

# การประเมินความเสี่ยงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อการบริโภคและการชลประทาน: โครงการในพระราชดำริอ่างเก็บน้ำแม่ปืม อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา

## Risk Assessment of Reservoir Water for Drinking and Irrigation: The King Initiation Royal Project at Mae Puem Reservoir, Mae Jai District, Phayao Province

จอมจันทร์ นทีวัฒนา,<sup>1\*</sup> จินตพัฒน์ นทีวัฒนา,<sup>2</sup> ไมตรี สุทธจิตต์,<sup>3</sup> วิชัย เทียนถาวร,<sup>4</sup>

แสวง ดอน คิม,<sup>5</sup> ควอง วู คิม<sup>6</sup>

Jomjun Nateewattana,<sup>1\*</sup> Jintapat Nateewattana,<sup>2</sup> Maitree Suttajit,<sup>3</sup> Vichai Tienthavorn,<sup>4</sup>

Sang Don Kim,<sup>5</sup> Kyoung Woong Kim<sup>6</sup>

### บทคัดย่อ

อ่างเก็บน้ำแม่ปืมเป็นโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว สร้างขึ้นเพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ให้เพียงพอต่อการทำการเกษตรตลอดทั้งปี เป็นแหล่งประมงน้ำจืด และเพื่อบรรเทาอุทกภัย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของธาตุหลัก จุลธาตุ และโลหะหนัก และเพื่อประเมินคุณภาพน้ำสำหรับการใช้งานด้านการบริโภคและการเกษตร ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ ผลการสำรวจพบว่า คุณภาพน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำในระดับสากลพบว่า น้ำมีคุณภาพดี สามารถบริโภคได้ เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น โดยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพอยู่ในเกณฑ์ปกติ ความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในน้ำพบว่า เหล็กและแมงกานีสมีค่าเกินมาตรฐาน และอยู่ในระดับความเสี่ยงสูง สำหรับธาตุอื่นที่ตรวจวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยธาตุที่มีความเสี่ยงปานกลางได้แก่ อะลูมิเนียม และซิลิเนียม ผลการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพพบว่า แมงกานีสที่ปนเปื้อนในน้ำอยู่ในระดับที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพ เมื่อบริโภคน้ำเป็นประจำอย่างต่อเนื่อง จากดัชนีการปนเปื้อนโลหะหนักบ่งชี้ว่า มลพิษจากโลหะหนักมีการปนเปื้อนสูง เนื่องจากมีเหล็กและแมงกานีสเกินค่ามาตรฐาน แต่ไม่มีความเสี่ยงต่อโลหะหนักชนิดอื่นที่เป็นอันตรายร้ายแรง คุณภาพน้ำทางด้านการเกษตรพบว่า น้ำมีคุณภาพเหมาะสมพบโพแทสเซียมและแมงกานีสที่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการชลประทานขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ

**คำสำคัญ:** โครงการในพระราชดำริอ่างเก็บน้ำแม่ปืม อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา, คุณภาพน้ำ, การประเมินความเสี่ยง, น้ำบริโภค, น้ำชลประทาน

### Abstract

Mae Puem reservoir is one of the King Bhumibol Initiation Royal Project. It was constructed to storage water for irrigation throughout the year, a fishery resource, and flood control. The purposes of study were to investigate concentrations of major element, trace element, and heavy metal, as well as to assess water quality for consumption

<sup>1</sup> อาจารย์,<sup>4</sup> ศาสตราจารย์, คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000 <sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาเอก, โครงการบัณฑิตศึกษา ศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 <sup>3</sup> ศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000 <sup>5,6</sup> ศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กรุงเทพมหานคร 10500 <sup>6</sup> ศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

<sup>1</sup> Lecturer, <sup>4</sup> Professor, School of Medicine, University of Phayao, Muang District, Phayao Province 56000, Thailand. <sup>2</sup> Doctoral degree student, Toxicology Graduated Program, Faculty of Science, Mahidol University, Khet Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand. <sup>3</sup> Professor, School of Medical Science, University of Phayao, Muang District, Phayao Province 56000, Thailand. <sup>5,6</sup> Postdoctoral researcher, <sup>5,6</sup> Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju Province 500172, Republic of Korea.

\* Corresponding author; Jomjun Nateewattana, School of Medicine, University of Phayao, Muang District, Phayao 56000, Thailand. E-mail: jomjun\_102@hotmail.com

and irrigation. Water characteristics were compared with the international standard of drinking water. This study found that water quality was suitable for consumption after pre-treatment. The physico-chemical properties were in acceptable limits. Determination of element concentrations showed that Fe and Mn exceeded drinking water guidelines and had high risk; however the other elements were in allowable limits. According to risk assessment, the medium risk elements were included Al and Se. On the other hand, the result of health risk assessment revealed that Mn content in water was at health risk for continuously consumption. The contamination index indicated that this reservoir had high contamination due to elevated Fe and Mn exceeded standard guidelines, but other heavy metals with high toxicity had no risk. The assessment of water quality for irrigation showed that water had suitable quality, except K and Mn exceeded FAO irrigation water standard.

**Keywords:** King Initiation Royal Project at Mae Puem reservoir, Mae Jai district, Phayao province, Water quality, Risk assessment, Drinking water, Irrigation water

## บทนำ

โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ปืมเป็นโครงการตามแนวพระราชดำริ โดยครั้งเมื่อพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้เสด็จพระราชดำเนินทอดพระเนตรโครงการชลประทานขนาดเล็ก และทรงเยี่ยมราษฎรบริเวณฝายร่องช้าง ตำบลป็น อำเภอดอกคำใต้ จังหวัดพะเยา ในวันที่ 15 มกราคม 2525 ทรงมีพระราชดำริให้ก่อสร้างอ่างเก็บน้ำแม่ปืม ตำบลแม่ใจ จังหวัดพะเยา เพื่อให้คนในพื้นที่สามารถเพาะปลูกและมีน้ำใช้ได้อย่างตลอดทั้งปี รวมทั้งลดปัญหาอุทกภัยในฤดูน้ำหลาก นอกจากนี้ยังเกิดผลดีประการสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ราษฎรในเขตน้ำท่วมมีการอพยพไปตั้งหลักแหล่งเพื่อประกอบอาชีพบริเวณอ่างเก็บน้ำได้ต่อไปโดยไม่เดือดร้อน จุดกำเนิดน้ำแม่ปืมเกิดจากป่าต้นน้ำบริเวณเขตป่าห้วยบงและห้วยเคียนซึ่งตั้งอยู่ทางทิศเหนือของอำเภอเมืองพะเยา และบริเวณดอยหัวงและดอยด้วนบริเวณอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย และอำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา โดยมีลำน้ำขนาดเล็กไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำแม่ปืมตลอดทั้งปี น้ำมีปริมาณมากในฤดูฝน สำหรับฤดูแล้งมีปริมาณน้ำมากเพียงพอต่อการเกษตร นอกจากนี้ลำน้ำแม่ปืมยังหล่อเลี้ยงอุทยานแห่งชาติแม่ปืม น้ำจากลำน้ำแม่ปืมจะไหลผ่านหมู่บ้านป่าดิงทรายและบ้านแม่ปืม อำเภอแม่ใจ เพื่อไปบรรจบกับแม่น้ำอิงที่ตำบลบ้านใหม่ แล้วจึงไหลลงไปสู่กว๊านพะเยา อำเภอเมืองจังหวัดพะเยา<sup>1</sup>

โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ปืมถูกสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการช่วยเหลือพื้นที่เพาะปลูกทำอ่างเก็บน้ำ และใช้เป็นแหล่งประมงน้ำจืด โดยบริเวณพื้นที่ส่งน้ำของโครงการส่วนใหญ่ใช้ปลูกข้าวเป็นหลัก โดยอ่างเก็บน้ำก่อสร้างขึ้นในปี 2525 - 2526 ด้วยเงินงบประมาณ 36,353,000 บาท โดยมีลักษณะเป็นเขื่อนดินสูง 19.30 เมตร ยาว 450 เมตร มีปริมาณน้ำเก็บ

กัก 43 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งใช้ในพื้นที่เพาะปลูก 45,650 ไร่ ในพื้นที่ 5 ตำบลได้แก่ ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่ใจ ตำบลป่าแฝก ตำบลแม่สุก และตำบลแม่ปืม ครอบคลุมพื้นที่ 3 อำเภอได้แก่ อำเภอแม่ใจ อำเภอเมืองพะเยา และอำเภอพาน จังหวัดเชียงรายบางส่วน นอกจากนี้ยังมีการก่อสร้างคลองส่งน้ำเพิ่มอีก 5 สาย โดยแยกพื้นที่ส่งน้ำของคลองแต่ละสายได้ดังนี้

1. คลองส่งน้ำสาย 1RP - RMC มีความยาว 4.725 กิโลเมตร ส่งน้ำไปยังพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า อำเภอแม่ใจ รวมพื้นที่ส่งน้ำทั้งสิ้น 1,550 ไร่
2. คลองส่งน้ำสาย 1R - RMC มีความยาว 16.55 กิโลเมตร ส่งน้ำไปยังพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า ตำบลป่าแฝก อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา และอำเภอพาน จังหวัดเชียงรายบางส่วน รวมพื้นที่ส่งน้ำทั้งสิ้น 12,300 ไร่
3. คลองส่งน้ำสาย 1L - 1R - RMC ยาว 1.42 กิโลเมตร ส่งน้ำไปยังพื้นที่ตำบลป่าแฝก อำเภอแม่ใจ รวมพื้นที่ส่งน้ำทั้งหมด 1,150 ไร่
4. คลองส่งน้ำสาย LMC ยาว 10.237 กิโลเมตร ส่งน้ำไปยังพื้นที่ตำบลแม่ใจ อำเภอแม่ใจ และตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ส่งน้ำ 12,800 ไร่ และ
5. คลองส่งน้ำสาย RMC ยาว 14.116 กิโลเมตร ส่งน้ำไปยังพื้นที่ตำบลบ้านเหล่า ตำบลแม่ใจ ตำบลแม่สุก อำเภอแม่ใจ รวมทั้งตำบลแม่ปืม อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา<sup>1</sup>

## วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของธาตุหลัก จุลธาตุ และโลหะหนัก รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่ปืม อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา และทำการประเมินความเสี่ยงคุณภาพน้ำ สำหรับใช้ประโยชน์ในการบริโภคและการเกษตร รวมทั้งเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ และสร้างฐานข้อมูลคุณภาพน้ำของจังหวัดพะเยา

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. การเก็บและเตรียมตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำ 25 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ชุดตัวอย่าง โดยชุดที่ 1 เป็นตัวอย่างน้ำดิบที่ไม่ปรับสภาพด้วยกรด เพื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นทางเคมีกายภาพ ประกอบด้วยได้แก่ พีเอช (pH; Mettler Toledo, SG23-FK5 pH/Conductivity) และค่าการนำไฟฟ้า (EC; Mettler Toledo, SG23-FK5 pH/Conductivity), ค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO; Mettler Toledo, SG6-FK2 DO Meter), ค่าความขุ่น (Turbidity; Hach, 2100Q Turbidimeter) และอุณหภูมิ และชุดที่ 2 ได้แก่ น้ำที่จะนำไปวิเคราะห์ธาตุหลัก จุลธาตุ และโลหะหนัก ทำการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 65% ให้มีพีเอชต่ำกว่า 2 และเก็บในขวดไฮดรอปอลิเอท (High density polyethylene: HDPE) จัดเก็บตัวอย่างที่ในอุณหภูมิ 4°C และขนส่งไปตรวจยังสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งกวางจู (Gwangju Institute of Science and Technology, GIST) ประเทศเกาหลีใต้ ตามความร่วมมือระหว่างสถาบันดังกล่าวกับคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

### 2. การวิเคราะห์ทางเคมี

ตัวอย่างน้ำที่จะทำการวิเคราะห์ธาตุจะถูกกรองผ่านในลอนฟิวเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมโครเมตร การวิเคราะห์ธาตุหลักได้แก่ แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) และซิลิกอน (Si) ถูกวิเคราะห์โดย inductively-coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES; Optima 5300 DV, Perkin Elmer, USA) ความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถตรวจพบได้คือ 0.1 mg L<sup>-1</sup> สารละลายมาตรฐานรวมธาตุสำหรับธาตุหลัก (multi-elements standard) เตรียมจากสารละลายมาตรฐานบริษัทเมอร์ค (Merck, Germany) เพื่อทำการกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration standard curve) ช่วงความเข้มข้นในการวิเคราะห์ธาตุหลัก 0 – 20 mg L<sup>-1</sup> สำหรับการวิเคราะห์จุลธาตุประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) สารหนู (As) โบรอน (B) แบเรียม (Ba) แคดเมียม (Cd) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แกลเลียม (Ga) ลิเทียม (Li) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) รูบิเดียม (Rb) ซีเซียม (Se) สทอนเนียม (Sr) ทาลเลียม (Tl) ยูเรเนียม (U) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP – MS) ความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถตรวจพบได้คือ 0.1 µg L<sup>-1</sup> สารละลายมาตรฐานรวมธาตุสำหรับจุลธาตุ

(multi-elements standard) เตรียมจากสารละลายมาตรฐานบริษัทอากิเล็นท์ (Agilent, Santa Clara, CA, USA) เพื่อทำการกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration standard curve) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 100 µg L<sup>-1</sup> ทำการตรวจวัดความเที่ยงตรงด้วยน้ำอ้างอิงมาตรฐาน 1640 (SRM 1640; the National Institute of Standard and Technology, MD, USA) โดยจะถูกยอมรับในช่วงไม่น้อยกว่า 5% ของน้ำอ้างอิงมาตรฐาน ค่าความเข้มข้นที่ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (detection limit) ใช้การแทนที่ในสัดส่วนครึ่งหนึ่งของค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้

### 3. การคำนวณและวิเคราะห์ค่าความเสี่ยง

#### 3.1 การคำนวณค่าความเสี่ยง (Environmental Risk Quotient)

การประเมินความเสี่ยงคำนวณจากสมการที่ 1 โดยค่าความเสี่ยงคือ RQ หรือ risk quotient และ MEC (measured environment concentration) คือ ความเข้มข้นของสารที่วัดในสิ่งแวดล้อม ส่วน PNEC (predicted no effect concentration) คือ ความเข้มข้นสูงสุดของสารที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต โดยค่า RQ น้อยกว่าเท่ากับ 0.1 หมายความว่า มีความเสี่ยงต่ำ RQ มากกว่า 0.1 ถึง 1 หมายความว่า มีความเสี่ยงระดับปานกลาง RQ มากกว่า 1 หมายความว่า มีความเสี่ยงสูง และ RQ มากกว่า 10 หมายความว่า มีความเสี่ยงสูงมาก<sup>2,3</sup>

$$RQ = MEC / PNEC \quad (1)$$

#### 3.2 การคำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวัน (chronic daily intake: CDI)

ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวัน (chronic daily intake: CDI) โดยคิดจากน้ำดื่ม คำนวณได้จากสมการที่ 2 มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกายต่อวัน [mg (kg day)<sup>-1</sup>] ซึ่งระบุว่ารับสารแต่ละตัวผ่านการบริโภคน้ำในแต่ละวันคิดเฉลี่ยวันละ 2 ลิตร น้ำหนักตัวเด็กคิดค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15 กิโลกรัม สำหรับผู้ใหญ่คิดเป็น 70 กิโลกรัม ซึ่ง Cm คือ ความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัด (µg L<sup>-1</sup>) lw คือ ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ดื่มในแต่ละวัน (L) และ Wb คือ น้ำหนักตัวเฉลี่ย (kg)<sup>4</sup>

$$CDI = \frac{Cm \times lw}{Wb} \quad (2)$$

3.3 ค่าดัชนีความเสี่ยงต่อสุขภาพ (health risk index: HRI)

การคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health risk index: HRI) คำนวณจากสมการที่ 3 โดยเป็นค่าสัดส่วนของค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวันต่อปริมาณอ้างอิง (reference dose, RfD) คือ ปริมาณสารเคมีที่มนุษย์สามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้

$$HRI = \frac{CDI}{RfD} \quad (3)$$

ทุกวัน โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายมีค่าดังนี้ As (0.30), B (200), Ba (200), Cd (0.50), Co (0.30), Cu (40), Fe (700), Li (2), Mn (140), Mo (5), Ni (20), Se (5), Sr (600), Tl (0.01), V (0.07), and Zn (300) <sup>5, 6, 7</sup> ปริมาณที่จะก่อให้เกิดอันตรายแก่ร่างกายเมื่อคำนวณแล้วพบว่า มีค่าเกินกว่า 1 เท่า (HRI > 1) โดยใช้ในการพิจารณาในกรณีการก่อโรคร้ายที่ไม่ใช่มะเร็ง (non cancer endpoint)

3.4 ค่าดัชนีการปนเปื้อนโลหะหนัก (The contamination index: C<sub>D</sub>)

ค่าดัชนีการปนเปื้อนเป็นการประเมินค่าโดยคำนวณระดับการปนเปื้อน ซึ่งค่า C<sub>D</sub> ได้จากการคำนวณแต่ละพารามิเตอร์ของโลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งมีค่าเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันเป็นค่าดัชนีการปนเปื้อน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ คำนวณตามสมการที่ 4 และ 5 การจำแนกระดับการปนเปื้อนประกอบด้วย 3 กลุ่มดังนี้ C<sub>D</sub> < 1 มีการปนเปื้อนต่ำ C<sub>D</sub> 1 – 3 มีการปนเปื้อนปานกลาง และ C<sub>D</sub> > 3 มีการปนเปื้อนสูง เมื่อ C<sub>fi</sub> คือ ปัจจัยการปนเปื้อนของแต่ละองค์ประกอบ โดย i แทนแต่ละองค์ประกอบที่เกินมาตรฐาน CA<sub>i</sub> คือ ค่าจากการตรวจวัดสำหรับแต่ละองค์ประกอบ CN<sub>i</sub> คือ ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ โดยในการศึกษานี้จะใช้ค่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค และองค์ประกอบโลหะหนักที่นำมาคำนวณได้แก่ สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว และสังกะสี ยกเว้นนิเกิลที่ไม่มีมาตรฐานกำหนดไว้ <sup>8, 9, 10</sup>

$$CD = \sum_{i=0}^n Cfi \quad (4)$$

$$Cfi = \frac{CAi}{CNI} - 1 \quad (5)$$

3.5 ค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนัก (Heavy metal pollution index: HPI)

ค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนักเป็นหนึ่งในค่าที่บ่งชี้คุณภาพน้ำ ซึ่งพิจารณาจากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโดยใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ทำการคำนวณ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 คำนวณดัชนีย่อยของโลหะหนักแต่ละตัว (The sub-index: Qi) จากสมการที่ 7 ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนักตามสมการที่ 8 ค่านี้เป็นค่าสัดส่วนของมาตรฐานการประเมินของแต่ละพารามิเตอร์ที่กำหนดน้ำหนัก มาตรฐานวัดประเมิน (Wi) คือ ค่าที่กำหนดขึ้นมีค่าระหว่าง 0 – 1 โดยเลือกมาจากพื้นฐานความสำคัญของโลหะหนักแต่ละค่า ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ามาตรฐานของพารามิเตอร์เดียวกัน (corresponding parameter) นั่นคือ Wi เท่ากับ 1/MAC โดยในการศึกษานี้จะใช้ค่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคเป็นค่า Maximum admissible concentration (MAC)

จากสมการที่ 7 Qi คือ ค่าดัชนีย่อยของโลหะหนักแต่ละพารามิเตอร์ Mi คือ ค่าจากการตรวจวัดโลหะแต่ละพารามิเตอร์ li คือ เกณฑ์อนุโลมสูงสุดของโลหะหนักแต่ละพารามิเตอร์ Si เกณฑ์กำหนดสูงสุดของโลหะหนักแต่ละตัว <sup>8</sup> โดยค่า |Mi - li| เป็นค่าสัมบูรณ์ สมการที่ 8 ค่า Wi คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละพารามิเตอร์ และ n เท่ากับจำนวนพารามิเตอร์ที่พิจารณา โดยค่าวิกฤติของค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนัก (The critical pollution index of HPI) สำหรับน้ำดื่มคือ 100 <sup>9, 10</sup>

$$Qi = \frac{\sum_{i=1}^n |Mi-li|}{Si-li} \times 100 \quad (7)$$

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n WiQi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (8)$$

3.6 ดัชนีการประเมินค่าโลหะหนัก (Heavy metal evaluation index: HEI)

ดัชนีการประเมินค่าโลหะหนักเป็นค่าดัชนีที่บ่งชี้ถึงคุณภาพน้ำทั้งหมด โดยพิจารณาจากผลกระทบของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ คำนวณตามสมการ 9 เมื่อ H<sub>C</sub> คือ ค่าการตรวจวัดของแต่ละพารามิเตอร์ H<sub>mac</sub> คือ ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ ในการศึกษานี้จะใช้ค่าเกณฑ์กำหนดสูงสุดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคของโลหะหนักแต่ละพารามิเตอร์ 100 <sup>9, 10</sup>

$$HEI = \sum_{k=1}^n \frac{Hci}{Hmac} \quad (9)$$

## ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การประเมินความเสี่ยงมาตรฐานน้ำดื่ม: พารามิเตอร์ทางเคมีกายภาพ

จากตารางที่ 1 แสดงผลการตรวจวัดค่าทางเคมีกายภาพ (physico-chemical parameter) ของอ่างเก็บน้ำแม่ปืมพบว่า ค่าพีเอช (pH) อยู่ระหว่าง 6.71 – 7.10 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) มีค่ามากกว่า  $3 \text{ mg L}^{-1}$  แสดงถึงน้ำมีคุณภาพดีมาก และมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่น้อย ความขุ่นอยู่ในระดับ 0.64 – 1.38 และค่าการนำไฟฟ้า (EC) และของแข็งละลายน้ำ (TDS) มีค่าอยู่เกณฑ์มาตรฐานแสดงว่า น้ำมีไอออนและของแข็งที่ละลายได้ อยู่ในปริมาณน้อย โดยเมื่อคำนวณค่าความเสี่ยง (RQ) พบว่ามีเพียงค่าความกระด้างที่มีความเสี่ยงปานกลาง อย่างไรก็ตามคุณลักษณะของน้ำยังจัดว่าเป็นน้ำอ่อน<sup>11</sup>

2. การประเมินความเสี่ยงมาตรฐานน้ำดื่ม: ความเข้มข้นของธาตุหลัก จุลธาตุ และโลหะหนัก

สอดคล้องกับตารางที่ 1 ในการสำรวจค่าความเข้มข้นของธาตุที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำพบว่า มีเหล็กและแมงกานีสที่เกินค่ามาตรฐานน้ำดื่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 802.71 – 4,930.43 และ 35.19 – 1,339.50  $\mu\text{g L}^{-1}$  ตามลำดับ ค่ามาตรฐานน้ำดื่มของเหล็กอยู่ที่  $300 \mu\text{g L}^{-1}$ <sup>12, 13, 14</sup> และแมงกานีสเท่ากับ  $400 \mu\text{g L}^{-1}$  (WHO, 2011) สำหรับความเข้มข้นของธาตุอื่นๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มระดับนานาชาติ<sup>12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19</sup> เมื่อคำนวณระดับความเสี่ยงพบว่า เหล็กและแมงกานีสมีความเสี่ยงสูง และธาตุที่มีค่าเสี่ยงปานกลางได้แก่ อะลูมิเนียม และซีลีเนียม โดยมีค่า RQ มากกว่า 0.10

3. การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ: ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวัน (chronic daily intake: CDI) และค่าดัชนีความเสี่ยงต่อสุขภาพ (health risk index: HRI)

จากการสรุปการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพแสดงในตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวัน (CDI) ในเด็กและผู้ใหญ่ซึ่งถึงการรับธาตุต่างๆ จากน้ำผ่านการบริโภคในแต่ละวัน โดยคิดเฉลี่ยวันละ 2 ลิตร จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่ได้รับในแต่ละวัน (CDI) มาคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงต่อสุขภาพ (health risk index: HRI) ซึ่งพบว่า มีเพียงแมงกานีสเท่านั้นที่มีค่า HRI มากกว่า 1 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพสำหรับผู้บริโภคกลุ่มเด็กเมื่อบริโภคน้ำจากแหล่งดังกล่าวอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

ดังนั้นธาตุที่ต้องเฝ้าระวังเมื่อบริโภคน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืมได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส และซีลีเนียม

ซึ่งการรับอะลูมิเนียมปริมาณสูงอย่างต่อเนื่องจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease)<sup>20</sup> ขณะที่เหล็กที่มีในน้ำปริมาณสูงจะส่งผลต่อความนำที่มนำไขว้ของน้ำ และส่งผลต่อสุขภาพคือ ก่อให้เกิดภาวะฮีโมโครมาโทซิส (Haemochromatosis)<sup>21</sup> การรับเอาแมงกานีสในปริมาณสูงโดยทางการกินส่งผลให้เกิดผลต่อเสียต่อระบบประสาท และการเสื่อมของระบบประสาท (Neurological impairment) และอาจเป็นพิษต่อตับ รวมทั้งก่อให้เกิดโรคพาคินสัน<sup>19</sup> และการรับซีลีเนียมมากเกินไปจะส่งผลต่อระบบทางเดินอาหาร ฟันผุ เล็บหนาและเปราะ ผมหร่วง โรคผิวหนัง หรือโรคพิษที่เกิดจากซีลีเนียมที่เรียกว่า ซีลีโนซิส (Selenosis)<sup>19</sup>

4. การประเมินความเสี่ยงจากโลหะหนัก

จากตารางที่ 3 และ 4 แสดงค่าดัชนีมลพิษที่เกี่ยวข้องในการประเมินความเสี่ยงจากโลหะหนัก ( $C_p$ , HPI และ HEI) พบว่า ค่าดัชนีการปนเปื้อน (The contamination index:  $C_p$ ) ค่าเฉพาะค่าโลหะหนักที่เกินกว่ามาตรฐานพบว่า มีค่าเฉลี่ยมลพิษ 4.80 แสดงว่า มลพิษจากโลหะหนักอยู่ในระดับสูง เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของเหล็กและแมงกานีสเกินมาตรฐาน โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ย 2,342.84 และ 476.20  $\mu\text{g L}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนัก (Heavy metal pollution index: HPI) บ่งชี้คุณภาพน้ำโดยรวมเมื่อพิจารณาจากค่าโลหะหนักโดยวิธีการถ่วงน้ำหนัก จากผลการคำนวณพบว่า ดัชนีมลพิษจากโลหะหนักมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติของดัชนีมลพิษ (critical pollution index) คือ น้อยกว่า 100 ดังนั้นอ่างเก็บน้ำแม่ปืมไม่มีความเสี่ยงต่อโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำจนเป็นอันตราย และค่าดัชนีการประเมินค่าโลหะหนัก (Heavy metal evaluation index: HEI) เป็นดัชนีที่บ่งชี้คุณภาพน้ำโดยรวมในการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำมากคือ มีค่าเฉลี่ยเพียง 6.29 ซึ่งถือว่าระดับมลพิษต่ำมาก เพราะอยู่ในเกณฑ์ต่ำสุดของค่ามลพิษระดับต่ำคือ มีค่าน้อยกว่า 400 สำหรับโลหะหนักทั้งหมด 8 ชนิดที่ทำการตรวจวัดในน้ำ<sup>9, 10</sup>

5. การประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐานน้ำเพื่อการเกษตร

จากตารางที่ 5 แสดงผลการพิจารณาการผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทางการเกษตรพบว่า พารามิเตอร์เคมีกายภาพ (physico-chemical parameters) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกค่าคือ ค่าพีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายน้ำ โดยความกระด้างของน้ำอยู่ในระดับที่จัดว่าเป็นน้ำอ่อน คือมีค่าความกระด้างต่ำกว่า  $75 \text{ mg L}^{-1}$ <sup>11</sup> และค่า SAR ซึ่งเป็นการจำแนกคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรตามความเหมาะสมของน้ำที่มีเกลือโซเดียม

(sodium absorption ratio; SAR) พบว่า มีค่าต่ำกว่า 10 ซึ่งแสดงว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ปืมใช้ได้กับดินทุกชนิดโดยไม่เป็นอันตราย โดยจากการประเมินความเข้มข้นของธาตุพบว่า มี 2 ธาตุที่เกินมาตรฐานน้ำเพื่อการเกษตร<sup>22</sup> ได้แก่ โพแทสเซียมและแมงกานีส ซึ่งโพแทสเซียมเป็นธาตุหลักตามความต้องการของพืช ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้น้ำในการเพาะปลูกมากนัก เพราะมีปริมาณเกินมาตรฐานเพียงเล็กน้อย แต่อาจส่งผลกระทบต่อพืชน้ำในแหล่งน้ำดังกล่าว โดยจะส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโต และการดูดซึมธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียม<sup>23</sup> สำหรับแมงกานีสจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบการดูดซึมและการใช้ธาตุอื่นๆ ของต้นพืชเช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัส<sup>22, 23</sup>

### สรุปผลการทดลอง

การประเมินความเสี่ยงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำ เพื่อวัตถุประสงค์ในการบริโภคและการชลประทานของโครงการในพระราชดำริอ่างเก็บน้ำแม่ปืม อำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา พบว่า พารามิเตอร์ด้านเคมีกายภาพสำหรับน้ำดื่มผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และผลการสำรวจความเข้มข้นของธาตุมีเพียงเหล็กและแมงกานีสที่มีความเข้มข้นเกินมาตรฐานและมีความเสี่ยงสูง โดยธาตุที่มีความเสี่ยงปานกลางได้แก่ อะลูมิเนียม และซิลิเนียม สำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพพบว่า แมงกานีสมีความเสี่ยงในกลุ่มเด็กที่บริโภคน้ำในระยะยาว จากการที่เหล็กและแมงกานีสมีความเข้มข้นสูง ส่งผลให้น้ำมีค่าดัชนีการปนเปื้อนสำหรับธาตุที่เกินมาตรฐานอยู่ในระดับที่มีมลพิษสูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีมลพิษจากโลหะหนักและดัชนีการประเมินค่าโลหะหนักซึ่งคำนวณจากปริมาณโลหะหนักในน้ำทั้งหมดพบว่า ไม่มีอันตรายในภาพรวม และเกณฑ์การปนเปื้อนอยู่ในระดับต่ำ สำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านการเกษตรพบว่า พารามิเตอร์ด้านเคมีกายภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และมีเพียงโพแทสเซียมและแมงกานีสที่มีความเข้มข้นเกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยโพแทสเซียมมีค่าเกินมาตรฐานเพียงเล็กน้อย แต่แมงกานีสอาจต้องทำการเฝ้าระวังไม่ให้น้ำมีการปนเปื้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหากจะบริโภคน้ำจากอ่างแม่ปืม ควรทำการบำบัดอย่างเหมาะสม เพื่อลดปริมาณสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และทำการเฝ้าระวังคุณภาพแหล่งน้ำไม่ให้เกิดการปนเปื้อนจากมลสารเพิ่มมากขึ้น และทำการเผยแพร่ความรู้ไปยังชุมชนใกล้เคียงในการร่วมกันอนุรักษ์แหล่งน้ำ

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้จัดทำขึ้นสืบสานพระราชปณิธานในงานด้านการจัดการน้ำตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวและการอนุรักษ์ทรัพยากรแหล่งน้ำที่สำคัญของจังหวัดพะเยา และส่งผลดีต่อชุมชนที่ใช้น้ำอ่างแม่ปืมจำนวนหลายพันครัวเรือน เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากรัฐบาลสาธารณรัฐเกาหลีใต้ (Republic of Korea) ภายใต้การสนับสนุนทุนการวิจัย 2013 Postdoctoral Fellowship Program for Foreign Researchers รวมทั้งการสนับสนุนงานวิจัยอย่างเต็มที่ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งกวางจู สาธารณรัฐเกาหลีใต้ ร่วมกับคณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา รวมไปถึงบุคลากรในมหาวิทยาลัยพะเยา และผู้ร่วมงานทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

### เอกสารอ้างอิง

1. กรมชลประทาน. โครงการพัฒนาแหล่งน้ำอันเนื่องมาจากพระราชดำริ [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [อ้างอิงเมื่อ 2557 มิถุนายน 9]. สืบค้น: <http://www.rid.go.th/royalproject/>.
2. Ha, N. T. V., Nam, Ng. T. T., and Sthiannopkao, S. Occurrence of selected metals in the Saigon River Canal System: Implications for risk assessment of safety water supply to Ho Chi Minh City, Vietnam. *Science and Technology for Sustainability*. Gwangju Institute of Science and Technology (GIST). 2010; 1(8): 69-97.
3. Nicole, C. M., and Bernd, N. Exposure Modeling of Engineered Nanoparticles in the Environment. *Environmental Science and Technology*. 2008; 42: 4447 – 4453.
4. U.S.EPA. Exposure Factors Handbook. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.; 2011.
5. Muhammad, S., Shah, M. T., Khan, S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan. *Microchemical Journal*. 2011; 98: 334 – 343.
6. U.S. EPA. Guidelines for carcinogen risk assessment. Risk Assessment Forum, United States Environment Protection Agency, Washington, D.C.; 2005.
7. Risk Assessment Information System (RAIS) [Internet]. 2014 [cited 2014 April 20]. Available from: <http://rais.ornl.gov/>.

8. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521
9. Edet, A. E., and Offiong, O.E. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). *GeoJournal*. 2002; 57: 295–304.
10. Maria-Alexandra, H., Roman, C., Ristoiu, D., Popita, G., Tanaselia, C. Assessing of water quality pollution indices for heavy metal contamination: A study case from Medias city groundwater. *Agriculture – Science and Practice* 3 – 4. 2013; (87 – 88): 25 – 31.
11. มั่นสิน ตันทุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร; 2538.
12. National Health and Medical Research Council and Natural Resource Management Ministerial Council. ADWG; Australian Drinking Water Guidelines. Artarmon, NSW; 2004.
13. U.S. EPA. Drinking water standards and health advisories. Washington, D.C.; 2006.
14. U.S. EPA. Drinking water contaminants. Washington, D.C.; 2008.
15. Drinking water quality standards of Japan; DWQSS [internet]. 2008 [cited 2013 December 5]. Available from:[http://www.jwwa.or.jp/english/water\\_en/water-e07.html](http://www.jwwa.or.jp/english/water_en/water-e07.html).
16. Department of Health Services, Division of Drinking Water and Environmental Management. California regulations related to drinking water (Title 22 - CALIFORNIA DHS), Los Angeles, California; 2008.
17. World Health Organization (WHO). Aluminium in Drinking-water. Geneva; 1998.
18. World Health Organization (WHO). Boron in drinking-water. Geneva; 2009.
19. World Health Organization (WHO). WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition, Geneva; 2011.
20. Cao, H., Qiao, Li., Zhang, H., and Chen, J. Exposure and risk assessment for aluminium and heavy metals in Puerh tea. *Science of the Total Environment*. 2010; 408: 2777–2784.
21. World Health Organization (WHO). Iron in Drinking-water. Second Edition, Geneva; 1996.
22. Ayers, R. S., and Westcot, D. W. Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome; 1994.
23. ยงยุทธ โอสถสภ. ชาติอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์. กรุงเทพมหานคร; 2552.
24. World Health Organization (WHO). Total dissolved solids in Drinking-water First Edition, Geneva; 2003.

Table 1 Water quality assessment for drinking water of Mae Puem reservoir

Parameter	Unit	Standard	Source	Range	Mean	Standard deviation	RQ max	RQ mean	Level of risk <sub>max</sub>
pH	-	6.5 - 9	WHO guideline for drinking water quality, 2011	6.71 - 7.10	6.84	0.16	-	-	pass
DO	mg L <sup>-1</sup>	> 3	WHO guideline for drinking water quality, 2011	8.49 - 13.23	12.02	2.00	-	-	pass
Turbidity	NTU	none	No guideline	0.64 - 1.38	0.95	0.27	-	-	-
EC	µs cm <sup>-1</sup>	1500	WHO guideline for drinking water quality, 2011	46 - 117	63	30.26	0.078	0.042	low
Hardness	mg L <sup>-1</sup>	150	WHO guideline for drinking water quality, 2011	26 - 32	28	2.45	0.213	0.187	medium
TDS	mg L <sup>-1</sup>	500	WHO guideline for drinking water quality, 2003	19 - 54	27.60	14.81	0.108	0.055	low
Ca	mg L <sup>-1</sup>	300	Drinking water quality standards (DWQSSs) of Japan, 2008	6.26 - 7.12	6.53	0.36	0.024	0.022	low
K	mg L <sup>-1</sup>	411	WHO guideline for drinking water quality, 2011	2.00 - 2.51	2.11	0.22	0.006	0.005	low
Mg	mg L <sup>-1</sup>	300	Drinking water quality standards (DWQSSs) of Japan, 2008	1.41 - 1.51	1.44	0.04	0.005	0.005	low
Na	mg L <sup>-1</sup>	200	Drinking water quality standards (DWQSSs) of Japan, 2008	0.67 - 0.83	0.72	0.07	0.004	0.004	low
Si	mg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	3.52 - 3.69	3.58	0.07	-	-	-
Al	µg L <sup>-1</sup>	100	WHO drinking water guideline, 1998 / ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	3.16 - 18.35	10.38	7.22	0.184	0.104	medium
As	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	0.13 - 0.71	0.38	0.21	0.071	0.038	low
B	µg L <sup>-1</sup>	500	WHO guideline for drinking water quality, 2009	4.54 - 5.18	4.86	0.23	0.010	0.010	low
Ba	µg L <sup>-1</sup>	700	WHO guideline for drinking water quality, 2011	29.56 - 72.89	48.15	19.52	0.104	0.069	low
Cd	µg L <sup>-1</sup>	3	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	low
Co	µg L <sup>-1</sup>	11	Title 22; California Code of regulations, 2008	BDL - 3.04	0.84	1.25	0.276	0.076	low
Cs	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	1.66E-3 - 0.01	4.34E-03	2.61E-03	-	-	low

Parameter	Unit	Standard	Source	Range	Mean	Standard deviation	RQ max	RQ mean	Level of risk <sub>max</sub>
Cr	µg L <sup>-1</sup>	50	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	low
Cu	µg L <sup>-1</sup>	2000	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL - 7.35	1.76	3.17	0.004	0.001	low
Fe	µg L <sup>-1</sup>	300	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004 / USEPA; United States Environmental Protection Agency, 2006 and 2008	802.71 - 4930.43	2342.84	1538.44	16.435	7.809	<b>HIGH</b>
Ga	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	1.16 - 3.18	2.03	0.91	-	-	-
Li	µg L <sup>-1</sup>	73	Title 22; California Code of regulations, 2008	0.23 - 0.25	0.24	0.01	3.42E-03	3.29E-03	low
Mn	µg L <sup>-1</sup>	400	WHO guideline for drinking water quality, 2011	35.19 - 1339.50	476.20	507.01	3.349	1.191	<b>HIGH</b>
Mo	µg L <sup>-1</sup>	50	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	BDL - 0.01	3.55E-03	4.90E-03	2.00E-04	7.10E-05	low
Ni	µg L <sup>-1</sup>	70	WHO guideline for drinking water quality, 2011	0.03 - 1.38	0.38	0.57	0.020	0.005	low
Pb	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	low
Rb	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	4.94 - 5.92	5.28	0.38	-	-	-
Se	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	1.54 - 2.15	1.75	0.24	0.215	0.175	medium
Sr	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	22.40 - 24.45	23.34	0.90	-	-	-
Tl	µg L <sup>-1</sup>	2	Title 22; California Code of regulations, 2008 / USEPA; United States Environmental Protection Agency 2006 and 2008	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	low
U	µg L <sup>-1</sup>	15	WHO guideline for drinking water quality, 2011	6.11E-4 - 0.02	0.01	0.01	1.330E-03	6.67E-04	low
V	µg L <sup>-1</sup>	260	Title 22; California Code of regulations, 2008	0.04 - 0.32	0.14	0.11	1.23E-03	5.38E-04	low
Zn	µg L <sup>-1</sup>	3000	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	2.88 - 49.21	19.57	20.78	0.016	0.007	low

Table 2 The assessment of health risk indexes for drinking water of Mae Puem reservoir

Parameter	Unit	Standard	Source	CDI range of adult	CDI mean of adult	CDI range of child	CDI mean of child	HRI range of adult	HRI mean of adult	HRI range of child	HRI mean of child
Ca	mg L <sup>-1</sup>	300	Drinking water quality standards (DWQSS) of Japan, 2008	0.18 - 0.20	0.19	0.84 - 0.95	0.87	-	-	-	-
K	mg L <sup>-1</sup>	411	WHO guideline for drinking water quality, 2011	0.06 - 0.07	0.06	0.27 - 0.33	0.28	-	-	-	-
Mg	mg L <sup>-1</sup>	300	Drinking water quality standards (DWQSS) of Japan, 2008	4.03E-2 - 4.30E-2	4.11E-02	0.19 - 0.20	0.19	-	-	-	-
Na	mg L <sup>-1</sup>	200	Drinking water quality standards (DWQSS) of Japan, 2008	1.92E-2 - 2.38E-2	2.06E-02	0.09 - 0.11	0.10	-	-	-	-
Si	mg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	0.10 - 0.11	0.10	0.47 - 0.49	0.48	-	-	-	-
Al	µg L <sup>-1</sup>	100	WHO drinking water guideline, 1998 / ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	0.09 - 0.52	0.30	0.42 - 2.45	1.38	-	-	-	-
As	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	3.83E-3 - 0.02	0.01	0.02 - 0.09	0.05	0.01 - 0.07	0.04	0.06 - 0.31	0.17
B	µg L <sup>-1</sup>	500	WHO guideline for drinking water quality, 2009	0.13 - 0.15	0.14	0.60 - 0.69	0.65	6.48E-4 - 7.40E-4	6.94E-04	3.02E-3 - 3.45E-3	3.24E-03
Ba	µg L <sup>-1</sup>	700	WHO guideline for drinking water quality, 2011	0.84 - 2.08	1.38	3.94 - 9.72	6.42	4.22E-3 - 1.04E-2	6.88E-03	0.02 - 0.05	0.03
Cd	µg L <sup>-1</sup>	3	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	-	-	-	-
Co	µg L <sup>-1</sup>	11	Title 22; California Code of regulations, 2008	BDL - 0.09	0.02	BDL - 0.40	0.11	BDL - 0.17	0.05	BDL - 0.81	0.22
Cs	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	4.75E-5 - 2.32E-4	1.24E-04	2.21E-4 - 1.08E-3	5.79E-04	-	-	-	-
Cr	µg L <sup>-1</sup>	50	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	-	-	-	-
Cu	µg L <sup>-1</sup>	2000	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL - 0.21	0.05	BDL - 0.98	0.24	BDL - 0.01	1.31E-03	BDL - 0.02	0.01

Parameter	Unit	Standard	Source	CDI range of adult	CDI mean of adult	CDI range of child	CDI mean of child	HRI range of adult	HRI mean of adult	HRI range of child	HRI mean of child
Fe	µg L <sup>-1</sup>	300	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004 / USEPA; United States Environmental Protection Agency, 2006 and 2008	22.93 - 140.87	66.94	107.03 - 657.39	312.38	0.03 - 0.20	0.10	0.15 - 0.94	0.45
Ga	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	0.03 - 0.09	0.06	0.15 - 0.42	0.27	-	-	-	-
Li	µg L <sup>-1</sup>	73	Title 22; California Code of regulations, 2008	6.58E-3 - 7.11E-3	6.85E-03	3.07E-2 - 3.32E-2	3.20E-02	3.29E-3 - 3.56E-3	3.43E-03	1.53E-2 - 1.66E-2	1.60E-02
Mn	µg L <sup>-1</sup>	400	WHO guideline for drinking water quality, 2011	1.01 - 38.27	13.61	4.69 - 178.60	63.49	0.01 - 0.27	0.10	0.03 - 1.28	0.45
Mo	µg L <sup>-1</sup>	50	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	BDL - 2.80E-4	1.01E-04	BDL - 1.31E-3	4.73E-04	BDL - 5.60E-5	2.03E-05	BDL - 2.61E-4	9.46E-05
Ni	µg L <sup>-1</sup>	70	WHO guideline for drinking water quality, 2011	9.86E-4 - 0.04	0.01	4.60E-3 - 0.18	0.05	4.93E-5 - 1.97E-3	5.38E-04	2.30E-4 - 9.20E-3	2.51E-03
Pb	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	BDL	BDL	BDL	BDL	-	-	-	-
Rb	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	0.14 - 0.17	0.15	0.66 - 0.79	0.70	-	-	-	-
Se	µg L <sup>-1</sup>	10	WHO guideline for drinking water quality, 2011	0.04 - 0.06	0.05	0.20 - 0.29	0.23	8.77E-3 - 1.23E-2	9.98E-03	0.04 - 0.06	0.05
Sr	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	0.64 - 0.70	0.67	2.99 - 3.26	3.11	1.07E-3 - 1.16E-3	1.11E-03	4.98E-3 - 5.43E-3	5.19E-03
Tl	µg L <sup>-1</sup>	2	Title 22; California Code of regulations, 2008 / USEPA; United States Environmental Protection Agency 2006 and 2008	BDL	BDL	BDL	BDL	-	-	-	-
U	µg L <sup>-1</sup>	15	WHO guideline for drinking water quality, 2011	1.75E-5 - 4.67E-4	1.53E-04	8.15E-5 - 2.18E-3	7.16E-04	-	-	-	-
V	µg L <sup>-1</sup>	260	Title 22; California Code of regulations, 2008	1.17E-3 - 9.09E-3	4.05E-03	0.01 - 0.04	0.02	0.02 - 0.13	0.06	0.08 - 0.61	0.27
Zn	µg L <sup>-1</sup>	3000	ADWG; Australia drinking water guideline, 2004	0.08 - 1.41	0.56	0.38 - 6.56	2.61	2.74E-4 - 4.69E-3	1.86E-03	1.28E-3 - 2.19E-2	8.70E-03

**Table 3** Standards used for Heavy metal index computation

Parameter	Unit	W	S*	I**	MAC
As	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.02	1000	500	500
Cd	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.1	500	300	300
Cr	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.02	1500	1000	1000
Cu	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.001	15000	5000	5000
Fe	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.001	-	50	50
Mn	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.001	-	50	50
Pb	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.02	-	10	10
Zn	$\mu\text{g L}^{-1}$	0.001	-	50	50

**Note:** \*S: Standard permissible of heavy metals \*\*I: Highest allowable of heavy metals (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332, 2521)

**Table 4** Result of Heavy metal index computation

Location	CD	HPI	HEI
M1	0.61	27.05	1.73
M2	3.42	28.03	5.43
M3	12.33	34.31	14.35
M4	2.99	27.75	5.00
M5	4.63	28.12	4.91
<b>Mean</b>	<b>4.80</b>	<b>29.05</b>	<b>6.29</b>

Table 5 Water quality assessment for irrigation of Mae Puem reservoir

Parameter	Unit	Standard	Source	Range	Mean	Assessment
pH	-	6.5 - 8.5	Food and Agriculture Organization of United Nations	6.71 - 7.10	6.84	Pass
DO	mg L <sup>-1</sup>	> 4	กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535	8.49 - 13.23	12.02	Pass
Turbidity	NTU	none	No guideline	0.64 - 1.38	0.95	-
EC	µs cm <sup>-1</sup>	3000	Food and Agriculture Organization of United Nations	46 - 117	63	Pass
Hardness	mg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	26 - 32	28	-
TDS	mg L <sup>-1</sup>	2000	Food and Agriculture Organization of United Nations	19 - 54	27.60	Pass
SAR	-	9	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.34 - 0.40	0.36	Pass
Ca	mg L <sup>-1</sup>	40	Food and Agriculture Organization of United Nations	6.26 - 7.12	6.53	Pass
K	mg L <sup>-1</sup>	2	Food and Agriculture Organization of United Nations	2.00 - 2.51	2.11	Exceed
Mg	mg L <sup>-1</sup>	10	Food and Agriculture Organization of United Nations	1.41 - 1.51	1.44	Pass
Na	mg L <sup>-1</sup>	40	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.67 - 0.83	0.72	Pass
Si	mg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	3.52 - 3.69	3.58	-
Al	µg L <sup>-1</sup>	5000	Food and Agriculture Organization of United Nations	3.16 - 18.35	10.38	Pass
As	µg L <sup>-1</sup>	100	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.13 - 0.71	0.38	Pass
B	µg L <sup>-1</sup>	2000	Food and Agriculture Organization of United Nations	4.54 - 5.18	4.86	Pass
Ba	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	29.56 - 72.89	48.15	-
Cd	µg L <sup>-1</sup>	10	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL	BDL	Pass
Co	µg L <sup>-1</sup>	50	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL - 3.04	0.84	Pass
Cs	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	1.66E-3 - 0.01	4.34E-03	-
Cr	µg L <sup>-1</sup>	100	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL	BDL	Pass
Cu	µg L <sup>-1</sup>	200	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL - 7.35	1.76	Pass
Fe	µg L <sup>-1</sup>	5000	Food and Agriculture Organization of United Nations	802.71 - 4930.43	2342.84	Pass

Parameter	Unit	Standard	Source	Range	Mean	Assessment
Ga	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	1.16 - 3.18	2.03	-
Li	µg L <sup>-1</sup>	2500	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.23 - 0.25	0.24	Pass
Mn	µg L <sup>-1</sup>	200	Food and Agriculture Organization of United Nations	35.19 - 1339.50	476.20	Exceed
Mo	µg L <sup>-1</sup>	10	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL - 0.01	3.55E-03	Pass
Ni	µg L <sup>-1</sup>	200	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.03 - 1.38	0.38	Pass
Pb	µg L <sup>-1</sup>	5000	Food and Agriculture Organization of United Nations	BDL	BDL	Pass
Rb	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	4.94 - 5.92	5.28	-
Se	µg L <sup>-1</sup>	20	Food and Agriculture Organization of United Nations	1.54 - 2.15	1.75	Pass
Sr	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	22.40 - 24.45	23.34	-
Tl	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	BDL	BDL	-
U	µg L <sup>-1</sup>	none	No guideline	6.11E-4 - 0.02	0.01	-
V	µg L <sup>-1</sup>	100	Food and Agriculture Organization of United Nations	0.04 - 0.32	0.14	Pass
Zn	µg L <sup>-1</sup>	2000	Food and Agriculture Organization of United Nations	2.88 - 49.21	19.57	Pass

Note: FAO cited from Ayers and Westcot, 1994.