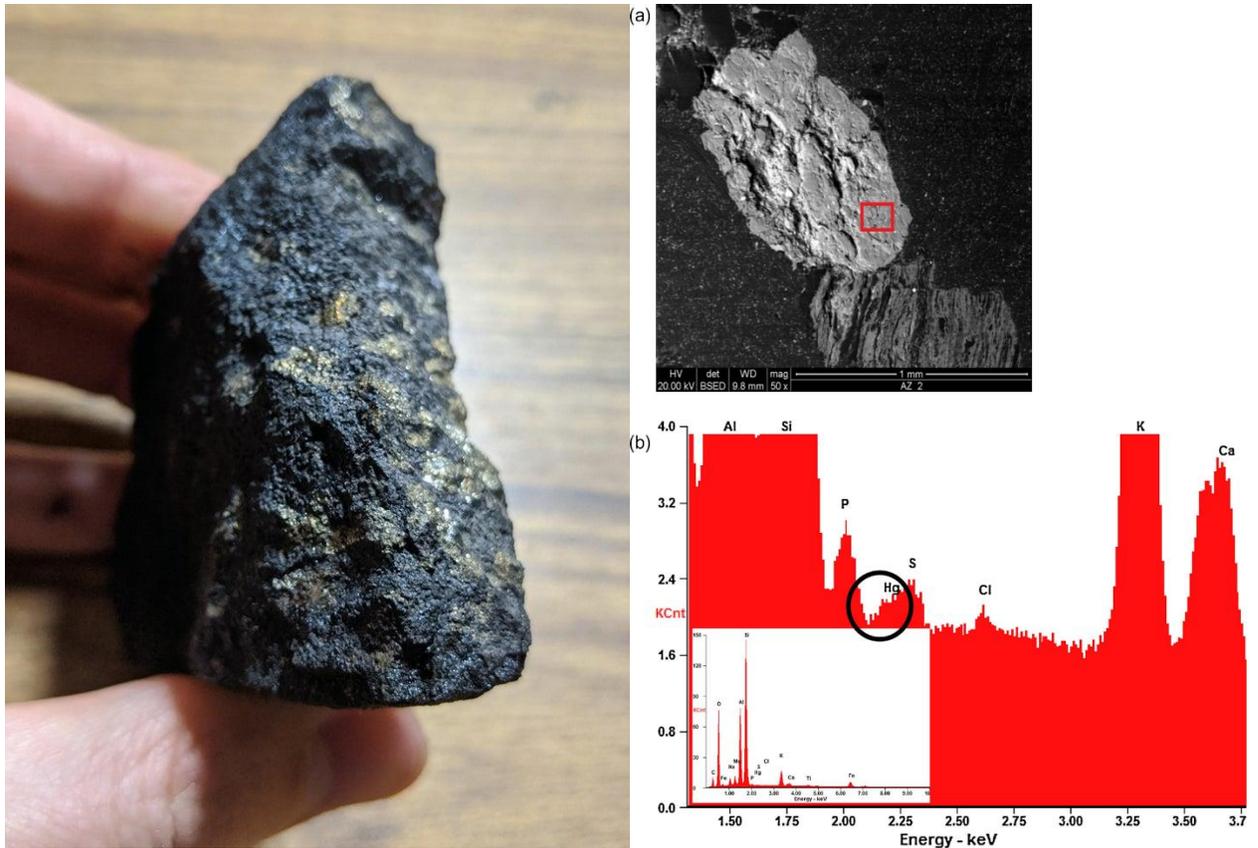
4) แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานที่สุด และเกิดในบริเวณลึก และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าการเกิดถ่านหินประเภทอื่น ๆ มีลักษณะดำเป็นเงา มันวาวมาก มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 90 - 98 ความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 2 - 5 มีค่าความร้อนสูงแต่ติดไฟยาก เมื่อติดไฟเปลวไฟจะเป็นสีน้ำเงิน และไม่มีควัน เหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และเป็นเชื้อเพลิงชั้นดีในการผลิตไฟฟ้าแต่หายากและราคาแพง



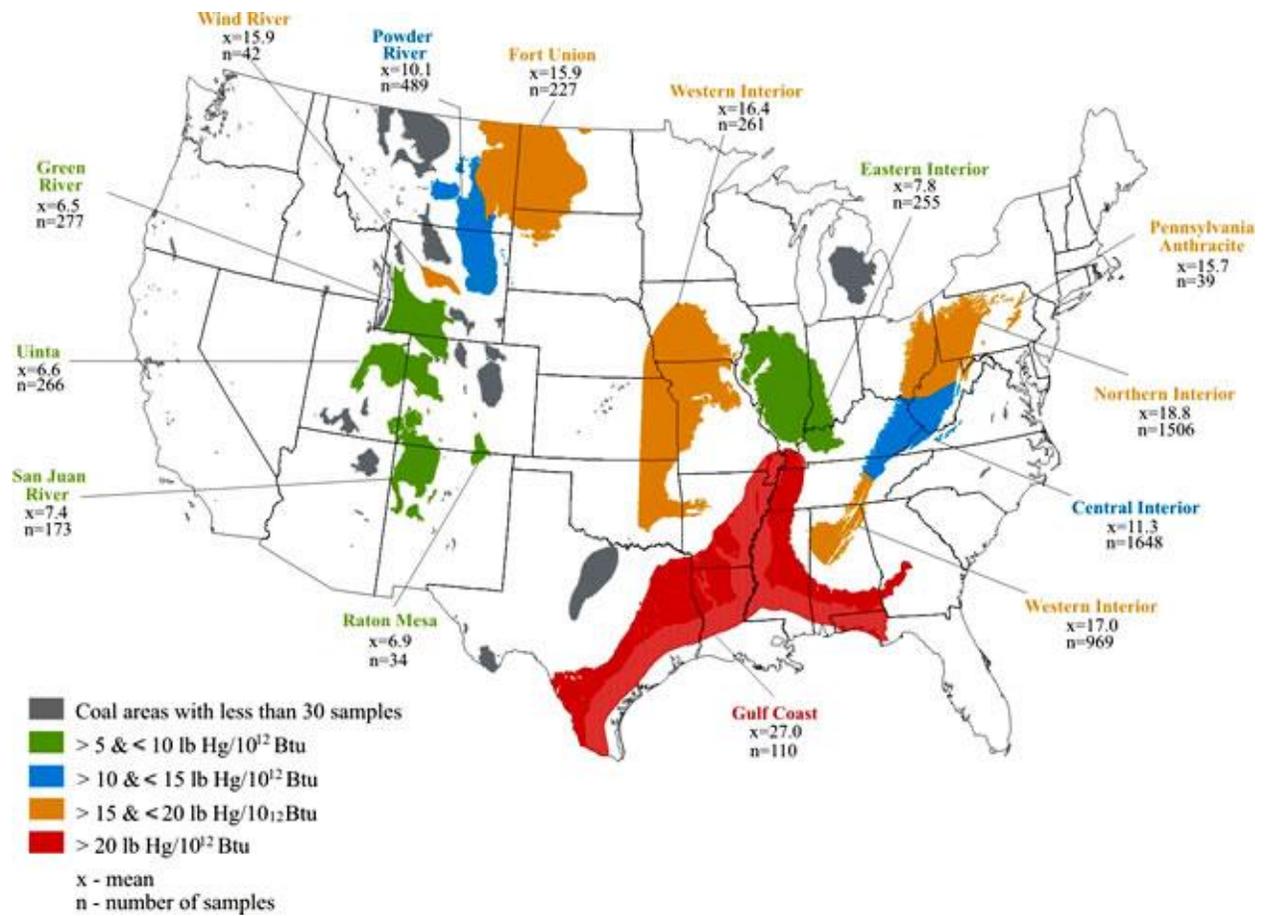
รูปที่ 3-1 การแปรสภาพจากซากพืชสู่ถ่านหิน<sup>42</sup>

อนึ่งแม้ถ่านหินประเภทต่างๆจะเกิดจากการแปรสภาพของซากพืชซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุที่ไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และ ไนโตรเจน (N) และมีธาตุองค์ประกอบรองอย่างกำมะถัน (S) แต่ในช่วงเวลาหลายพันปีถึงหลักล้านปี กระบวนการทางธรณีวิทยาจะทำให้ดิน หิน และแร่ธาตุอื่น ๆ ตกตะกอนร่วมกับซากพืชและสามารถปนเปื้อนอยู่ในถ่านหินที่ก่อกำเนิดใต้ดินได้ซึ่งแร่ที่มักจะตกตะกอนและพบร่วมกับถ่านหินคือแร่ไพไรต์ (Pyrite; FeS) (รูปที่ 3-3) ซึ่งมักจะพบการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตรายต่าง ๆ เช่น ปรอท และสารหนู แม้จะพบในปริมาณไม่มากนักเมื่อเทียบกับธาตุหลัก เช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) แต่ก็พบโลหะหนักในปริมาณสูงมากพอที่จะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่จัดเป็นสารอันตราย (Hazardous Air Pollutants) จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินได้ ทั้งนี้ความเข้มข้นของปรอทในถ่านหินขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีของแหล่งแร่ ปรอทในถ่านหินมีความเข้มข้นเฉลี่ยตั้งแต่ 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 0.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ในขณะที่รูปที่ 3-4 แสดงความแตกต่างของปรอทในถ่านหินที่มาจากแหล่งแร่ต่าง ๆ ในประเทศเดียวกัน (ในตัวอย่างนี้คือประเทศสหรัฐอเมริกา) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 6.5 ถึง 27 ปอนด์ปรอทต่อ  $10^{12}$  บีทียู ทำให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าถ่านหินจะปลดปล่อยปรอทมากหรือน้อยนั้น ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งแร่ที่โรงไฟฟ้านำถ่านหินมาใช้<sup>43</sup> อนึ่งสำหรับประเทศไทยร้อยละ 99 ของถ่านหินที่พบในประเทศเป็นลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัส โดยพบกระจายอยู่ใน

ภาคเหนือ (จังหวัดตาก ลำพูน ลำปาง) และภาคใต้ (จังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ และสงขลา) แต่ไม่มีการรายงานความเข้มข้นของปรอทจากเหมืองถ่านหินในประเทศไทย



รูปที่ 3-3 (a) แร่ไพไรต์ที่มักพบในถ่านหิน โดยไพไรต์มักจะปนเปื้อนโลหะและกึ่งโลหะพิษ เช่น ปรอท สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และ (b) การวิเคราะห์ SEM-EDS แสดงปรอทในถ่านหิน<sup>44</sup>



รูปที่ 3-4 ความเข้มข้นของปรอท (x) ในถ่านหินจากแหล่งแร่ต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา<sup>43</sup>

ตารางที่ 3-1 โลหะหนักและกึ่งโลหะในถ่านหินจากแหล่งแร่ในประเทศต่าง ๆ

โลหะหนักและกึ่งโลหะ	เหมืองหงสา ประเทศลาว	ประเทศสหรัฐอเมริกา	เหมืองแม่เมาะ ประเทศไทย	ประเทศอินโดนีเซีย	ประเทศบราซิล
As	37.13	6.49±10.10	53.96±17.61	4	239-328
Hg	0.41	0.08±0.07	N.R.	0.1	N.R.
Cd	1.33	0.12±0.15	N.R.	1	10-25
Cr	49.67	11.48±6.85	14.10±4.19	N.R.	57-75
Pb	52.31	N.R.	5.06±1.40	8	50-107

เมื่อเข้าใจที่มาของปรอทในถ่านหินผ่านกระบวนการทางธรณีเคมีแล้ว สิ่งต่อมาที่ต้องทำความเข้าใจคือการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินและการปลดปล่อยปรอทจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้าถ่านหินคือโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ถ่านหินถูกเผาเพื่อปลดปล่อยความร้อนซึ่งจะถูกนำไปต้มน้ำให้เป็นไอน้ำ ไอน้ำนี้เป็นแหล่งพลังงานจลน์ซึ่งจะไปหมุนกังหันไอน้ำทำให้เกิดการหมุนขดลวดทองแดงตัดสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ผลผลิตที่ต้องการจากโรงไฟฟ้าถ่านหินจริง ๆ คือกระแสไฟฟ้าเท่านั้น อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตก่อให้เกิดผลอันไม่พึงประสงค์ เช่น มลพิษทางอากาศที่ถูกปล่อยออกมาทางปลายปล่องของเตาเผาที่ประกอบด้วยมลสารหลายชนิด เช่น CO<sub>2</sub> ซึ่งก่อให้เกิดสภาวะ

การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ทำให้เกิดฝนกรดและการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ที่สามารถก่อให้เกิดโรคทางเดินหายใจไปจนถึงมะเร็ง โลหะ และกึ่งโลหะพิษต่าง ๆ ที่ส่วนใหญ่เกาะติดอยู่กับ PM2.5 และปรอทที่เป็นมลพิษข้ามพรมแดนอันเป็นจุดสนใจของรายงานนี้

ทั้งนี้กฎหมายควบคุมการปลดปล่อยมลพิษอากาศในหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย (ตารางที่ 3-2) กำหนดค่าที่ยอมรับได้ของมลพิษ เช่น PM2.5 SO<sub>2</sub> และ NO<sub>2</sub> ทำให้มีระบบการบำบัด PM2.5 เช่น Electrostatic Precipitator (ESP) ระบบการบำบัด SO<sub>2</sub> เช่น Flue Gas Desulfurization (FGD) และระบบบำบัด NO<sub>2</sub> เช่น Selective Catalytic Reduction (SCR) จึงทำให้โรงไฟฟ้าถ่านหินที่มักติดตั้งระบบบำบัดทั้ง 3 ประเภทนี้เพื่อลดการปลดปล่อยมลพิษเหล่านี้จากปลายปล่อง อย่างไรก็ตามหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย ไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานปลายปล่องของปรอทโรงไฟฟ้าถ่านหิน ทำให้ไม่มีการติดตั้งระบบที่สามารถกำจัดปรอทออกได้ถึงร้อยละ 91 ถึง 98 เช่น ระบบ Activated Carbon Injection (ACI) โรงไฟฟ้าที่ติดตั้งทั้ง 3 ระบบ FGD SCR และ ESP แต่ไม่ได้ติดตั้ง ACI ที่จะสามารถลดการปลดปล่อยปรอทได้เพียงร้อยละ 70 หมายความว่าปรอทอีกร้อยละ 30 จะถูกปลดปล่อยจากการเผาถ่านหินสู่บรรยากาศ โปรดสังเกตว่าปรอทมีความพิเศษคือเป็นโลหะหนักชนิดเดียวที่ถูกปลดปล่อยในรูปของไอปรอท (Hg<sup>0</sup> และ Hg<sup>2+</sup>) มากกว่ารูปอนุภาคฝุ่น (Hg<sup>p</sup>) จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า ในขณะที่โลหะหรือกึ่งโลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว สารหนู หรือโครเมียมจะถูกปลดปล่อยออกมากับอนุภาคทำให้ ESP สามารถบำบัดโลหะและกึ่งโลหะเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพไปพร้อมกับการบำบัด PM2.5 (มากกว่าร้อยละ 99)

ตารางที่ 3-2 ค่ามาตรฐานควบคุมการปลดปล่อยมลพิษจากปลายปล่องโรงไฟฟ้าถ่านหิน

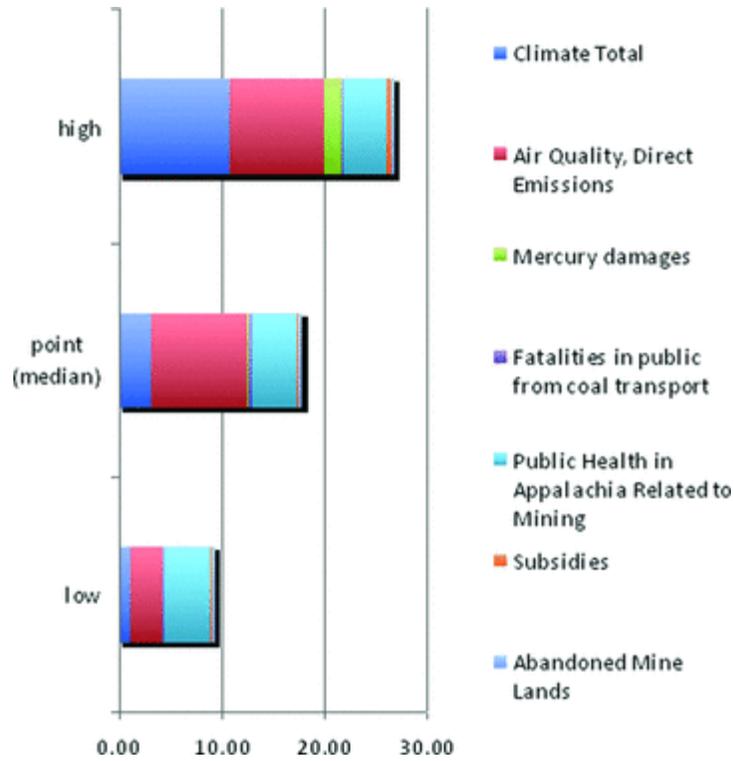
ค่ามาตรฐานปลายปล่อง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						
มลพิษ	ไทย	มาเลเซีย	ญี่ปุ่น	อเมริกา	จีน	ยุโรป
CO <sub>2</sub>	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	1,400 lb CO <sub>2</sub> /MWh-g	ไม่มี	ไม่มี
SO <sub>2</sub>	471.2	500	30-35 (ave)*	160	100	200
NO <sub>x</sub>	378.8	500	60-70 (ave)*	117	100	200
Particulate	80	50	4-5 (best)*	22.5	30	50
CO	ไม่มี	200	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
Acid Gas (HF, HCl)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	มี	ไม่มี	ไม่มี
Hg <sup>0</sup> (gas)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	0.001	0.03	0.03
Metals	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	มี	ไม่มี	ไม่มี

โดยสรุปจากทั้งเหตุผลทางธรณีการเกิดการปนเปื้อนปรอทในถ่านหินและการนำถ่านหินมาผลิตไฟฟ้าที่ไม่ได้มีมาตรฐานการปลดปล่อยปรอทจากปลายปล่องในหลายประเทศดังที่แสดงข้างต้นนี้เอง ทำให้โรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นแหล่งปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศสูงสุดในอันดับที่ 1 หรือ 2 ในหลายประเทศและทวีป และในภาพรวมของโลกถือเป็นแหล่งปลดปล่อยสูงสุดอันดับที่ 2

### 3.2 ถ่านหิน พรอท และต้นทุนภาวะภายนอก

การปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศจากโรงไฟฟ้าถ่านหินทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพดังที่แสดงในบทที่ 1 อันเป็นหนึ่งในต้นทุนภาวะภายนอก (External Cost) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ผลิตสู่สังคม ทั้งนี้ต้นทุนภาวะภายนอกมีนิยามคือต้นทุนอันเกิดจากการผลิต เช่น ผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่ผู้ผลิตไม่ได้จ่ายแต่กระจายภาระการจ่ายออกไปสู่ประชาชนกลุ่มหนึ่ง หรือ สังคมในภาพรวม ซึ่งประชาชนกลุ่มดังกล่าวหรือสังคมในภาพรวมอาจจะไม่รู้ว่าถูกผลกระทบมาให้จ่าย หรืออาจรู้ตัวว่าต้องจ่ายแต่ก็ไม่เต็มใจจ่าย ยกตัวอย่างเช่นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาถ่านหินเพื่อการผลิตไฟฟ้าทำให้เกิดภาวะโลกรวนส่งผลกระทบต่อสังคมทั้งโลกในภาพรวม ถือเป็นต้นทุนภาวะภายนอกด้วยภาวะโลกรวนที่เกิดขึ้นเพราะโรงไฟฟ้าไม่ได้จ่ายค่าใช้จ่ายในการจัดการกับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการทางวิศวกรรม เช่น การจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ใต้พิภพ (Carbon Capture and Storage) ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศและเร่งภาวะโลกรวนอันเกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของคนอื่น ๆ ในสังคม ความเสียหายนี้จะไม่เกิดหากโรงไฟฟ้าจ่ายต้นทุนในการจัดการก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตนเองแทนที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม กำไรที่ได้จากการประหยัดต้นทุนนี้ถือเป็นผลกระทบสู่สังคม เป็นการเอาเปรียบสังคมแม้ว่าจะถูกกฎหมายก็ตาม

ทั้งนี้ต้นทุนภาวะภายนอกจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และภาวะโลกรวนเป็นแค่ตัวอย่างหนึ่งของต้นทุนภาวะภายนอก ยังมีต้นทุนภาวะภายนอกหลัก ๆ จากการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน เช่น ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดจากการปลดปล่อยมลพิษอากาศอื่น ๆ (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM10 และ PM2.5) มลพิษที่เกิดขึ้นจากการทำเหมืองถ่านหิน และความเสียหายต่อสุขภาพและโอกาสในชีวิตจากปรอทดังแสดงในรูปที่ 3-5 งานวิจัยโดย Epstein และ คณะในปี 2011 ประเมินว่าในขณะที่ราคาค่าไฟฟ้าจากถ่านหินในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 0.06-0.13 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) แต่มีค่าใช้จ่ายที่ถูกผลกระทบออกไปจากอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินมีค่าสูงถึง 345.3 พันล้านเหรียญสหรัฐ (อยู่ในช่วง 175.2 ถึง 523.3 พันล้านเหรียญสหรัฐ) คิดเป็นราคาที่ถูกลักออกไปคือ 0.18 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (ในช่วง 0.094 ถึง 0.27 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) แสดงให้เห็นว่าราคาค่าไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินที่ว่าต่ำนั้นเกิดการการผลกระทบต้นทุนที่แท้จริงสู่สังคมนั่นเอง



รูปที่ 3-5 ต้นทุนภาวะภายนอกจากการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน<sup>45</sup>

ปรอทเป็นหนึ่งในต้นทุนภาวะภายนอกที่สำคัญที่สังคมในภาพรวมกำลังรับภาระนี้ โดยไม่รู้ตัว เช่น การจ่ายค่ารักษาพยาบาลจากการเจ็บป่วยจากปรอทที่ปลดปล่อยออกมา โดยไม่รู้ตัวว่าอาการเจ็บป่วยดังกล่าวเกิดจากปรอท หรือค่าการเสียโอกาสในชีวิตจากความฉลาดทางสติปัญญาที่ตกต่ำ โดยไม่รู้ตัวที่แท้จริงแล้วความฉลาดทางสติปัญญาที่ต่ำนั้นเกิดจากการบริโภคปลาที่ปนเปื้อนปรอทที่ปลดปล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นต้น ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นความฉลาดทางสติปัญญาที่ลดลง<sup>46</sup> หรือ ผลเสียต่อสุขภาพอื่น ๆ ล้วนแล้วแต่เป็นต้นทุนที่มองไม่เห็นแต่เกิดขึ้นจริงและได้รับการยืนยันจากหลากหลายงานวิจัย ดังแสดงตัวอย่างโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

เป็นที่ทราบกันดีว่าช่วงวัยที่ได้รับพิษจากสารปรอทมากที่สุด คือ วัยเด็ก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อพัฒนาการของทารกและเด็กเป็นอย่างมาก<sup>47,48</sup> โดยพบว่าภาวะความเสี่ยงสูงของสมองที่กำลังพัฒนาจากพิษสารปรอทนั้นก็เนื่องจากคุณสมบัติชอบไขมัน (Lipophilic) ของปรอทที่สามารถแทรกซึมผ่านรกและส่งต่อเข้าไปสู่ระบบประสาทส่วนกลางของทารกได้<sup>49</sup> โดยสารปรอทสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงสมองที่ยังไม่ได้พัฒนาอย่างเต็มที่ของทารกในวัยไม่เกินหนึ่งปีได้อย่างง่ายดาย<sup>50</sup> ส่วนใหญ่หญิงตั้งครรภ์ที่ได้รับปรอทมักเกิดจากการ

บริโภคปลาและอาหารทะเลที่ปนเปื้อนสารปรอท ซึ่งการปนเปื้อนนี้มาจากการกระทำของมนุษย์ร้อยละ 70 และจากแหล่งธรรมชาติร้อยละ 30

ผลกระทบต่อพัฒนาการทางสมองของเด็กดังกล่าวถูกศึกษาผ่านงานวิจัยระดับ วิทยา 2 ชั้นที่ตรวจสอบเด็กที่ได้รับสารเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ผ่านมดลูก งานวิจัยชิ้นแรก พบการลดลง 3 หน่วยของแบบทดสอบเชาวน์ปัญญาที่เรียกว่า Wechsler Intelligence Scale for Children-Revise (WISC-R) สำหรับทารกที่มีความเข้มข้นของระดับปรอทใน เลือด  $> 6$  ไมโครกรัมต่อลิตร และยังพบปรอทในเส้นผมผู้เป็นแม่อีกด้วย<sup>51,52</sup> งานวิจัยชิ้นที่ สองศึกษาบนหมู่เกาะแพร์ซึ่งเป็นพื้นที่ของประเทศเดนมาร์กในมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือซึ่งอาศัยอยู่โดยประชากรสแกนดิเนเวีย ได้ติดตามกลุ่มเด็ก ๆ เป็นเวลา 14 ปีและ รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาการทางระบบประสาท 17 กรณีศึกษา รวมทั้งผลกระทบ ของพิษจากสารปรอทที่มีต่อการทำงานของหัวใจและหลอดเลือด นักวิจัยได้พบ ความสัมพันธ์ที่เป็นอันตรายจากการได้รับสารปรอทก่อนคลอดและการพัฒนาการ ทางด้านความจำ สมาธิ ภาษา และการทดสอบการรับรู้ทางสายตา<sup>53</sup> การได้รับพิษจากสาร ปรอทนั้นยังสัมพันธ์กับการทำงานที่ลดลงระบบประสาทซิมพาเทติกและระบบประสาท พาราซิมพาเทติกที่เกี่ยวข้องกับการปรับความแปรปรวนของอัตราการเต้นของหัวใจให้อยู่ ในระดับปานกลางอีกด้วย<sup>54</sup> จากข้อมูลดังกล่าว Axelrad และ คณะ (2007) ได้ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการได้รับสารปรอทก่อนคลอดของมารดาและความฉลาด ทางสติปัญญา (IQ) ของทารกผ่านการวิเคราะห์เชิงบูรณาการของข้อมูลทางด้านระดับ วิทยาดังกล่าว โดยใช้การสร้างแบบจำลองลำดับชั้นแบบเบย์ (Bayesian Hierarchical Model) พบว่า สัมประสิทธิ์การลดลงของ IQ ของทารกจะอยู่ที่  $-0.18$  หน่วย (ค่าประมาณ ความเชื่อมั่นที่ระดับร้อยละ 95;  $-0.378$  ถึง  $-0.009$ ) สำหรับแต่ละหนึ่งต่อล้านส่วนของ ความเข้มข้นของปรอทที่เพิ่มขึ้นในผมของแม่<sup>55</sup>

National Academy of Sciences (NAS) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการ ประเมินงานวิจัยทั้งสองชิ้นนี้และสรุปได้ว่ามีหลักฐานชัดเจนที่บ่งชี้ว่าสารพิษจากปรอท ส่งผลร้ายแรงต่อระบบประสาทของทารกในครรภ์แม้ในระดับความเข้มข้นต่ำ ยิ่งไปกว่านั้น NAS ยังให้ความเห็นว่าการวิจัยทางระดับวิทยาน่าเชื่อถือมากที่สุดคืองานวิจัยในหมู่ เกาะแพร์ NAS เลือกว่าจะใช้ตัวแบบเชิงเส้น Linear Model เพื่อแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างการได้รับสารพิษปรอทและการพัฒนาการทางระบบประสาท และใช้ข้อมูลจาก งานวิจัยหมู่เกาะแพร์ในการแนะนำปริมาณพิษจากสารปรอทที่เหมาะสม NAS พบว่า ความเข้มข้นของพิษจากสารปรอทในเลือดจากสายรกเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพที่สัมพันธ์กับ การได้รับสารพิษในมดลูกมากที่สุด และมีความสัมพันธ์กับผลกระทบต่อระบบประสาท มากที่สุดด้วย (National Research 2000)<sup>56</sup>

ในทำนองเดียวกัน Trasande และ คณะ (2005) ทำการประเมินความเสียหายจากปรอทจากการประมาณการต้นทุนที่เกิดจากพิษของสารปรอทซึ่งส่งผลต่อเศรษฐกิจ สุขภาพ และความมั่นคงของประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิจัยได้ฉายภาพให้เห็นถึงต้นทุนในการควบคุมการปล่อยมลพิษจากโรงไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบผ่านข้อมูลการปนเปื้อนปรอทในเลือดของศูนย์ควบคุมและป้องกันโรค พบว่าในแต่ละปีมีเด็กจำนวน 316,588 ถึง 637,233 คน มีระดับปรอทในเลือดมากกว่า 5.8 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ส่งผลต่อการสูญเสียไอคิว ผลจากการสูญเสียสติปัญญานี้ทำให้เกิดภาวะถดถอยของผลิตภาพทางเศรษฐกิจ (Economic Productivity) อย่างต่อเนื่องยาวนานในช่วงชีวิตของเด็กเหล่านี้ ผลผลิตที่หายไปนี้ถือเป็นค่าใช้จ่ายหลักจากสารพิษของเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) และมีมูลค่าสูงถึง 8.7 พันล้านดอลลาร์ต่อปี (2.2 – 43.8 พันล้านดอลลาร์ คำนวณจากค่าเงินดอลลาร์ปี 2000) จากทั้งหมดนี้ 1.3 พันล้านเหรียญสหรัฐ (0.1 – 6.5 พันล้านเหรียญสหรัฐ) ในแต่ละปีเป็นผลมาจากการปล่อยสารปรอทของโรงไฟฟ้าในอเมริกา<sup>57</sup>

นอกจากระดับสติปัญญาแล้ว ปรอทอินทรีย์ยังส่งผลกระทบต่อหัวใจและหลอดเลือด โดยพบความสัมพันธ์ของการเพิ่มความเสียหายของโรคหลอดเลือดหัวใจตีบเฉียบพลัน และการเสียชีวิตจากการรับสัมผัสเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg)<sup>58</sup> ในทำนองเดียวกัน การสะสมของสารปรอทในร่างกายมนุษย์ยังเกี่ยวข้องกับการเร่งการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ<sup>59</sup> การได้รับเมทิลเมอร์คิวรี (MeHg) ที่เพิ่มขึ้นในร่างกายจะกระตุ้นการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด<sup>60</sup> สารปรอทยังมีความเชื่อมโยงกับการเพิ่มขึ้นของความดันโลหิตและความดันชีพจรในกลุ่มผู้ใหญ่<sup>61</sup> และความแปรปรวนของอัตราการเต้นของหัวใจสัมพันธ์กับการรับสัมผัสปรอท<sup>62</sup>

งานวิจัยของ Rice, Hammitt, และ Evans<sup>63</sup> เสนอว่าการเพิ่มขึ้นของความเสียหายต่ออาการหัวใจวายถึงแก่ชีวิตสัมพันธ์กับความเข้มข้นของปรอทในเส้นผมตามสมการที่ 3-1

$$\Delta RR = 0.066 \text{ increase in risk of fatal hear attack } (\mu\text{gHg/g}_{\text{hair}}) \quad (3-1)$$

เมื่อ  $\Delta RR = 0.066$  คือความเสี่ยงต่ออาการหัวใจวายถึงแก่ชีวิตที่เพิ่มขึ้น (ค่าเป็นสัดส่วน)

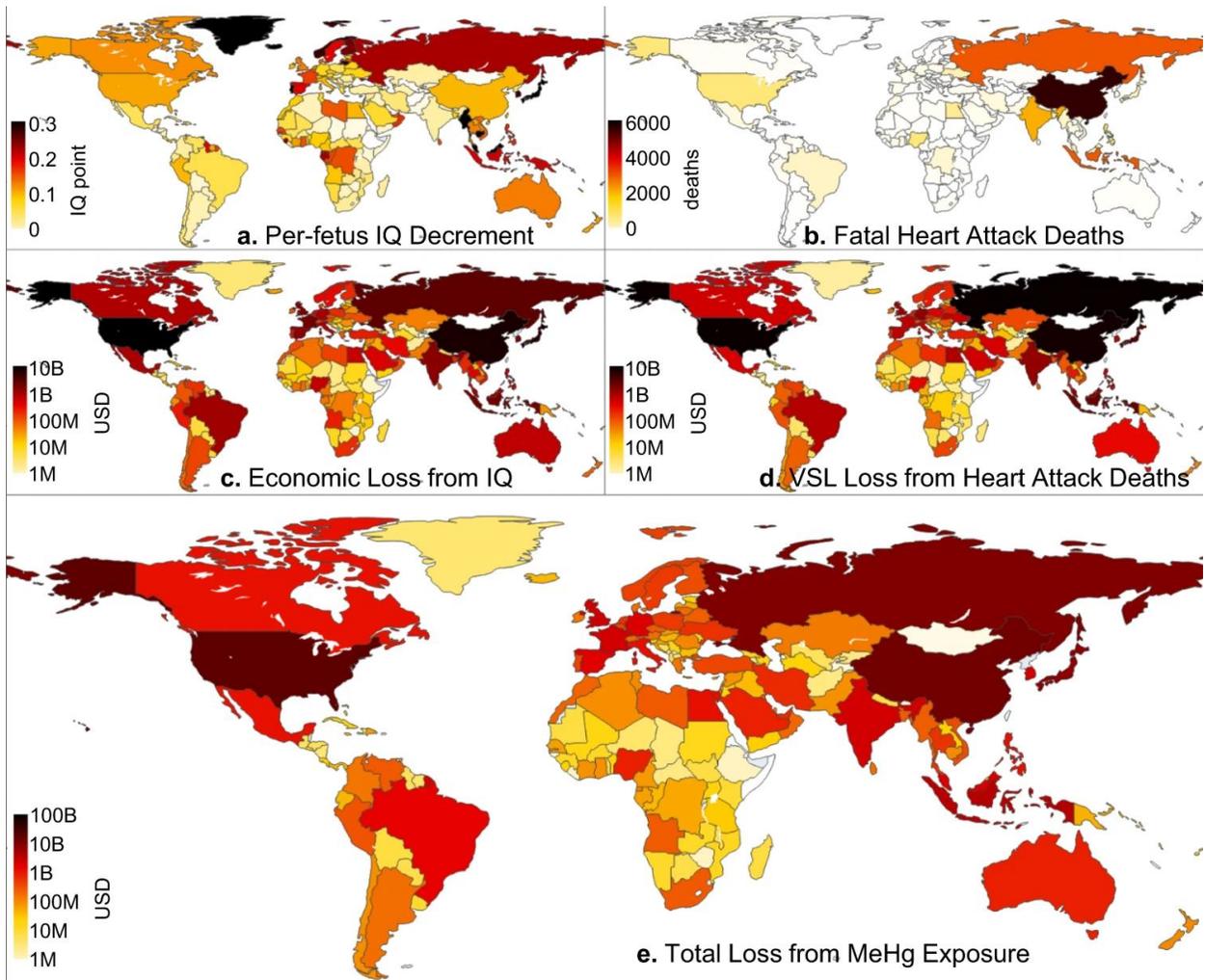
จากความเสี่ยงต่อโรคหัวใจ หลอดเลือด และความฉลาดทางสติปัญญาที่ลดลงอันเนื่องมาจากปรอท ต้นทุนความเสียหายจากการปลดปล่อยปรอท 1 กิโลกรัมสู่บรรยากาศ คือ 22,937 ยูโรต่อกิโลกรัมของปรอทที่ถูกปลดปล่อย (ในปี 2556)<sup>64</sup> ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ซึ่งแยกตามผลกระทบหลักทั้งสองของปรอทต่อสุขภาพ

ตารางที่ 3-3 สรุปค่าใช้จ่ายความเสียหายทั้งหมดสำหรับ Hg ใน €<sub>2013</sub>/kgHg ที่ถูกปล่อยสู่อากาศ โดยหน่วยที่ใช้คือ YOLL สำหรับการเสียชีวิต และระดับ IQ สำหรับความสูญเสีย IQ เกณฑ์ = 6.7E-03 mgHg/kgbody/day(4) and  $f_{thr} = 0.44$

จุดสิ้นสุด	เคส/กิโลกรัม ปรอท	ไม่ได้ลดหย่อน , ไม่มีกฎเกณฑ์	Lag [ปี]	ปัจจัยการ ลดลง	การลดลง, ไม่มีเกณฑ์	ลดลงแบบ มีเกณฑ์
อัตราการตาย	0.56	70,085	10	0.68	47,347	20,833
การสูญเสีย IQ	1.36	4,782	0	1	4,782	2,104
เท่ากับ € 2013/kgHg		74,867			52,129	22,937

### 3.3 การกระจายของต้นทุนภาวะภายนอกจากปรอทสู่นานาประเทศ

หัวข้อก่อนหน้าแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศในมุมมองของต้นทุนภาวะภายนอก อย่างไรก็ตามการปล่อยปรอทเป็นมลพิษข้ามพรมแดนระดับโลกที่แท้จริง ฉะนั้นปรอทที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดหนึ่ง ๆ อาจก่อให้เกิดต้นทุนภาวะภายนอกกับอีกส่วนของสังคม หรือกับอีกประเทศหนึ่งเลยก็ได้ การกระจายตัวของต้นทุนภาวะภายนอกจากปรอทสู่นานาประเทศทั่วโลกจึงมีความสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 (a) ถึง (d) จะเห็นได้ว่าประเทศต่าง ๆ ได้รับความเสียหายทางเศรษฐกิจจากปรอทที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1 ล้านเหรียญสหรัฐต่อปีถึง 1 แสนล้านเหรียญสหรัฐต่อปี ทั้งนี้ผลเสียต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยอยู่ในระดับสูง (1 พันล้านเหรียญสหรัฐต่อปี) จะเป็นรองก็แต่ประเทศที่ได้รับผลกระทบสูงสุดอย่างสหรัฐอเมริกาและประเทศจีนเป็นต้น ด้วยทุกประเทศไม่มีประเทศไหนสามารถหนีพิษปรอทพ้น การแก้ไขปัญหามลพิษระดับโลกนี้จึงจำเป็นต้องใช้ความร่วมมือกันระดับโลกดังจะกล่าวต่อไปในบทสุดท้าย



รูปที่ 3-6 การกระจายตัวของ (a) ผลกระทบต่อ IQ (b) ผลกระทบจากโรคหัวใจวายอันเนื่องมาจากการสัมผัสมลพิษปรอทอินทรีย์ (c) มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจผลกระทบต่อ IQ ของทารก (d) มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจจากโรคหัวใจ และ (e) ผลรวมความเสียหายต่อสุขภาพทั้งสองจากปรอท<sup>39</sup>

## บทที่ 4 การศึกษาการแพร่กระจายและการตกสะสมของปรอทในประเทศไทยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน

บทนี้จะขยับจากผลกระทบของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในภาพรวมในบทที่ 3 มาสู่ประเด็นใกล้ตัวคือการปลดปล่อยปรอท การตกสะสมของปรอท และความเสียดต่อสุขภาพจากปรอทในห่วงโซ่อาหารที่เฉพาะเจาะจงกับคนไทยมากขึ้น โดยตอบคำถามว่า ปรอทที่ถูกปลดปล่อยมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินของประเทศไทยเอง และ จากแหล่งกำเนิดต่างๆจากนอกประเทศ (รวมถึงโรงไฟฟ้าถ่านหินนอกประเทศด้วย) ส่งผลกระทบต่อ การปนเปื้อนปรอทในปลาในแหล่งน้ำของประเทศไทยอย่างไรบ้าง แหล่งน้ำใดได้รับผลกระทบ และผลกระทบอยู่ในระดับที่น่ากังวลหรือไม่ อย่างไร?

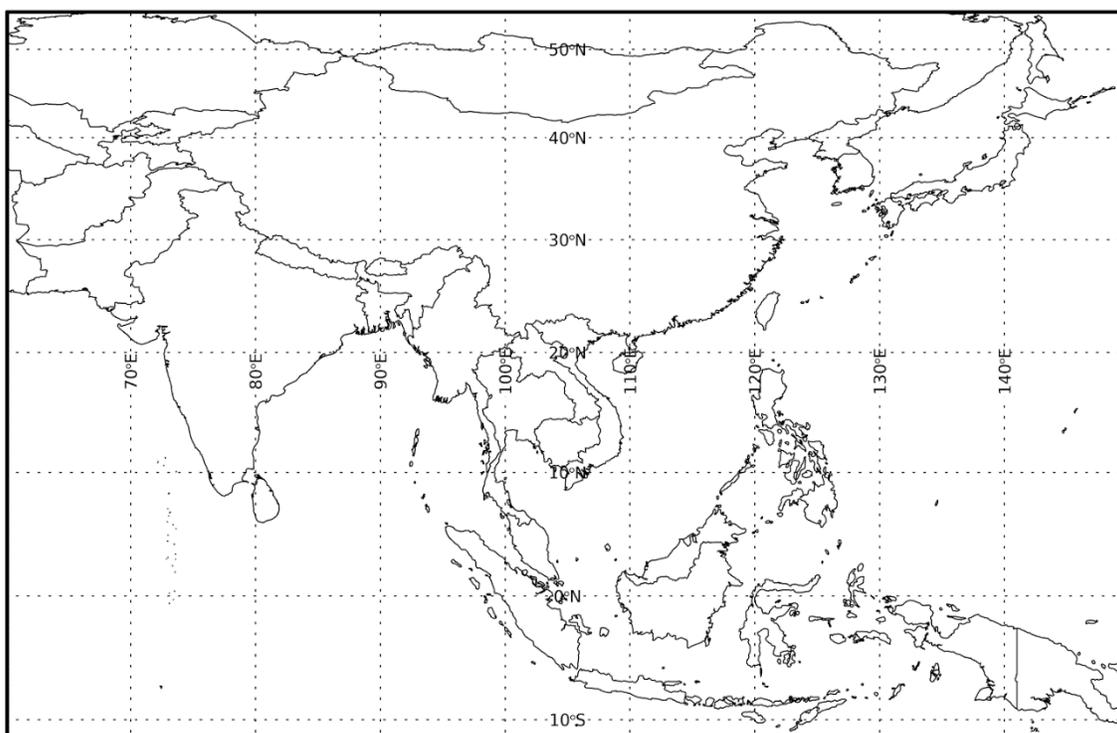
ความเข้าใจการแพร่กระจายของปรอทออกสู่บรรยากาศและการตกสะสมซึ่งนำไปสู่ผลกระทบจากปรอทนั้น ต้องใช้ข้อมูลการปลดปล่อยปรอทที่ถูกต้อง และเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยเผยให้เห็นถึงความเป็นไปและการเคลื่อนย้ายของปรอทเมื่อออกสู่บรรยากาศ ก็คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการต่างๆ ในบรรยากาศ (Atmospheric model) อีกทั้งแบบจำลองยังช่วยให้ความกระจ่างเกี่ยวกับอิทธิพลของแหล่งกำเนิดต่างๆ ที่มีต่อการตกสะสมของปรอท ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่สนใจ เช่น แหล่งน้ำซึ่งคนใช้เป็นแหล่งอาหาร เป็นต้น นอกเหนือจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว สิ่งที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนกว่ากันคือการมีข้อมูลการปนเปื้อนปรอทในโลกจริงเพื่อเป็นการยืนยันความเข้าใจที่เกิดจากการใช้แบบจำลอง ข้อมูลที่แสดงในบทนี้มีการเก็บตัวอย่างปลาในแหล่งน้ำในบริเวณต่างๆ ในประเทศไทย และวิเคราะห์ปริมาณปรอทในตัวอย่างปลา เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณปรอทในตัวอย่างปลากับอัตราการตกสะสมของปรอทที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ ซึ่งข้อมูลดังกล่าว แม้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้น แต่ก็ช่วยสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการสะสมของปรอทในสิ่งแวดล้อมในบริเวณต่างๆ ของประเทศไทยได้

### 4.1 แบบจำลองปรอท

บทนี้ใช้แบบจำลอง GEOS-Chem<sup>65</sup> ซึ่งเป็นแบบจำลองการเคลื่อนย้ายและกระบวนการทางเคมีในบรรยากาศแบบสามมิติ ใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเสมือนจริง จากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา หรือ NASA เป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญในการขับเคลื่อนการคำนวณในแบบจำลอง แบบจำลอง GEOS-Chem ได้รับการพัฒนาร่วมกันโดยนักวิจัยจากหลายสถาบันชั้นนำระดับนานาชาติมาอย่างต่อเนื่องกว่ายี่สิบปี เป็นแบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับในแวดวงวิชาการและมีผลงานตีพิมพ์ในวารสารทาง

วิชาการเป็นจำนวนมาก ในส่วนของแบบจำลองปรอทใน GEOS-Chem นั้น<sup>66</sup> มีกลุ่มนักวิจัย ร่วมกันพัฒนาและบูรณาการองค์ความรู้หลากหลายมิติ ทั้งข้อมูลแหล่งกำเนิด ปฏิกิริยาเคมี และการรับและปลดปล่อยปรอทในตัวกลางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ จนเป็นแบบจำลองที่มีปฏิสัมพันธ์ทั้งบรรยากาศ-มหาสมุทร-พื้นดิน อย่างครบสมบูรณ์ แบบจำลอง GEOS-Chem จึงเป็นเครื่องมือที่มีความก้าวหน้าและล้ำลึกเพื่อใช้ในการศึกษาการเคลื่อนย้ายและการตกสะสมของปรอทในการศึกษานี้ได้อย่างเหมาะสม

แบบจำลอง GEOS-Chem จำลองปรอททั้ง 3 รูปแบบ คือ Gaseous Elemental Mercury หรือ  $Hg^0$  Divalent Mercury หรือ  $Hg^{2+}$  และ Particulate Mercury หรือ  $Hg^P$  การคำนวณและติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณปรอทแต่ละรูปแบบดำเนินไปในแต่ละกล่อง (Grid cell) ของบรรยากาศในสามมิติ ในการศึกษานี้ทำการคำนวณที่ความละเอียดของกล่องในแนวราบ  $0.25$  องศาละติจูด  $\times$   $0.3125$  องศาลองจิจูด (ประมาณ  $28$  กม.  $\times$   $35$  กม.) พื้นที่ศึกษาด้วยแบบจำลอง (Modeling domain) ครอบคลุมภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศจีน ดังรูปที่ 4-1 พื้นที่ศึกษาด้วยความละเอียดสูงนี้เชื่อมโยงการจำลองในระดับโลกโดยใช้ความเข้มข้นปรอทที่ขอบของพื้นที่ศึกษา (Boundary conditions) บันทึกลงมาจากการจำลองระดับโลกเพื่อคำนวณการเคลื่อนย้ายเข้าหรือออกจากพื้นที่ศึกษานี้ เรียกการจำลองแบบนี้ว่า Nested-grid simulation ในส่วนความละเอียดของ Grid cell ในแนวตั้งนั้นกำหนดที่ 47 ชั้น (Layer) จากพื้นดิน (ความดันบรรยากาศ หรือ  $1013.25$  hPa) ไปจนถึงเหนือสุดของชั้นบรรยากาศ (ความสูงประมาณ  $80$  กิโลเมตร หรือ ความดัน  $0.01$  hPa)



รูปที่ 4-1 พื้นที่ศึกษาด้วยแบบจำลองความละเอียดสูง

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ทำการจำลองปรอทในบรรยากาศในช่วงเวลาปี 2561 โดยถือเป็นช่วงเวลาที่นำเสนอภาพสถานการณ์ปรอทที่เป็นปัจจุบันและมีข้อมูลเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าถ่านหินและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่สมบูรณ์เหมาะสมแก่การศึกษาด้วยแบบจำลองแนวทางการศึกษาปรอทซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้าในประเทศไทยนั้น ดำเนินการโดยคำนวณแบบจำลองใน 2 ฉากทัศน์ (Scenarios) ได้แก่ Full emission scenario และ Minus Thai coal scenario รายละเอียดฉากทัศน์แสดงดังตารางข้างล่าง จากนั้นคำนวณส่วนต่างของผลจำลองจากสองฉากทัศน์เพื่อให้ได้ปริมาณปรอทที่มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย จากนั้นจะเรียกโดยตัวย่อ MCCT (Mercury from coal combustion in Thailand)

ฉาบทศน์ที่ 1 : Full emission	การจำลองในฉาบทศน์นี้มีการปลดปล่อยปรอทจากทั้งประเทศไทยและจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ทั่วโลก ทั้งแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติและแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์
ฉาบทศน์ที่ 2 : Minus Thai Coal	การจำลองในฉาบทศน์นี้ไม่มีการปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย
ส่วนต่าง	ผลคำนวณส่วนต่างของปรอทจากฉาบทศน์ที่ 1 และฉาบทศน์ที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลจากการปลดปล่อยปรอทโดยโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย ทั้งในรูปแบบของความเข้มข้นในบรรยากาศ และอัตราการของกระบวนการในสิ่งแวดล้อม เช่น อัตราการตกสะสม

#### 4.2 กระบวนการต่าง ๆ ของปรอทในบรรยากาศ

แบบจำลองทำหน้าที่ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเคลื่อนย้ายและการแปรเปลี่ยนต่าง ๆ ของปรอทที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ เพื่อให้การคาดการณ์ความเป็นไปของปรอทหลังจากถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดนั้นมีความแม่นยำ กระบวนการต่าง ๆ ของปรอทประกอบไปด้วย การเคลื่อนย้ายในแนวราบโดยอิทธิพลของลม การถ่ายเทมวลอากาศในแนวตั้ง กระบวนการทางเคมี การตกสะสมแบบแห้ง และการตกสะสมแบบเปียกที่เกิดขึ้นจากฝนตก การคำนวณกระบวนการเหล่านี้ใช้ข้อมูลนำเข้าที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุตุนิยมิวิทยา (ลม ฝน อุณหภูมิ ความดันอากาศ ฯลฯ) จากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) และความเข้มข้นของสารที่จะมาทำปฏิกิริยาเคมีกับปรอท เช่น โบรมีน (Br), ไฮดรอกซิล (OH), โอโซน (O<sub>3</sub>), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>), ไฮโดรเพอรอกซิล (HO<sub>2</sub>)<sup>67</sup> ซึ่งข้อมูลนำเข้าที่ถูกต้องและกระบวนการต่างๆ ได้รับการศึกษาวิจัยและทดสอบเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดเพื่อให้มีความมั่นใจต่อแบบจำลองปรอทใน GEOS-Chem

นอกจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของโลกแล้ว แบบจำลอง GEOS-Chem ยังได้คำนวณการแลกเปลี่ยนปรอทระหว่างบรรยากาศกับมหาสมุทรและแหล่งน้ำ<sup>68</sup> และบรรยากาศกับพื้นดิน<sup>69</sup> การคำนวณมากมายในแบบจำลองและข้อมูลนำเข้ามหาศาลนี้สะท้อนถึงความซับซ้อนในโลกจริงที่เป็นปัจจัยให้ปรอทนั้นคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน

## 4.3 แหล่งกำเนิดปรอท

### 4.3.1 แหล่งกำเนิดปรอทตามธรรมชาติ

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ปรอทส่วนหนึ่งถูกปล่อยสู่บรรยากาศได้โดยธรรมชาติ นั่นคือการปล่อยจากมหาสมุทร และการปล่อยจากพื้นดิน รวมถึงจากภูเขาไฟ ปรอทถูกปล่อยสู่บรรยากาศจากผิวน้ำทะเลคิดเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของการปลดปล่อยปรอททั้งหมด ปรอทที่ปลดปล่อยจากมหาสมุทรนี้แม้จะเรียกว่าเป็นสิ่งที่เกิดเองตามธรรมชาติ แต่กระนั้นปรอทเหล่านี้ล้วนเป็นปรอทที่ตกสะสมจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำทะเลนั่นเอง แล้วเกิดเคลื่อนย้ายและแปรเปลี่ยนทางเคมีเมื่ออยู่ในน้ำ ครั้นเมื่อปรอทมีความอิ่มตัวในน้ำเทียบกับความเข้มข้นในบรรยากาศก็สามารถที่จะถูกปลดปล่อยกลับสู่บรรยากาศ แบบจำลองไม่คำนวณการปลดปล่อยปรอทจากภูเขาไฟเนื่องจากมีความไม่แน่นอนและมีความสำคัญน้อยกว่าการปลดปล่อยจากมหาสมุทรและพื้นดิน

การปลดปล่อยปรอทจากพื้นดิน แบ่งเป็นสองประเภทคือ การปลดปล่อยโดยตรงจากแหล่งแร่ปรอทในพื้นดิน และการปลดปล่อยจากดิน ซึ่งมีทั้งที่ปลดปล่อยจากการสะสมปรอทในดิน น้ำ และพืช และที่เป็นการปลดปล่อยซ้ำ (Reemission) ของปรอทที่ตกสะสมจากบรรยากาศลงสู่พื้นดิน จะเห็นได้ว่าปรอทที่ได้เคยถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งส่วนหนึ่งนั้นมาจากกิจกรรมมนุษย์ นั้น หลังจากที่ถูกปล่อยสู่พื้นดินและผิวน้ำแล้วจะยังคงวนเวียนกลับมาในบรรยากาศต่อไปได้อีกเป็นเวลานาน

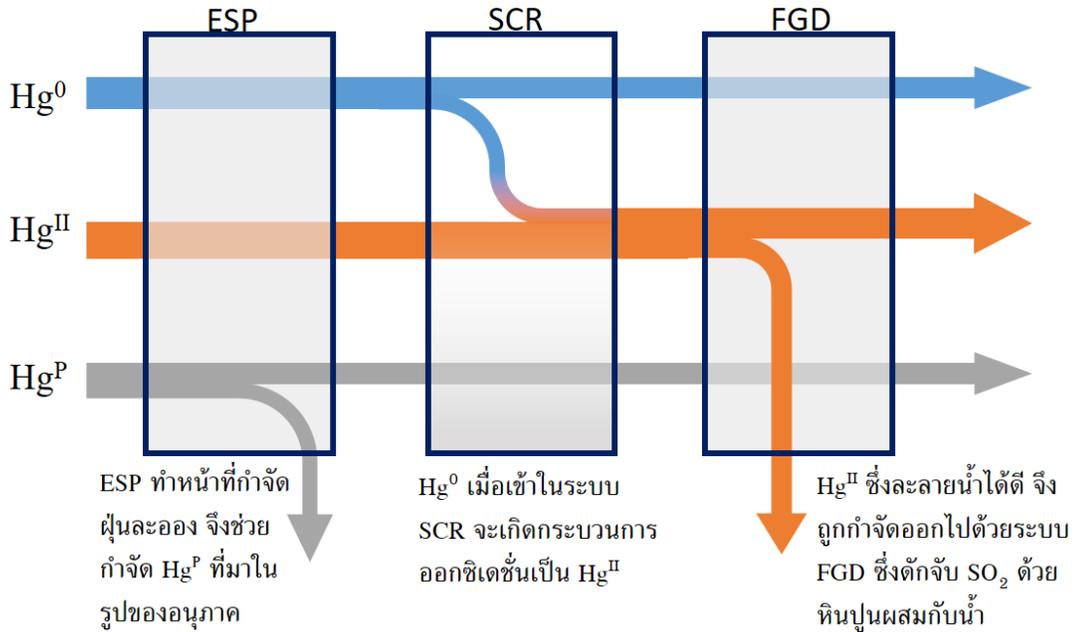
### 4.3.2 แหล่งกำเนิดปรอทจากกิจกรรมมนุษย์

เช่นเดียวกับที่กล่าวจำแนกโดยละเอียดในบทที่ 2 การปลดปล่อยปรอทสู่บรรยากาศโดยกิจกรรมมนุษย์นับเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของการปลดปล่อยทั้งหมด แหล่งกำเนิดปรอทจากกิจกรรมมนุษย์ในแบบจำลองนั้นใช้ข้อมูลการปลดปล่อยปรอทจากอุตสาหกรรมการผลิตแร่โลหะ (ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว เหล็ก) การผลิตเหล็กกล้า การผลิตปรอท การผลิตทองคำ (เหมืองขนาดใหญ่) การผลิตเงิน การผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตโซดาไฟ (ในโรงงานผลิตคลอไรด์-แอลคาร์ไบด์) และการเผาไหม้ถ่านหิน ขยะ และน้ำมัน<sup>70</sup> และใช้ข้อมูลการปลดปล่อยปรอทจากการใช้และทำลายผลิตภัณฑ์ต่างๆ (เช่น สีทาอาคาร หลอดไฟ วัสดุอุดฟัน เป็นต้น) (Horowitz et al. 2014) อีกทั้งยังได้มีการพิจารณาถึงข้อมูลเกี่ยวกับการปลดปล่อยจากเหมืองแร่ทองคำพื้นบ้านและขนาดเล็ก (Artisanal and small-scale gold mining)<sup>71</sup>

การปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นข้อมูลที่ต้องพิจารณารายละเอียดอย่าง ถ้วนถี่ในแง่รูปแบบของปรอทที่ถูกปลดปล่อย เพราะมีผลต่อความเป็นไปของปรอทใน บรรยากาศ ระบบบำบัดมลพิษทางอากาศในโรงไฟฟ้าถ่านหิน แม้ไม่ใช่ระบบกำจัดปรอท โดยตรง แต่มีผลพลอยได้ในการกำจัดปรอทออกจากไอเสียที่จะถูกระบายออกสู่ บรรยากาศ (ดูอธิบายในกรอบ) ข้อมูลการปลดปล่อยปรอทในรูปแบบจำลอง GEOS-Chem นั้นใช้ข้อมูลของโรงไฟฟ้าและระบบบำบัดมลพิษทางอากาศที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าเพื่อคำนวณ อัตราการปลดปล่อยปรอทในแต่ละรูปแบบ โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐ ประชาชนจีน และประเทศอินเดีย<sup>72</sup> ส่วนในรายงานฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงบัญชีการ ปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลเจาะจงของแต่ละ โรงไฟฟ้าและระบบบำบัดมลพิษทางอากาศที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าถ่านหิน

#### 4.3.3 เกิดอะไรขึ้นกับปรอทเมื่อผ่านระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ?

ดังที่ได้แสดงในบทที่ 3 ระบบบำบัดอากาศที่ออกแบบเพื่อกำจัดฝุ่นละออง ออกไซด์ ของไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นั้น มีผลพลอยได้ในการช่วยแยกปรอทบางส่วน ออกจากอากาศเสียของโรงไฟฟ้า โดยปรอทในแต่ละรูปแบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือ ถูกกำจัดออกจากอากาศในวิธีหรือกระบวนการแตกต่างกันไป ซึ่งการจัดลำดับอุปกรณ์ บำบัดมลพิษทางอากาศก็มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทของระบบบำบัดมลพิษทาง อากาศโดยรวมด้วยเช่นกัน แม้กระนั้นมวลของปรอทประมาณร้อยละ 30 ก็ยังคงถูก ปลดปล่อยสู่บรรยากาศหลังจากผ่านระบบบำบัดมลพิษอื่น ๆ เหล่านี้



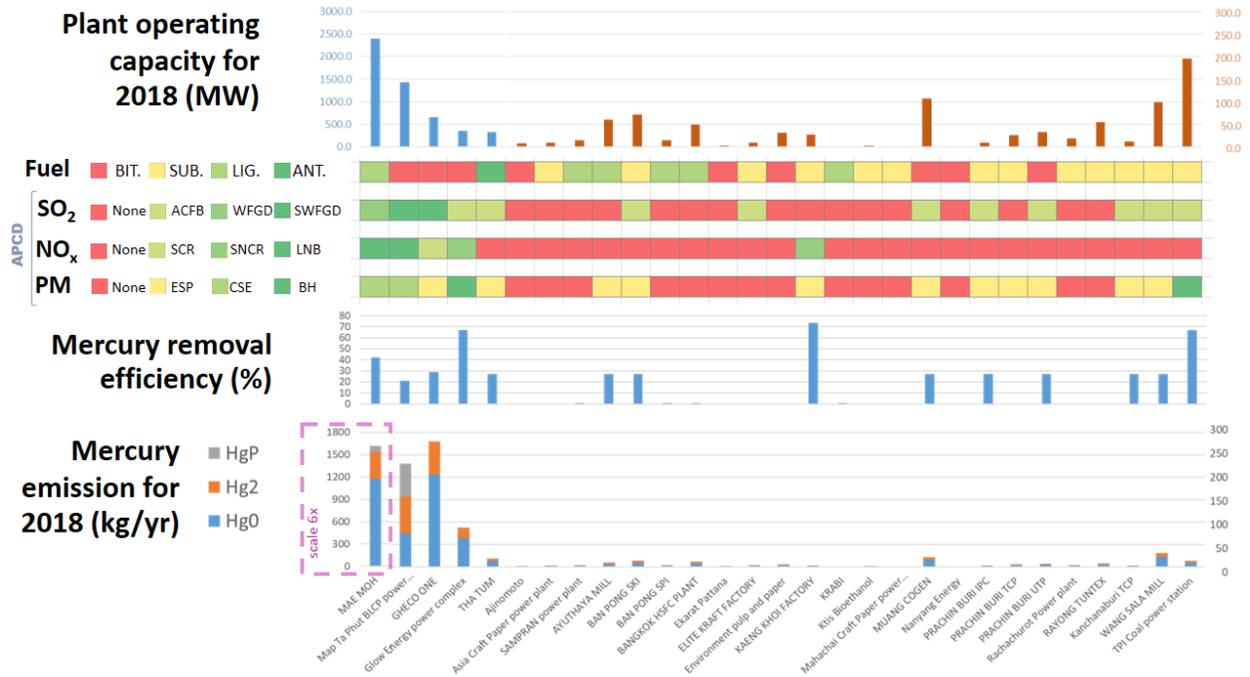
รูปที่ 4-2 ผลพลอยได้ในกำจัดปรอทของระบบบำบัดมลพิษอื่น ๆ โดย  
 ESP (Electrostatic precipitator) คือ เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต  
 SCR (Selective catalytic reduction) คือ ระบบกำจัดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน  
 และ FGD (Flue-gas desulfurization) คือ เครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

#### 4.4 บัญชีแหล่งกำเนิดปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินของประเทศไทย

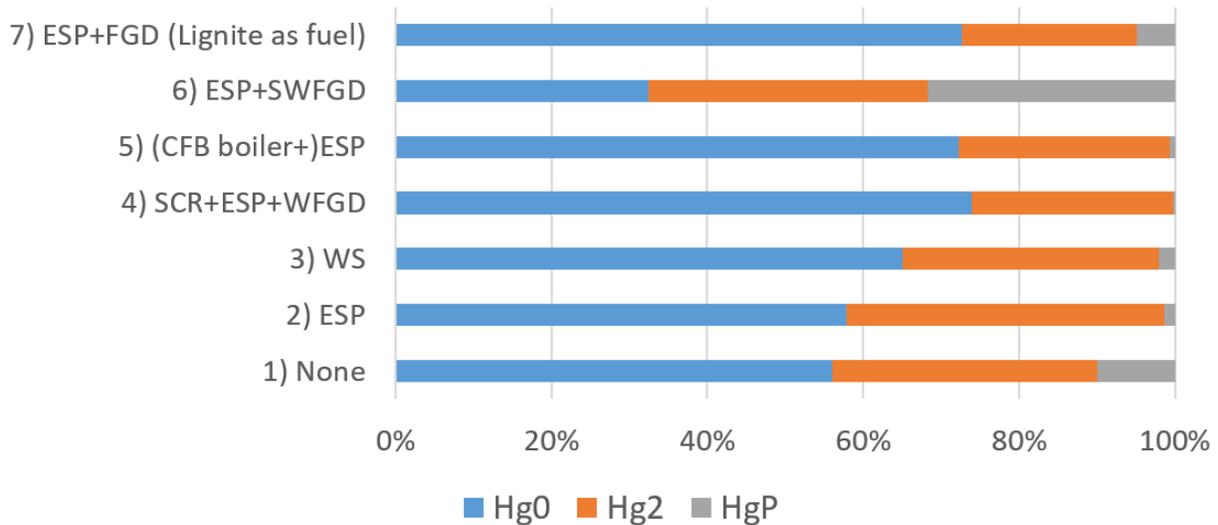
จากการรวบรวมข้อมูล ณ ปี 2563 ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าและโรงงานที่ใช้พลังงานจากการเผาไหม้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง จำนวน 29 แห่ง<sup>73,74,75,76</sup> ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4-1 สำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ดำเนินงานในปี 2561 นั้นมีจำนวน 27 แห่ง (อีก 2 แห่งที่ไม่ดำเนินการ คือ โรงไฟฟ้าถ่านหินกระบี่ หยุดดำเนินการตั้งแต่ปี 2538 และ โครงการโรงไฟฟ้าถ่านหินมหาชัยคราฟท์เปเปอร์ ยังไม่เปิดดำเนินการ) กำลังผลิตรวม 6,046.4 เมกะวัตต์ จำแนกเป็นสองกลุ่มหลักคือ กลุ่มที่กำลังผลิตมากกว่า 300 เมกะวัตต์ จำนวน 5 แห่ง และกลุ่มที่กำลังผลิตน้อยกว่า 300 เมกะวัตต์อีก 24 แห่ง (ไม่ดำเนินการ 2 แห่ง) ข้อมูลของโรงไฟฟ้าถ่านหินนำเสนอด้วยรูปที่ 4-2 ประกอบไปด้วยกำลังผลิต ชนิดของเชื้อเพลิง จำแนกเป็นถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินซับบิทูมินัส ถ่านหินแอนทราไซต์ และลิกไนต์ ข้อมูลระบบบำบัดมลพิษอากาศ จำแนกเป็น ระบบจัดการซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ระบบจัดการออกไซด์ของไนโตรเจน และ ระบบจัดการฝุ่นละออง

จากฐานข้อมูลพบว่ายังไม่มีโรงไฟฟ้าถ่านหินแห่งใดในประเทศไทยที่ติดตั้งระบบกำจัดปรอทเป็นการเจาะจง เช่น Activated Carbon Injection ดังที่ได้แสดงในบทที่ 3 อย่างไรก็ดี ระบบบำบัดมลพิษทางอากาศที่กล่าวข้างต้นนี้มีผลพลอยได้ในการกำจัดปรอทออกจากอากาศก่อนที่จะระบายออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลระบบบำบัดมลพิษทางอากาศของโรงไฟฟ้าถ่านหินแต่ละแห่งเพื่อเป็นข้อมูลกำหนดประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและกำหนดการจำแนกปรอทแต่ละรูปแบบ ( $Hg^0$ ,  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$ ) ที่ถูกปลดปล่อยออกจากปลายปล่องของแต่ละโรงไฟฟ้า โดยใช้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดปรอทของชุดระบบบำบัดอากาศที่ได้จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ<sup>73,77,78,79</sup> ข้อมูลการจำแนกรูปแบบปรอท (Mercury speciation) นั้นได้จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการ<sup>73,78</sup> ให้สอดคล้องการรูปแบบระบบบำบัดมลพิษทางอากาศที่มีใช้กันในบริษัทโรงไฟฟ้าถ่านหินประเทศไทยและสรุปไว้ดังรูปที่ 4-3 ซึ่งค่าสัดส่วนการปลดปล่อยปรอทแบ่งตามรูปแบบสำหรับแต่ละชุดระบบบำบัดอากาศดังแสดงนี้เปรียบเสมือนค่าเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าหลาย ๆ แห่งที่มีชุดระบบบำบัดอากาศแบบเดียวกัน

โดยสรุปแล้ว จากการคำนวณพบว่าในปี 2561 มีการปลดปล่อยปรอทออกสู่บรรยากาศจากการเผาไหม้ถ่านหินในประเทศไทย รวมทั้งหมด 2,381 กิโลกรัมต่อปี โดยจำแนกได้เป็นปรอทในรูปแบบ  $Hg^0 = 1,632$  กิโลกรัมต่อปี  $Hg^{2+} = 588$  กิโลกรัมต่อปี และ  $Hg^P = 159$  กิโลกรัมต่อปี ข้อมูลการปลดปล่อยตามตำแหน่งโรงไฟฟ้าถูกนำไปประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบแผนที่ความละเอียด 1 องศาละติจูด x 1 องศาลองจิจูด ดังรูปที่ 4-4 สอดคล้องกับรูปแบบข้อมูลแผนที่อัตราการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมมนุษย์ที่เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลอง GEOS-Chem<sup>72</sup>

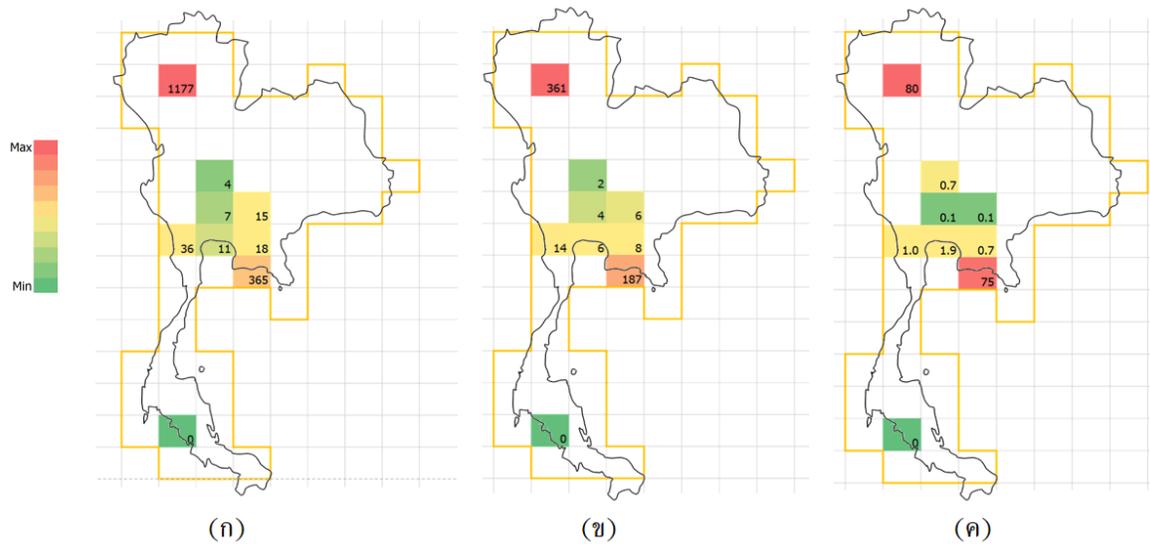


รูปที่ 4-2 ข้อมูลโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย



รูปที่ 4-3 ข้อมูลการจำแนกรูปแบบปรอท (Mercury speciation) จำแนกตามระบบบำบัดอากาศ

ข้อมูลสำหรับระบบบำบัดอากาศแบบที่ 1) – 5) อ้างอิงจากบทความทางวิชาการ<sup>78</sup> และข้อมูลสำหรับระบบบำบัดอากาศแบบที่ 6) – 7) อ้างอิงจากรายงานของ UNEP<sup>73</sup>



รูปที่ 4-4 แผนที่อัตราการปลดปล่อยปรอทจากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้าของประเทศไทย แสดงข้อมูลในหน่วยกิโลกรัมต่อปี สำหรับการปลดปล่อยปรอทรูปแบบต่าง ๆ ก) ปรอท  $Hg^0$  ข) ปรอท  $Hg^{2+}$  ค) ปรอทในรูปอนุภาค  $Hg^P$

ตารางที่ 4-1 บัญชีการปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ณ ปี 2561

No.	Power plant name	Ownership	Operating Capacity (MW)	Hg emission (kg/year)				Location	
				Total Hg	Hg <sup>0</sup>	Hg <sup>II</sup>	Hg <sup>P</sup>	Latitude	Longitude
1	Ajinomoto	AJINOMOTO (THAILAND)	8.6	1.5	0.82	0.50	0.15	13.98	100.53
2	Asia Craft Paper power plant	ASIA CRAFT PAPER CO LTD	9.0	1.7	0.96	0.58	0.17	13.55	100.25
3	SAMPAN power plant	CHIEM PATANA KNITTING CO LTD	14.9	3.6	2.0	1.2	0.36	13.74	100.24
4	AYUTHAYA MILL	<u>Panipol</u> Pulp Industry PCL	60.6	9.2	5.3	3.7	0.12	14.26	100.47
5	BAN PONG SKI	SIAM KRAFT INDUSTRY CO LTD	71.5	12.5	9.0	3.4	0.08	13.85	99.85
6	BAN PONG SPI	SIAM PAPER INDUSTRIES CO LTD	15.3	3.7	2.0	1.2	0.37	13.85	99.85
7	BANGKOK HSFC PLANT	HIANG SENG FIBRE CONTAINER CO	49.5	11.9	6.6	4.0	1.2	13.75	100.47
8	Map Ta Phut BSCP power station	BSCP LTD	1434.0	230.4	74.9	82.6	72.9	12.64	101.16
9	<u>Ekarat Pattana</u>	EKARAT PATTANA CO LTD	3.0	0.51	0.29	0.17	0.05	15.37	100.24
10	ELITE KRAFT FACTORY	ELITE KRAFT PAPER CO LTD	9.8	2.7	1.8	0.89	0.05	13.92	101.91
11	Environment pulp and paper	ENVIRONMENT PULP AND PAPER CO LTD	32.0	5.5	3.1	1.9	0.55	15.38	100.24
12	GHECO ONE	GHECO-ONE CO LTD	660.0	279.5	206.6	72.4	0.56	12.67	101.13
13	Glow Energy power complex	Global Power Synergy Public Company	360.0	87.4	63.5	23.3	0.41	12.68	101.14
14	KAENG KHOI FACTORY	THAI ACRYLIC FIBRE CO LTD	27.3	2.2	1.6	0.57	0.00	14.57	100.97
15	KRABI	ELEC GEN AUTH THAILAND (EGAT)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.99	99.05
16	<u>Kris</u> Bioethanol	<u>Kris</u> Bioethanol Co Ltd	3.0	0.83	0.46	0.28	0.08	15.37	100.24
17	MAE MOH	ELEC GEN AUTH THAILAND (EGAT)	2400.0	1618.1	1177.0	361.2	79.9	18.30	99.75
18	<u>Mahachai</u> Craft Paper power plant	<u>Mahachai</u> Craft Paper Co Ltd	0.0	N/A	N/A	N/A	N/A	13.59	100.26
19	MUANG COGEN	IRPC PCL	108.0	21.6	15.5	5.8	0.1	12.67	101.33
20	Nanyang Energy	NANYANG ENERGY CO LTD	1.8	0.31	0.17	0.10	0.03	13.68	100.28
21	PRACHIN BURI IPC	INTERPACIFIC PAPER CO LTD	9.5	1.9	1.4	0.52	0.01	14.02	101.27
22	PRACHIN BURI TCP	THAI CANE PAPER PLC	26.0	5.4	3.0	1.8	0.54	13.95	101.81
23	PRACHIN BURI UTP	UNITED PAPER PUBLIC CO LTD	33.5	6.1	4.4	1.6	0.04	14.02	101.31
24	<u>Rachachurot</u> Power plant	<u>Rachachurot</u> Co Ltd	19.0	3.6	2.0	1.2	0.36	13.86	99.83
25	RAYONG TUNTEX	TPT PETROCHEMICALS PCL	55.0	8.1	4.5	2.7	0.81	12.80	101.20
26	THA TUM	NATIONAL POWER SUPPLY PCL	328.0	18.1	13.1	4.9	0.11	13.93	101.59
27	Kanchanaburi TCP	THAI CANE PAPER PLC	11.6	1.6	1.1	0.42	0.01	13.95	99.67
28	WANG SALA MILL	SIAM KRAFT INDUSTRY CO LTD	99.5	30.4	21.9	8.2	0.18	13.94	99.71
29	TPI Coal power station	TPI POLENE POWER CO LTD	196.0	12.6	9.1	3.4	0.08	14.65	101.13

#### 4.5 สมดุลมวลของปรอทในบรรยากาศ

ผลจากแบบจำลองปรอทในบรรยากาศสามารถสรุปภาพรวมให้เห็นปริมาณปรอทที่อยู่ในบรรยากาศและกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ในรูปแบบของแผนภาพสมดุลมวล ปรอทในสถานะต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เห็นเด่นชัดว่ากระบวนการใดที่เป็นช่องทางสำคัญในการสูญเสียปรอทออกจากบรรยากาศ ซึ่งนั่นหมายถึงการเคลื่อนย้ายปรอทจากในอากาศไปยังตัวกลางสิ่งแวดล้อมอื่น ได้แก่ ผืนดิน และ ผืนน้ำ (แม่น้ำ ทะเลสาบ มหาสมุทร) อันนำไปสู่การสะสมปรอทในพืชและสัตว์ รวมถึงระบบนิเวศและห่วงโซ่อาหาร

ในภาพรวมของการปลดปล่อยปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด สมดุลมวลของปรอทดังกล่าวแสดงในรูปแบบที่ 4-5 ในแง่แหล่งกำเนิดอาจดูเหมือนว่าการปลดปล่อยโดยกิจกรรมมนุษย์นั้นน้อยกว่าการปลดปล่อยโดยรวมจากธรรมชาติ แต่พึงตระหนักว่าการปลดปล่อยในธรรมชาตินั้นส่วนหนึ่งเกิดมาจากปรอทที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งได้สะสมอยู่ในดินและน้ำเรื่อยมาเป็นเวลานาน ส่วนในแง่กระบวนการที่กำจัดปรอทออกจากบรรยากาศมีช่องทางหลักคือการตกสะสม (Deposition) ในแง่ของการกระจายตัวในแนวดิ่ง พบว่าสัดส่วนของปริมาณปรอทในบรรยากาศชั้นล่าง (Troposphere) เทียบกับทั้งคอลัมน์บรรยากาศ คิดเป็นร้อยละ 96 ร้อยละ 46 และร้อยละ 13 สำหรับ  $Hg^0$   $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$

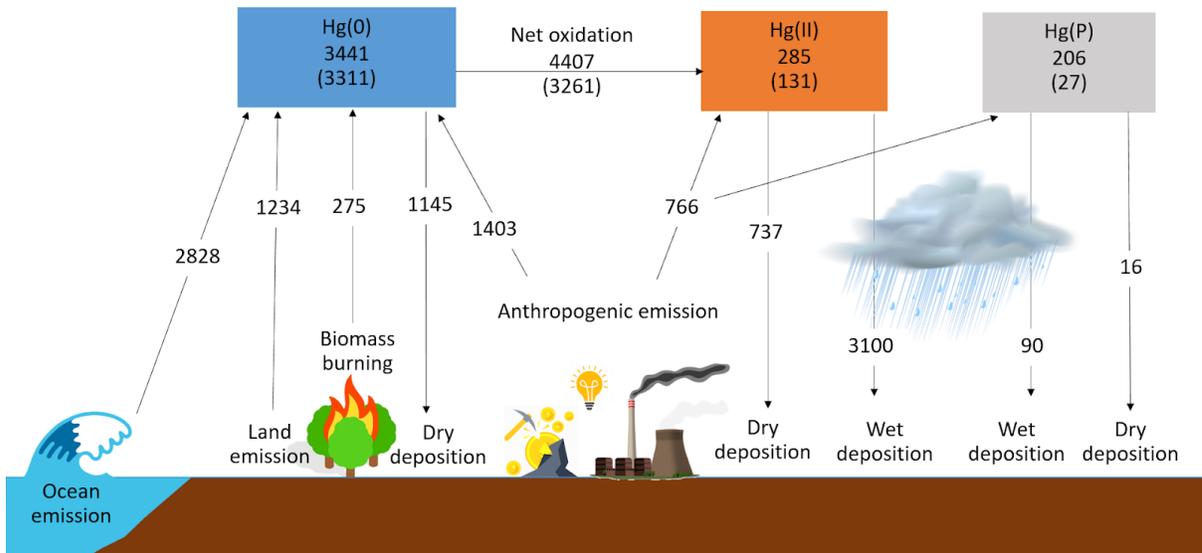
รูปที่ 4-6 แสดงสมดุลมวลของปรอทที่มาจากแหล่งกำเนิดใหม่ผ่านหินในโรงไฟฟ้าของประเทศไทย หรือ MCCT เป็นการคำนวณความเป็นไปของ MCCT ในบรรยากาศโลก MCCT ส่วนใหญ่ (ร้อยละ 85) อยู่ในรูปแบบ  $Hg^0$  เนื่องจากความคงทนมีอายุยาวนานจึงสามารถถูกเคลื่อนย้ายไปได้ไกลทั่วโลก ในขณะที่ปรอทในรูปแบบ  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$  นั้นถูกฝนพาให้ตกสะสมลงสู่พื้นดินได้จึงมีปริมาณในบรรยากาศเป็นสัดส่วนที่เล็กกว่า แต่ก็มีกระบวนการกระจายตัวในระยะไกลจากแหล่งกำเนิดเนื่องจากมีกระบวนการออกซิเดชันจาก  $Hg^0$  ที่เป็นแหล่งกำเนิดทุติยภูมิในบรรยากาศด้วย และด้วยความที่ปรอทในรูปแบบ  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$  ถูกฝนกำจัดออกจากบรรยากาศได้ง่ายนี้เอง ทำให้มีปรอทในรูปแบบ  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$  คงอยู่ในบรรยากาศชั้นสูง หรือที่มีชื่อเรียกว่าชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) และคงอยู่ได้เป็นสัดส่วนมากกว่าในชั้นบรรยากาศล่างที่ติดกับพื้นดิน หรือที่เรียกว่าชั้นโทรโปสเฟียร์ (Troposphere) เพราะไม่มีฝนตกในชั้นสตราโทสเฟียร์ ดังเห็นได้ในสมดุลมวลที่มี  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$  ในชั้นโทรโปสเฟียร์เป็นส่วนน้อย คือเพียง 39 กิโลกรัมและ 9 กิโลกรัมตามลำดับ

ในแง่กระบวนการต่าง ๆ ที่เพิ่มเติมมวลปรอทในบรรยากาศ นอกจากการปลดปล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินโดยตรง จะเห็นว่ามีปรอทที่ดั้งเดิมมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินถูกปลดปล่อยซ้ำอีกผ่านกระบวนการทางธรรมชาติคือ จากพื้นดิน เป็นเพราะว่า MCCT ในรูปแบบ  $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$  ที่ตกสะสมลงสู่พื้นดินนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับเป็น  $Hg^0$  ใน

พื้นดิน แล้วเกิดการปลดปล่อยกลับสู่บรรยากาศได้อีก สำหรับปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ มีทั้งการออกซิเดชันจาก  $Hg^0$  ก่อให้เกิด  $Hg^{2+}$  และการรีดักชันที่เปลี่ยน  $Hg^{2+}$  กลับไปเป็น  $Hg^0$  โดยรวมแล้วพบว่ามีปฏิกิริยารีดอกซ์สุทธิเป็นการก่อให้เกิด  $Hg^{2+}$  ที่อัตราสูงคิดเป็น 3.2 เท่าของอัตราการปลดปล่อยปรอทรวมจากแหล่งกำเนิดโรงไฟฟ้าโดยตรง ผลจากแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นประเด็นว่าการปลดปล่อยปรอทจากการเผาไหม้ถ่านหิน นอกจากที่ปลดปล่อยโดยตรง ยังก่อให้เกิดผลทางอ้อมที่รุนแรงยิ่งกว่าในการแปรเปลี่ยนปรอท  $Hg^0$  ที่เสถียรในสิ่งแวดล้อมให้กลายเป็น  $Hg^{2+}$  ที่สามารถสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การแปรเปลี่ยนทางเคมีที่ซับซ้อนนี้เองที่ทำให้  $Hg^{2+}$  มีการกระจายตัวได้ไกลจากแหล่งกำเนิดปฐมภูมิและกว้างไกลไปทั่วบรรยากาศโลก

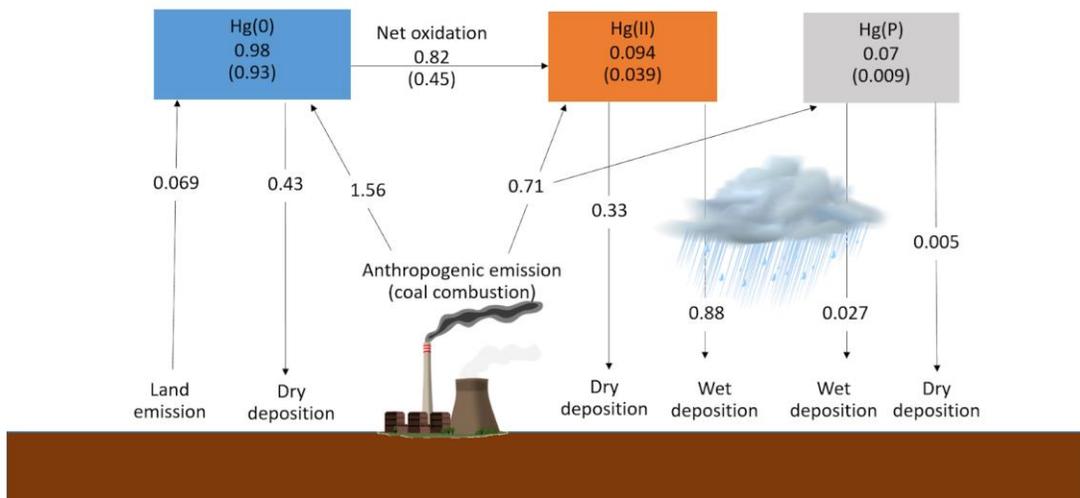
ในส่วนของ การกระจายตัวในแนวดิ่ง พบว่าสัดส่วนของปริมาณ MCCT ในบรรยากาศชั้นล่าง (Troposphere) เทียบกับทั้งคอลัมน์บรรยากาศ คิดเป็นร้อยละ 94 ร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับ  $Hg^0$   $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$

ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นศักยภาพของมลพิษปรอทซึ่งถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดแบบจุด หากแต่สามารถส่งผลให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดทุติยภูมิในที่ห่างไกลจากต้นกำเนิดแรก สำหรับกระบวนการที่กำจัดปรอทออกจากบรรยากาศ จะเห็นว่า  $Hg^0$  ไม่มีการตกสะสมแบบเปียก เพราะว่า  $Hg^0$  นั้นไม่ละลายน้ำ ในภาพรวมแล้ว การตกสะสมแบบเปียก และแบบแห้งนั้นมีความสำคัญใกล้เคียงกัน การตกสะสมหรือ deposition นั้น แม้จะเรียกว่าเป็นการสูญเสียปรอทออกจากสมดุลมวลปรอทในบรรยากาศ แต่แท้จริงก็คือการเคลื่อนย้ายปรอทจากบรรยากาศไปสู่พื้นดินและผิวน้ำ นี่จึงเป็นกระบวนการที่เชื่อมโยงสู่ผลกระทบต่อระบบนิเวศ ซึ่งจะบรรยายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4-5 แผนภาพสมดุลมวลของปรอทในบรรยากาศครอบคลุมทั้งโลก ซึ่งมาจากทุกแหล่งกำเนิด

ตัวเลขในกล่องคือปริมาณปรอทในบรรยากาศในหน่วยตัน โดยแสดงปริมาณในบรรยากาศทั้งหมด และในวงเล็บเป็นปริมาณในชั้นบรรยากาศที่ติดกับพื้นดินหรือ Troposphere ตัวเลขบนลูกศรแสดงอัตราของกระบวนการต่าง ๆ ในหน่วยตันต่อปี



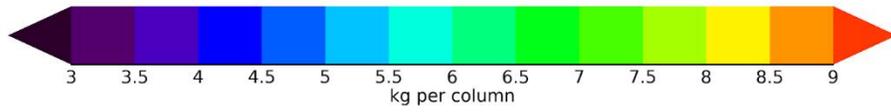
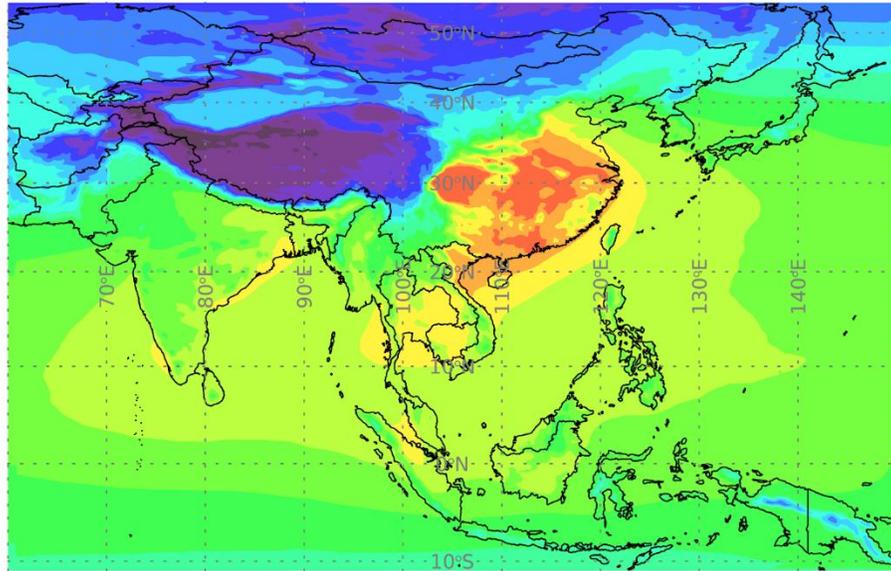
รูปที่ 4-6 แผนภาพสมดุลมวลของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยหรือ MCCT

ตัวเลขในกล่องคือปริมาณปรอทในบรรยากาศในหน่วยตัน โดยแสดงปริมาณในบรรยากาศทั้งหมด และในวงเล็บเป็นปริมาณในชั้นบรรยากาศที่ติดกับพื้นดินหรือชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ตัวเลขบนลูกศรแสดงอัตราของกระบวนการต่าง ๆ ในหน่วยตันต่อปี

#### 4.6 แผนที่ปรอท

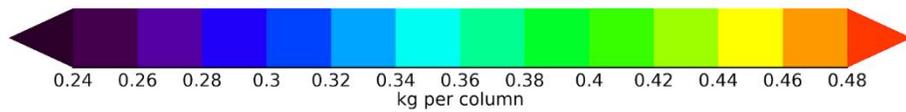
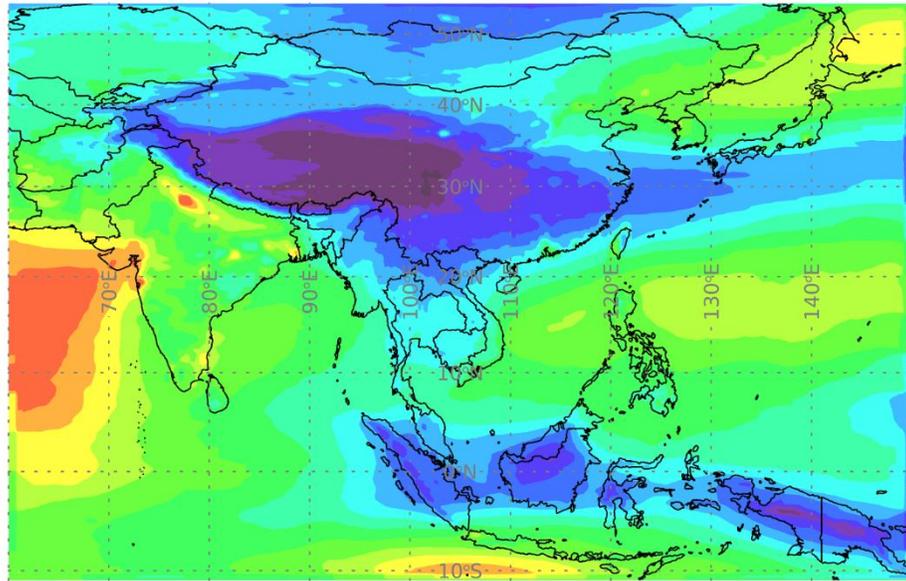
แบบจำลองนั้นทำการคำนวณปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด ซึ่งช่วยเผยให้เห็นถึงการกระจายตัวของปรอทในบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4-7 สำหรับ  $Hg^0$  มีการกระจายตัวที่เห็นความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดต่างๆ บนพื้นดิน ดังที่เห็นปริมาณ  $Hg^0$  มีค่าสูงบริเวณสาธารณรัฐประชาชนจีนซึ่งมีการปลดปล่อยปรอทจากกิจกรรมต่าง ๆ สอดคล้องระดับความเป็นอุตสาหกรรมและเมือง และมีปริมาณ  $Hg^0$  มีค่าต่ำบริเวณเขตปกครองตนเองทิเบต สำหรับ  $Hg^{2+}$  นั้นมีลักษณะการกระจายตัวไปในบรรยากาศที่ไม่มีความเชื่อมโยงชัดเจนกับแหล่งกำเนิดบนพื้นดิน เพราะมีกระบวนการออกซิเดชันของ  $Hg^0$  ในบรรยากาศเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญ ซึ่งสัมพันธ์กับ  $Hg^0$  ที่เคลื่อนย้ายระยะไกลและสารที่มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งยังมีการสูญเสีย  $Hg^{2+}$  ออกจากบรรยากาศไปกับฝน ดังนั้น  $Hg^{2+}$  จึงมีลักษณะการกระจายตัวที่ซับซ้อนจากหลายปัจจัย ส่วนปรอทในรูป  $Hg^P$  เกิดจาก  $Hg^{2+}$  ที่เปลี่ยนสถานะจากก๊าซไปเป็นอนุภาค จึงมีความสัมพันธ์ร่วมกับการกระจายตัวของอนุภาค (Particulate matter) ประเภทอื่น ๆ ด้วย

Hg0\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_mass



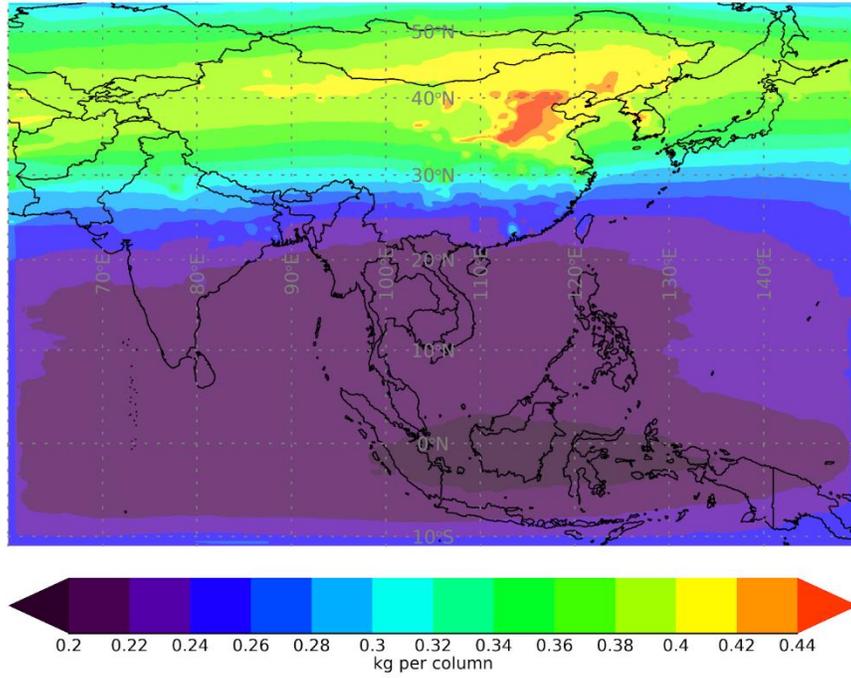
ก)

Hg2\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_mass



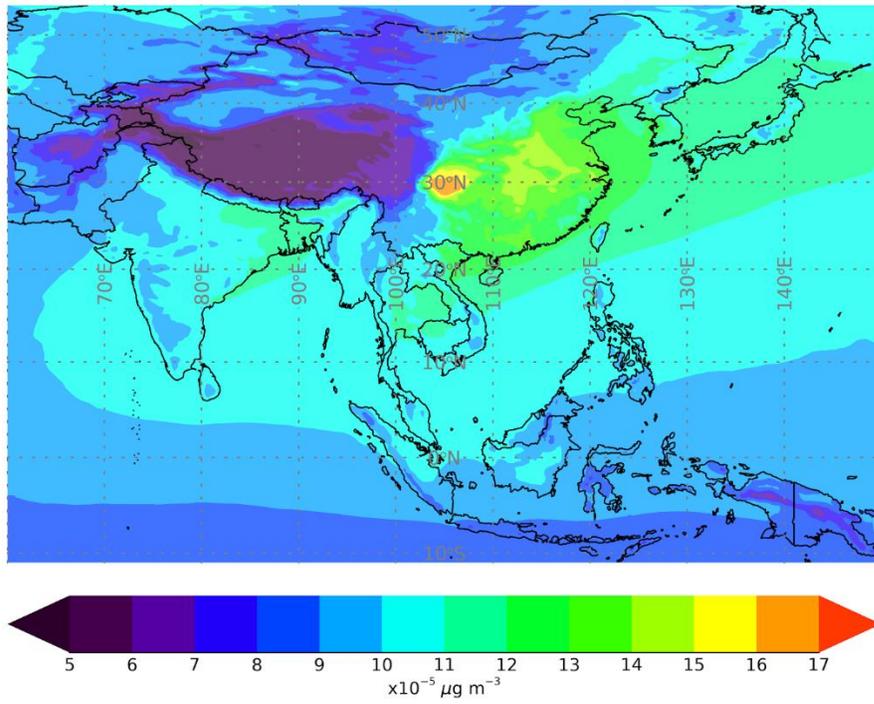
ข)

HgP\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_mass



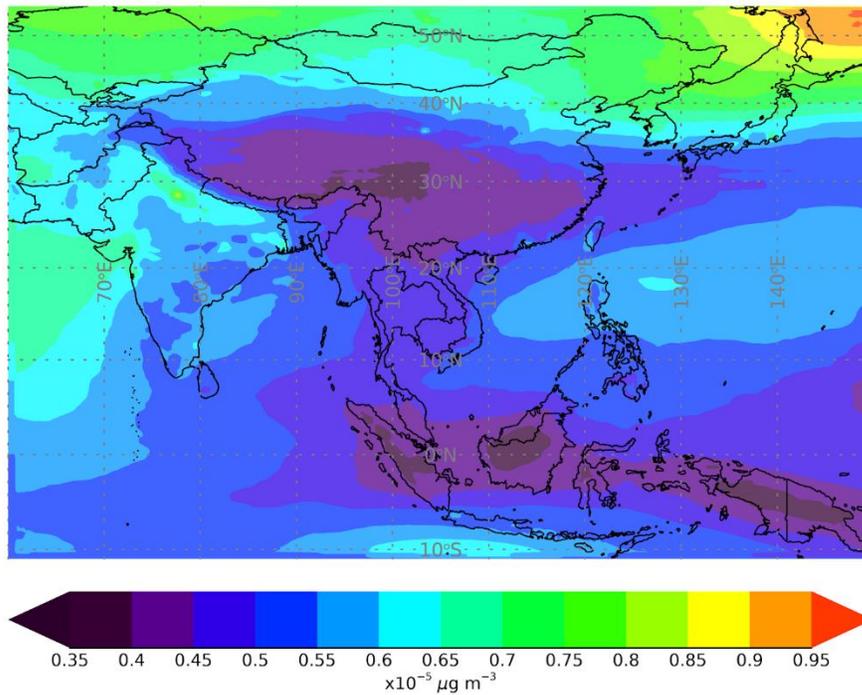
ค)

Hg0\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_conc



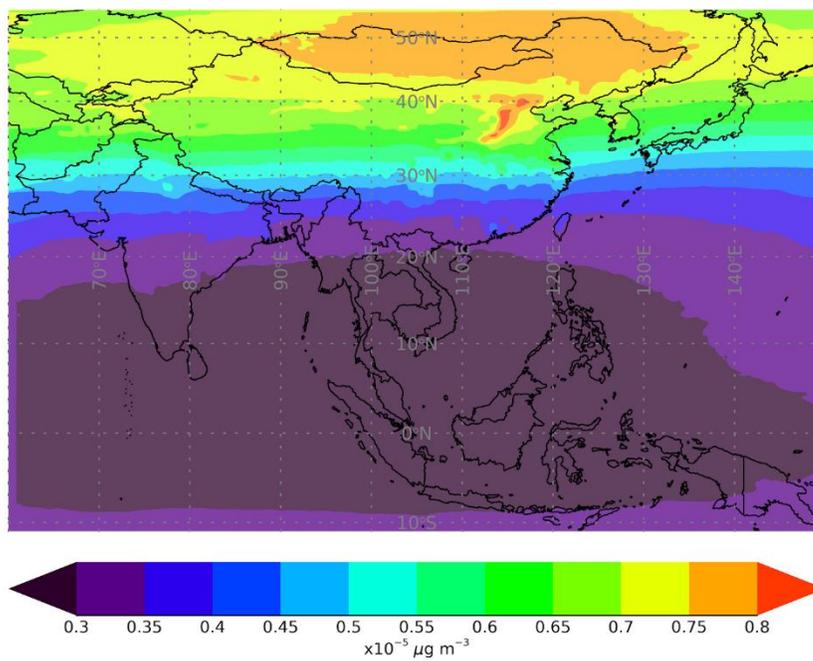
ง)

Hg2\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_conc



จ)

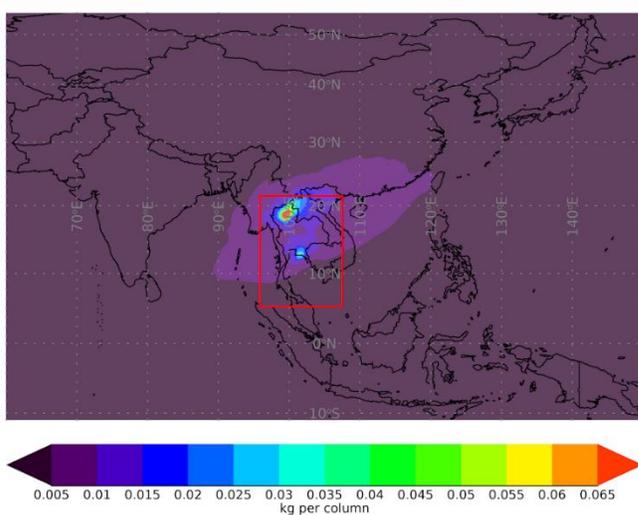
HgP\_Fullcolumn\_FullEmis\_annual\_column\_conc



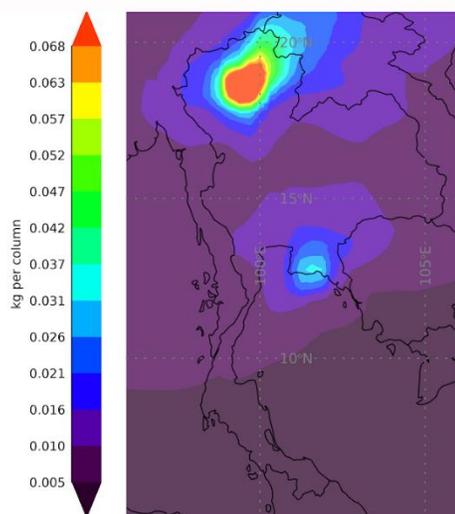
ข)

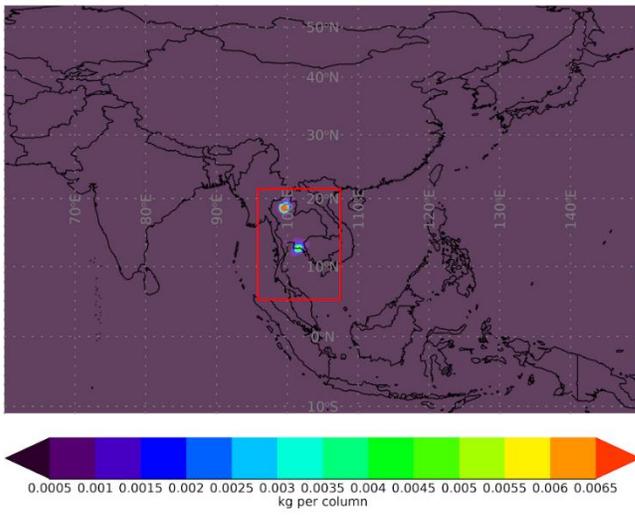
รูปที่ 4-7 แผนที่ปริมาณปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด แสดงค่าเฉลี่ยของปี 2561 ปริมาณรวม  
 ในชั้นบรรยากาศทั้งหมด ในหน่วยกิโลกรัมต่อคอลัมน์ สำหรับ ก)  $Hg^0$  ข)  $Hg^{2+}$  และ ค)  
 $Hg^P$  และเป็นความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งคอลัมน์ในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
 สำหรับ ง)  $Hg^0$  จ)  $Hg^{2+}$  และ ฉ)  $Hg^P$

รูปที่ 4-8 แสดงแผนที่การกระจายตัวของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย (MCCT) ซึ่งคำนวณโดยแบบจำลอง GEOS-Chem แบบจำลองในระดับโลกให้ผลบ่งชี้  
 ว่าปรอท MCCT กระจายตัวไปในบรรยากาศทั่วทั้งโลก เมื่อพิจารณาในแง่พื้นที่เทียบกับต้น  
 กำเนิดในประเทศไทย พบว่าปรอทส่วนใหญ่กระจายไปนอกดินแดนประเทศไทย โดยร้อยละ  
 98 ร้อยละ 99.5 และร้อยละ 99.7 ของ MCCT ในรูปแบบ  $Hg^0$   $Hg^{2+}$  และ  $Hg^P$   
 ตามลำดับ นั้นแพร่กระจายนอกประเทศไทย แสดงให้เห็นว่ามลพิษนั้นแพร่กระจายอย่าง  
 ไร้พรมแดน และปรอทนั้นมีอายุยาวนานจึงถูกเคลื่อนย้ายไปได้ระยะทางไกล หาก  
 พิจารณาการกระจายตัวบนแผนที่จะเห็นบริเวณความเข้มข้นของ MCCT สูงเด่นชัดใน  
 ประเทศไทย ส่วนที่นอกประเทศนั้นความเข้มข้นแต่ละกริดมีค่าต่ำ หากแต่ในภาพรวมของ  
 โลกนั้นปรอท MCCT นี้กระจายครอบคลุมพื้นที่กว้างใหญ่มหาศาลของโลก ทำให้โดยรวม  
 แล้วสัดส่วนที่กระจายอยู่นอกประเทศไทยมีค่ามาก

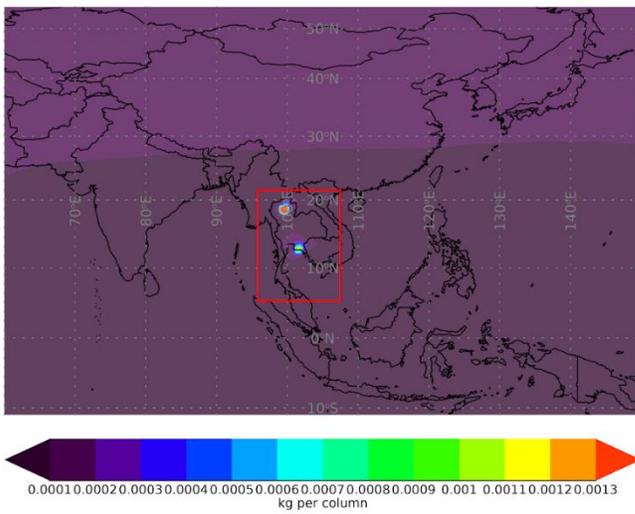
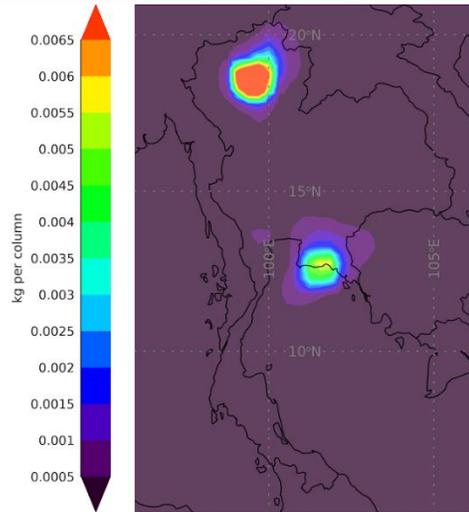


ก)

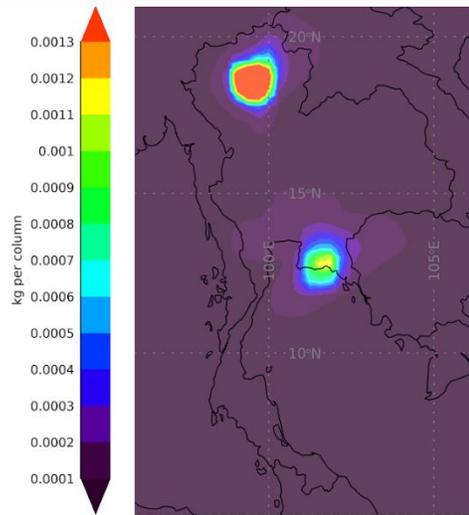


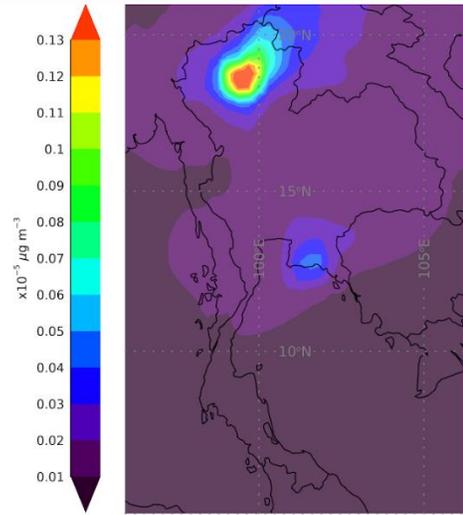
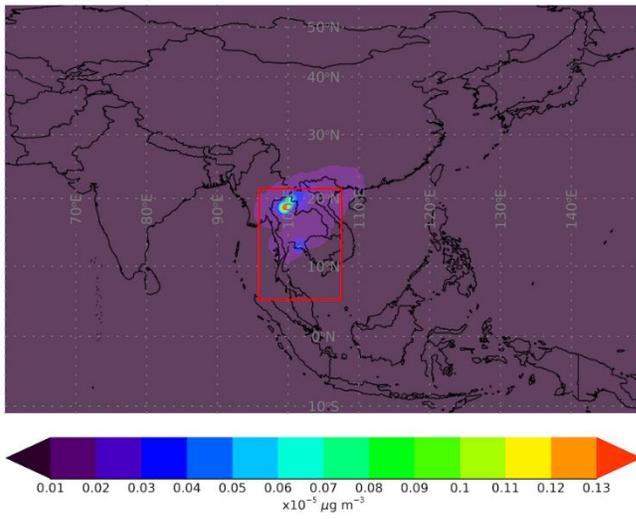


๒)

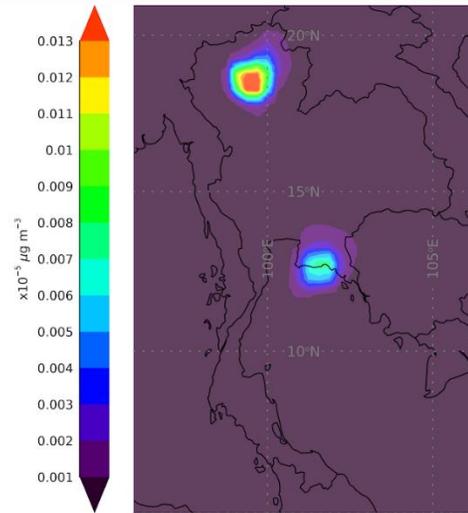
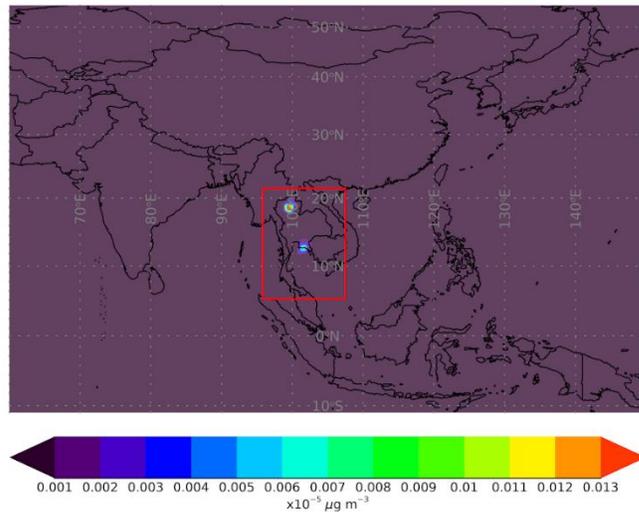


๓)

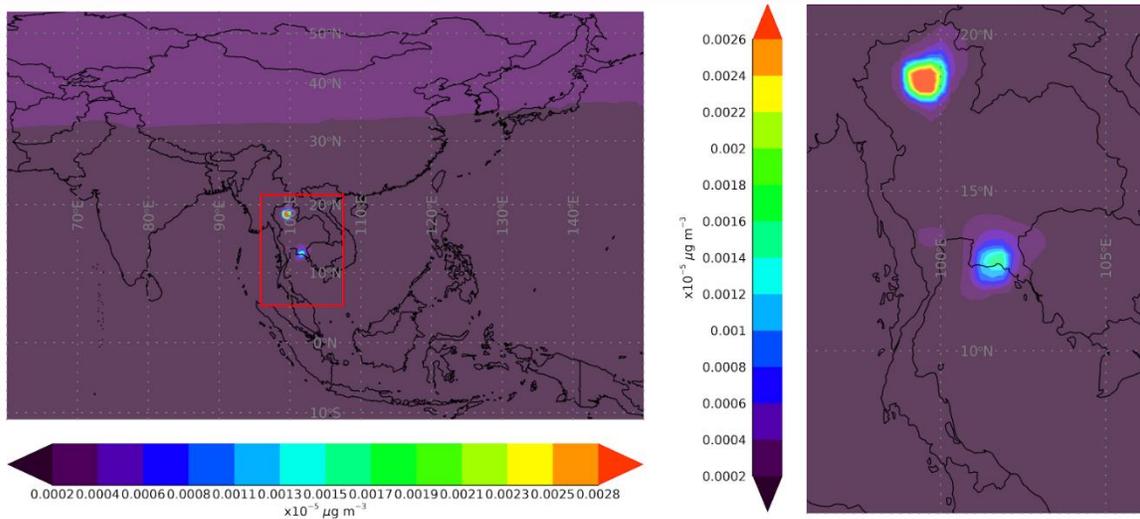




2)



3)



จ)

รูปที่ 4-8 แผนที่ปริมาณปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย (MCCT) แสดงค่าเฉลี่ยของปี 2561 ปริมาณรวมในชั้นบรรยากาศทั้งหมด ในหน่วยกิโลกรัมต่อคอลัมน์ สำหรับ ก)  $Hg^0$  ข)  $Hg^{2+}$  และ ค)  $Hg^p$  และเป็นความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งคอลัมน์ในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับ ง)  $Hg^0$  จ)  $Hg^{2+}$  และ ฉ)  $Hg^p$

ในแง่ของกระบวนการที่กำจัดปรอทออกจากบรรยากาศซึ่งคือการเคลื่อนย้ายปรอทในบรรยากาศไปสู่ผิวดินและแหล่งน้ำนั้น รูปที่ 4-9 แสดงแผนที่การตกสะสมโดยจำแนกเป็นการตกสะสมแบบแห้ง (Dry deposition) การตกสะสมแบบเปียก (Wet deposition) และการตกสะสมรวม (ผลรวมการตกสะสมแบบแห้งและตกสะสมแบบเปียก) จากรูปจะสามารถเห็นลักษณะของการตกสะสมแบบแห้งที่สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดปรอท ในขณะที่การตกสะสมแบบเปียกนั้นสัมพันธ์กับรูปแบบบริเวณการเกิดฝนตกซึ่งประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แผนที่การตกสะสม ดังในรูปที่ 4-9 นี้สื่อถึงปรอทที่ประเทศไทยต้องเผชิญในภาพรวม ซึ่งประเทศไทย (ทั้งหมดของผืนแผ่นดินและน่านน้ำของประเทศไทยอ้างอิงตาม Exclusive Economic Zone) เผชิญกับการตกสะสมปรอทรวม 219 กิโลกรัมต่อปี เกิดจากการตกสะสมแบบเปียก 32 กิโลกรัมต่อปี และการตกสะสมแบบแห้ง 187 กิโลกรัมต่อปี

หากพิจารณาการตกสะสมของ MCCT หรือปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย ในการจำลองในระดับโลกพบว่าร้อยละ 80 ของการตกสะสม MCCT เกิดขึ้นนอกประเทศไทย อย่างไรก็ตามการตกสะสม MCCT ที่ใกล้แหล่งกำเนิดในประเทศไทยนั้นทำให้เกิดบริเวณ hotspot ของการตกสะสมอย่างเด่นชัด รูปที่ 4-10 แสดงให้เห็นลักษณะการ

ตกสะสมที่มีอัตราสูงกระจุกตัวใกล้แหล่งกำเนิด โดยมีพื้นที่อิทธิพลการตกสะสม (Area of deposition influence: ADI) เด่นชัดสองบริเวณ คือ บริเวณที่ 1 (ADI1) กลุ่มจังหวัดภาคเหนือซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่จังหวัดลำปาง และบริเวณที่ 2 (ADI2) จังหวัดจันทบุรี-ตราด สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดที่สำคัญในจังหวัดลำปาง และแหล่งกำเนิดบริเวณจังหวัดระยองตามลำดับ เมื่อพิจารณาในแง่ความสำคัญของการตกสะสมของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยเทียบกับปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด แบบจำลองรายงานผลว่าในบริเวณ ADI1 นั้นพบการตกสะสมของ MCCT คิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 26 เทียบกับการตกสะสมของปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด

ส่วนบริเวณ ADI2 นั้นพบสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 16 ดังรูปที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์พื้นที่อิทธิพลการตกสะสมแสดงดังรูปที่ 4-12 พบว่าการตกสะสมบริเวณที่ 1 (ADI1) ต้องเผชิญกับปรอทที่ตกสะสม (รวมแบบเปียกและแบบแห้ง) ในอัตราที่สูงกว่าบริเวณ ADI2 และบริเวณอื่นๆที่เหลือในประเทศไทย อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือใจกลางบริเวณ ADI1 ซึ่งคือจังหวัดลำปาง นั้น ได้รับ MCCT ที่ตกสะสมสูงถึง 11 ไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่การสะสมของปรอทสู่สิ่งแวดล้อมและความเสี่ยงการสัมผัสสัมผัสปรอทของประชาชนในพื้นที่ดังกล่าว ถือว่าเป็นประเด็นที่ต้องให้ความใส่ใจ หากพิจารณาปริมาณปรอทที่ตกสะสมในห้วงเวลาหนึ่งปี บริเวณ ADI1 ประสบกับการตกสะสมปรอทรวม 131 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 60 ของการตกสะสมปรอทที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ส่วนบริเวณ ADI2 (จังหวัดจันทบุรี-ตราด) นั้นเผชิญกับการตกสะสมของปรอทในปริมาณ 34 กิโลกรัมต่อปี หรือร้อยละ 15ของการตกสะสมปรอทในประเทศไทย ข้อมูลนี้เผยให้เห็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมของปรอทที่มีต่อบริเวณจังหวัดใกล้เคียงที่ตั้งโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งอาจมีเคยได้ถูกตีแผ่ให้เข้าใจมาก่อนหากแต่ผู้ได้รับผลกระทบถูกผลกระทบความเสี่ยงอย่างไม่รู้ตัว

การจำลองการตกสะสมนี้สามารถระบุบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการสะสมปรอทในปลาที่มากน้อยแตกต่างกันไป อันนำไปสู่การเก็บตัวอย่างปลาในแหล่งน้ำตามตำแหน่งต่างๆ เพื่อการเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองว่าปรอทที่พบในตัวอย่งปลานั้นจะมีรูปแบบแนวโน้มปริมาณสอดคล้องกับผลจากการตกสะสมจากแบบจำลองเพียงใด การศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างปลาจากจำนวน 6 สถานี แสดงดังรูปที่ 4-13 ได้แก่จุดที่คาดการณ์ว่าจะมีการตกสะสมของปรอทสูงกว่าปกติ อันประกอบด้วย 1) เขื่อนกัวคองหมา (จังหวัดลำปาง) (สอดคล้องกับ ADI1) และ 2) อ่างเก็บน้ำด่านชุมพล (จังหวัดตราด) (สอดคล้องกับ ADI2) และจุดที่มีการตกสะสมของปรอทปานกลาง อันประกอบด้วย 3) อ่างเก็บน้ำห้วยท่าเคย (จังหวัดราชบุรี) และ 4) เขื่อนวชิราลงกรณ์ (จังหวัดกาญจนบุรี) และบริเวณที่การตกสะสมของปรอทต่ำมาก หรือที่เรียกว่าพื้นที่ควบคุม อันประกอบด้วย 5) อ่างเก็บน้ำทะเลหลวง (จังหวัดสุโขทัย) และ 6) เขื่อนห้วยหลวง (จังหวัดอุดร) ตารางที่ 4-2 แสดงพิกัดของจุดเก็บตัวอย่างปลาทั้ง 6 และ จำนวนปลาที่จับในแต่ละตำแหน่ง การ

จับปลาดำเนินการโดยผู้ที่มีความชำนาญในการจับปลาในแหล่งน้ำแต่ละแห่งโดยใช้ อุปกรณ์ คือ ข่ายดักปลา ซึ่งการจับปลาในแหล่งน้ำที่มีขนาดใหญ่มีความยากในการใช้แห หรือเบ็ดตก ปลา ผู้ดำเนินการจึงวางข่ายดักปลาเป็นระยะเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงจึง สามารถเก็บปลาที่ติดข่ายและบรรจุใส่กล่องโฟมแช่น้ำแข็งเพื่อรักษาสภาพปลาก่อนนำมา ชำแหละในห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อวิเคราะห์ปรอทในเนื้อปลาโดย ห้องปฏิบัติการที่ได้รับการขึ้นทะเบียนและรับรองคุณภาพ (Accredited Laboratory Service)

ทั้งนี้ปลากระสับซิด (*Hampala macrolepidota*) (ตุรุษที่ 4-14) เป็นปลาชนิดหลักที่ จับได้ใน 5 จุดเก็บตัวอย่าง (ยกเว้นจากอ่างเก็บน้ำทะเลหลวง จังหวัดสุโขทัย) จากทั้งหมด 6 จุดเก็บตัวอย่าง โดยจากปลาที่จับได้ 72 ตัว เป็นปลากระสับซิด 60 ตัว (หรือร้อยละ 83.33) ฉะนั้นการแปลผลการสะสมปรอทเชิงเปรียบเทียบจะทำได้ถูกต้องตามหลัก วิชาการ เมื่อเน้นการเปรียบเทียบการสะสมปรอทในปลากระสับซิดที่แหล่งน้ำที่แตกต่างกัน ทั้ง 5 แหล่งที่มีการตกสะสมของปรอทที่แตกต่างกัน โดยคณะวิจัยได้ทำการวัดขนาด และน้ำหนักของปลากระสับซิดที่จับได้ และความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลาที่จับได้ใน แต่ละแหล่งน้ำแสดงในตารางที่ 4-2 และในภาคผนวก 1 ปลากระสับซิดเป็นปลาที่มนุษย์ บริโภคเป็นอาหาร การสะสมของปรอทในเนื้อปลาดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อความเสี่ยง ต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามนอกจากปลากระสับซิดแล้ว ยังมีปลาชนิดอื่นๆอีกที่ถูก จับได้จาก 6 แหล่งน้ำในการเก็บตัวอย่างครั้งนี้ อันประกอบด้วย ปลากดขาว ปลาดุก ปลากดแก้ว ปลาสวาย ปลาเทโพ ปลาทราย ปลาชะโด และปลาบู่ ดังแสดงในตารางที่ 4-3 และ 4-4

ตารางที่ 4-2 แหล่งน้ำที่ทำการศึกษา ขนาด และน้ำหนักของปลากระสูบขีดที่จับได้ และความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลาที่จับได้ในแต่ละแหล่งน้ำ พร้อมทั้งความเป็นไปได้ที่ปลาที่จับได้จะมีปรอทมากกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม

Station	Latitude	Longitude	Accumulated mercury (kg/year)	Reservoir's surface area (km <sup>2</sup> )	Reservoir's volume (million m <sup>3</sup> )	Fish quantity	Fish weight (g)	Mercury concentration (mg/kg)	mg/kg
Kiew Kho Ma dam (Lampang)	18.81392	99.639533	26.9788	1275	170	15	206±31	0.258±0.2	40
Huai Tha Khoei reservoir (Ratchaburi)	13.28116	99.418369	23.8504	147	23.4	9	232±70	0.04±0.14	0
Vajiralongkorn dam (Kanchanaburi)	14.82931	98.597683	27.5311	388	8.1	20	19.75±5	0.03±0.01	0
Dan Chumphol reservoir (Trat)	12.46916	102.64807	25.3288	4.8	5.6	10	117±33	0.16±0.14	16
Huai Luang dam (Udon Thani)	17.36118	102.59574	19.5689	666	1800	6	122±37	0.02±0.01	0

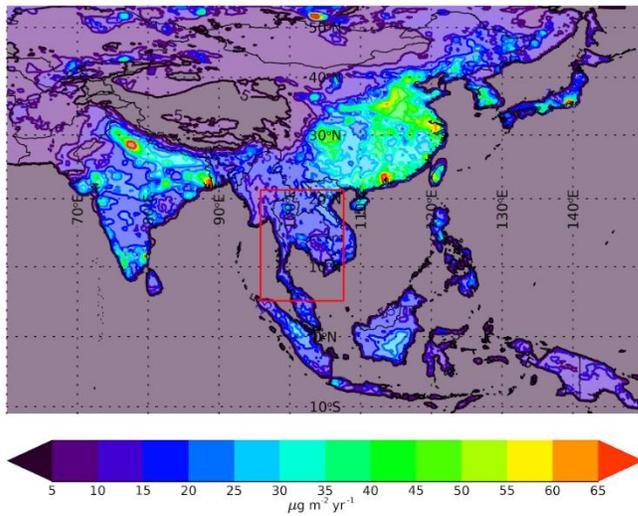
ตารางที่ 4-3 ข้อมูลปลาชนิดอื่น ๆ ในแต่ละสถานี

Station	Fish species	Fish weight (g)	Fish quantity	Mercury concentration (mg/ kg)
Kiew Kho Ma damn (Lampang)	Walking catfish	757	1	0.36
Huai Tha Khoei reservoir (Ratchaburi)	Java Barb	213	1	0.07
Dan Chumphol reservoir (Trat)	Marble goby	169	1	0.2
Huai Laung dam	Clown featherback	132	1	0.008
	Giant snakehead	2,492	2	0.03

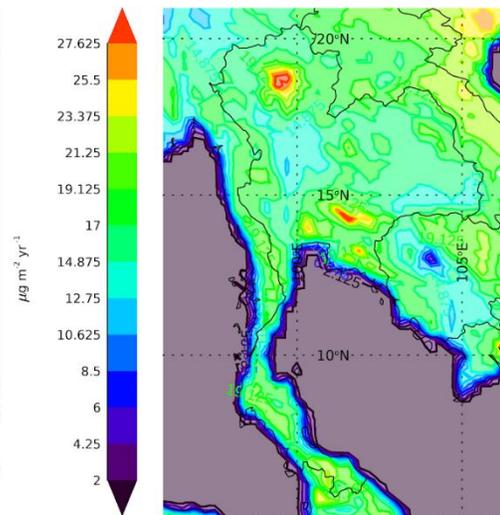
ตารางที่ 4-4 ข้อมูลพื้นที่สถานีทุ่งทะเลหลวง สุโขทัยและความเข้มข้นปรอทในปลาแต่ละชนิด

Station	Latitude	Longitude	Accumulated mercury (kg/ year)	Reservoir surface area (km <sup>2</sup> )	Reservoir's volume (million m <sup>3</sup> )	Fish species	Fish weight (g)	Fish quantity	Mercury concentration (mg/ kg)	mg/ kg
Thale Luang reservoir (Sukhothai)	17.05187	99.796897	18.1812	11.28	32.4	Asian redfin	607	3	0.09	0
						catfish	1,956		0.09	
						(ปลากตแก้ว)	607		0.09	
						Iridescent shark (ปลา	1,710	2	0.04	
						One spot pangasius (ปลาเทโพ)	1,336		0.02	
757	1	0.03								

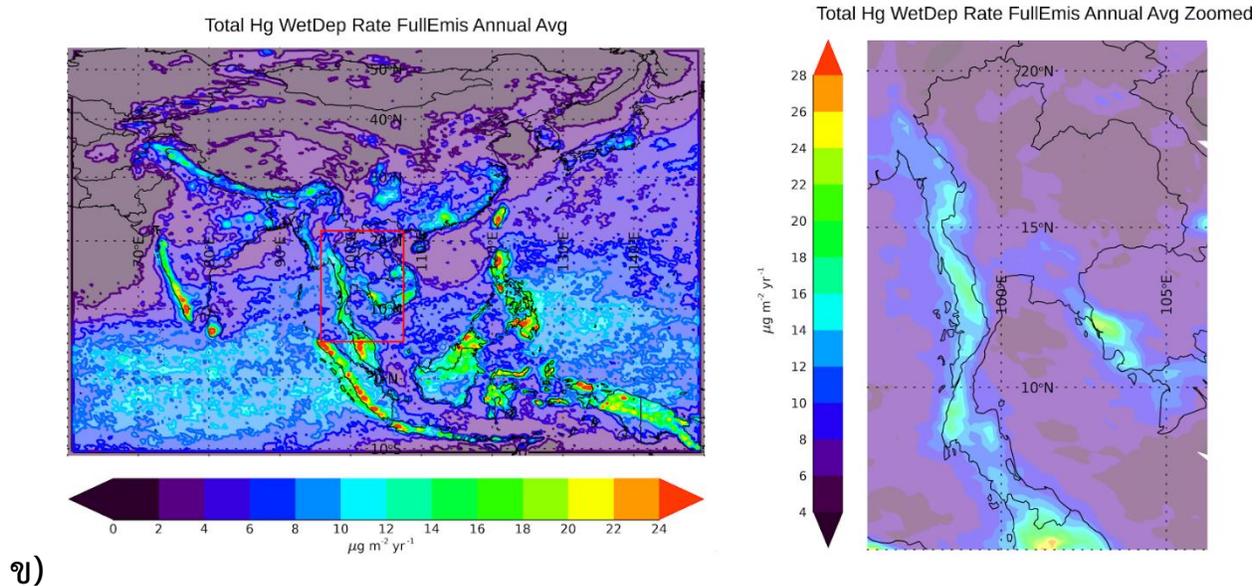
Total Hg DryDep Rate FullEmis Annual Avg



Total Hg DryDep Rate FullEmis Annual Avg Zoomed

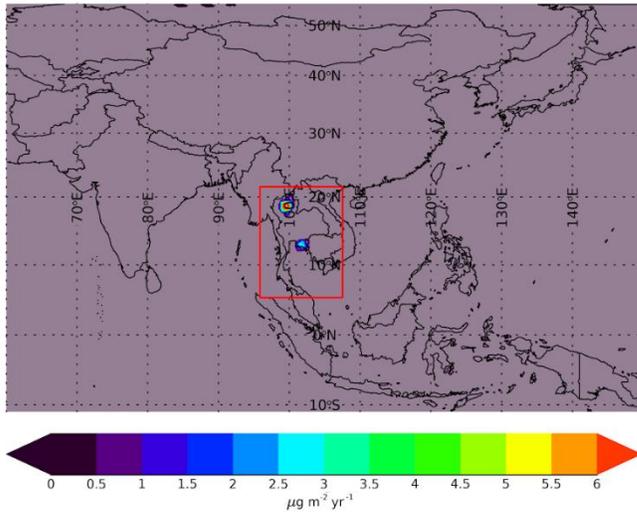


ก)



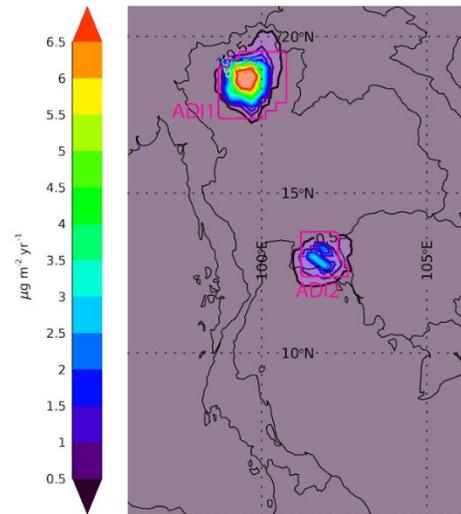
รูปที่ 4-9 แผนที่การตกสะสมของปรอท รวมปรอททุกรูปแบบ จากทุกแหล่งกำเนิด แสดงค่าเฉลี่ยของปี 2561 ในหน่วยไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อปี กล่องสีแดงในรูปซ้าย แสดงบริเวณประเทศไทยที่น่าเสนอ ในรูปขวา รูป ก) การตกสะสมแบบแห้ง และ ข) การสะสมแบบเปียก

MCCT TotalHg DryDep Rate Annual Avg

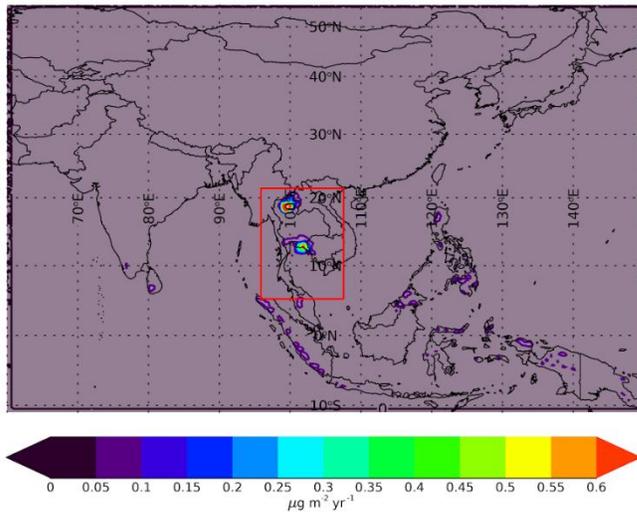


ก)

MCCT TotalHg DryDep Rate Annual Avg Zoomed

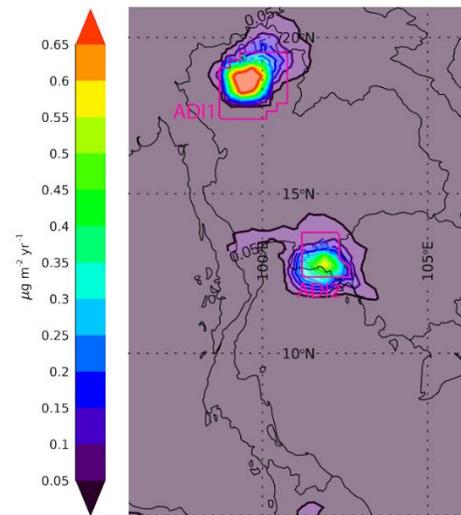


MCCT TotalHg WetDep Rate Annual Avg



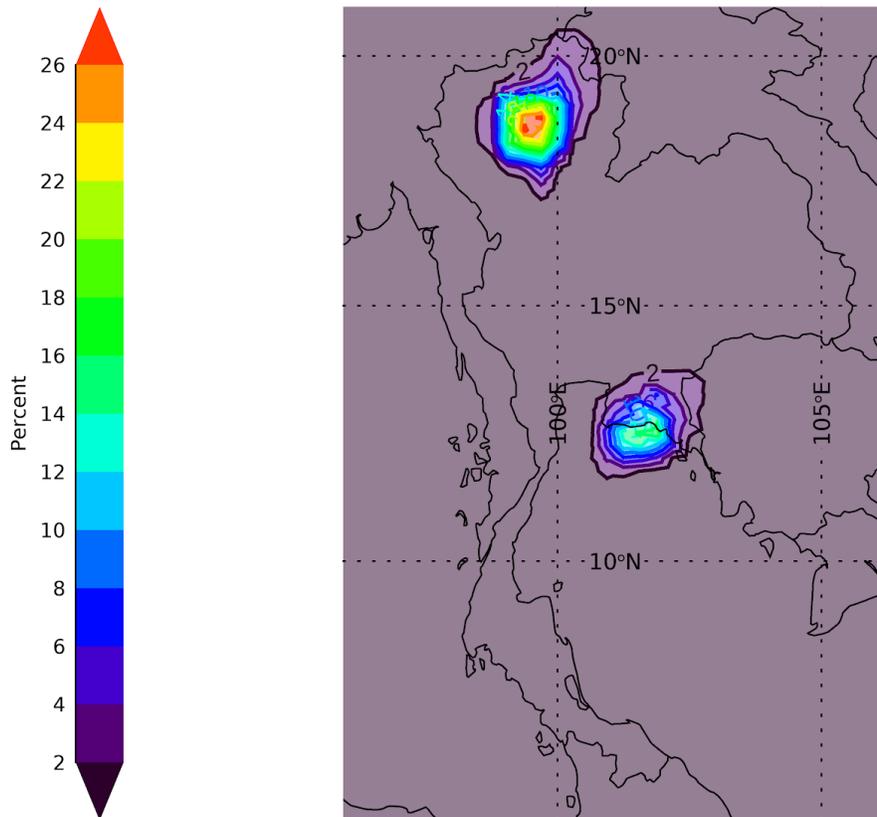
ข)

MCCT TotalHg WetDep Annual Avg Zoomed d

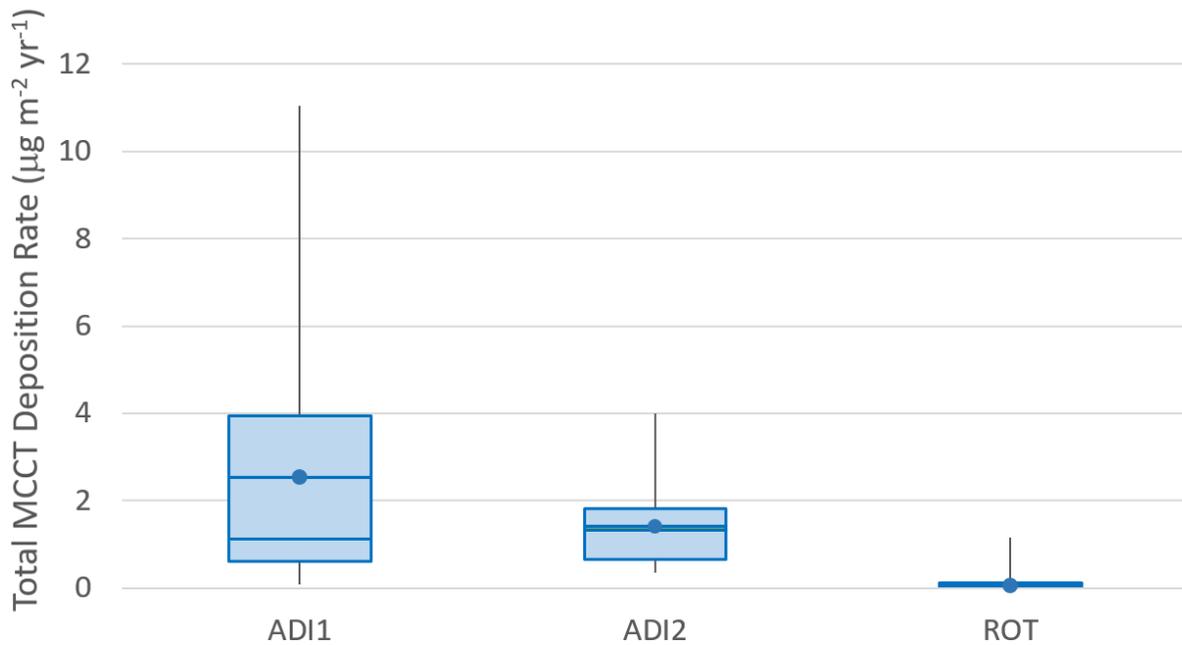


รูปที่ 4-10 แผนที่การตกสะสมของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย (MCCT) รวมปรอททุกรูปแบบ แสดงค่าเฉลี่ยของปี 2561 ในหน่วยไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อปี กล่องสี่แดงในรูปซ้ายแสดงบริเวณประเทศไทยที่น่าเสนอ ในรูปขวา ส่วนกรอบสี่ชมพูในรูป ขวาบ่งชี้บริเวณอิทธิพลการตกสะสม ADI1 และ ADI2 รูป ก) การตกสะสมแบบแห้ง และ ข) การสะสมแบบเปียก

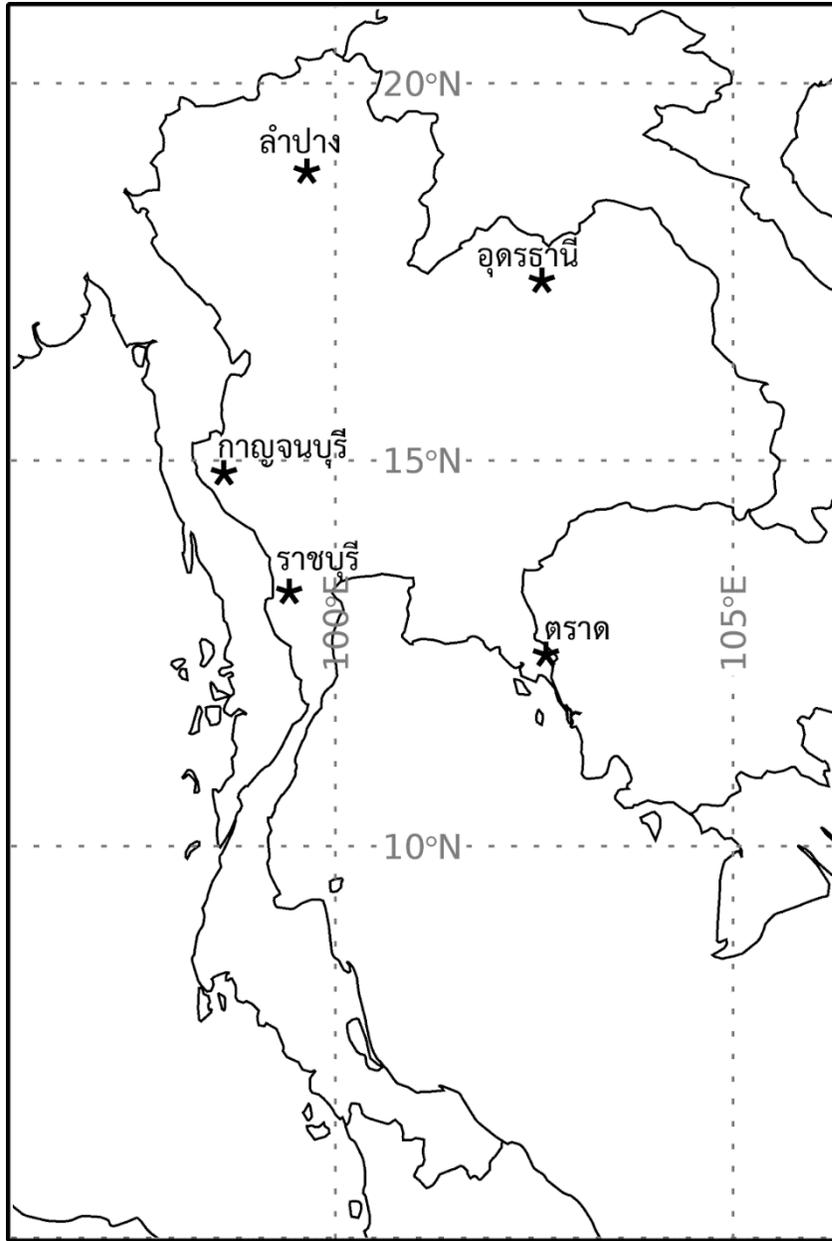
MCCT contribution to Total Dep Zoomed



รูปที่ 4-11 แผนที่แสดงสัดส่วนของการตกสะสมปรอท MCCT เทียบกับการตกสะสมปรอทจากทุกแหล่งกำเนิด คำนวณจากค่าเฉลี่ยการตกสะสมในเวลา 1 ปี แสดงในหน่วยร้อยละ



รูปที่ 4-12 อัตราการตกสะสมรวมของปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย (MCCT) รวมปรอททุกรูปแบบ แสดงค่าเฉลี่ยของปี 2561 ในหน่วยไมโครกรัมต่อตารางเมตรต่อปี สำหรับพื้นที่อิทธิพลการตกสะสม บริเวณที่ 1 (ADI1) บริเวณที่ 2 (ADI2) และบริเวณที่เหลือในประเทศไทย (Rest of Thailand: ROT) สัญลักษณ์กล่องแสดงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 หรือค่าเฉลี่ย (สัญลักษณ์จุดสีน้ำเงิน) และเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 ตามลำดับจากบนลงล่าง ส่วนสัญลักษณ์เส้นสีดำแสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด



รูปที่ 4-13 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างปลาเพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณปรอท



**Scientific name:** *Hampala macrolepidota*

<b>Kingdom</b>	Animalia
<b>Phylum</b>	Chordata
<b>Class</b>	Actinopterygii
<b>Order</b>	Cypriniformes
<b>Family</b>	Cyprinidae
<b>Genus</b>	Hampala
<b>Species</b>	<i>H. macrolepidota</i>

รูปที่ 4-14 ข้อมูลทางชีวภาพของปลากระสับขีด

ดังแสดงผลในตารางที่ 4-2 สำหรับปลากระสับขีดจาก 5 แหล่งน้ำ พบว่าน้ำหนักของปลากระสับขีดที่จับได้จากเขื่อนก๊วกคองหมา (จังหวัดลำปาง) (สอดคล้องกับ ADI1) มีค่าระหว่าง 158-246 กรัม (โดยมีค่าเฉลี่ย =  $206 \pm 31$ ) ส่วนปลากระสับขีดจากอ่างเก็บน้ำด่านชุมพล (จังหวัดตราด) (สอดคล้องกับ ADI2) มีน้ำหนักระหว่าง 64-163 กรัม (โดยมีค่าเฉลี่ย =  $117 \pm 33$ ) ในขณะที่ปลากระสับขีดจากอ่างเก็บน้ำห้วยท่าเคย (จังหวัดราชบุรี) มีน้ำหนักระหว่าง 153-350 กรัม (โดยมีค่าเฉลี่ย =  $232 \pm 70$ ) และปลากระสับขีดจากเขื่อนวชิราลง

กรณี (จังหวัดกาญจนบุรี) มีน้ำหนักระหว่าง 12-32 กรัม (โดยมีค่าเฉลี่ย =  $19.75 \pm 5$ ) และ  
ท้ายที่สุด ปลากระสูบขีดจากเขื่อนห้วยหลวง (จังหวัดอุดรธานี) มีน้ำหนักระหว่าง 87-191  
กรัม (โดยมีค่าเฉลี่ย =  $122 \pm 37$ )

ในขณะที่การบริโภคเนื้อปลามีประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบประสาทและสมอง แต่  
หากเนื้อปลาปนเปื้อนด้วยสารปรอทก็จะส่งผลเสียต่อระบบประสาทและสมอง  
เช่นเดียวกัน<sup>80</sup> ด้วยเหตุนี้ค่าความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลา = 0.3 มก ต่อ กก จึงเป็น  
ค่าที่ผลประโยชน์จากการบริโภคเนื้อปลาต่อสมองถูกหักล้างโดยผลเสียต่อสมองหาก  
บริโภคเนื้อปลาปนเปื้อนปรอทพอดี กล่าวคือหากเนื้อปลาปนเปื้อนปรอทมากกว่า 0.3 มก  
ต่อ กก การบริโภคเนื้อปลาจะทำให้เกิดผลเสียต่อสมองมากกว่า<sup>80</sup> งานวิจัยนี้จึงใช้ค่าความ  
เข้มข้นของปรอทในเนื้อปลา = 0.3 มก ต่อ กก (น้ำหนักเปียก) เป็นค่าที่ยอมรับได้ของ  
ปรอท เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นของปรอทรวม (Total Hg) ในเนื้อ  
ของปลากระสูบขีดจากทั้ง 5 สถานีเก็บตัวอย่างจะแสดงได้ดังรูปที่ 4-15 โดยเส้นสีแดง  
แสดงค่าความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลา = 0.3 มก ต่อ กก จะพบว่าปลากระสูบขีดที่จับ  
ได้จากเขื่อนก๊วกคองหมา (จังหวัดลำปาง) (สอดคล้องกับ ADI1) และอ่างเก็บน้ำด่านชุมพล  
(จังหวัดตราด) (สอดคล้องกับ ADI2) เกินค่า 0.3 มก ต่อ กก ประมาณร้อยละ 40 และร้อย  
ละ 16 ตามลำดับ ในขณะที่ปลากระสูบขีดที่จับได้จากแหล่งน้ำอื่น ๆ ไม่เกินค่า 0.3 มก ต่อ  
กก

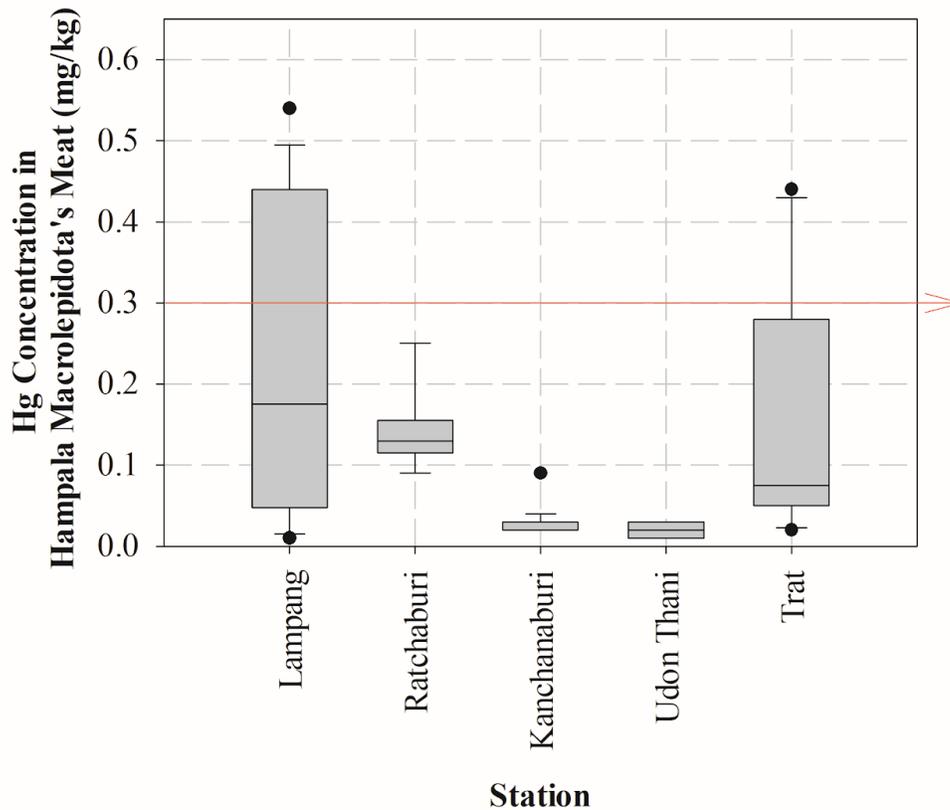
ในทำนองเดียวกัน หากวิเคราะห์ให้ละเอียดขึ้นอีกโดยอ้างอิงงานวิจัยก่อนหน้า<sup>81</sup>  
ที่ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากะพงปากกว้าง  
(Largemouth Bass) และการตกสะสมแบบเปียกรวมของปรอทจากทุกแหล่งที่มา (Total  
Hg Wet Deposition rate ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ )) จะพบว่าการตกสะสมของปรอทรวมแบบเปียก  
ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวโน้มที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ในงานวิจัยดังกล่าว ยกเว้นกรณี  
ของจังหวัดกาญจนบุรีที่ซึ่งปลากระสูบขีดมีขนาดเล็กกว่าที่สถานีอื่นๆมาก และยกเว้นกรณี  
ของจังหวัดอุดรธานีซึ่งเป็นพื้นที่ควบคุมที่มีปรอทตกสะสมต่ำมาก (รูปที่ 4-16) ทั้งนี้ปลา  
กะพงปากกว้างเป็นปลาผู้ล่า และเป็นสิ่งมีชีวิตที่กินทั้งพืชและสัตว์เป็นอาหาร เช่นเดียวกับ  
ปลากระสูบขีดจึงทำให้สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มดังกล่าวรวมกันได้ อย่างไรก็ตามการ  
ทบทวนวรรณกรรมพบว่านอกจากการตกสะสมแบบเปียกของปรอทจากทุกแหล่งที่มาแล้ว  
ยังมีอีกหลายปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการสะสมของปรอทในเนื้อปลา ยกตัวอย่างเช่น ค่า  
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติในน้ำ (Natural Organic Matters) ที่จะส่งผล  
ต่อการแปรสภาพปรอทอินทรีย์ให้เป็นปรอทอินทรีย์<sup>82,83</sup> สารปรอทในน้ำ น้ำหนักของ  
ปลา ความกว้าง ความหนา หรือ ความยาวของปลา<sup>84</sup> และค่าการตกสะสมของปรอทแบบ  
รวม แบบเปียก และแบบแห้งที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศ  
(MCCT Total Hg Deposition, MCCT Wet Hg Deposition และ MCCT Dry Hg  
Deposition) นอกเหนือไปจากค่าการตกสะสมของปรอทแบบรวม แบบเปียก และแบบ

แหล่งที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทุกแหล่งกำเนิดรวมกัน (Total Hg Deposition, Total Wet Hg Deposition, และ Total Dry Hg Deposition) และลักษณะทางอุทกศาสตร์ของแหล่งน้ำ เช่น ขนาดของพื้นที่ลุ่มน้ำพื้นที่ผิวของแหล่งน้ำ และปริมาตรของแหล่งน้ำ

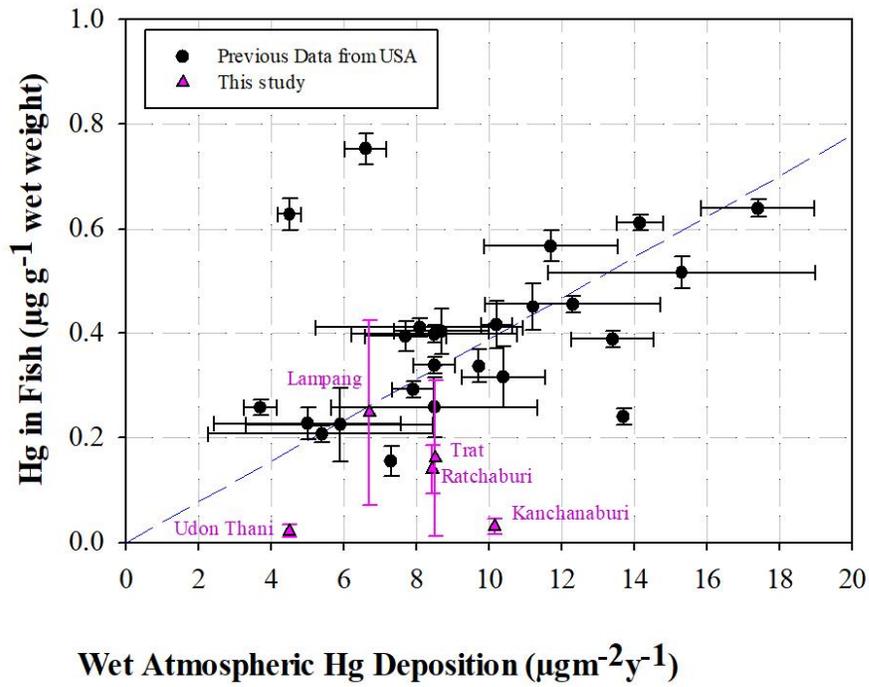
ด้วยงานวิจัยก่อนหน้าพบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากับค่าความยาวของปลา<sup>84</sup> ดังนั้นเพื่อที่จะวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมปรอทในเนื้อปลาที่ตรวจพบ งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ถดถอยแบบพหุคูณเชิงเส้น (Multiple Linear Regression Analysis) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากับทั้ง 15 ปัจจัยกับดังกล่าวข้างต้นโดยการทดสอบที (t-test) และค่า p value (หรือค่า Sig) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ (SPSS) โดยใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 60 ชุดข้อมูลจาก 5 แหล่งน้ำดัง (ตารางที่ 4-2) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญกับค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากระสุนชี้ตจากทั้ง 5 สถานี (ค่านัยสำคัญมากกว่า 0.05) คือ

1. ค่าการตกสะสมของปรอทแบบรวมที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทุกประเภทรวมกัน
2. ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติในน้ำ
3. ปริมาตรของแหล่งน้ำ
4. ความหนาของปลา
5. ความกว้างของปลา

ผลจากแบบจำลองและการเก็บตัวอย่างปลาในแหล่งน้ำแสดงให้เห็นว่าค่าการตกสะสมของปรอทแบบรวมที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทุกประเภทรวมกันมีอิทธิพลต่อการสะสมของปรอทในปลาเป็นอย่างมาก ซึ่งเน้นย้ำความสำคัญของการปลดปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินภายในประเทศ และปรอทข้ามพรมแดนกับการรับสัมผัสปรอทผ่านการบริโภคปลาและความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชน



รูปที่ 4-15 การกระจายตัวของความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากระสูบขีดที่จับได้จากแหล่งน้ำต่างกัน 5 แหล่งใน 5 จังหวัด ส่วนเส้นสีแดงแสดงค่าความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลา = 0.3 มก ต่อ กก ซึ่งเป็นค่าที่ผลประโยชน์จากการบริโภคเนื้อปลาต่อสมองเท่ากับผลเสียต่อสมองหากบริโภคเนื้อปลาปนเปื้อนปรอท



รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลา และการตกสะสมแบบเปียกของปรอทจากทุกแหล่งที่มา (Total Hg Wet Deposition rate ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ ) ของงานวิจัยก่อนหน้า และงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สีม่วง)

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์เชิงถดถอยพหุคูณเพื่อหาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการสะสมของปรอทในปลากระสูบขีดจาก 5 สถานีในงานวิจัยนี้ (ตัวหนาสีแดงคือปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าลอการิทึมของความเข้มข้นของปรอทในเนื้อปลากระสูบขีด)

Factor	t	sig
Natural organic compound concentration in water	3.556	0.001
Mercury concentration in water	0.205	0.838
Fish weight	-0.308	0.759
Fish body width	2.507	0.015
Fish body length	-0.193	0.848
Fish body thickness	-4.364	0
Size of the basin	-0.205	0.838
Surface area of the reservoir	-0.205	0.838
Volume of the reservoir	3.357	0.001
Total mercury deposition from domestic coal plants	-0.205	0.838
Wet mercury deposition from domestic coal plants	-0.205	0.838
Dry mercury deposition from domestic coal plants	-0.205	0.838
Total mercury deposition from every source	3.692	0.001
Wet mercury deposition from every source	0.205	0.838
Dry mercury deposition from every source	-0.205	0.838

\*sig <0.05 แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ

## บทที่ 5 ข้อเสนอของกรีนพีซ

1. กำหนดค่ามาตรฐานการปล่อยปรอทจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ (Stationery Sources)
2. กำหนดให้ปรอทอยู่ในบัญชีรายชื่อมลพิษเป้าหมาย (Target substances /pollutants) ที่ถูกกำหนดขึ้นในกฎหมายรายงานและเปิดเผยข้อมูลการปล่อยและเคลื่อนย้ายสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม (Pollutant Release and Transfer Registers: PRTR) ซึ่งมีการตรวจวัด รายงานและเผยแพร่ให้สาธารณะชนสามารถเข้าถึงได้
3. ดำเนินตามมาตรการในข้อ 8 (Article 8) ของอนุสัญญามินามาตะว่าด้วยปรอทที่มุ่งเน้นถึงการควบคุมและลดการปล่อย (emission) ปรอทออกสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดที่มีจุดกำเนิดแน่นอน(point sources) ตามรายการที่ระบุไว้ในภาคผนวก D (Annex D) ของอนุสัญญาฯ อันได้แก่ โรงไฟฟ้าถ่านหิน อุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหิน เป็นต้น
4. ยกเลิกโครงการโรงไฟฟ้าถ่านหินใหม่ การกำหนดแผนระยะยาวในการปลดระวางโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ยังดำเนินการอยู่ของประเทศไทย

นอกจากนี้ คุณยังสามารถร่วมเป็นส่วนหนึ่งสนับสนุนให้มีการ รายงานและเปิดเผยข้อมูลการปล่อยและเคลื่อนย้ายสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ให้การเข้าถึงข้อมูลมลพิษเป็นสิทธิของประชาชน อย่างแท้จริง ได้ที่ <https://thaiprtr.com/>

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Van Der Krogt, P., 2010. 'Elementymology & Elements Multidict: Hydrargyrum Mercury.' (<https://elements.vanderkrogt.net/element.php?sym=Hg>)
- [2] USEPA., 2021. 'Mercury' (<https://www.epa.gov/mercury>)
- [3] USEPA.,2021. 'Mercury Emissions: The Global Context.', (<https://www.epa.gov/international-cooperation/mercury-emissions-global-context>)
- [4] Yan, H., Li, Q., Yuan, Z., Jin, S., & Jing, M., 2019. 'Research progress of mercury bioaccumulation in the aquatic food chain, China: A review. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.', 102(5), 612-620.( <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02629-7>)
- [5] Obrist, D., Kirk, J. L., Zhang, L., Sunderland, E. M., Jiskra, M., & Selin, N. E., 2018. 'A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use'. *Ambio*, 47(2), 116-140. (<https://doi.org/10.1007/s13280-017-1004-9>)
- [6] European Commission, DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol., 2017. 'Tackling mercury pollution in the EU and worldwide.' Science for Environment Policy, In-depth Report 15 (DOI: 10.2779/44615)
- [7] Mercury: Time to act., 2013. GRID-Arendal. (<https://www.grida.no/publications/194>)
- [8] Mason, R., Pirrone, N., 2009. 'Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere', Springer (DOI:10.1007/978-0-387-93958-2).
- [9] Amos, H. M. et al., 2014. 'Global biogeochemical implications of mercury discharges from rivers and sediment burial', *Environmental Science & Technology* 48(16), 9514-9522. (<https://doi.org/10.1021/es502134t>)
- [10] United Nations Environment Programme.,(n.d.). 'Hg Mercury'. ([https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29451/CHB\\_HgFactsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29451/CHB_HgFactsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y))
- [11] O'Connor, D., Hou, D., Ok, Y. S., Mulder, J., Duan, L., Wu, Q., Wang, S., Tack, F. M., & Rinklebe, J., 2019. 'Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review.' *Environment International*, 126, 747-761. (<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.019>)
- [12] Bigham, G. N., Murray, K. J., Masue-Slowey, Y., & Henry, E. A., 2016. 'Biogeochemical controls on methylmercury in soils and sediments: Implications for site management'. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(2), 249-263. (<https://doi.org/10.1002/ieam.1822>)

- [13] Zhou, J., Obrist, D., Dastoor, A., Jiskra, M., & Ryjkov, A., 2021. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(4), 269-284. (<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>)
- [14] Yang, Z., Fang, W., Lu, X., Sheng, G., Graham, D. E., Liang, L., Wullschleger, S. D., & Gu, B., 2016. 'Warming increases methylmercury production in an Arctic soil', *Environmental Pollution*, 214, 504-509. (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.069>)
- [15] Wang, X., Luo, J., Yuan, W., Lin, C., Wang, F., Liu, C., Wang, G., & Feng, X., 2020. 'Global warming accelerates uptake of atmospheric mercury in regions experiencing glacier retreat', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 2049-2055. (<https://doi.org/10.1073/pnas.1906930117>)
- [16] Schaefer, K., Elshorbany, Y., Jafarov, E., Schuster, P. F., Striegl, R. G., Wickland, K. P., & Sunderland, E. M., 2020. 'Potential impacts of mercury released from thawing permafrost', *Nature Communications*, 11(1). (<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18398-5>)
- [17] Shannon, J. D. & Voldner, E.C ,1994. 'Modeling atmospheric concentrations of mercury and deposition to the Great Lakes', *Atmospheric Environment*, 29(14), 1649-1661. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00075-a](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00075-a)
- [18] Schnoor, J. L., 1996. 'Environmental modeling: Fate and transport of pollutants in water, air, and soil.', John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Junge, C. E., 1963. 'Air chemistry and radioactivity', New York: Academic Press.
- [20] Tang, W., Liu, Y., Guan, W., Zhong, H., Qu, X., & Zhang, T., 2020. 'Understanding mercury methylation in the changing environment: Recent advances in assessing microbial methylators and mercury bioavailability.', *Science of The Total Environment*, 714, 136827. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136827>)
- [21] De Oliveira, D. C., Correia, R. R., Marinho, C. C., & Guimarães, J. R., 2015. 'Mercury methylation in sediments of a Brazilian mangrove under different vegetation covers and salinities.', *Chemosphere*, 127, 214-221. (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.009>)
- [22] Wu, P., Kainz, M. J., Bravo, A. G., Åkerblom, S., Sonesten, L., & Bishop, K., 2019. 'The importance of bioconcentration into the pelagic food web base for methylmercury biomagnification: A meta-analysis', *Science of The Total Environment*, 646, 357-367. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.328>)
- [23] Buck, D. G., Evers, D. C., Adams, E., DiGangi, J., Beeler, B., Samánek, J., Petrlik, J., Turnquist, M. A., Speranskaya, O., Regan, K., & Johnson, S., 2019. 'A global-scale assessment of fish mercury concentrations and the identification of biological hotspots.', *Science of The Total Environment*, 687, 956-966. (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.159>)

- [24] Phenrat, T., 2020. 'Community citizen science for risk management of a spontaneously combusting coal-mine waste heap in ban Chaung, Dawei district, Myanmar', *GeoHealth*, 4(6). (<https://doi.org/10.1029/2020gh000249>)
- [25] Costa, F., Coelho, J. P., Baptista, J., Martinho, F., Pereira, M. E., & Pardal, M. A., 2020. 'Mercury accumulation in fish species along the Portuguese coast: Are there potential risks to human health?', *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110740. (<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110740>)
- [26] Zillioux, E. J., 2015. 'Mercury in fish: History, sources, pathways, effects, and indicator usage.', *Environmental Indicators*, 743-766. ([https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2\\_42](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2_42))
- [27] O'Connor, D., Hou, D., Ok, Y. S., Mulder, J., Duan, L., Wu, Q., Wang, S., Tack, F. M., & Rinklebe, J., 2019. 'Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review', *Environment International*, 126, 747-761. (<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.019>)
- [28] IRIS., 1998. 'Mercury, elementa' l, CASRN 7439-97-6, US.EPA, 28 pp
- [29] Foley, M. M., Seidel, I., Sevier, J., Wendt, J., & Kogan, M., 2020. 'One man's swordfish story: The link between Alzheimer's disease and mercury exposure.', *Complementary Therapies in Medicine*, 52, 102499. (<https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102499>)
- [30] Kim, B., Shah, S., Park, H., Hong, Y., Ha, M., Kim, Y., Kim, B., Kim, Y., & Ha, E., 2020. 'Adverse effects of prenatal mercury exposure on neurodevelopment during the first 3 years of life modified by early growth velocity and prenatal maternal folate level', *Environmental Research*, 191, 109909. (<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109909>)
- [31] AMAP, 2018. 'Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment', UNEP pp.5-13.
- [32] UN Environment., 2019. 'Global Mercury Assessment 2018', UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland (ISBN: 978-92-807-3744-8)
- [33] Madsen, T., and Randal, L., 2011. 'America's Biggest Mercury Polluters How Cleaning Up the Dirtiest Power Plants Will Protect Public Health', Environment Massachusetts Research & Policy Center. (<https://environmentamerica.org/sites/environment/files/reports/AME-Biggest-Mercury-Polluters---WEB.pdf>)
- [34] European Environment Agency, 2018. 'Mercury in Europe's environment A priority for European and global action', EEA Report 11. (DOI: 10.2800/935076)
- [35] Zhao, C., & Luo, K., 2018. 'Household consumption of coal and related sulfur, arsenic, fluorine and mercury emissions in China.', *Energy Policy*, 112, 221-232.

- (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.021>)
- [36] Slos, L., 2012. 'Mercury emissions from India and Southeast Asia'. ([https://usea.org/sites/default/files/102012\\_Mercury%20emissions%20from%20India%20and%20South%20East%20Asia\\_ccc208.pdf](https://usea.org/sites/default/files/102012_Mercury%20emissions%20from%20India%20and%20South%20East%20Asia_ccc208.pdf))
- [37] Bich Thao, P. T., Pimonsree, S., Suppoung, K., Bonnet, S., Junpen, A., & Garivait, S., 2021. 'Development of an anthropogenic atmospheric mercury emissions inventory in Thailand in 2018', *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101170. (<https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101170>)
- [38] Streets, D. G., Horowitz, H. M., Lu, Z., Levin, L., Thackray, C. P., & Sunderland, E. M., 2019. 'Global and regional trends in mercury emissions and concentrations, 2010–2015', *Atmospheric Environment*, 201, 417-427. (<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.031>)
- [39] Zhang, Y., Song, Z., Huang, S., Zhang, P., Peng, Y., Wu, P., Gu, J., Dutkiewicz, S., Zhang, H., Wu, S., Wang, F., Chen, L., Wang, S., & Li, P., 2021. 'Global health effects of future atmospheric mercury emissions. *Nature Communications*', 12(1). (<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23391-7>)
- [40] Ferreira-Rodríguez, N., Castro, A. J., Tweedy, B. N., Quintas-Soriano, C., & Vaughn, C. C., 2021. 'Mercury consumption and human health: Linking pollution and social risk perception in the southeastern United States', *Journal of Environmental Management*, 282, 111528. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111528>)
- [41] Pierce, B.S., and Dennen, K.O., eds., 2009. 'The National Coal Resource Assessment Overview: U.S, Geological Survey, Professional, Paper 1625–F, 402 p.
- [42] J.M.K.C. Donev et al., 2019. 'Energy Education - Coal formation'. ([https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal\\_formation](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_formation))
- [43] Tewalt, S. J., Bragg, L. J., & Finkelman, R. B., 2001. 'Mercury in U.S. coal; abundance, distribution, and modes of occurrence', *Fact Sheet FS-095-01*. (<https://doi.org/10.3133/fs09501>)
- [44] Rompalski, P., Smoliński, A., Krztoń, H., Gazdowicz, J., Howaniec, N., & Róg, L., 2019. 'Determination of mercury content in hard coal and fly ash using X-ray diffraction and scanning electron microscopy coupled with chemical analysis', *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 3927-3942. (<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.02.016>)
- [45] Epstein, P. R., Buonocore, J. J., Eckerle, K., Hendryx, M., Stout III, B. M., Heinberg, R., Clapp, R. W., May, B., Reinhart, N. L., Ahern, M. M., Doshi, S. K., & Glustrom, L., 2011. 'Full cost accounting for the life cycle of coal', *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 73-98. (<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x>)

- [46] Axelrad, D. A., Bellinger, D. C., Ryan, L. M., & Woodruff, T. J., 2007. 'Dose–response relationship of prenatal mercury exposure and IQ: An integrative analysis of epidemiologic data', *Environmental Health Perspectives*, 115(4), 609-615. (<https://doi.org/10.1289/ehp.9303>)
- [47] Amin-Zaki, L., Elhassani, S., Majeed, M. A., Clarkson, T. W., Doherty, R. A., & Greenwood, M., 1974. 'Intra-uterine methylmercury poisoning in Iraq', *Pediatrics*, 54(5), 587-595. (<https://doi.org/10.1542/peds.54.5.587>)
- [48] Amin-Zaki, L., 1979. 'Prenatal methylmercury poisoning', *American Journal of Diseases of Children*, 133(2), 172. (<https://doi.org/10.1001/archpedi.1979.02130020064013>)
- [49] Massie, H., & Campbell, K., 1992. 'The Massie-Campbell scale of mother-infant attachment indicators during stress', Berkeley: Instruction Guide.
- [50] Rodier, P. M., 1995. 'Developing brain as a target of toxicity', *Environmental Health Perspectives*, 103(suppl 6), 73-76. (<https://doi.org/10.1289/ehp.95103s673>)
- [51] Kjellstrom T, Kennedy P, Wallis S, Mantell C., 1986. 'Physical and Mental Development of Children with Prenatal Exposure to Mercury from Fish. Stage I: Preliminary Tests at Age 4', Report 3080, Solna, Sweden:National Swedish Environmental Protection Board.
- [52] Kjellstrom T, Kennedy P, Wallis S, Stewart A, Friberg L, Lind B, et al., 1989. 'Physical and Mental Development of Children with Prenatal Exposure to Mercury from Fish. Stage II: Interviews and Psychological Tests at Age 6', Report 3642. Solna, Sweden:National Swedish Environmental Protection Board.
- [53] Grandjean P, Weihe P, White RF, Debes F, Araki S, Yokoyama K, et al., 1997. 'Cognitive deficit in 7-year-old children with prenatal exposure to methylmercury. *Neurotoxicol Teratol*', 19(6):417–428.
- [54] Grandjean P, Murata K, Budtz-Jorgensen E, Weihe P., 2004. 'Cardiac autonomic activity in methylmercury neurotoxicity: 14-year follow-up of a Faroese birth cohort.' *J Pediatr*, 144(2):169–176.
- [55] Axelrad D., 2007. 'Dose-response relationship of prenatal mercury exposure and IQ: an integrative analysis of epidemiologic data', *Environmental Health Perspectives*, Apr;115(4):609-15. (doi: 10.1289/ehp.9303)
- [56] Toxicological Effects of Methylmercury', 2000. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press. (<https://doi.org/10.17226/9899>)
- [57] Transande et al., 2005. 'Public Health and Economic Consequences of Methyl Mercury Toxicity to the Developing Brain.', *Environ Health Perspect.* 113(5): 590–596. (doi: 10.1289/ehp.7743)
- [58] Virtanen, J. K., Rissanen, T. H., Voutilainen, S., & Tuomainen, T., 2007. 'Mercury as a risk factor for cardiovascular

- diseases.', *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 18(2), 75-85.  
(<https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2006.05.001>)
- [59] Salonen, J., 1998. 'Excessive intake of iron and mercury in cardiovascular disease.', *Forum of Nutrition*, 112-126.(<https://doi.org/10.1159/000059452>)
- [60] Lim, S., Choi, M. C., Joh, K. O., & Paek, D., 2008. 'The health effects of mercury on the cardiac autonomic activity according to the heart rate variability', *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 20(4), 302.  
(<https://doi.org/10.35371/kjoem.2008.20.4.302>)
- [61] Valera, B., Dewailly, E., & Poirier, P., 2009. 'Environmental mercury exposure and blood pressure among Nunavik Inuit adults.', *Hypertension*, 54(5), 981-986.(<https://doi.org/10.1161/hypertensionaha.109.135046>)
- [62] Yaginuma-Sakurai, K., Murata, K., Shimada, M., Nakai, K., Kurokawa, N., Kameo, S., & Satoh, H., 2010. 'Intervention study on cardiac autonomic nervous effects of methylmercury from seafood.', *Neurotoxicology and Teratology*, 32(2), 240-245.  
(<https://doi.org/10.1016/j.ntt.2009.08.009>)
- [63] Rice, G. E., Hammitt, J. K., & Evans, J. S., 2010. 'A probabilistic characterization of the health benefits of reducing methyl mercury intake in the United States.', *Environmental Science & Technology*, 44(13), 5216-5224.  
(<https://doi.org/10.1021/es903359u>)
- [64] Nedellec, V., & Rabl, A., 2016. 'Costs of health damage from atmospheric emissions of toxic metals: Part 2-Analysis for mercury and lead', *Risk Analysis*, 36(11), 2096-2104.(<https://doi.org/10.1111/risa.12598>)
- [65] Bey, I., D. J. Jacob, R. M. Yantosca, J. A. Logan, B. D. Field, A. M. Fiore, Q. B. Li, H. G. Y. Liu, L. J. Mickley and M. G. Schultz., 2001. 'Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation.', *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 106(D19): 23073-23095.
- [66] Selin, N. E., D. J. Jacob, R. J. Park, R. M. Yantosca, S. Strode, L. Jaeglé and D. Jaffe., 2007. 'Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury: Global constraints from observations.', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112(D2).
- [67] Horowitz, H. M., D. J. Jacob, Y. Zhang, T. S. Dibble, F. Slemr, H. M. Amos, J. A. Schmidt, E. S. Corbitt, E. A. Marais and E. M. Sunderland., 2017. 'A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: implications for the global mercury budget.', *Atmos. Chem. Phys.* 17(10): 6353-6371.
- [68] Strode, S. A., L. Jaeglé, N. E. Selin, D. J. Jacob, R. J. Park, R. M. Yantosca, R. P. Mason and F. Slemr., 2007. 'Air-sea exchange in the global mercury cycle.', *Global Biogeochemical Cycles* 21(1).
- [69] Selin, N. E., D. J. Jacob, R. M. Yantosca, S. Strode, L. Jaeglé and E. M. Sunderland., 2008. 'Global 3-D land-ocean-atmosphere model for mercury: Present-day versus preindustrial cycles and anthropogenic enrichment factors

for deposition.', *Global Biogeochemical Cycles* 22(2).

[70] Streets, D. G., M. K. Devane, Z. Lu, T. C. Bond, E. M. Sunderland and D. J. Jacob., 2011. 'All-Time Releases of Mercury to the Atmosphere from Human Activities.', *Environmental Science & Technology* 45(24): 10485-10491.

[71] Muntean, M., G. Janssens-Maenhout, S. Song, N. E. Selin, J. G. J. Olivier, D. Guizzardi, R. Maas and F. Dentener., 2014. 'Trend analysis from 1970 to 2008 and model evaluation of EDGARv4 global gridded anthropogenic mercury emissions.', *Science of The Total Environment* 494-495: 337-350.

[72] Zhang, Y., D. J. Jacob, H. M. Horowitz, L. Chen, H. M. Amos, D. P. Krabbenhoft, F. Slemr, V. L. St. Louis and E. M. Sunderland., 2016. 'Observed decrease in atmospheric mercury explained by global decline in anthropogenic emissions.', *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(3): 526-531.

[73] Watchalayann, P., N. Soonthornchaikul, L. Laokiat, S. Leelapaiboon, N. Eaktasang, M. Wongsoonthornchai, B. Thitanuwat and S. Kingkaew., 2018. 'Reducing Mercury Emission from Coal Combustion in the Energy Sector in Thailand'

[74] Endcoal.org., 2019. 'Global Energy Monitor's Global Coal Plant Tracker: coal plants in Thailand 2018.', Endcoal.org.

[75] S&P., 2019. 'S&P Global Market Intelligence 2019: World Electric Power Plants Database.', S. P. G. M. Intelligence.

[76] ONEP., 2020. 'Smart EIA Database.', ONEP.

[77] Srivastava, R. K., Hutson, N., Martin, B., Princiotta, F., & Staudt, J., 2006. 'Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers.', *Environmental Science & Technology*, 40(5), 1385-1393. (<https://doi.org/10.1021/es062639u>)

[78] Zhang, L., S. Wang, L. Wang, Y. Wu, L. Duan, Q. Wu, F. Wang, M. Yang, H. Yang, J. Hao and X. Liu., 2015. 'Updated Emission Inventories for Speciated Atmospheric Mercury from Anthropogenic Sources in China.', *Environmental Science & Technology* 49(5): 3185-3194.

[79] Zhao, S., Pudasainee, D., Duan, Y., Gupta, R., Liu, M., & Lu, J., 2019. 'A review on mercury in coal combustion process: Content and occurrence forms in coal, transformation, sampling methods, emission and control technologies.', *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 26-64. (<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.02.001>)

[80] Driscoll, C.T., Mason, R. P., Chan, H. M., Jacob, D. J., Pirrone, N., 2013. 'Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects.', *Environ Sci Technol.*; 47(10): 4967-4983.

[81] Hammerschmid, C. R., Fitzgerald, W. F., 2006. 'Methylmercury in freshwater fish linked to atmospheric mercury deposition', *Environ Sci Technol.*; 40(24):7764-70. doi: 10.1021/es061480i.

[82] Bourdineaud, J. P., Gonzalez-Rey, M., Rovezzi, M., Glatzel, P., Nagy, K. L., Manceau,

A., 2019. 'Divalent Mercury in Dissolved Organic Matter Is Bioavailable to Fish and Accumulates as Dithiolate and Tetrathiolate Complexes.', *Environ. Sci. Technol.*; 53, 9, 4880–4891

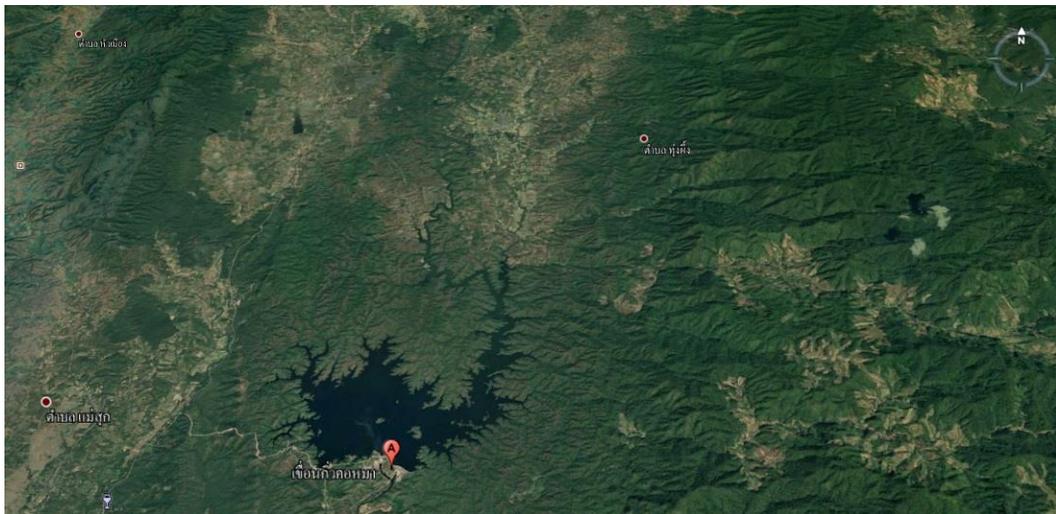
[83] Mazrui, N. M., Jonsson, S., Thota, S., Zhao, J., Mason, R. P., 2016. 'Enhanced availability of mercury bound to dissolved organic matter for methylation in marine sediments.', *Geochim Cosmochim Acta.*; 194: 153–162

[84] Backstrom, C. H., Buckman, K., Molden, E., & Chen, C. Y., 2020. 'Mercury levels in freshwater fish: Estimating concentration with fish length to determine exposures through fish consumption.', *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(4), 604-621.(<https://doi.org/10.1007/s00244-020-00717-y>)

## ภาคผนวก

### ภาพถ่ายดาวเทียมตำแหน่งและพิกัดแหล่งน้ำของจุดเก็บปลาทั้ง 6 สถานี

สถานี 1 เขื่อนก๊วกคองมา จังหวัดลำปาง พิกัด 99.6395326,18.813923 พื้นที่ผิวอ่าง 12.8 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 170 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับน้ำ 1,275 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 355 เมตร ซึ่งบริเวณเขื่อนมีภูเขาสูงซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่ 600-900 เมตร และมีธารน้ำไหลจากภูเขาลงสู่เขื่อนก๊วกคองมา



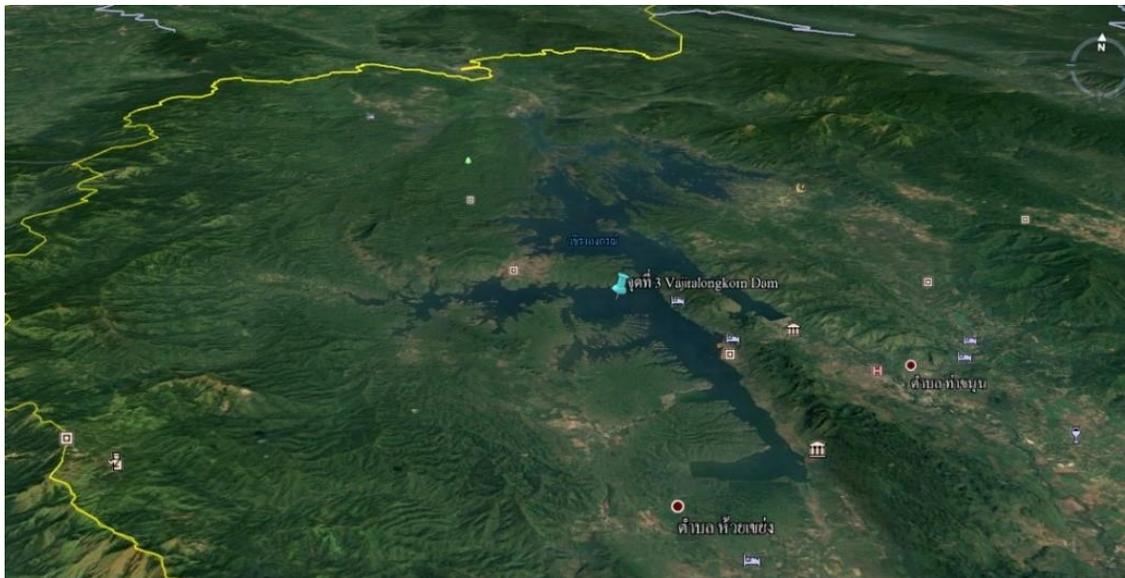
รูปที่ 16 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขื่อนก๊วกคองมา จังหวัดลำปาง

สถานี 2 ห้วยท่าเคย จังหวัดราชบุรี พิกัด 99.4183686,13.281164 พื้นที่ผิวอ่าง 0.6 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 23.4 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับน้ำ 147 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 230 เมตร ซึ่งบริเวณเขื่อนมีภูเขาสูงซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่ 500-700 เมตร



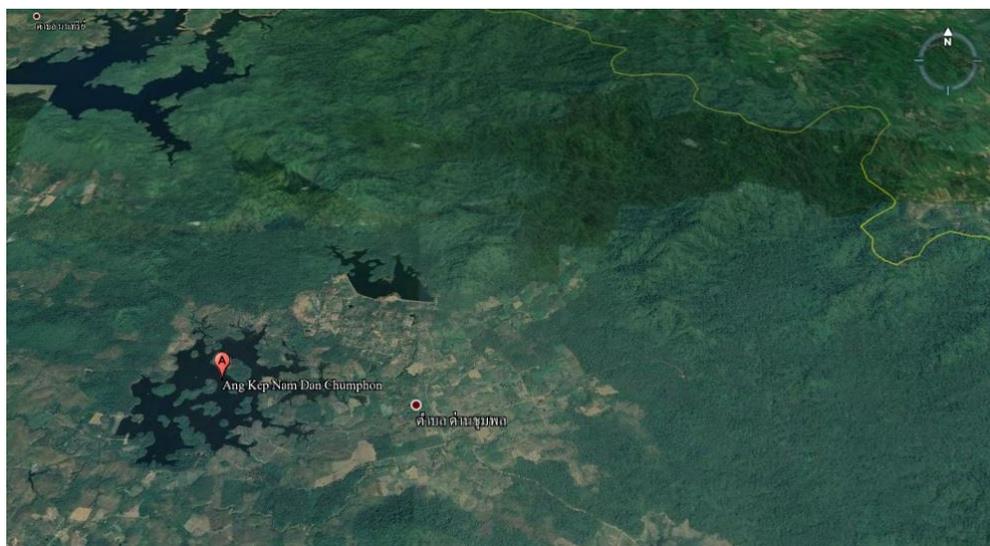
รูปที่ 17 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอ่างเก็บน้ำห้วยท่าเคย จังหวัดราชบุรี

สถานี 3 เขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี พิกัด 98.5976832, 14.829311 พื้นที่ 388 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 8,860 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับน้ำ 1,783 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 162 เมตร ซึ่งบริเวณเขื่อนมีภูเขาสูงซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่ 300-1600 เมตร



รูปที่18 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี

สถานี 4 อ่างเก็บน้ำด่านชุมพล จังหวัดตราด พิกัด 102.648074, 12.469157 พื้นที่ 4.8 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 5.6 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับน้ำ 42.8 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 40 เมตร ซึ่งบริเวณเขื่อนมีภูเขาสูงซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่ 200-600 เมตร



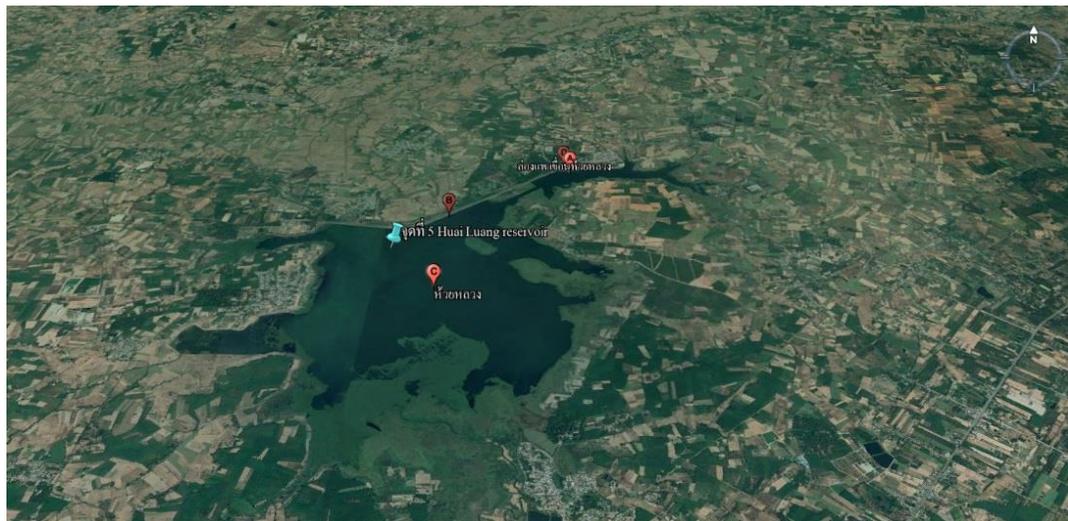
รูปที่ 19 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอ่างเก็บน้ำด่านชุมพล จังหวัดตราด

สถานี 5 อ่างเก็บน้ำทุ่งแสงหลวง จังหวัดสุโขทัย พิกัด 99.796897, 17.05187 พื้นที่ 11.28 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 32.4 ล้านลูกบาศก์เมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 50 เมตร เป็นอ่างเก็บน้ำที่ตั้งอยู่ท่ามกลางชุมชนเมืองสุโขทัย



รูปที่ 20 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอ่างเก็บน้ำทุ่งแสลงหลวง จังหวัดสุโขทัย

สถานี 6 เขื่อนห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี พิกัด 102.595736, 17.361184 พื้นที่ผิวอ่าง 31 ตารางกิโลเมตร ปริมาณกักเก็บน้ำ 113 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับน้ำ 666 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 198 เมตร ซึ่งห่างจากเขื่อนไประยะหนึ่งมีภูเขาสูงซึ่งมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่ 250-540 เมตร



รูปที่ 21 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขื่อนห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี

ตารางที่ 6 สถานี 1 เขื่อนก๊วคหมา จังหวัดลำปาง

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Analyses result (mg/kg)
1	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	246	25.5	7	3.4	0	0.01	0.05
2	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	159	23.5	6.5	2.8	0	0.01	0.19
3	ปลากดขาว Asian redbtail catfish	<i>Hemibagrus nemurus</i>	158	26	5.5	5	0	0.01	0.63
4	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	206	27	7.5	2.7	0	0.01	0.02
5	ปลาดุก Walking catfish	<i>Clarias batrachus</i>	757	48	8.5	8	0	0.01	0.36
6	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	257	28	7.5	3.5	0	0.01	0.28
7	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	227	29	8	2.8	0	0.01	0.34
8	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	215	26.5	7	3.4	0	0.01	0.54
9	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	226	26.5	7	3	0	0.01	0.45
10	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	213	27	7	2.2	0	0.01	0.15
11	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	237	27	7.5	2.8	0	0.01	0.44
12	ปลากระสับซิด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	185	25	6.5	2.6	0	0.01	0.13

13	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	183	24.5	6.3	3.3	0	0.01	0.16
14	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	170	23.5	6.3	3.2	0	0.01	0.04
15	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	208	26	6.7	3.1	0	0.01	0.44
16	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	757	48	8.5	8	0	0.01	0.01

ตารางที่ 7 สถานี 2 อ่างเก็บน้ำท่าเคย จังหวัดราชบุรี

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Analyses result (mg/kg)
1	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	233	26.5	7	3.1	0.001	0.005	0.25
2	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	350	29.5	8.5	3.9	0.001	0.005	0.14
3	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	204	26	6.5	3.6	0.001	0.005	0.11
4	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	210	25	7	3	0.001	0.005	0.12
5	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	189	25	6.2	2.9	0.001	0.005	0.13
6	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	189	25.5	7	2.9	0.001	0.005	0.17
7	ปลากระสับซี้ด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	153	24	6	2.9	0.001	0.005	0.09

8	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	213	25	7	3.2	0.001	0.005	0.13
9	ปลาตะเพียน ขาว Java barb	<i>Barbonymus gonionotus</i>	213	15	4.5	1.7	0.001	0.005	0.07
10	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	350	29.5	8.5	3.9	0.001	0.005	0.12

ตารางที่ 8 สถานี 3 เขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/ kg)	LOQ (mg/ kg)	Analyses result (mg/ kg)
1	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	25	13	3.8	1.4	0.001	0.005	0.03
2	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	21	12.5	3.5	0.3	0.001	0.005	0.03
3	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	16	11.2	3.3	1.2	0.001	0.005	0.04
4	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	21	12	3.8	1.3	0.001	0.005	0.09
5	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	32	14	3.8	1.6	0.001	0.005	0.02
6	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	21	13	3.2	1.2	0.001	0.005	0.02
7	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	30	14	4.5	1.6	0.001	0.005	0.02
8	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	17	11	3.5	1.2	0.001	0.005	0.03
9	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	18	11	3.2	1.2	0.001	0.005	0.03
10	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	27	12.5	4	1.4	0.001	0.005	0.03

11	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	22	13	3.5	1.3	0.001	0.005	0.02
12	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	15	11	3.2	1.3	0.001	0.005	0.03
13	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	13	10	3	1.2	0.001	0.005	0.03
14	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	12	10.5	3	1.1	0.001	0.005	0.04
15	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	14	10.5	3.2	1	0.001	0.005	0.02
16	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	17	11.5	3	1.2	0.001	0.005	0.03
17	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	15	11.5	3.1	1.2	0.001	0.005	0.03
18	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	14	10.2	3.4	1.2	0.001	0.005	0.02
19	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	25	13.6	3.8	1.2	0.001	0.005	0.02
20	ปลากระสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	20	12.5	3.8	1.4	0.001	0.005	0.03

ตารางที่ 9 สถานี 4 อ่างเก็บน้ำทุ่งทะเลหลวง

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Analyses result (mg/kg)
1	ปลากดแก้ว Asian redfin catfish	<i>Hemibagrus wyckioides</i>	607	39	7.5	7.5	0.001	0.005	0.09
2	ปลาสวาย Iridescent shark	<i>Pangasianodon hypophthalmus</i>	757	46	10.5	4	0.001	0.005	0.03
3	ปลากดแก้ว Asian redfin catfish	<i>Hemibagrus wyckioides</i>	1956	64	10.5	13	0.001	0.005	0.09
4	ปลาเทโพ One spot pangasius	<i>Pangasius larnaudii</i>	1710	56	10.5	1.9	0.001	0.005	0.04
5	ปลาเทโพ One spot pangasius	<i>Pangasius larnaudii</i>	1336	55	12	8.5	0.001	0.005	0.02
6	ปลากดแก้ว Asian redfin catfish	<i>Hemibagrus wyckioides</i>	607	39	7.5	7.5	0.001	0.005	0.09

ตารางที่ 10 สถานี 5 เขื่อนห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Analyses result (mg/kg)
1	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	100	19.5	5.9	2.4	0.001	0.005	0.01
2	ปลากราย Clown featherback	<i>Chitala ormata</i>	132	25.5	8.4	2	0.001	0.005	0.008
3	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	130	22	6.5	2.4	0.001	0.005	0.04
4	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	129	21	6.5	2.9	0.001	0.005	0.02
5	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	87	18.5	5.9	2.1	0.001	0.005	0.01
6	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	98	19	6	2.3	0.001	0.005	0.02
7	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	191	24.5	6.5	3	0.001	0.005	0.03
8	ปลาชะโด Giant snakehead	<i>Ophiocephalus micropeltes</i> / <i>Channa micropeltes</i>	2,492	58	12.5	8.5	0.001	0.005	0.03
9	ปลาชะโด Giant snakehead	<i>Ophiocephalus micropeltes</i> / <i>Channa micropeltes</i>	2,492	58	12.5	8.5	0.001	0.005	0.03

ตารางที่ 11 สถานี 6 อ่างเก็บน้ำด่านชุมพล จังหวัดตราด

Number	Fish species	Binomial nomenclature	Weight (g)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Analyses result (mg/kg)
1	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	118	21.5	6.8	2.9	0.001	0.005	0.05
2	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	163	23	8.5	2.3	0.001	0.005	0.44
3	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	126	23	2.7	2.4	0.001	0.005	0.05
4	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	83	19	6	1.8	0.001	0.005	0.02
5	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	150	22.5	7.2	2.5	0.001	0.005	0.07
6	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	64	18	5.8	1.6	0.001	0.005	0.25
7	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	110	20	7.4	2.1	0.001	0.005	0.08
8	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	93	20	6.7	1.9	0.001	0.005	0.26
9	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	107	22	6.7	2	0.001	0.005	0.05
10	ปลาบู่ Marble goby	<i>Oxyeleotris marmoratus</i>	169	24	4.5	4.5	0.001	0.005	0.20
11	ปลากะสูบขีด Hampala barb	<i>Hampala macrolepidota</i>	163	23	8.5	2.3	0.001	0.005	0.34