การพัฒนาการติดตามความปลอดภัยของเขื่อนด้วย เทคโนโลยีอนุกรมเวลา InSAR

Development of Dam Safety Monitoring with InSAR Time Series Technology

ธนวัฒน์ บุณยะผลึก[1,*] อนุเผ่า อบแพทย์ [2] และ สรวิศ สุภเวชย์ [3]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: Tanawat.buny@ku.th*

บทคัดย่อ

การติดตามความปลอดภัยของเขื่อนในประเทศไทยเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญที่มีการติดตามตรวจสอบอย่างเป็นระบบโดยหน่วยงานที่รับผิดชอบมาอย่างต่อเนื่อง ปัญหาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเขื่อนและบริเวณโดยรอบที่อาจจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเขื่อนได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างทั้งภายในและภายนอกรวมไปถึงลักษณะโครงสร้างของเขื่อนนั้น ๆ ที่จะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งน้ำ ระบบระบายน้ำ และมีโอกาสเกิดการพังทลายหรือการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) ได้ เป็นต้น เพราะฉะนั้นการติดตามความปลอดภัยของเขื่อนเป็นสิ่งที่สำคัญและเป็นงานที่ต้องใช้เทคนิคการสำรวจที่มีความแม่นยำและมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง รวมทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของเวลาและแรงงานในการสำรวจ เนื่องจากการเคลื่อนตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จึงต้องใช้ข้อมูลแบบอนุกรมเวลาจากดาวเทียม Sentinel-1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือน มกราคม 2565 มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) โดยใช้พื้นที่ศึกษาคือ เขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นเขื่อน Earth Fill (Zoned Type) ขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อจังหวัดเชียงใหม่เป็นอย่างมาก มีความสูง 68 เมตร ความยาวสันเขื่อน 610 เมตร ความกว้างสันเขื่อน 10 เมตร และสามารถกักเก็บน้ำได้มากถึง 295 ล้านลูกบาศก์เมตร จากผลการวิจัยพบว่าเขื่อนแม่กวงอุดมธารามีการทรุดตัวอย่างช้า ๆ ประมาณ -3 ถึง -5 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งอัตราการทรุดตัวนี้สามารถนำไปเป็นปัจจัยหนึ่งในการตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือการสำรวจอื่น เพราะในอนาคตหากมีการตรวจพบการเคลื่อนตัวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็อาจจะส่งผลให้เกิดการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำแบบจำลอง HEC-RAS 6.0 เข้ามาช่วยจำลองประมวลผลพื้นที่น้ำท่วมในรูปแบบ 3D เพื่อนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ความเสียหายและพื้นที่ที่จะเกิดน้ำท่วมเพื่อเตรียมทำแผนปฏิบัติการฉุกเฉิน (EAP) และพัฒนาเป็นกระบวนการแจ้งเตือน เพื่อเป็นเกณฑ์และแนวทางมาตรฐานในการดำเนินงานในขั้นตอนการปฏิบัติการต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: กระบวนการแจ้งเตือน, การติดตามความปลอดภัยของเขื่อน, เทคโนโลยีอนุกรมเวลา InSAR

Abstract

Monitoring the safety of dams in Thailand is one of the crucial processes that the responsible authorities should continuously and systematically monitor. Problems due to the displacement of the dam structure and surrounding areas may affect the dam's stability depending on a variety of internal and external factors, including the structural characteristics of the dam. They will damage the water supply system, drainage system, likelihood of dam break, and others. Therefore, dam safety monitoring is an important task requiring surveying techniques with high precision and spatial resolution. Monitoring reduces the cost of time and labour in the survey. As the displacement is a slow process, we used time-series data from Sentinel-1 satellites from January 2017 to January 2022. The data was analyzed by InSAR time series technology, the study site: Mae Kuang Dam, Chiang Mai. The dam is a large Earth Fill (Zoned Type) dam that is very important to Chiang Mai. The dimension includes a height of 68 meters, a dam ridge length of 610 meters, a dam ridge width of 10 meters, and a water capacity of up to 295 million cubic meters. The research results showed that the Mae Kuang Udom Thara dam is slowly subsiding, about -3 to -5 millimeter per year. This subsidence rate could be used as one of the factors to consider with other deformation surveying measurements. In the future, if a more significant displacement is detected, a dam break could occur. Furthermore, the researcher used HEC-RAS 6.0 model to analyze and process flooded areas in 3D and prepare for an Emergency Action Plan (EAP). The warning process is to be developed as standard criteria and guidelines for operations in the next step of future operation.

Keywords: warning process, dam safety monitoring, InSAR time series technology

1. คำนำ

เขื่อนเป็นสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่สำหรับกั้นทางน้ำ เพื่อกักเก็บน้ำ โดยเก็บน้ำจากช่วงฤดูน้ำหลากและปล่อยน้ำใช้ในการเกษตรกรรม อุตสาหกรรม อุปโภคบริโภค รวมไปถึงรักษาระบบนิเวศน์ในช่วงขาดแคลนน้ำ โดยเขื่อนจะทำหน้าที่ชะลอความเร็วของน้ำ ให้น้ำไหลผ่านได้เฉพาะตามปริมาณที่เหมาะสม โครงสร้างของเขื่อนนั้นถูกออกแบบเผื่อการทรุดตัว 1 เปอร์เซ็นต์ของความสูงเขื่อน [1] อยู่แล้ว โดยการทรุดตัวต้องไม่ต่ำกว่าระดับแคมเบอร์ (Camber) [2] อย่างไรก็ตามการกักเก็บน้ำไว้ปริมาณมาก ๆ หากไม่มีการบริหารจัดการน้ำ รวมทั้งการซ่อมบำรุงอย่างเหมาะสมก็จะเพิ่มโอกาสในการเกิดภัยพิบัติขึ้นมาได้ หนึ่งในกิจกรรมที่ต้องตรวจสอบและทบทวนสถานะอย่างสม่ำเสมอคือ ความปลอดภัยของเขื่อน ในปัจจุบันเขื่อนหลายแห่งในประเทศได้มีการติดตามความปลอดภัย โดยวิธีดัชนีภาพ (Condition Index) และการติดตามจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) โดยติดตั้งเครื่องมือไว้ที่ตัวเขื่อน เช่น การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของพื้นผิวตัวเขื่อนโดยใช้กล้องสำรวจวัดระยะของหมุดสำรวจแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) [3] การวัดการทรุดตัวโดยการใช้กล้องสำรวจวัดระดับของหมุดเซอร์เฟสโมนูเมนต์ (Surface Monument) [2] การวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของตัวเขื่อน โดยติดตั้งท่อวัดการทรุดตัว/บวมตัวในแนวดิ่ง (USBR Settlement Gauge or Cross Arm) [24] หรือติดตั้งท่อนำอินไคลโนมิเตอร์ (Inclinometer Access Tube) [4] รวมไปถึงการตรวจวัดโดยใช้แหวนแม่เหล็กวัดการเคลื่อนตัว (Horizontal Magnetic Ring) เป็นต้น [2] ซึ่งการติดตั้งเครื่องมือในตัวเขื่อนนั้นมีความจำเป็นต้องใช้งบประมาณเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งอาจเกิดข้อผิดพลาดในการวัด (Human Error) [5] ได้และเขื่อนหลายแห่งตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ซึ่งในไม่กี่ปีที่ผ่านมา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ได้ร่วมมือกัน โดยมีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นที่ปรึกษาในการจัดทำเกณฑ์การแจ้งเตือนความปลอดภัยเขื่อนและพัฒนาระบบเสมือนผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) ในการติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติ [6] โดยมีการพัฒนาระบบตรวจติดตามความปลอดภัยเขื่อนจากระยะไกล (Dam Safety Remote Monitoring System, DS-RMS) ซึ่งเป็นการตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์ที่ติดตั้งบนตัวเขื่อน ในปัจจุบันนั้นได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อติดตามความปลอดภัยเขื่อนขึ้นมาหลายวิธี ซึ่งหนึ่งในนั้นคือเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลด้วยดาวเทียมที่มีเซนเซอร์เป็นระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series Interferometric Synthetic Aperture Radar, TSInSAR)) ซึ่งกำลังถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานสำรวจทางด้านวิศวกรรมในหลายประเทศ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้กับการติดตามความปลอดภัยเขื่อนในประเทศไทย

โดยปัจจุบันประเทศไทยได้นำเอาเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ มาใช้ในการติดตามการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล [7] ซึ่งสามารถให้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างและเป็นหนึ่งในวิธีการสำรวจหลัก ที่ให้ข้อมูลอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินมาจนถึงปัจจุบัน [2] ผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การทรุดตัวของเขื่อนประเภทดินถมแบ่งส่วน Earth Fill (Zoned Type) [4] ซึ่งการทรุดตัวของเขื่อนดังกล่าวนั้นเป็นผลกระทบหลักที่ทำให้เกิดการพิบัติของตัวเขื่อน โดยการพิบัติจะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการพิบัติที่รุนแรง (Catastrophic Failure) และความเสียหายที่แก้ไขได้ (Repairable Damage) [9] โดยหากเกิดการพิบัติของเขื่อนแล้วจะทำให้เกิดความเสียหายทางโครงสร้างและทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก โดยหน่วยงานกรมชลประทานได้มีการลงพื้นที่ตรวจสภาพเขื่อนประจำปีเพื่อตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตาและประเมินสภาพเขื่อนด้วยวิธีดัชนีสภาพ [10] และจัดทำแบบจำลองการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) โดยนำเอาแบบจำลองทางชลศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองสภาพการไหลระบบลำน้ำ (HEC-RAS) [2] มาเพื่อประเมินความเสียหายที่อาจจะเกิดเนื่องจากการพิบัติของเขื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการติดตามความปลอดภัยเขื่อนอย่างใกล้ชิดและรวดเร็ว

เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) นั้นคือการตรวจวัดค่าสะท้อนกลับของสัญญาณที่คงที่และถาวรของ Permanent Scatterer (PS) โดยสัญญาณที่ส่งไปจะสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับสัญญาณโดยจะใช้หลักการสร้างภาพ Differential Interferograms หลายคู่ภาพ โดยภาพที่ถูกสร้างจะมีการอ้างอิงจากภาพ Master หรือเรียกว่า Single Master ซึ่งต้องเป็นภาพเดียวกัน [8] เนื่องจากตัวเขื่อนนั้นมักตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้การวิเคราะห์การพิบัติของโครงสร้างทำได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตรและยังสามารถคำนวณจุดตรวจสอบการทรุดตัวกระจายครอบคลุมทั้งพื้นที่ที่ศึกษาได้ดีกว่าเครื่องมือทางธรณีฟิสิกส์อีกด้วย

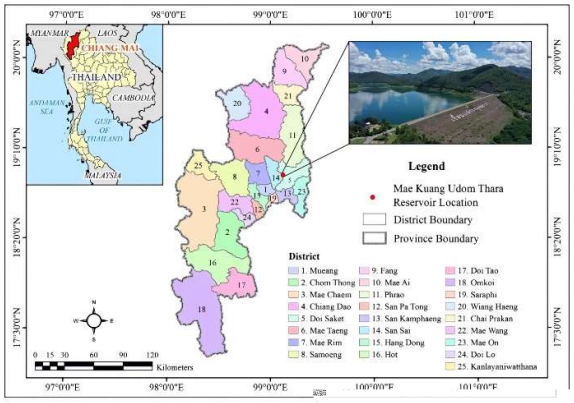
ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและตรวจสอบการทรุดตัวของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ตำบลลวงเหนือ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ โดยความดูแลของสำนักงานกรมชลประทานที่ 1 ตั้งแต่ช่วงเดือน มกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2565 โดยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) เพื่อเป็นการนำเทคโนโลยีการสำรวจด้วยดาวเทียมเข้ามาสู่งานทางด้านวิศวกรรมอย่างเต็มรูปแบบและจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานสำรวจรังวัดหรือจัดทำแผนที่ในประเทศไทยต่อไป

2. พื้นที่และข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ความเป็นมาของเขื่อนแม่กวงอุดมธาราเริ่มขึ้นเมื่อวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2519 พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร ได้เสด็จพระราชดำเนินเยี่ยมราษฎรในท้องที่อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่และได้เสด็จพระราชดำเนินมายังบริเวณโครงการชลประทานแม่กวง พื้นที่ตำบลลวงเหนือ อำเภอดอยสะเก็ด โดยทรงเล็งเห็นถึงปัญหาการเกิดอุทกภัยในเขตจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูนในทุกปี ส่วนในฤดูแล้งก็มีน้ำน้อยไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูก เดิมทีราษฎรได้สร้างฝายพื้นเมืองปิดกั้นลำน้ำเพื่อทดน้ำไปใช้ในการเพาะปลูก เป็นฝายประเภทชั่วคราว สร้างขึ้นโดยการขาดหลักวิชาการ เป็นเหตุให้ชำรุดทรุดโทรม ต้อง

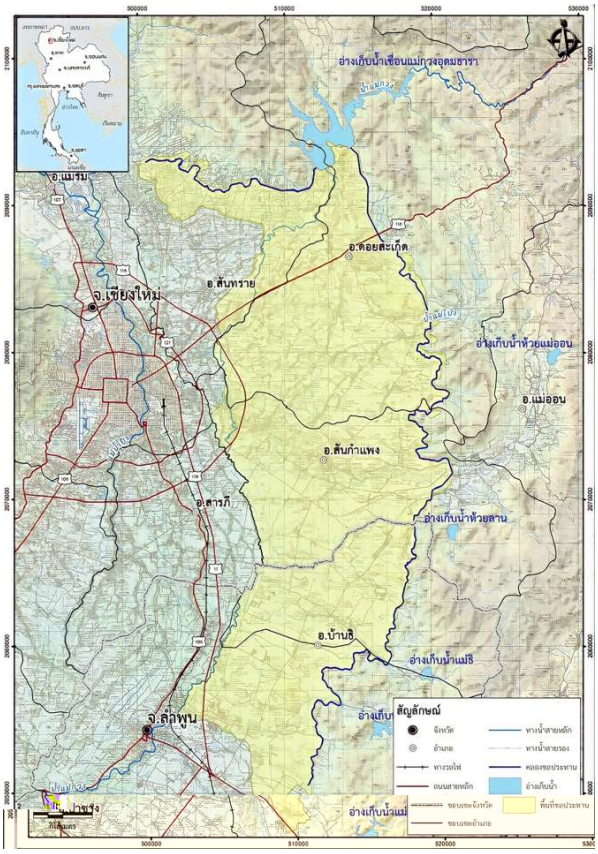
ซ่อมแซมเป็นประจำทุกปี ปีใดฝายเสียหายมาก ไม่สามารถซ่อมแซมได้ทัน ผลผลิตที่เคยได้รับสม่ำเสมอก็จะลดลง ทำให้ราษฎรเดือดร้อน พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร จึงทรงได้พระราชทานพระราชดำริให้กรมชลประทานดำเนินการสำรวจและศึกษาการพัฒนาลำน้ำสาขาของลำน้ำแม่กวงในระหว่างการก่อสร้างเขื่อนเก็บกักน้ำ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาวิจัย อ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ [2]

โดยกรมชลประทานได้เริ่มงานก่อสร้างเบื้องต้น เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 และ กรมชลประทานได้เริ่มทำการสำรวจ ออกแบบ และก่อสร้างงานเบื้องต้น ในปี พ.ศ. 2520 พร้อมทั้งขอความช่วยเหลือจากรัฐบาลญี่ปุ่นในการศึกษาความเหมาะสมของโครงการ เพื่อขอใช้เงินกู้จากต่างประเทศ ซึ่งคณะรัฐมนตรีอนุมัติให้ใช้เงินกู้ของรัฐบาลญี่ปุ่นรวมทั้งสิ้น 4 สัญญา ในระหว่าง ปี พ.ศ. 2525-2530 รวมเป็นเงินกู้ที่ใช้ในโครงการนี้ประมาณ 1,848 ล้านบาท งานก่อสร้างเขื่อนแม่กวงอุดมธาราทั้งหมดและระบบส่งน้ำชลประทานได้ก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์ตามแผนพัฒนาเกษตรชลประทานแม่กวงในปี พ.ศ. 2536 [12]

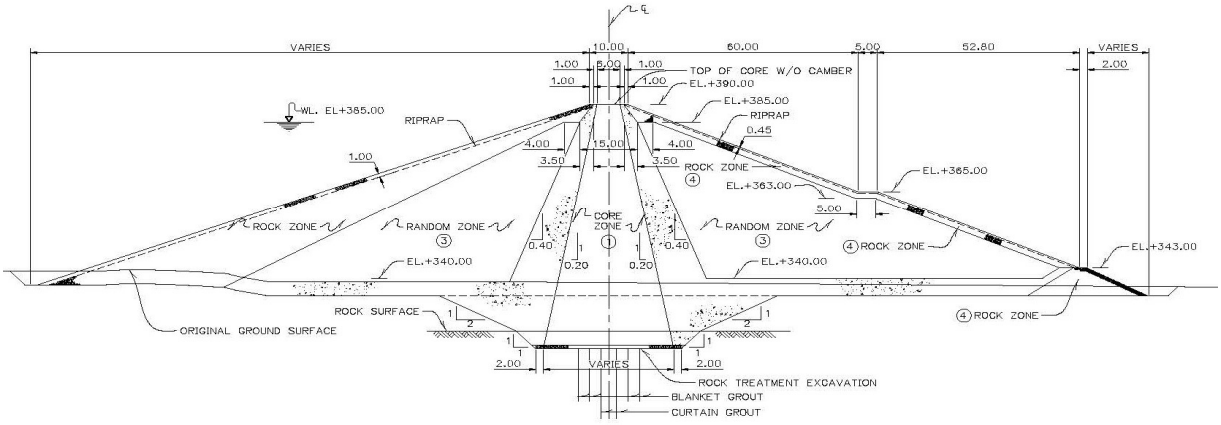
โดยเขื่อนแม่กวงอุดมธาราสร้างปิดกั้นลำน้ำแม่กวง บริเวณบ้านผาแตก ตำบลลวงเหนือ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ละติจูด 18.925 ลองจิจูด 99.128 หรือพิกัด 2092509 เหนือ 512817 ตะวันออก ตามแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 ระวาง 4846IV ซึ่งอยู่ห่างจากตัวจังหวัดเชียงใหม่ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือตามเส้นทางเชียงใหม่ – ดอยสะเก็ดประมาณ 20 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ที่ตั้งและพื้นที่ชลประทานของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่กวงอุดมธารา [12]

2.2 การบดอัดและคุณสมบัติของวัสดุถม

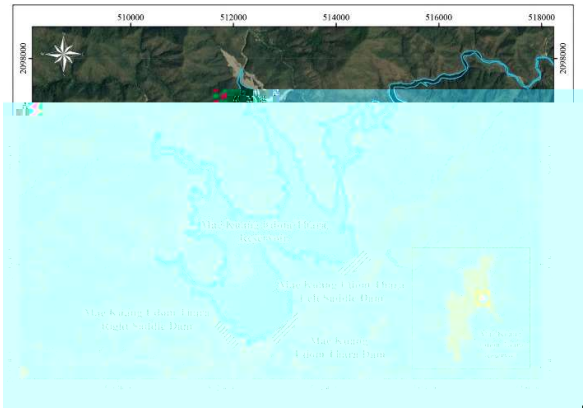
จากรายงานออกแบบรายละเอียดและแบบก่อสร้างซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมชลประทาน สามารถแสดงรายละเอียดของหน้าตัดเขื่อนและสรุปข้อมูลวัสดุถมบดอัดของเขื่อนหลัก ได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนแกนเขื่อน (Core Zone) นั้นจะเป็นดินประเภท ดินเหนียวปนทราย (SC) ดินเหนียว (CL) และดินเหนียวปนกรวด (GC) ส่วนเปลือกของเขื่อน (Random Zone) จะเป็นดินประเภท ดินเหนียวปนกรวด (GC) ดินทรายปนกรวด (GM) และ กรวด (GW-GP) ในส่วนของวัสดุกรอง (Filter) นั้นจะเป็นดินประเภท กรวดทราย (GW) และในส่วนของโซนหิน (Rock Zone) และส่วนของหินทิ้ง (Riprap) จะเป็นหิน



รูปที่ 3 รูปตัดและข้อมูลวัสดุถมบดอัดเขื่อนหลักแม่กวงอุดมธารา [12]

2.3 ลักษณะอ่างเก็บน้ำ

เขื่อนแม่กวงอุดมธาราสร้างปิดกั้นลำน้ำแม่กวง บริเวณบ้านผาแตก ตำบลลวงเหนือ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ เป็นเขื่อน Earth Fill (Zoned Type) สูง 68 เมตร ระดับสันเขื่อน +390.00 เมตร ความยาวสันเขื่อน 610 เมตร ระดับน้ำสูงสุด +387.80 เมตร และสามารถกักเก็บน้ำได้สูงสุด 295 ล้านลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4 ขอบเขตอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จ.เชียงใหม่

ซึ่งอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ เขื่อนหลัก เขื่อนปิดช่องเขาขาดฝั่งขวา และเขื่อนปิดช่องเขาขาดฝั่งซ้าย มีพื้นที่รับน้ำฝนเหนือเขื่อนประมาณ 569 ตารางกิโลเมตร ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะแสดงขอบเขตของอ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา

2.3.1 ลักษณะอ่างเก็บน้ำ

- ระดับน้ำสูงสุด	+387.80	เมตร
- ปริมาตรน้ำที่ระดับสูงสุด	295	ล้านลูกบาศก์เมตร
- ระดับน้ำเก็บกักปกติ	+385.00	เมตร
- ปริมาตรน้ำที่ระดับเก็บกักปกติ	263	ล้านลูกบาศก์เมตร
- ระดับน้ำต่ำสุด	+350.00	เมตร

2.3.2 เขื่อนและอาคารประกอบ

<u>เขื่อนหลัก</u>

- ประเภทเขื่อน	Earth Fill (Zoned Type)[13]	
- สูง	68	เมตร
- ระดับสันเขื่อน	+390.00	เมตร
- ความยาวสันเขื่อน	610	เมตร
- ความกว้างสันเขื่อน	10	เมตร
- ความกว้างฐานเขื่อน	316.60	เมตร

<u>เขื่อนปิดช่องเขาขาดฝั่งขวา (Right Saddle Dam)</u>

- ประเภทเขื่อน	Earth Fill (Zoned Type)	
- สูง	42	เมตร
- ระดับสันเขื่อน	+390.00	เมตร
- ความยาวสันเขื่อน	640	เมตร
- ความกว้างสันเขื่อน	8	เมตร

โดยลักษณะภูมิประเทศของลาดเขาตั้งอยู่บนตะพักสูงมีลักษณะเป็นช่องเขาผายกว้าง (Wide Valley) ความกว้างของช่องเขาบริเวณสันเขื่อน 610 เมตร จุดที่ลึกที่สุดอยู่ที่ระดับ 317.00 เมตร ความสูงของสันเขื่อนอยู่ที่ระดับ 390.00 เมตร ถมตัวเขื่อนบริเวณร่องน้ำเดิมโดยมีชั้นระบายน้ำ ซึ่งชั้นระบายน้ำภายในตัวเขื่อนเป็นการผสมกันระหว่างชั้นระบายน้ำในแกนตั้ง (Chimney drain) ทั้งฝั่งเหนือน้ำและท้ายน้ำ ชั้นระบายน้ำแบบซี่ (Finger drain) ที่ฐานยันเขาและชั้นระบายน้ำแบบผืน (Blanket Drain) ที่ฐานของเขื่อน และยังพบรอยเลื่อนบริเวณจังหวัดเชียงใหม่โดยเป็นรอยเลื่อนที่มีความโดดเด่นในจังหวัดเชียงใหม่ คือ รอยเลื่อนแม่ทา แนวรอยเลื่อนนี้วางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ จากอำเภอฝาง ผ่านอำเภอพร้าวลงไปทางด้านตะวันออกของอำเภอดอยสะเก็ดและอำเภอสันกำแพง ตามแนวยาวของลำน้ำแม่ทา รอยเลื่อนจะค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางไปในแนวตะวันตกเฉียงใต้ มีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 200 กิโลเมตร ปัจจุบันยังพบว่ามีการเลื่อนตัวอยู่ หินที่พบในบริเวณรอยเลื่อนนี้ เป็นหินมหายุคพาลีโอโซอิกตอนกลางถึงตอนปลายและหินแกรนิตยุคไทรแอสซิก บริเวณแอ่งฝางจะการเลื่อนตัวลงทางฝั่งตะวันตกของระนาบรอยเลื่อนอีกด้วย [14] ซึ่งรอยเลื่อนดังกล่าวอยู่ใน

พื้นที่รัศมี 150 กิโลเมตร จากบริเวณหัวงานเขื่อนแม่กวงอุดมธารา และได้ การตรวจพบการแผ่นดินไหวทั้งหมด 4,077 ครั้ง ตั้งแต่ช่วงเวลาเดือ กุมภาพันธ์ 2518 จนถึง ธันวาคม 2563 บันทึกโดยเครื่องมือตรวจวั แผ่นดินไหว (Instrumental record) ของกรมอุตุนิยมวิทยา (TMD) กร ชลประทาน (RID) และกรมสำรวจธรณีวิทยาสหรัฐอเมริกา (USGS) ซึ่ง แผ่นดินไหวที่มีขนาด 3.5 ริกเตอร์ขึ้นไปบริเวณใกล้กับหัวงานก่อสร้างเขื่อ แม่กวงอุดมธาราในระยะทาง 10 กิโลเมตร ดังตารางที่ 1 จึงอาจส่งผลต่อ การทรุดตัวของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา และมีโอกาสที่จะเป็นปัจจัยหนึ่งใน การพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) ได้

ตารางที่ 1 แผ่นดินไหวที่มีขนาด 3.5 ริกเตอร์ขึ้นไป บริเวณรอบเขื่อนแม่กวงอุดมธารา

Date	latitude	longitude	Earthquake magnitude (Richter)	Distancing from dam (km)
26 Apr 2002	18.910	99.082	4.4	5
12 Dec 2006	18.963	99.196	3.8	7
19 Jun 2007	18.934	99.187	4.4	5
19 Jun 2007	18.939	99.150	4.3	3

รูปที่ 5 ลักษณะของรอยเลื่อนในตะกอนแอ่งเทอร์เชียรี บริเวณทางหลวง 1269 กิโลเมตรที่ 29+500 ตำบลบ้านปง อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ (ละติจูด 18.748 ลองจิจูด 98.884) [14]

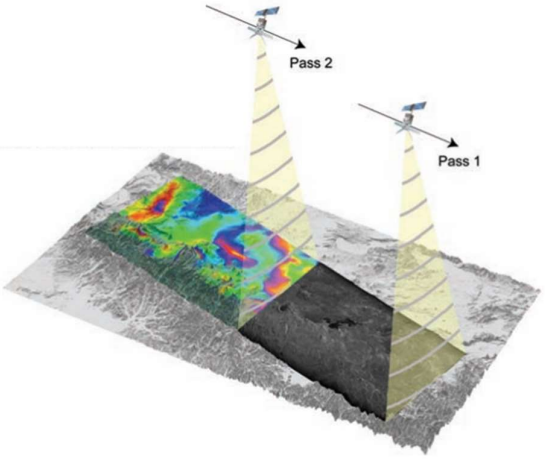
2.3 ข้อมูลดาวเทียม Sentinel - 1

ดาวเทียมในระบบเรดาร์อาศัยช่วงคลื่นย่านไมโครเวฟ หากแบ่งประเภทของดาวเทียมตามความยาวคลื่นที่นิยมนำมาใช้งาน สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ความยาวคลื่นช่วง X-Band ความยาวคลื่นช่วง C-Band และ ความยาวคลื่นช่วง L-Band สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูล SAR จากดาวเทียม Sentinel-1 ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง C-Band และการที่จะนำเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) มาใช้นั้น ต้องพิจารณาถึงการวางแผนเลือกข้อมูลจากดาวเทียมและความเป็นไปได้ของจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้งาน เนื่องจากดาวเทียมในระบบ SAR ส่วนใหญ่จะมีขนาดไฟล์ข้อมูลที่ใหญ่มาก อีกทั้งการศึกษาด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการประมวลผลในจำนวนที่เพียงพอเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อน [8] ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยเกี่ยวกับการทรุดตัวขนาดใหญ่ที่ได้รับผลกระทบจากการลดระดับหรือเพิ่มระดับของน้ำให้เขื่อนพอตเตอร์ริลโลส ในประเทศอาร์เจนตินา ซึ่งใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Envisat โดย European Space Agency (ESA) จำนวนถึง 47 ภาพ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 ถึง พ.ศ. 2553 ซึ่งแบ่งออกเป็นวงโคจรขาขึ้น (ascending) 27 ภาพ (track 447, frame 6525) และวงโคจรขาลง (descending) 20 ภาพ (track 425, frame 4278) [15]

ในปัจจุบันองค์การอวกาศแห่งยุโรป (ESA) มีดาวเทียม Sentinel-1 ที่มีกระบวนการบันทึกข้อมูลด้วยเรดาร์ เริ่มปฏิบัติการในปี พ.ศ. 2557 ประกอบด้วยดาวเทียม Sentinel-1A และดาวเทียม Sentinel-1B ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Copernicus โดยดาวเทียม Sentinel-1 มีระบบเซ็นเซอร์ C-SAR ซึ่งจะให้ภาพในทุกสภาพแสงและสภาพอากาศ โดยวัตถุประสงค์ของดาวเทียมคือการติดตามที่ดิน ป่าไม้ น้ำ ดินและการเกษตร สนับสนุนการทำแผนที่ฉุกเฉินในกรณีที่เกิดภัยธรรมชาติ การตรวจสอบสภาพแวดล้อมทางทะเล การสำรวจน้ำแข็งในทะเลและการติดตามภูเขาน้ำแข็ง พยากรณ์สภาพน้ำแข็งที่ทะเล การทำแผนที่การรั่วไหลของน้ำมัน การตรวจจับเรือเดินทะเล รวมถึงการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลในทุกสภาพอากาศได้ทั้งกลางวันและกลางคืน โดยโคจรในแนวเหนือใต้ใกล้ขั้วโลก (Near-polar) ที่ความสูง 693 กิโลเมตร เอียง 98.18 องศา โคจรกลับมาที่เดิมทุก ๆ 12 วัน และเนื่องจากดาวเทียม Sentinel-1 มีดาวเทียม 2 ดวงในหนึ่งวงโคจร ซึ่งวางตัวห่างกัน 180 องศาในวงโคจร ทำให้ใช้เวลาในการกลับมาบันทึกข้อมูลในพื้นที่เดิมได้ทุก 6 วัน โดยดาวเทียม Sentinel-1 ระบบบันทึกข้อมูล C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar) จะบันทึกข้อมูลและส่งสัญญาณมายัง/

3.1.2 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

การประมวลผล InSAR นั้นเป็นเทคนิคที่พัฒนาเพิ่มเติมโดยใช้ภาพ SAR ในการประมวลผลซึ่งถ้าหากมีภาพ SAR เพียงภาพเดียวข้อมูลเฟสจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าหากมีการบันทึกภาพที่บริเวณเดียวกัน โดยจะคำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฟสที่ตรงกันบนพื้นฐานพิกเซลต่อพิกเซล (Pixel) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (หรือความแตกต่างของระยะ) ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาเดียวกันหรือคนละช่วงเวลากันก็ได้ [26] ซึ่งเป้าหมายหลักในช่วงแรกของเทคนิค InSAR นั่นคือการประมวลผลเพื่อตรวจหาลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศหรือเป็นการสังเคราะห์แบบจำลองความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศ (DEM) ในความละเอียดที่ไม่มากแต่มีพื้นที่ผลลัพธ์ครอบคลุมที่ค่อนข้างกว้าง โดยลักษณะการบันทึกภาพนั้นตำแหน่งทั้งสองนั้นจะต้องอยู่คนละตำแหน่งกันไม่ทับกันสนิทพอดี นั้นหมายถึงมีค่าระยะห่างระหว่างการบันทึกภาพทั้งสอง (Spatial Baseline) และการบันทึกภาพทั้งสองพยายามให้มีเวลาใกล้กันมากที่สุด [11] เพื่อลดโอกาสไม่ให้มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศปะปนเข้ามาและเมื่อทำการขจัดค่าเฟสส่วนอื่นออกจนเหลือค่าเฟสที่เกิดจากภูมิประเทศ จึงทำการประมวลผลหาลักษณะความสูงของประเทศจากค่าเฟสนี้ต่อไปได้ แต่ต่อมาการประมวลผล InSAR นั้นนำมาใช้ในการประมวลผลหาการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศได้ ซึ่งถ้าหากพิจารณาในลักษณะกรณีที่เป็นอุดมคติแล้วถ้าหากภาพ SAR ทั้งสองที่นำมาประมวลผลถูกบันทึกภาพจากดาวเทียมที่อยู่ตำแหน่งเดียวกันทับกันสนิท ช่วงเวลาที่ทำการบันทึกภาพทั้งสองนั้นสภาพอากาศทั้งหมดมีลักษณะเหมือนกันและลักษณะของวัตถุในจุดภาพต่าง ๆ เหล่านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นถ้าหากนำภาพ SAR ทั้งสองนั้นมาหาค่าต่างเฟส จะสามารถบอกได้ว่าค่าต่างเฟสที่ตรวจพบในภาพ Interferogram ในแต่ละจุดภาพนั้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาระหว่างการบันทึกภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่เทคนิค InSAR ก็ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างนั้นคือการแปรเปลี่ยนไปของเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศ การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศนั้นยังมีผลกระทบต่อลักษณะของคลื่นเช่นกัน โดยมีสาเหตุมาจากส่วนประกอบในชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะละอองน้ำและความชื้น ซึ่งจะเป็นตัวดูดซับพลังงานและกระเจิงคลื่นระบบเรดาร์จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ [26]



รูปที่ 7 ลักษณะระบบ InSAR กับค่าเฟสโดยแสดงการบันทึกภาพของสองช่วงเวลาที่มีลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศเกิดขึ้นที่เดียวกัน โดยลักษณะของคลื่นที่เดินทางกลับมาโดยทั้งสองคลื่นนั้นมีค่าเฟสที่แตกต่างกัน ($\Delta\phi$) เนื่องจากการสะท้อนของคลื่นมีลักษณะที่แตกต่างกัน [26]

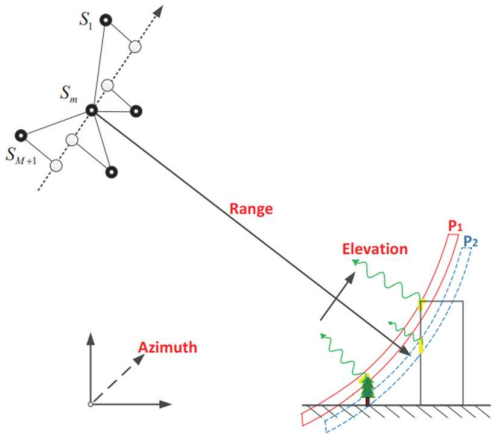
3.1.3 General Persistent scatterer InSAR (PSI) [8]

Persistent Scatterer InSAR เป็นเทคนิคหนึ่งที่พัฒนาเพิ่มเติมจากเทคนิค InSAR เพื่อขจัดปัญหาเรื่องการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลและปัญหาในเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ [8] ซึ่งใช้ค่าการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟที่โดดเด่นและคงที่ คือ Permanent scatterer (PS) ซึ่งจะเป็นการสะท้อนกลับจากการกระทบกับวัตถุ โดยค่าการสะท้อนของแต่ละจุดภาพ (Pixel) เป็นการรวมผลของเวกเตอร์การกระเจิง (Backscattering) ดังแสดงในรูปที่ 8(P_1) และเมื่อเวลาผ่านไปเกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นที่หรือวัตถุเหล่านี้ เช่น การเพิ่มจำนวนหรือลดจำนวนลง การเปลี่ยนขนาดของวัตถุ (ในกรณีของพืช) หรือการเปลี่ยนตำแหน่งไป [23] ซึ่งจะทำให้ผลรวมค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพเปลี่ยนไปด้วย อย่างไรก็ตามหากภายในจุดภาพนั้นมีวัตถุจำนวนหนึ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุอื่น ๆ และมีการสะท้อนเช่นนี้ตลอดช่วงเวลาที่มีการบันทึกภาพ วัตถุเหล่านี้ก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หากแต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัตถุอื่น ๆ ภายในจุดภาพเดียวกันที่เกิดการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีขนาดเล็กกว่า ก็จะไม่ทำให้ผลรวมของค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 8(P_2) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนที่เกิดขึ้นในจุดภาพเหล่านี้ จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดการทรุดตัว หรือการเคลื่อนตัวของวัตถุหรือไม่ ซึ่งจะสามารถนำมาใช้กับโครงสร้างเขื่อนได้ดี [27][29]

3.1.4 Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) [17]

เป็นเทคนิคที่ในแต่ละจุดภาพนั้นระดับค่าสหสัมพันธ์นั้นจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาจากพื้นดิน ซึ่งจุดภาพส่วนใหญ่นั้นจะมีการกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาแบบ

สุ่ม (Random) แต่ถ้าหากในบางจุดภาพมีส่วนที่สะท้อนกลับมาถูก dominate โดยตัว Scatter ตัวหนึ่งแล้ว รูปที่ 8(P_2) จุดภาพเหล่านี้จะมีค่าเฟสที่คงที่มากกว่า ซึ่งส่วนที่สุ่ม (Random) อาจจะเล็กมากจนทำให้สามารถแยกสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศออกมาได้ ยิ่งจุดภาพที่ค่าความคงที่ของเฟสยิ่งมากจุดภาพนั้นก็จะยิ่งมีโอกาสที่จะมีค่าสหสัมพันธ์มากตามไปด้วย [17][30]

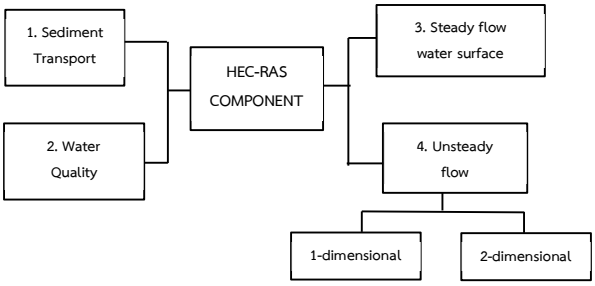


รูปที่ 8 ลักษณะการสะท้อนกลับโดย P1 แสดงถึงค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาด้วยการวางซ้อนของ Scatter Pixel ที่เหมือนจุดแข็งสองตัวและ P2 แสดงถึง Persistent Scatter pixel เป็นลักษณะของจุดภาพที่มีการ dominate โดยตัวสะท้อนตัวใดตัวหนึ่ง (อาคาร) [30]

หลักการของเทคนิค Persistent Scatterers ก็คือการหา PS pixel เหล่านี้ และนำเฉพาะค่าของจุดภาพที่ได้ผ่านการคัดกรองแล้วเท่านั้นมาใช้ในการประมวลผลหาค่าการเคลื่อนตัวต่อไปโดยเทคนิค PS ในช่วงแรกนั้นจะใช้ค่าแอมพลิจูดเป็นสำคัญในการคัดกรองซึ่งทำให้ถูกจำกัดอยู่ว่าพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นต้องมีค่าการสะท้อนกลับที่ดีมาก (Bright Scatterer) แต่ว่าในเทคนิค StaMPS [18] ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ทั้งค่าแอมพลิจูดและหลักความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของค่าเฟสมาใช้ในการคัดกรอง PS Pixel ซึ่งจะทำให้เทคนิค StaMPS นี้สามารถหา PS Pixel ได้ในทุกประเภทพื้นที่แม้ในภูมิประเทศที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่น้อยก็ตามและในเทคนิคนี้ยังสามารถทำงานในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวแบบไม่คงที่หรือพื้นที่ที่ไม่ทราบค่าการเคลื่อนตัวของพื้นผิวมาก่อนก็สามารถทำงานได้ [11]

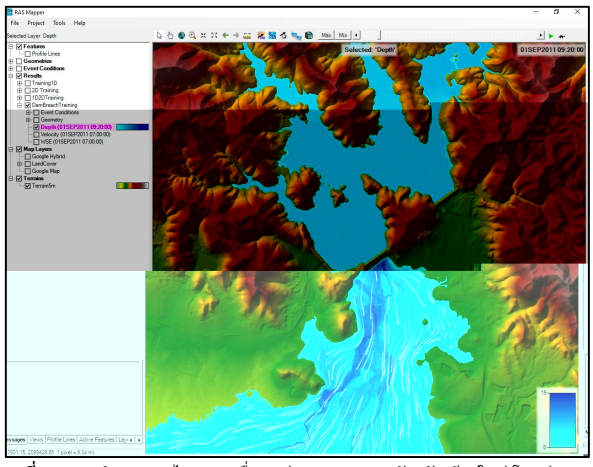
3.2 หลักการ Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS)

โปรแกรมแบบจำลองทางชลศาสตร์ Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณการไหลของระบบน้ำ ซึ่งพัฒนาโดย Hydrologic Engineer Center ของ US Army Corps เป็นโปรแกรมเกี่ยวกับการหาหน้าข้างการไหลของน้ำ (Water Surface Profile) [31] ซึ่งพัฒนามาจากโปรแกรม HEC-2 โดยตัวโปรแกรมจะเขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน (Fortran Programming Language) [32] มีความสามารถในการวิเคราะห์ 4 ส่วน คือ (1) การคำนวณการไหลของน้ำแบบทรงตัวมั่น (Steady Flow water surface profile) (2) การคำนวณการไหลของน้ำแบบไม่ทรงตัว (Unsteady Flow simulation) (3) การคำนวณการเคลื่อนที่ของตะกอน (Sediment Transport) และ (4) การคำนวณการกระจายตัวของคุณภาพน้ำ (Water Quality Analysis) [33] ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ส่วนประกอบ HEC – RAS

การใช้งานโปรแกรมแบบจำลองเป็นการรับเข้าของข้อมูล (Input Data) [32] โดยการคำนวณหาหน้าข้างการไหลของพื้นผิวน้ำที่คงที่ หรือการไหลที่ผันแปรทีละน้อยในช่องทางธรรมชาติและสิ่งก่อสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยใช้วิธีพื้นฐานของโปรแกรมในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำระหว่างรูปตัดที่ใกล้เคียงกัน มาสร้างโมเดล (Model) ได้ทั้งการไหลใต้วิกฤตและการไหลเหนือวิกฤต อีกทั้งยังสามารถรวมผลของระดับผิวน้ำเนื่องจากการขัดขวางการไหลได้ เช่น สะพาน ท่อลอด ฝาย เป็นต้น [33] ซึ่งจะจำลองสภาพการไหลระบบลำน้ำ (1-Dimensional) และการไหลบนพื้นที่ราบน้ำท่วม (2-Dimensional) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยต้องอาศัยข้อมูลลักษณะภูมิประเทศจากแบบจำลองชั้นความสูง (Digital Elevation Model, DEM) ในการคำนวณลักษณะการไหลและการจำลองการไหลที่มีโครงสร้างหรือสิ่งก่อสร้างในลำน้ำซึ่งรวมไปถึงการพิบัติของโครงสร้างปิดกั้นลำน้ำ [34]



รูปที่ 10 การจำลองการไหลของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ โดยส่วนปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน ด้วยโปรแกรม HEC – RAS [34]

3.3 โครงสร้างเขื่อน

3.3.1 เขื่อนดิน (Earth fill Dam)

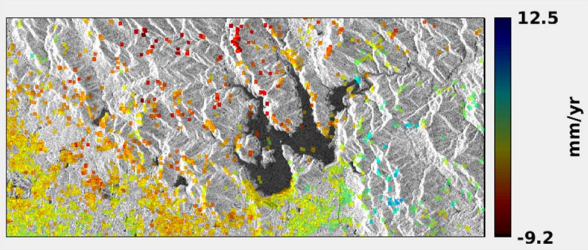
คือเขื่อนที่สร้างโดยการนำเอาดินมาบดอัดให้แน่นด้วยเครื่องจักรกล หรือ แรงงานคน ข้อดีของเขื่อนประเภทนี้คือมีลักษณะทึบน้ำหรือน้ำซึมผ่านตัวเขื่อนได้ยากและมีความมั่นคงแข็งแรง โดยเขื่อนดินนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างตัวเขื่อนคือ เขื่อนดินถมชนิดเนื้อเดียว (Homogeneous Dam) และเขื่อนดินถมชนิดแบ่งส่วน (Zoned Type Dam) การแบ่งชนิดของเขื่อนดินอย่างชัดเจน จะยิ่งช่วยให้การวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวเขื่อนทำได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และยังช่วยป้องกันหรือบรรเทาผลเสียหายที่จะเกิดตามมาได้ ตั้งแต่เริ่มต้นการคำนวณออกแบบ

(1) เขื่อนดินถมชนิดเนื้อเดียว (Homogeneous Dam) เป็นเขื่อนที่ก่อสร้างจากการบดอัดวัสดุชนิดเดียวกัน ส่วนใหญ่จะใช้เป็นดินประเภททึบน้ำ จำพวก GC, SC, ML และ CL [1] เป็นต้น ซึ่งดินจำพวกนี้สามารถบดอัดได้ดีมีความแข็งแรงและทึบน้ำพอสมควร เขื่อนชนิดนี้จะต้องมีส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนของชั้นกรอง (Filter) หรือส่วนระบายน้ำ (Drain) ทางด้านท้ายน้ำบริเวณตีนเขื่อนหรือภายในตัวเขื่อน เนื่องจากการใช้ดินประเภททึบน้ำมาก่อสร้างเป็นตัวเขื่อนทั้งหมดจึงทำให้มีปัญหาในเรื่องของการระบายน้ำภายในตัวเขื่อนตามมา กล่าวคือ ในช่วงขณะที่ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำลดลง อัตราการระบายน้ำออกจากตัวเขื่อนที่ค่อนข้างช้าจะเป็นสาเหตุทำให้ดินบริเวณลาดเขื่อนซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ อาจจะเกิดการเลื่อนไถลของลาดเขื่อนได้โดยง่าย ซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยของเขื่อนและการใช้งบประมาณก่อสร้างที่มหาศาล ส่วนใหญ่เขื่อนประเภทนี้จึงออกแบบให้เป็นเขื่อนขนาดเล็กที่มีปริมาณดินถมไม่มากนัก และมีความสูงไม่เกิน 15.00 เมตร

นอกจากนี้หากมิได้พิจารณากำหนดระบบระบายน้ำที่ดีภายในตัวเขื่อนไว้ด้วยแล้ว ในขณะที่เกิดสภาวะน้ำเต็มอ่างเก็บน้ำ เป็นระยะเวลานาน ก็จะทำให้ระดับน้ำที่ไหลซึมผ่านตัวเขื่อน (Top Flow Line) อยู่ในระดับสูง และเข้าใกล้ลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ดินตัวเขื่อนอยู่ในบริเวณดังกล่าวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีกำลังการรับแรงลดลง จนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการพิบัติของลาดเขื่อน (Slope Failure) ด้านท้ายน้ำด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาออกแบบด้วยความละเอียดรอบคอบ เพื่อป้องกันมิให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้นได้ โดยทางด้านเหนือน้ำมักจะถูกปิดทึบด้วยหินเรียง หรือหินทิ้งอีกที เพื่อป้องกันการกัดเซาะจากคลื่น ด้านท้ายน้ำก็มักจะปลูกหญ้าเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน

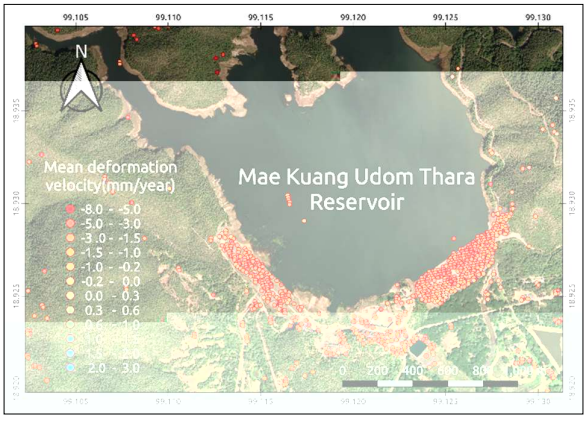
(2) เขื่อนดินถมชนิดแบ่งส่วน (Zoned Type Dam) ในกรณีที่เป็นเขื่อนดินถมที่ค่อนข้างใหญ่ มักจะใช้วัสดุหลายชนิดมาประกอบกัน โดยเลือกใช้วัสดุให้มีประสิทธิภาพสูงสุดตามศักยภาพ คือนำเอาคุณสมบัติที่ดีของแต่ละอย่างมาใช้อย่างเต็มที่โดยในส่วนของแกนเขื่อน (Core Zone) มักเลือกใช้ดินประเภททึบน้ำ (Impervious Soil) เช่น ดินประเภท GC, SC และ CL เป็นต้น และในส่วนของเปลือก (Shell Zone หรือ Random Zone) ที่ถัดออกมาจากส่วนแกนเขื่อน จะเลือกใช้ดินประเภทกึ่งทึบน้ำ (Semi-Impervious Soil) เช่น ดินประเภทที่มีกรวดหรือทรายปะปนอยู่เป็นวัสดุในการก่อสร้าง นอกจากนั้น ดินประเภทนี้ ยังมีค่ามุมของการทรงตัว (Angle of Repose) สูงกว่าดินเหนียวทึบน้ำที่ใช้ทำเป็นแกนเขื่อน จึงทำให้สามารถออกแบบลาดเขื่อน ให้มีความลาดชันได้มากกว่า รวมทั้งยังมีคุณสมบัติในเรื่องการทรุดตัวน้อยกว่าอีกด้วย ซึ่งล้วนเป็นข้อดีของเขื่อนประเภทนี้ทั้งสิ้น [1]

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเขื่อนชนิดนี้จะมีระดับเผื่อการทรุดตัวหรือ แคมเบอร์ (Camber) ตามยอดเขื่อนดินเพื่อให้แน่ใจว่าระยะพ้นน้ำ (Freeboard) จะไม่ลดลงจากการก่อสร้างเขื่อนและฐานราก ควรจัดให้มีระดับของแคมเบอร์ (Camber) ประมาณ 1% ของความสูงของอ่างเก็บน้ำ (หรือมีความสูงขั้นต่ำ 0.20 เมตร) [20] เนื่องจากเขื่อนแม่กวงอุดมธาราเป็นเขื่อนที่ได้ทำการออกแบบก่อสร้างมาเป็นเวลานานแล้ว แบบก่อสร้างที่ใช้ ณ ขณะนั้นถูกออกแบบไว้เมื่อปี พ.ศ. 2528 ทำให้รูปแบบและความชัดเจนของแบบก่อสร้างี่ ม้ากนัก ในที่ที้ดน้วิอัยองขอยกตวอย่างแบ7% กา อ ร้างข?ะ



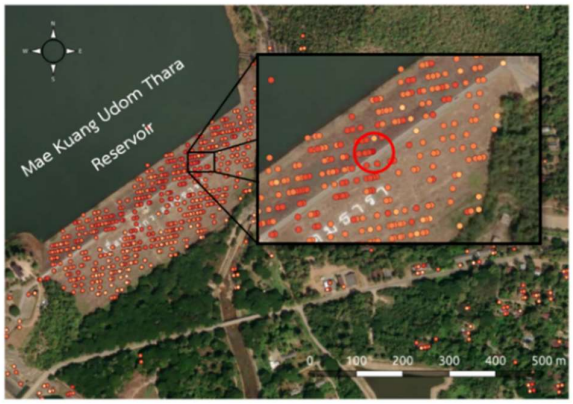
รูปที่ 12 การวิเคราะห์การทรุดตัว จาก MATLAB Programs [27][28]

และเมื่อทำการจัดกลุ่ม (Classify) ค่าการทรุดตัวใหม่ ดังรูปที่ 12 จากนั้นจะได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบการทรุดตัวของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) พบจุดที่เกิดการทรุดทั้งบริเวณเขื่อนหลักและเขื่อนปิดช่องเขาฝั่งขวา โดยตรวจพบการทรุดตัวเป็นรูปแบบคือบริเวณสันเขื่อน (Top of dam) ทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ -3 ถึง -5 มิลลิเมตรต่อปี เป็นส่วนใหญ่ทั้งตัวเขื่อนหลักและตัวเขื่อนปิดช่องเขาฝั่งขวาด้วย (Right Saddle dam) และพบการทรุดตัวน้อยลงบริเวณฐานเขื่อนอยู่ที่ประมาณ -0.2 ถึง -1 มิลลิเมตรต่อปี ของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ดังรูปที่ 13 และ 14



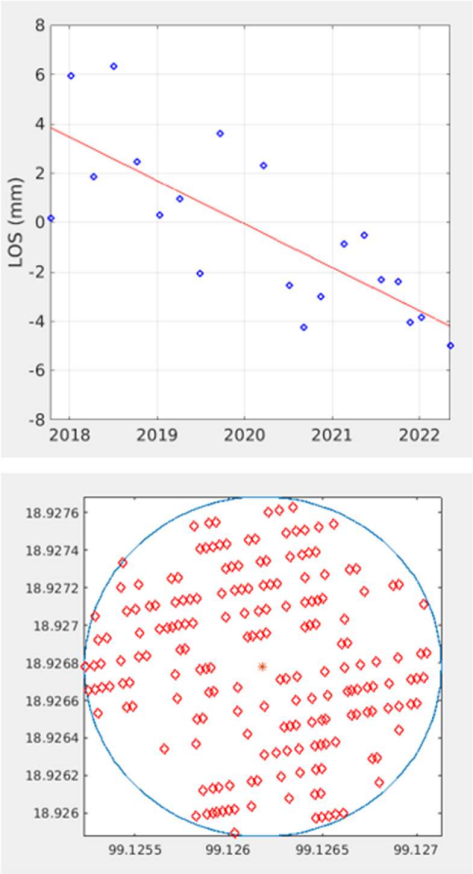
รูปที่ 13 อัตราการทรุดตัวของพื้นที่ศึกษาในช่วงปีพ.ศ. 2560 - 2565 จากเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) อ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่

เมื่อพิจารณาสังเกตเขื่อนหลักแล้วจะเห็นการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อน (Top of dam) ที่มากกว่าตำแหน่งอื่น เช่นจุดที่เป็นจุดสีแดงเข้มซึ่งแตกต่างจากที่อื่นอย่างชัดเจนมีการทรุดตัวอยู่ที่ - 5 ถึง - 8 มิลลิเมตรต่อปี ทำให้สามารถมีข้อมูลในเบื้องต้นหากต้องการการตรวจสอบเป็นพิเศษโดยการลงพื้นที่ ดังรูปที่ 14 อย่างไรก็ตามอัตราการทรุดตัวดังกล่าวเป็นเพียงแนวโน้มที่เป็นแบบสัมพัทธ์ (Relative) กับพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งขนาดยังอยู่ในเกณฑ์การควบคุมความถูกต้องของการสำรวจรังวัด ยังไม่มีนัยสำคัญ หากแต่การติดตามโดยเทคนิคการสำรวจรังวัดระยะไกลจะทำให้สามารถระบุว่าเขื่อนใดและบริเวณใดของเขื่อนที่ควรจะต้องจัดสรรทรัพยากรเข้าไปทำการตรวจสอบและเฝ้าระวัง



รูปที่ 14 ตัวอย่างพื้นที่การทรุดตัวที่บริเวณสันเขื่อนที่ต้องพิจารณาตรวจสอบเป็นพิเศษ จากอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) อ่างเก็บน้ำแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่

ผู้วิจัยได้เลือกพิกัดจุดตัวแทนการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อน (Top of dam) คือพิกัด ลองจิจูดที่ 99.126 และ ละติจูดที่ 18.927 และรัศมีวงตรวจสอบ 100 เมตร ซึ่งจะพบได้ว่ามีจุดการทรุดตัว มากกว่า 100 จุด และยังสามารถพิจารณาแนวโน้มการทรุดตัวของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ในปีพ.ศ. 2565 ที่อาจจะทรุดตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 StaMPS InSAR อัตราการทรุดตัวต่อปี ในช่วงปีพ.ศ. 2560 - 2565 ตำแหน่งที่ Lon 99.126 และ Lat 18.926 LOS (บน) และจุดที่อยู่ในรัศมี 100 เมตร (ล่าง)

ซึ่งผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time-Series) จะทำให้เห็นแนวโน้มการทรุดตัวและแสดงลักษณะการทรุดตัวเป็นบริเวณกว้างซึ่งครอบคลุมมากกว่า วิธีการทางธรณีวิทยาที่ใช้ในปัจจุบัน โดยการนำภาพ SAR มาวิเคราะห์นั้นทำให้ประหยัดค่าใช่จ่ายในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน และยังสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป เช่น การเลือกพื้นที่ที่จะลงไปตรวจสอบค่าการทรุดตัว การนำผลวิเคราะห์มาต่อยอดในการทำเล่มการศึกษาผลกระทบหากเกิดการพิบัติของเขื่อน (Dam Break) ซึ่งหากเกิดความเสียหายกับตัวเขื่อนจนพังทะลายแล้ว การที่จะกลับมาตรวจสอบเครื่องมือพฤติกรรมเขื่อนนั้นเป็นไปได้ยาก ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายกับเครื่องมือหรือสูญหาย การนำการสำรวจระยะไกลเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) มาแก้ปัญหาในการย้อนรอยและตรวจสอบสภาพก่อนที่จะเกิดเหตุการณ์ เพื่อตรวจสอบว่าเหตุใดจึงเกิดการพังทะลายของโครงสร้างเขื่อนได้และเมื่อเกิดเหตุการณ์ขึ้นแล้วจะมีผลเสียและวิธีการรับมืออย่างไร ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมได้จากผลการศึกษาจากแบบจำลองสภาพการไหลในระบบโครงข่ายลำน้ำ โดยโปรแกรม HEC-RAS 6.0

4.1.2 ผลการศึกษาจากการใช้โปรแกรมแบบจำลอง HEC-RAS 6.0

โดยหลังจากที่ได้ผลการทรุดตัวของเขื่อนจากการประมวลผลอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) แล้ว ในกรณีที่พบว่าเขื่อนเกิดการทรุดตัวต่ำกว่าระดับแคมเบอร์ (Camber) ก็จะส่งผลทำให้เกิดการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) [2] ได้ ซึ่งจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ทางชลศาสตร์ HEC-RAS ในการจำลองพื้นที่น้ำท่วมเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงและพื้นที่ความเสียหายที่เกิดจากการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) และจากนั้นก็จะจัดทำแผนปฏิบัติการกรณีฉุกเฉิน (EAP) [10] เพื่อเป็นแผนการปฏิบัติและแนวทางการรออพยพประชาชนออกจากพื้นที่ต่อไป

เมื่อวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมจากเขื่อนหลักมีความเสียหายกรณีที่รุนแรงที่สุดเป็นกรณีที่รั่วซึมผ่านดินฐานรากเขื่อนหลักขณะมีน้ำเก็บกักที่ระดับ +385 เมตร พร้อมกับเกิดน้ำหลากสูงสุดที่อาจเป็นได้ไหลเข้าเขื่อนโดยมีปริมาณน้ำหลากจากการพิบัติ 42,834.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยสรุปพื้นที่น้ำท่วมได้ดังนี้ปริมาณน้ำหลากจากการพิบัติกรณีนี้ส่งผลให้เกิดพื้นที่น้ำท่วมเป็นวงกว้างบริเวณท้ายน้ำ และมีความรุนแรงรวมทั้งหมด 475,046.37 ไร่ โดยอยู่ในพื้นที่จังหวัดลำพูน 128,227.11 ไร่ และพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ 346,819.26 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่น้ำท่วม 2 จังหวัด 12 อำเภอ 89 ตำบล [10]

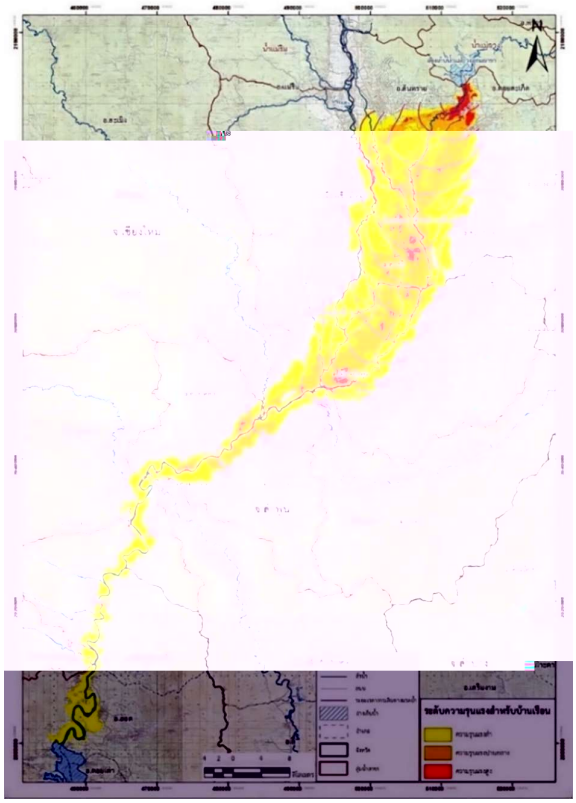
4.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

4.2.1 การวิเคราะห์ด้านวิศวกรรม

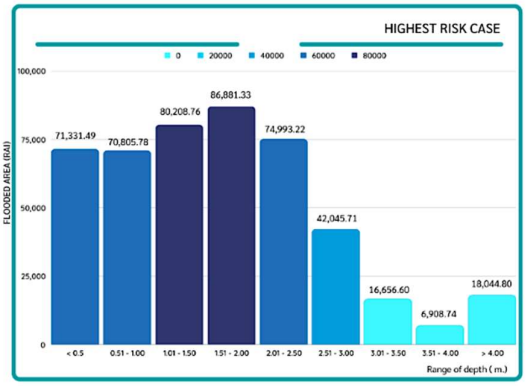
โดยทั่วไปแล้วเขื่อนชนิดดินถมชนิดแบ่งส่วน (Zoned Type Dam) จะเกิดการทรุดตัวด้วยวัสดุในการก่อสร้างอยู่แล้ว โดยในปีแรก ๆ ของการก่อสร้างแล้วเสร็จจะมีการทรุดตัวอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างดินที่ถมบดอัดนั้นยังไม่เข้าที่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปด้วยน้ำหนักของตัวเขื่อนจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยลงไป ดังนั้นการก่อสร้างเขื่อนชนิดนี้จึงได้มีการเผื่อการทรุดตัวไว้อย่างน้อย 1 เปอร์เซ็นของความสูงเขื่อน หรืออย่างน้อย 0.20 เมตร เพื่อเพิ่มระดับของระยะพ้นน้ำ (Freeboard) เนื่องจากหากเกิดการทรุดตัวอย่างกระทัน จะทำให้ระยะของพ้นน้ำ (Freeboard) ไม่เพียงพอและอาจทำให้เกิดการไหลข้ามสันเขื่อนได้ เมื่อเกิดการไหลข้ามสันเขื่อนแล้วนั้นจะทำให้เกิดการกัดเซาะสันเขื่อนจนก่อให้การการพิบัติของโครงสร้างเขื่อน (Dam Break) ได้ และอีกสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการทรุดตัวได้เนื่องจากรั่วซึมบริเวณตัวเขื่อน (Seepage) หากเกิดการซึมไปเรื่อย ๆ อาจทำให้เกิดเป็นรูโพรง (Piping) เมื่อเกิดเป็นรูโพรงที่ใหญ่พอ อาจเกิดการยุบตัวกระทันหัน จนทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างเขื่อนเช่นกัน และอีกสาเหตุที่เกิดขึ้นได้คือการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน เนื่องจากในปัจจุบันรอยเรื่อยแม่ทา ที่อยู่บริเวณจังหวัดเชียงใหม่ยังเป็นรอยเลื่อนที่มีพลัง และโครงสร้างของเขื่อนแม่กวงอุดมธาราเป็นโครงสร้างแบบเก่าที่ไม่ได้คิดเผื่อถึงแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นกรมทรัพยากรธรณีได้มีการแนะนำให้ออกแบบสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ให้ต้านแรงแผ่นดินไหวมากกว่า 7.0 [21] สาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอาจนำไปสู่การเกิดภัยพิบัติได้ ผู้วิจัยจึงได้มีการทำแบบจำลองสภาพการไหลขึ้นด้วย

4.2.2 การวิเคราะห์ด้านความเสียหายของมูลค่าทางเศรษฐกิจและชีวิต

การประเมินความเสี่ยงอุทกภัย มูลค่าทางเศรษฐกิจและผู้เสียชีวิตจากกรณีฉุกเฉินเขื่อนจะเห็นได้ว่าเขื่อนแม่กวงนั้น มีความเสี่ยงที่จะเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินอันมีผลกระทบต่อพื้นที่และชุมชนได้ในมิติต่าง ๆ มีสถานการณ์วิกฤตในรูปแบบฉุกเฉินใน 3 ลักษณะกล่าวคือ เหตุการณ์ระบายน้ำปริมาณมากจากเขื่อน เหตุการณ์ที่มีน้ำรั่วซึมจากเขื่อนหลัก เหตุการณ์ที่มีน้ำล้นสันเขื่อนหลักและเหตุการณ์ที่มีความเสียหายต่อเนื่องกันทั้งสามเขื่อน โดยจะแสดงแผ่นที่น้ำท่วม รวมไปถึงความลึกน้ำเมื่อเกิดการพิบัติ ภาพรูปที่ 17 และ 18 โดยในแผนปฏิบัติการฉุกเฉินของเขื่อนและแผนปฏิบัติการฉุกเฉินชุมชนนี้ จะใช้สถานการณ์ที่มีระดับความเสี่ยงสูงที่สุด นั่นคือเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นและมีผลกระทบในระดับที่จำเป็นต้องมีการเตรียมพร้อมแผนปฏิบัติการฉุกเฉินดังกล่าวรวมมูลค่าความเสียหายการเกิดเขื่อนพิบัติ จากการประเมินความเสียหายการเกิดเขื่อนพิบัติ พบว่าในกรณีรุนแรงสุด (เขื่อนหลักมีความเสียหาย) จะมูลค่าความเสียหายมากที่สุด จำนวน 57,817.38 ล้านบาท ซึ่งมีความเสียหายด้านทรัพย์สินมากที่สุด จำนวน 53,711.57 ล้านบาท รองลงมาคือ กรณีเสี่ยงสูงสุด (น้ำรั่วซึมผ่านเขื่อนหลัก มีมูลค่าความเสียหาย จำนวน 57,476.44 ล้านบาทและกรณีระบายน้ำปริมาณมาก มีมูลค่าความเสียหายจำนวน 3,877.78 ล้านบาท



รูปที่ 17 พื้นที่น้ำท่วมและความรุนแรงสำหรับบ้านเรือนจากเขื่อนหลักเมื่อเกิดการพิบัติของโครงสร้าง



รูปที่ 18 สรุปพื้นที่น้ำท่วมตามความระดับความลึก

5. บทสรุปการวิจัย

การพัฒนาการติดตามความปลอดภัยของเขื่อนด้วยเทคโนโลยีเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) เป็นการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสำรวจเพื่อติดตามความปลอดภัยของเขื่อน กล่าวคือเมื่อนำวิธีการสำรวจระยะไกลแบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ มาใช้ช่วยตรวจสอบจะสามารถลดการเกิดความผิดพลาดของมนุษย์ (Human Error) ทั้งที่มาจากการไปตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตาดัชนีภาพ (Condition Index) และการวัดจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) รวมไปถึงยังสามารถลดจำนวนคนและงบประมาณที่ต้องออกพื้นที่ได้อีกด้วย

เมื่อนำวิธีการนี้มาตรวจวัดหาจุดที่ทรุดตัวของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงมกราคม 2565 พบว่ามีการทรุดตัวโดยประมาณ -3 ถึง -5 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งยังอยู่ในช่วงความถูกต้องของการควบคุมคุณภาพในการสำรวจ และเนื่องด้วยเขื่อนแม่กวงอุดมธารา เป็นเขื่อนขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญกับจังหวัดเชียงใหม่เป็นอย่างมาก อีกทั้งจังหวัดเชียงใหม่ยังเป็นเมืองเศรษฐกิจและเมืองแห่งการท่องเที่ยวที่สำคัญจังหวัดหนึ่งของประเทศไทย การทรุดตัวของเขื่อนเพียงเล็กน้อยในหลักมิลลิเมตรต่อปีก็อาจส่งผลกระทบให้เกิดความเสียหายมหาศาลอันมิอาจประเมินค่าได้ในอนาคต ดังนั้นการติดตามและตรวจสอบการทรุดตัวของเขื่อนจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยของความปลอดภัยเขื่อนที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในอนาคตหากมีข้อมูลการสำรวจรังวัดหมุดหลักในพื้นที่และเป็นข้อมูลที่ถูกต้องเชื่อถือได้ การนำเอาเทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) มาพัฒนาช่วยในการเพิ่มจุดตรวจสอบของเขื่อน เพื่อลดขอบเขตของพื้นที่ (Area Boundary) ที่จะต้องส่งคนลงไปตรวจสอบก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสำรวจเพื่อติดตามความปลอดภัยของเขื่อนอีกด้วย

จากการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลไปวิเคราะห์จำลองประมวลผลพื้นที่น้ำท่วมในรูปแบบ 3D โดยนำเอาโปรแกรมแบบจำลอง HEC-RAS 6.0 เข้ามาช่วย เพื่อนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ความเสียหายและพื้นที่ที่จะเกิดน้ำท่วม หากเกิดการพิบัติของตัวเขื่อน (Dam Break) สำหรับเตรียมทำแผนปฏิบัติการกรณีฉุกเฉิน (EAP) เพื่อเป็นแนวทางในการอพยพผู้คนและลดมูลค่าความเสียหายทั้งกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จากโครงการ Copernicus ของ European Space Agency (ESA) ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2565 เผยแพร่โดย ASF DAAC ดาวน์โหลดข้อมูลเมื่อเดือนมิถุนายน 2565 ประมวลผลด้วยซอฟท์แวร์ SNAP (The Sentinel Application Platform) และ StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) ส่วนแบบจำลองทางชลศาสตร์ใช้ซอฟท์แวร์ HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) ของ US Army Corps of Engineers และขอขอบคุณส่วนความปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อข้อมูลที่จำเป็นจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Bowles, J.E. (1987). *Design of small dams*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, pp.59-64.

[2] กรมชลประทาน ส่วนความปลอดภัยเขื่อน (2564). *รายงานแผนปฏิบัติการกรณีฉุกเฉินเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ส่วนความปลอดภัย*. กรมชลประทาน, หน้า 1-1 – 9-1.

[3] John Olusegun, O. (2016). *Precision Surveying the Principles and Geomatics Practice*, John Wiley & Sons, Inc., pp.398-422.

[4] กรมชลประทาน ส่วนความปลอดภัยเขื่อน (2562). คู่มือการกำหนดชนิดของเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเขื่อน สำนักงานชลประทานที่ 5. กรมชลประทาน , หน้า.12-17

[5] Anderssin, C. (2015). *INSAR ON EMBANKMENT DAMS*, **212**, pp.7-31.

[6] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2559) https://www.nectec.or.th/innovation/innovation-software/dsrms.html

[7] Aobpaet Aobpaet, Itthi Trisirisatayawang. (2012). *InSAR time series analysis for land subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area*. Ph.D. Dissertation, Chulalongkorn University, Thailand.

[8] สรศักดิ์ ชัยทวี (2554). การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series InSAR. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมสำรวจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[9] สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์,วรากร ไม้เรียง (2550).การพิบัติของเขื่อน. *โครงการอบรมปลอดภัยเขื่อนสภาวะปกติและสภาวะอันตราย*, กรุงเทพมหานครฯ, 20-21 กันยายน 2550, หน้า 1-34.

[10] กรมชลประทาน (2562). รายงานวิเคราะห์ความปลอดภัยเขื่อน. การตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตาและ ประเมินสภาพเขื่อนโดยวิธีดัชนีสภาพ เขื่อนแม่กวงอุดมธารา อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่, เชียงใหม่, 19-20 มีนาคม 2562, หน้า 6-29

[11] ปวัน ภิรมย์ทอง (2554). การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมสำรวจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[12] กรมชลประทาน (2564). รายงานการศึกษา การพิบัติของเขื่อน รายงานหลัก (Main Report). กรมชลประทาน, หน้า 1-1 – 9-42.

[13] Mohammed, Y. F., Salama, N. Y. A., Firas, A. S. (2014). SEEPAGE ANALYSIS OF A ZONED EARTH DAM BY FINITE ELEMENTS, Ph.D. Dissertation, University of Baghdad, Iraq

[14] กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2558). *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดเชียงใหม่.* กรมทรัพยากรธรณี, พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 33-34

[15] Clement, M., Valerie, B., Tom R. L., Ivanna P., Michel J. (2016). Large slope deformations detection and monitoring along shores of the Portillo's dam reservoir, Argentina, based on a small-baseline InSAR approach, *Landslides*, pp.451-461 https://doi.org/10.1007/s10346-015-0583-4

[16] กิติศักดิ์ พรมโสภา (2563).การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 พื้นที่ศึกษาอำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย,วิทยานิพนธ์ปริญญา ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร. หน้า 6-20

[17] Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca and A. Rucci (2011) A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, **49**, 3460-3470.

[18] Hooper, A., P. Segall and H. Zebker (2007) Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **112**, B07407.

[19] Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters, **35**, L16302.

[20] Ministry of Environment. (2022), Water and Natural Resources Practice Manual for Small Dams, Pans and Other Water Conservation Structures in Kenya. สืบค้นข้อมูลจาก : URL: http://design-of-small-dams.appspot.com /structures/

[21] กรมทรัพยากรธรณี(2563). *แผนที่รอยเลื่อนมีพลัง กลุ่มรอยเลื่อนแม่ทา*. สืบค้นข้อมูลจาก : URL: http://www.dmr.go.th/ewtadmin /ewt/dmrweb/ewt ews.php?nid=137239&filename =index

[22] ESA-Sentinel-1.SAR, Available online https://search.asf.alaska.edu

[23] Michele C. (2016). Persistent Scatterer Interferometry, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sening.**115**, PP.78-89 https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011

[24] กรมชลประทาน (2562) คู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) เรื่อง คู่มือเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนในพื้นที่สำนักงานชลประทานที่ 15. กรมชลประทาน, หน้า 19-31

[25] ศุภกิจ เหมือนพิมทอง (2562). การศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลภาพดาวเทียม Sentinel-1 และ ดาวเทียม Sentinel-2 สำหรับการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง,วิทยานิพนธ์ปริญญา การจัดการทรัพยากรป่าไม้, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 1-49

[26] Zhong, l., Ohig, K. and Russell, R. (2007) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Its Past, Present and Future, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **47**, pp.217-221.

[27] RUS Copernicus (2020). StaMPS: *Persistent Scatterer Interferometry Processing Case Study,* Mexico City, Nov. 2019 - Nov. 2020, Copernicus, pp.16-31.

[28] Andy, H., David, b., Ekbal, H. and Karsten, s. (2018), *StaMPS/MTI Manual Version 4.1b*, University of Leeds. pp.19-25.

[29] Anuphao, A., Miguel, C. C., Andrew, H. and Itthi Trisirisatayawong. (2013). *InSAR time-series analysis of land subsidend in Bangkok*, Thailand, International Journal of Remote Sensing,**34**,2969-2982

[30] Bo, Y., Huaping, X.,Wei, L.,Junxiang, G., Chunsheng, L. and Jingwen L., (2019).*An Improved Stanford Method for Persistent Scatterers Applied to 3D Building Reconstruction and Monitoring*, *11*(15),**1807**, https://doi.org/10.3390 /rs11151807

[31] สุดารัตน์ ภิรมย์ (2554). การจำลองสภาพน้ำท่วมด้วยแบบจำลอง HEC -R.AS และระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อบรรเทาอุทกภัย ในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างโดยใช้แก้มลิง, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า 40-42

[32] ปริวัตร น้ำต้าง (2550). การวิเคราะห์การไหลของแม่น้ำแม่กลองโดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS (Analysis of Flow in Mae Klong River by HEC-RAS Model), วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมชลประทาน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 28-29

[33] ณัฐพล แก้วทอง, ปกรณ์ ดิษฐกิจ, สรายุทธ์ นาครอด และ ชยณัฐ บัวทองเกื้อ (2562). การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS และ HEC-RAS เพื่อศึกษาแนวทางการบรรเทาอุทกภัยของอำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช, *Walailak Journal of Science and Technology*, นครศรีธรรมราช, May-June 2020, หน้า. 264-272

[34] กรมชลประทาน (2564). ฝึกอบรมการใช้แบบจำลอง HEC-RAS 6.0 เรื่อง จัดทำแผนปฏิบัติการกรณีฉุกเฉินของเขื่อนแม่กวงอุดมธารา. กรมชลประทาน, หน้า. 1-41