การติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยี InSAR : กรณีศึกษาอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา

InSAR Technology for Displacement Monitoring of the Upper Reservoir of Lamtakong Jolabha Vadhana Power Plant

ชญาภา เลาหะอุดมโชค[1,*] อนุเผ่า อบแพทย์[2] และ สรวิศ สุภเวชย์[3]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: Chayapha.la@ku.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย หากไม่ได้รับการติดตามหรือตรวจสอบจะส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีดาวเทียมเรดาร์อินเตอร์เฟอโรเมตรีจึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับการติดตามและตรวจสอบโครงสร้างที่สามารถตรวจสอบรายละเอียดได้มากขึ้น ลดการใช้ทรัพยากรบุคคล ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลงในระยะยาว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลลัพธ์จากการติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยี InSAR ในหลากหลายรูปแบบ ซึ่งนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งขาขึ้น (Ascending) และขาลง (Descending) จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึง เดือนมกราคม 2566 มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) พื้นที่ศึกษาคือ อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา จากผลลัพธ์ที่ได้พบค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างประมาณ -04.69 ถึง +05.62 มิลลิเมตรต่อปี ในแนวการโคจรแบบขาขึ้น ขณะที่ค่าการเคลื่อนตัวในแนวการโคจรแบบขาลง ประมาณ -03.84 ถึง +05.84 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้นหรือแบบขาลงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จึงสามารถเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวโดยการใช้ข้อมูลในแนวการโคจรแบบขาขึ้นและแบบขาลงร่วมกัน นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยสามารถนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคทางวิศวกรรมและสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อนำมาแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้แม่นยำมากขึ้น

คำสำคัญ: การติดตามการเคลื่อนตัว, เทคนิคอนุกรมเวลา InSAR, โครงสร้างพื้นฐาน

Abstract

The displacement of infrastructure is influenced by a variety of factors. If not monitored, it will result in heavy damage. Therefore, another alternative for monitoring structures is to use Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, which can examine more structure details and reduce the use of human resources, resulting in a lower long-term cost of monitoring structures. The goals of this study were to present the results of using InSAR technology to monitor the displacement of infrastructure in a variety of formats. We used time-series data from each of the 34 Sentinel-1 satellite images for ascending and descending orbits, from January 2017 to January 2023. InSAR time-series technology was used to evaluate the data. The study area is the upper reservoir of Lamtakong Jolabha Vadhana Power Plant, located in Nakhon Ratchasima. The results showed that structure is subsiding, about -04.69 to +05.62 millimeters per year for ascending orbits and -03.84 to +05.84 millimeters per year for descending orbits which different displacements of structure may be caused by many reasons. An analysis using only ascending or descending orbits data may be insufficient. Using information from both ascending and descending orbits can improve analyses' accuracy. However, the results of InSAR time-series analysis can be applied to engineering techniques and geographic information to solve the problem more precisely.

Keywords: Displacement Monitoring, Time-series InSAR, Infrastructure

1. บทนำ

ระบบการเก็บพลังงานโดยใช้การปั๊มน้ำเก็บไว้ (Pumped Hydro Electric Storage, PHES) นั้นแตกต่างจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำทั่วไป ประกอบด้วยอ่างเก็บน้ำสองแห่ง [1] ในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานต่ำ ระบบจะใช้พลังงานในการปั๊มน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่อยู่ในระดับต่ำขึ้นไปยังอ่างเก็บน้ำที่อยู่ระดับสูง และเมื่อมีความต้องการใช้พลังงานในปริมาณที่มากน้ำจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านกังหันเพื่อสร้างพลังงาน [2] การก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับแห่งแรกของประเทศไทยถูกสร้างขึ้นที่จังหวัดนครราชสีมา มีหลักการทำงานโดยสูบน้ำจากอ่างเก็บน้ำของเขื่อนกรมชลประทานไปเก็บไว้ที่อ่างพักน้ำตอนบน ซึ่งตั้งอยู่เหนือตัวอาคารโรงไฟฟ้าที่ถูกสร้างไว้ใต้ระดับผิวดินลึกกว่า 350 เมตร [1]

อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา เป็นอ่างพักน้ำเพื่อใช้สำหรับปล่อยน้ำไปผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำ อย่างไรก็ตามอ่างพักน้ำได้มีการก่อสร้างมาเป็นระยะเวลายาวนาน ทำให้สภาพโครงสร้างอาจมีการเสื่อมสภาพไปตามกาลเวลา เช่น การเสื่อมสภาพของวัสดุรองรับตัวเขื่อนหรือวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ก่อสร้าง [3] หากไม่ได้รับการติดตามหรือตรวจสอบตามกระบวนการทางวิศวกรรมส่งผลให้เกิดการพิบัติของเขื่อน สร้างความเสียหายอย่างมหาศาล ดังนั้นการตรวจสอบและติดตามโดยใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง การตรวจสอบสภาพเขื่อนโดยปกติมีอยู่ 2 วิธี คือ การตรวจสภาพเขื่อนด้วยสายตา (Visual Inspection) และการตรวจสภาพเขื่อนด้วยเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) [4] วิธีการเหล่านี้ต้องใช้กำลังคน ระยะเวลานาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างมาก และมีข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่ทำการสำรวจ อีกทั้งข้อมูลที่ได้อาจมีความไม่แน่นอนและผันผวนสูง ช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้ร่วมกับศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พิจารณากำหนดหลักเกณฑ์ความปลอดภัยเขื่อนในระบบติดตามตรวจวัดข้อมูลระยะไกลด้านความปลอดภัยเขื่อน (DS-RMS) และมีศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ดำเนินการด้าน Web Application [5] นอกจากนี้ การตรวจสอบและติดตามความปลอดภัยเขื่อนยังมีการใช้เทคโนโลยีดาวเทียมเรดาร์อินเตอร์เฟอโรเมตรี (InSAR) ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างอาจลดลงในระยะยาว ลดการใช้ทรัพยากรบุคคล และสามารถตรวจสอบรายละเอียดได้มากขึ้น [6] ส่งผลให้โครงสร้างมีสภาพความปลอดภัยที่ดีขึ้น

เทคนิคอินซาร์เป็นเทคนิคที่อาศัยการวิเคราะห์ผลต่างเฟส (Phase Differential) ของภาพเรดาร์ระบบ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไป โดยผลต่างเฟสระหว่างสองภาพสามารถวิเคราะห์ถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลก ซึ่งภาพทั้งสองภาพจะถูกบันทึกบริเวณตำแหน่งเดียวกัน ช่วงระยะเวลาเดียวกันหรือคนละช่วงเวลาก็ได้ สำหรับเทคนิค Time-series InSAR จะอาศัยค่าสัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปกระทบกับวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเสาอากาศเรียกว่า ค่าสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟที่คงที่และถาวร (Permanent Scatterer, PS) โดยจะใช้วิธีการวัดอนุพันธ์ของการบิดเบือนเฟสแสง มีหลักการคือ สร้างจำนวนภาพ Differential Interferograms (หรือที่เรียกว่า Shearing Interferograms) ของหลาย ๆ คู่ภาพ ซึ่งคู่ภาพที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะอ้างอิงจากภาพ Master ตัวเดียว (Single Master) [7] ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคอินซาร์มาใช้ในการติดตามและตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้าง เช่น การตรวจสอบการเสียรูปของอ่างเก็บน้ำ Kafang ประเทศจีน [8] การประเมินความเสียหายของอาคารที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ Crossrail กรุงลอนดอน [9] และการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล [10]

ผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยี InSAR ซึ่งนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2566 โดยมีพื้นที่ศึกษาคือ อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (TSInSAR) เพื่อเป็นการนำเสนอผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแนวการโคจรแบบขาขึ้นและแบบขาลงในหลากหลายรูปแบบและมีความแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถนำไปบูรณาการร่วมกับเทคนิคทางด้านวิศวกรรมสำรวจและสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อนำมาแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายงบประมาณในการสำรวจรังวัดโครงสร้างพื้นฐานให้กับหน่วยงานได้ต่อไปในอนาคต

2. พื้นที่ศึกษาและข้อมูลในการดำเนินการวิจัย

2.1 ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย

2.1.1 พื้นที่ศึกษา

ความเป็นมาของโครงการโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา เนื่องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่ใหญ่และมีประชากรมากที่สุดในประเทศไทย รวมถึงมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงได้มีการศึกษาและวางแผนพัฒนาการผลิตไฟฟ้าโดยโครงการโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา เป็นโครงการที่ได้บรรจุในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของ กฟผ. และในปี พ.ศ. 2532 กฟผ. ได้ร่วมมือกับองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศญี่ปุ่น (JICA) ร่วมลงนามทำสัญญาศึกษาความเหมาะสมโครงการ โดยผลการศึกษาแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2534 คณะรัฐมนตรีเห็นชอบให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำลำตะคองแบบสูบกลับเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าเสริมระบบในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งก่อสร้างแล้วเสร็จและนำไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเมื่อปี พ.ศ. 2547 โดยโครงการก่อสร้างนี้ประกอบด้วย อ่างเก็บน้ำตอนบน อ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคองเดิม โรงไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ส่งน้ำเข้าโรงไฟฟ้า อุโมงค์ท้ายน้ำ และลานไกไฟฟ้าและอาคารควบคุม

อ่างเก็บน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ตั้งอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ระหว่างอำเภอสีคิ้วและอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา รูปที่ 1 เป็นอ่างพักน้ำเพื่อใช้สำหรับปล่อยน้ำไปผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำ ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีขุดและถมโดยใช้หินในพื้นที่ หินที่ขุดมาจากฐานรากได้ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการก่อสร้างตัวอ่างเก็บน้ำ ซึ่งประกอบด้วยหินทรายและหินเคลย์เป็นหลักเนื่องจากความยากลำบากในการขนส่งวัสดุ และใช้หินเคลย์ถมที่ด้านท้ายน้ำ (รูปที่ 2) โดยตัวอ่างเก็บน้ำดาดด้วยแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ แต่ต่อมาได้มีการสังเกตเห็นรอยแตกร้าวซึ่งเป็นผลให้อ่างเก็บน้ำเกิดการรั่วไหล จึงได้มีการปูทับด้วยแผ่นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เพื่อป้องกันน้ำซึมออกจากอ่าง นอกจากนี้ชั้นผิวดินด้านบนมีความหนาประมาณ 30 เซนติเมตร ได้มีการปลูกหญ้ารูซี่ด้วยวิธี hydro-seeding เนื่องจากหญ้าชนิดนี้เติบโตได้ค่อนข้างเร็วและป้องกันการพังทลายของดิน อีกทั้งยังเสริมความแข็งแรงของผิวดินได้อีกด้วย [1] อ่างเก็บน้ำตอนบนสามารถเก็บกักน้ำได้ 10.3 ล้านลูกบาศก์เมตร มีระยะพ้นน้ำ (Freeboard) 2 เมตร พื้นที่ผิวน้ำ 0.34 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่บนสันเขายายเที่ยงที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 650 เมตร และส่งน้ำไปยังตัวอาคารโรงไฟฟ้าที่ถูกสร้างไว้ใต้ระดับผิวดินลึกกว่า 350 เมตร เพื่อเพิ่มระยะทางจากอ่างเก็บน้ำตอนบน ถึงอาคารโรงไฟฟ้าให้น้ำที่ไหลลงมามีกำลังแรงขึ้น [11] นับเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มกำลังผลิตในช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าสูง ช่วยเพิ่มความมั่นคงในระบบไฟฟ้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในภูมิภาค



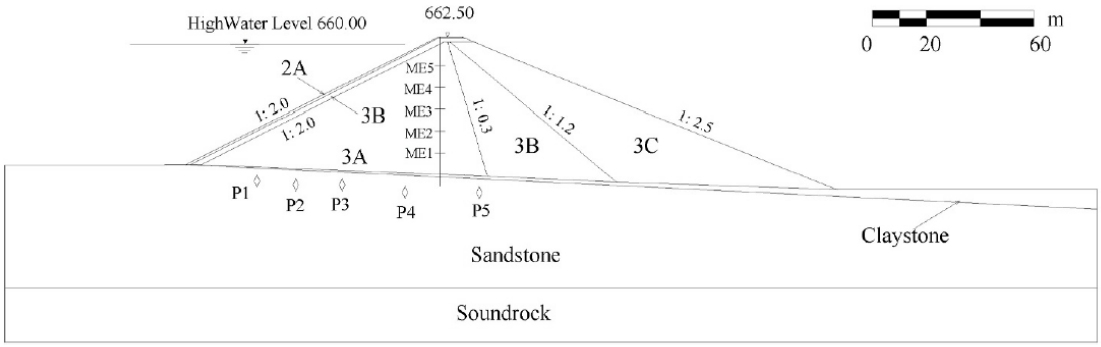
รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา อ่างเก็บน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา

2.1.2 การศึกษาอ่างเก็บน้ำแบบหินถม (Rock-Fill Dams)

เขื่อนหินถมเป็นเขื่อนที่ใช้วัสดุประเภทหินนำมาเป็นวัสดุในการถมโครงสร้างเขื่อน จึงจำเป็นต้องมีดินฐานรากที่แข็งแรงมาก มักจะใช้หินที่หาได้จากบริเวณใกล้เคียงกับสถานที่ก่อสร้างเป็นส่วนใหญ่ โดยจะมีผนังกั้นน้ำซึมทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำซึ่งจะเป็นผนังคอนกรีตหรือดิน แต่เนื่องจากหินที่นำไปถมเขื่อนจะจมอัดลงไปกับผนังกั้นน้ำซึมนี้จึงนิยมใช้เป็นแบบดินเหนียวมากกว่า และทางด้านเหนือน้ำมักนิยมใช้วัสดุที่สามารถปรับตัวได้ เช่น แอสฟัลท์ ซึ่ง International Commission on Large Dams (ICOLD) ได้ให้คำนิยามเขื่อนหินถม คือ เขื่อนประเภทถมหรือวัสดุถมประเภทหนึ่ง อาศัยหินในการสร้างเสถียรภาพให้กับโครงสร้างเขื่อน แต่เนื่องจากวัสดุประเภทหินไม่สามารถกั้นน้ำได้จึงจำเป็นต้องอาศัยวัสดุทึบน้ำ (Impervious zone) ซึ่งปริมาณของวัสดุประเภทหินจะต้องมีจำนวนมากกว่า 50% ของวัสดุทึบน้ำ [12] สำหรับการออกแบบเขื่อนหินถมจะต้องพิจารณาความมั่นคงของความลาดของเขื่อน ความปลอดภัยในด้านการเลื่อน การอัดและการจมของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง การซึมของน้ำผ่านผนังกันซึม การเก็บกักน้ำไว้ในอ่างจะต้องไม่ล้นอ่าง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างทางน้ำล้นและอุโมงค์จะสูงเมื่อเทียบกับเขื่อนประเภทอื่นเพราะไม่สามารถสร้างทางน้ำล้นในตัวเขื่อนได้ เพื่อเป็นการประหยัดควรพยายามใช้วัสดุที่ขุดออกมาเพื่อก่อสร้างอุโมงค์และส่วนประกอบของเขื่อนให้ได้มากที่สุด

2.2 ระยะเวลาในการดำเนินการ

ข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ของสหภาพยุโรป ในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2566 โดยใช้ข้อมูลการวิเคราะห์ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ของอ่างเก็บน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และชุดข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานทุก ๆ 12 วัน (ตามรอบโคจรของดาวเทียม) นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร (TSInSAR) เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของพื้นผิวโครงสร้างพื้นฐานอย่างแม่นยำระดับมิลลิเมตร [13]



รูปที่ 2 รูปตัดอ่างเก็บน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา [1]

3. หลักการและทฤษฎี

3.1 ข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1

ในปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมที่ให้บริการข้อมูลแบบไม่มีค่าใช้จ่าย โดยองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency, ESA) เพื่อใช้ในการติดตามและตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งดาวเทียม Sentinel-1 เป็นดาวเทียมถ่ายภาพเรดาร์ประกอบด้วย ดาวเทียม Sentinel-1A และดาวเทียม Sentinel-1B ซึ่งเป็นข้อมูลดาวเทียมระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) ที่รับส่งสัญญาณในช่วงคลื่น C-Band ที่ย่านความถี่ 5.405 กิกะเฮิร์ต [14] โดยเซนเซอร์ชนิดนี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน (Day-and-Night) และทุกสภาพอากาศ [15] ทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดาวเทียม Sentinel-1 เป็นดาวเทียมสำรวจระยะไกลที่มีกระบวนการบันทึกข้อมูลด้วยเรดาร์ มีระบบเซ็นเซอร์แบบ C-Band SAR (C-Band Synthetic Aperture Radar) ซึ่งจะให้ภาพในทุกสภาพแสงและสภาพอากาศ ดาวเทียม Sentinel-1 ถูกปล่อยขึ้นสู่วงโคจรเมื่อปี พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Copernicus ของสหภาพยุโรป โดยโคจรในแนวเหนือใต้ใกล้ขั้วโลกที่ความสูงจากแนวดิ่ง 693 กิโลเมตร (431 ไมล์) ทำมุมเอียง 98.18 องศา มีรอบการโคจรทุก 12 วัน และระยะเวลาการโคจร 98.6 นาที ซึ่งดาวเทียม Sentinel-1 มีความละเอียดเชิงพื้นที่และความกว้างของแนวการบันทึกภาพ 4 โหมด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โหมดการทำงานของดาวเทียม Sentinel-1 [15]

โหมดการทำงาน	ความกว้างแนวบันทึก (กิโลเมตร)	ความละเอียดเชิงพื้นที่ (เมตร)
Strip Map (SM)	80	5 x 5
Interferometric Wide Swath (IW)	250	5 x 20
Extra-Wide Swath (EW)	400	20 x 40
Wave (WV)	20 x 20	5 x 5

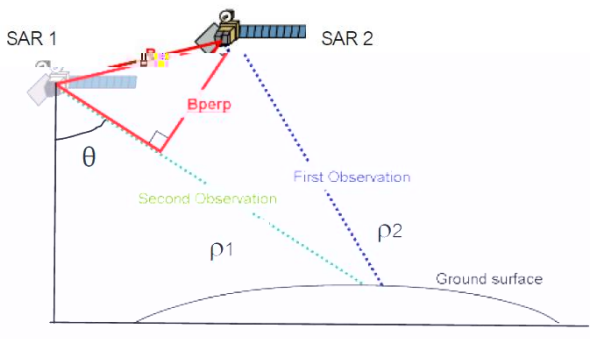
ดาวเทียม Sentinel-1 จะรองรับการทำงานแบบ single polarization (Polarization HH หรือ VV) สำหรับ Wave mode (WV) และแบบ dual polarization (Polarization VV กับ VH หรือ Polarization HH กับ HV) สำหรับโหมด SM, IW และ EW [16][17] สำหรับดาวเทียม Sentinel-1 ถูกออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์การทรุดตัว จึงไม่เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลอง DEM [18] ดาวเทียม Sentinel-1 สามารถนำมาใช้งานได้อย่างหลากหลายโดยมีภารกิจหลัก ได้แก่ การตรวจสอบทางทะเล การตรวจสอบที่ดินในการวัดการทรุดตัวของพื้นดินผ่านการสร้างภาพ InSAR เพื่อสร้างแผนที่ของระดับความสูงแบบดิจิทัลและวัดการเสียรูปของพื้นผิวดินของพื้นที่ และการตอบสนองฉุกเฉิน เช่น น้ำท่วม ดินถล่มและภูเขาไฟ หรือแผ่นดินไหว

3.2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

ระบบเรดาร์ Synthetic Aperture Radar (SAR) คือ ระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ การประมวลผลข้อมูลใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุและมุมมองที่เปลี่ยนไปของวัตถุ ซึ่งความแตกต่างของความยาวในการเดินทางของคลื่นไปและกลับทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีความละเอียดสูง แม้จะบินในระดับที่สูงจากพื้นโลกมาก ๆ ก็ตาม [19] โดยระบบเรดาร์ SAR นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นเครื่องมือในการสร้างรูปภาพภูมิประเทศ มีลักษณะคล้ายรูปที่ทำการถ่ายด้วยกล้องถ่ายรูปจากอากาศสู่พื้น มีการบันทึกข้อมูลแบบ Active คือ จะมีแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเองและทำการบันทึกข้อมูลในช่วงคลื่นความถี่ระหว่าง 300 MHz - 300 GHz [20][21] จึงไม่ขึ้นอยู่กับแสงธรรมชาติและสามารถถ่ายภาพในเวลากลางคืนได้ เทคโนโลยี SAR อาศัยการถ่ายรูปพื้นผิวของโลก โดยการปล่อยสัญญาณวิทยุไปที่พื้นผิวของโลก เมื่อสัญญาณวิทยุกระทบกับพื้นผิวจะเกิดการสะท้อนกลับมาที่ดาวเทียม ซึ่งจะแสดงลักษณะทางธรณีวิทยา รวมถึงภูมิประเทศที่แตกต่างกันนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นวิทยุได้แตกต่างกัน ทำให้สามารถนำคลื่นวิทยุที่รับได้มาวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นแผนที่ 3 มิติ

3.3 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

เทคโนโลยี InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาจากเทคโนโลยี SAR โดยนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี Interferometry คือ การเอาภาพถ่ายเรดาร์จาก SAR มาเปรียบเทียบกันเพื่อสร้าง Interferogram ซึ่งใช้หาความแตกต่างของภาพที่เกิดขึ้นอาศัยการถ่ายภาพในจุด ๆ เดิมสองรอบ แต่ละรอบอาจจะห่างกันตาม Revisiting day เป็นจุดที่ดาวเทียมจะโคจรกลับมาที่เดิม เมื่อนำภาพที่ถ่ายในบริเวณเดียวกันแต่เวลาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 มาเปรียบเทียบจะได้ Phase Differential ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกกรองเพื่อลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยที่สุด [22] ทำให้สามารถวัดระยะทาง ความสูง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวโลก นอกจากนี้เทคนิค InSAR ถูกนำมาใช้เนื่องจากวิเคราะห์และติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนได้ในระดับมิลลิเมตร และยังสามารถถ่ายภาพได้เป็นบริเวณกว้างในพื้นที่ยากต่อการเข้าถึง [23]



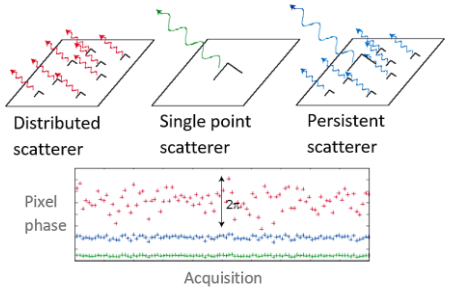
รูปที่ 3 ลักษณะเรขาคณิตของ InSAR ณ เวลาที่ต่างกัน [19]

สำหรับเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series InSAR) เป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลเฟสของภาพดาวเทียมเรดาร์ โดยอาศัยสัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเสาอากาศ เพื่อมาวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง เรียกว่า Permanent Scatterer (PS) ใช้วิธีการวัดอนุพันธ์ของการบิดเบือนเฟสแสง มีหลักการคือ สร้างจำนวนภาพ Differential Interferograms ของหลาย ๆ คู่ภาพ ซึ่งคู่ภาพที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะอ้างอิงจากภาพ Master ตัวเดียว (Single Master) แตกต่างจากแบบ Multiple Master ที่สามารถใช้ภาพใดก็ได้เป็นภาพ Master ในการจับคู่ภาพ [7][10] ทั้งนี้ เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของกรณีถ้าเวลาผ่านไปอาจมีวัตถุอย่างอื่นเข้ามาแทนที่ หรือวัตถุในจุดภาพนั้นเปลี่ยนไปหรืออาจจะหายไปได้ ส่งผลให้ค่าเวกเตอร์ผลรวมของค่าแอมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนไปมากและไม่สามารถนำมาประมวลผลได้ โดยข้อจำกัดนี้เรียกว่าการเสื่อมของสหสัมพันธ์ของเฟส (Temporal Decorrelation) ของข้อมูลในภาพ interferogram เช่น ลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่สะท้อนถึงค่าการเคลื่อนตัวบนพื้นผิวดินอย่างแท้จริง และอีกหนึ่งข้อจำกัดที่สำคัญคือ การคลาดเคลื่อนของสัญญาณอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งปัญหานี้จะทำให้ค่าเฟสที่ตรวจวัดได้ผิดเพี้ยนไป [24]

3.4 Persistent Scatterer Interferometric SAR (PSInSAR)

Persistent Scatterer InSAR เป็นเทคโนโลยีสำรวจข้อมูลระยะไกลขั้นสูงที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการวัดการเสียรูปของโครงสร้างและตรวจสอบการเคลื่อนที่ของพื้นผิวด้วยความแม่นยำระดับมิลลิเมตร ซึ่งใช้วิธีการซ้อนภาพ SAR แบบ Single Look Complex (SLC) ที่ถ่ายในบริเวณพื้นที่เดียวกัน แต่คนละช่วงเวลา [13] ทำให้สามารถตรวจสอบและหาปริมาณการเคลื่อนที่ของเปลือกโลกเมื่อเวลาผ่านไปและตรวจจับการเสียรูปของพื้นผิวซึ่งเป็นสัญญาณของธรณีพิบัติภัยในอนาคต เช่น แผ่นดินไหว หลุมยุบ และดินถล่ม เป็นต้น [25] เนื่องจากในภาพ SAR เป็นการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ซับซ้อน ส่งผลให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในพื้นที่ความละเอียดในการได้มาของทั้งสองครั้งมีการเชื่อมโยงกันลดลง หรือการมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุผลว่า InSAR แบบเดิมไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีในพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่นได้ ดังนั้น PSInSAR จึงเป็นเทคนิคขั้นสูงที่ตรงกันข้ามกับเทคนิค InSAR แบบทั่วไป เพื่อลดความเสี่ยงของการเสื่อมของสหสัมพันธ์ของเฟส (Decorrelation) และปัญหาในเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ [26]

หลักการของเทคนิค Persistent Scatterer InSAR คือ ตรวจหาการสะท้อนกลับโดย Single Scatter ตัวอย่างของวัตถุดังกล่าว ได้แก่ สะพาน อาคาร เขื่อน ท่อส่งน้ำ เสาอากาศ เป็นต้น เนื่องจากการสะท้อนแสงเกิดจากองค์ประกอบเพียงองค์ประกอบเดียว จึงมีความเป็นไปได้น้อยที่จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุที่อยู่รอบ ๆ (Temporal Decorrelation) และการเปลี่ยนแปลงมุมมองของเรดาร์ (Geometrical Decorrelation) ทั้งนี้ ลักษณะพิกเซล (Pixel) ของ Persistent scatterer ที่กระจายอย่างต่อเนื่องจะมีความแปรผันของเฟสน้อยกว่าพิกเซลของ Distributed scatterer ดังแสดงในรูปที่ 4 หากเป็นกรณีนี้ อินเตอร์เฟอโรแกรมทั้งหมดสามารถใช้เพื่อประเมินการเสียรูปและสามารถประมาณการเคลื่อนที่ของพื้นดิน ซึ่งขั้นตอนหลักของเทคนิค PSI สามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การก่อตัวของ Differential Interferograms 2) การเลือกเป้าหมายจุดที่เสถียร 3) Phase unwrapping 4) การสกัดพารามิเตอร์ที่สนใจและการกำจัดสัญญาณรบกวนในชั้นบรรยากาศ [13][27]



รูปที่ 4 แบบจำลองลักษณะการกระเจิง (a) Distributed scatterer (b) Single point scatterer (c) Persistent scatterer (d) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟสตามเวลา [28]

3.5 Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)

การประมวลผล PSI ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) ที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ทำงานได้แม้ในภูมิประเทศที่ปราศจากโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น หรือโครงสร้างที่อยู่ระหว่างการเสียรูปหรือไม่มั่นคง StaMPS เป็นซอฟต์แวร์ที่ให้บริการแบบไม่เสียค่าใช้จ่าย ทำงานโดยช่วยแยกการกระจัดของภาคพื้นดินจากเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ประกอบด้วย Persistent scatterer (PS) และ Small Baseline Methods (SBAS) [27] StaMPS ใช้ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของเฟสในการเลือกพิกเซล (Pixel) PS ทำให้สามารถระบุพิกเซล PS ได้มากกว่าอัลกอริทึมทั่วไปจะระบุได้ และยังสามารถทำการ Phase Unwrapping โดยไม่ต้องเรียกใช้ Phase History Model [29]

3.6 Sentinel Application Platform (SNAP)

โปรแกรม Sentinel Application Platform (SNAP) เป็นสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ที่รวบรวมกล่องเครื่องมือแบบไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับใช้ประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ของภารกิจการสำรวจภูมิประเทศ โปรแกรม SNAP ถูกพัฒนาโดยองค์การอวกาศยุโรป ใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลดาวเทียม ช่วยให้เข้าถึงข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลรวมถึงข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 โดยประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงาน เช่น ENVISAT BEAM, NEST และ Orfeo Toolbox สามารถเชื่อมต่อระบบการเขียนโปรแกรมสำหรับ Python และ Java ดังนั้น โปรแกรม SNAP จึงใช้สำหรับการแสดงภาพ การวิเคราะห์ภาพ และประมวลผลข้อมูล อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ ด้านการเกษตร ด้านป่าไม้ ด้านการใช้ที่ดิน และด้านภัยธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น [30]

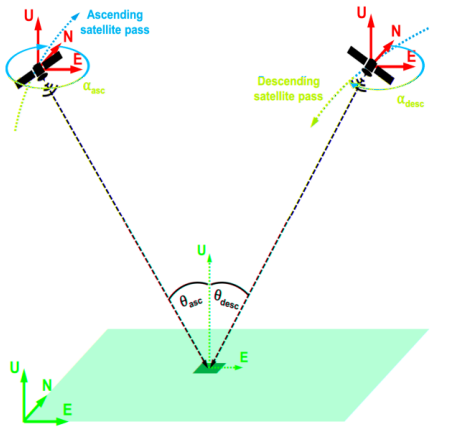
3.7 เรขาคณิตของดาวเทียม InSAR Line of Sight

เรขาคณิตของดาวเทียม InSAR Line of Sight (LOS) ถูกกำหนดโดยมุมตกกระทบ θ (มุมระหว่างมุมเซนิธกับเวกเตอร์การมองของดาวเทียม)

และทิศทางของดาวเทียม จากรูปที่ 5 การสังเกตการณ์ LOS จัดทำขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับส่วนหัวของดาวเทียม ทั้งนี้ความเร็ว LOS (V_{LOS}) ประกอบด้วย V_E, V_N, V_U ดังสมการ (1)

$$V_{LOS} = (-\sin\theta\cos\alpha \quad \sin\theta\sin\alpha \quad \cos\theta)\begin{pmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{pmatrix} \qquad (1)$$

เซนเซอร์ SAR ส่วนใหญ่มีค่า อยู่ที่ประมาณ -15° สำหรับดาวเทียมที่มีแนวการโคจรแบบขาขึ้น (Ascending) โดยมีทิศทางการบิน NNW และประมาณ -165° สำหรับดาวเทียมที่มีแนวการโคจรแบบขาลง (Descending) มีทิศทางการบิน SSW ซึ่งมุมตกกระทบจะแตกต่างกันไปเมื่อเซนเซอร์ SAR แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขอบเขตของภาพ (ระยะใกล้เทียบกับระยะไกล) และโหมดภาพ โดยดาวเทียม Sentinel-1 โหมด Swath Interferometric Wide มีความแปรผันระหว่างมุมตกกระทบระยะใกล้และระยะไกลอยู่ในช่วงตั้งแต่ 29° ถึง 46° ดังนั้น การวัด LOS นั้นจะแตกต่างกันไปตามมุมตกกระทบ นอกจากนี้ ความผันแปรของความเร็ว LOS ระหว่างระยะใกล้และระยะไกลจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเวกเตอร์ความเร็ว 3 มิติ [28]

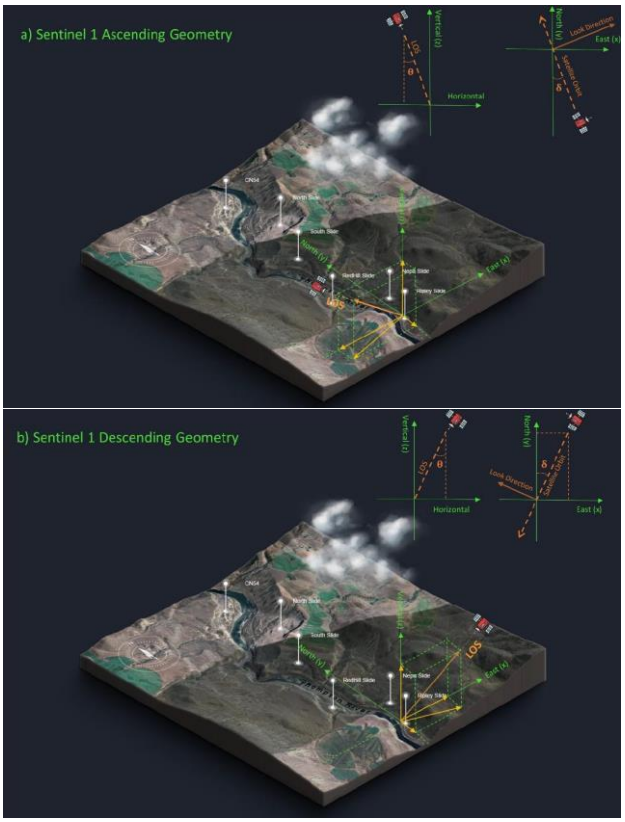


รูปที่ 5 มุมมองของ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) สำหรับการวัด Line of Sight (LOS) ในการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) [28]

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-1

ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาคือ ข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-1 ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) ระดับ Level-1 Single Look Complex (SLC) มีความยาวช่วงคลื่น C-band ทำงานแบบ Polarization VH กับ VV คือ การส่งระนาบคลื่นในแนวดิ่ง รับระนาบคลื่นในแนวนอน (VH) กับ การส่งระนาบคลื่นในแนวดิ่ง รับระนาบคลื่นในแนวดิ่ง (VV) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ศึกษาคือ อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา มีการทำงานแบบบันทึกในโหมด Interferometric Wide (IW) ซึ่ง Frame จะมีอยู่ 3 Sub-Swaths (IW1,IW2,IW3) ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลที่อยู่ในพื้นที่ศึกษาได้แก่ IW1 ทั้งในแนวการโคจรแบบขาขึ้นและแบบขาลง โดยทั่วไปมีมุมของวงโคจรดังแสดงในรูปที่ 6 มีความละเอียดของภาพในแนว Range และ Azimuth อยู่ที่ 5 x 20 เมตร ซึ่งชุดข้อมูลภาพที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ภาพ SAR ของแนวการโคจรแบบขาขึ้นและแบบขาลง จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ที่มีการบันทึกภาพในช่วงเวลา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 ถึงวันที่ 1 มกราคม 2566 เป็นระยะเวลา 7 ปี และใช้ระบบพิกัด (Coordinate System) WGS 1984 ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแต่ละภาพที่เลือกมี Path และ Frame เหมือนกันทุกภาพ คือ Path 99 Frame 1230 (ในการโคจรแบบขาขึ้น) และ Path 164 Frame 545 (ในการโคจรแบบขาลง) เนื่องจากต้องการให้ภาพแต่ละภาพซ้อนทับกันพอดีจึงจะสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไป



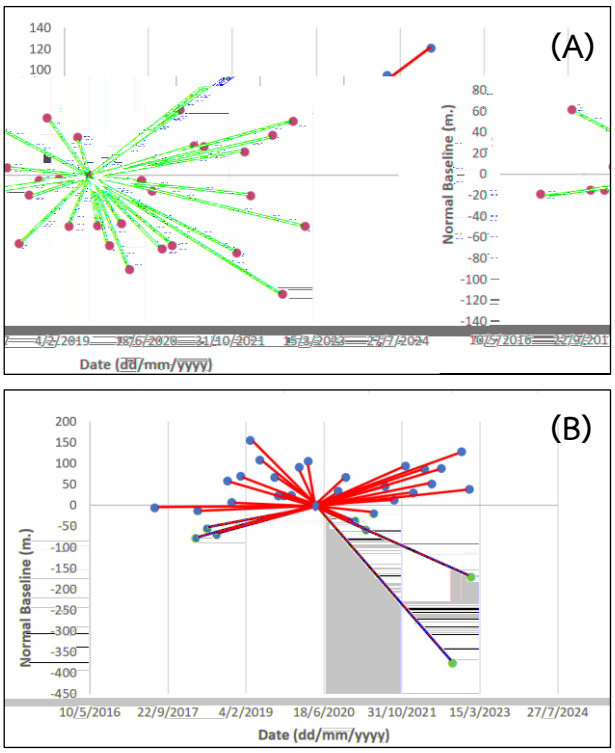
รูปที่ 6 เค้าโครงมุมทั่วไปสำหรับวงโคจรดาวเทียม (a) แบบขาขึ้น (Ascending) และ (b) แบบขาลง (Descending) บริเวณพื้นดินเหนือ Thompson Canyon, British Columbia [31]

ตารางที่ 2 รายละเอียดข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 ที่ใช้ในการประมวลผล

Radar Data Information		
Satellite	Sentinel-1	Sentinel-1
Acquisition Geometry	Ascending orbit	Descending orbit
Period Covered by Imagery	1 January 2017 to 1 January 2023	1 January 2017 to 1 January 2023
No. of Processed Images	34	34
Coordinate System	WGS 1984	WGS 1984
Sensor Mode	IW	IW

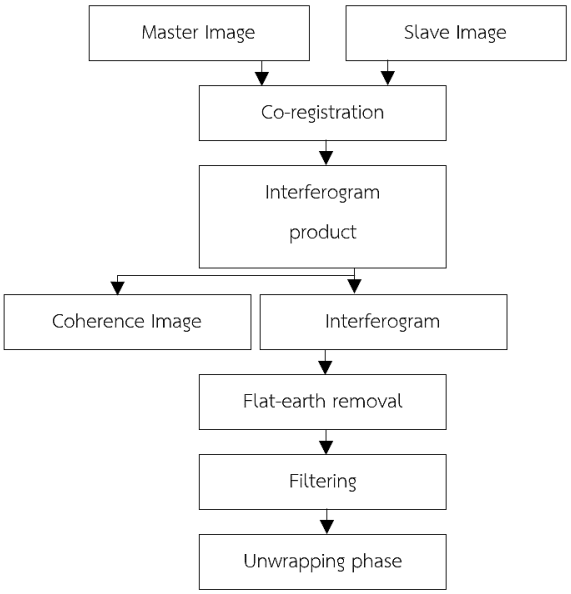
4.2 การประมวลผลข้อมูล

เรดาร์รูรับแสงสังเคราะห์อินเตอร์เฟอโรเมตริก (InSAR) จะอาศัยความแตกต่างของเฟสภาพทั้งสองภาพที่เรียกว่าภาพหลัก (Master) และภาพรอง (Slave) เป็นภาพจากดาวเทียมที่ได้มาจากบริเวณพื้นที่เดียวกัน ในแต่ละช่วงเวลาหรืออาจจะเป็นช่วงเวลาเดียวกันก็ได้ [22] เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่นั้น ทำให้สามารถวัดการเสียรูปหรือการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา ทั้งนี้ มีภาพจากวันที่ 18 กรกฎาคม 2562 เป็นภาพหลัก (Master) ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และมีวันที่ 28 เมษายน 2563 เป็นภาพหลัก (Master) ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending) และมีภาพที่เหลือเป็นภาพรอง (Slave) จากนั้นใช้อัลกอริทึม Co-registration เพื่อจัดเรียงภาพย่อยที่ถ่ายในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน มาเรียงต่อกันให้มีพิกัดจุดที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยแกนแนวนอน (แกน X) แสดงวันที่ และแกนแนวตั้ง (แกน Y) แสดงเส้นฐานปกติ (Normal Baseline)



รูปที่ 7 แผนภาพการกระจายของเวลาและพื้นที่ โดยวิธี PSI (a) ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) (b) ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending)

โดยการประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียมเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์แบบ Persistent Scatterer InSAR (PSI) มีหลักการทำงานคือ เมื่อดาวน์โหลดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 มาแล้วจะสร้าง Interferogram ด้วยซอฟต์แวร์ SNAP หลังจากนั้นประมวลผลด้วยวิธี Persistent Scatterer โดยการใช้ซอฟต์แวร์ StaMPS ในโปรแกรม MATLAB เพื่อประมวลผลหาจุดภาพที่เป็น PS pixel แล้วทำการ Phase Unwrapping เพื่อให้ได้ค่าเฟสที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 8 จากนั้นนำข้อมูลค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์มาแสดงผลในรูปแบบแผนที่โดยใช้โปรแกรม QGIS เพื่อแสดงผลลัพธ์ให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

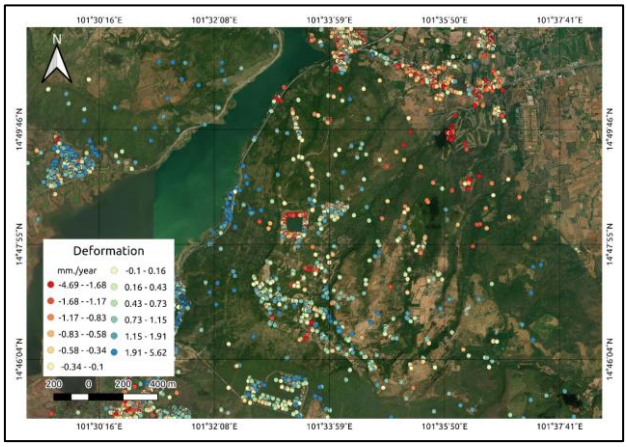


รูปที่ 8 กระบวนการ Interferometry

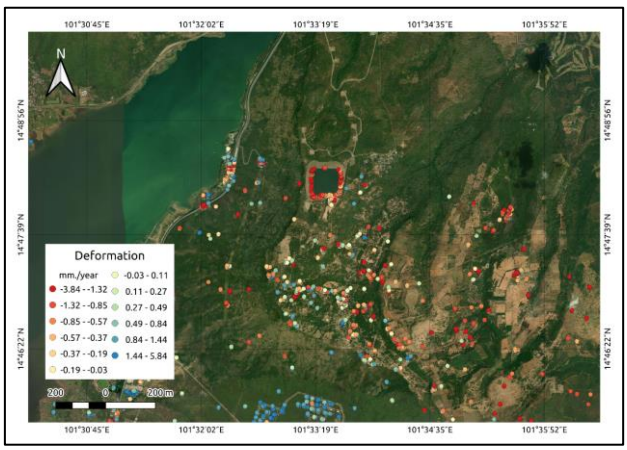
5. ผลการศึกษา

5.1 การตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัว

การใช้เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series InSAR) เพื่อตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2566 จากการวิเคราะห์ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) ตรวจพบจุดภาพที่เป็น PS pixel เป็นค่าการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำทั้งหมด 11,798 จุด ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ออกจากดาวเทียม (การทรุดตัว) อยู่ที่ประมาณ -4.69 มิลลิเมตรต่อปี และมีค่าการเคลื่อนที่เข้าหาดาวเทียม (การยกตัว) อยู่ที่ประมาณ +5.62 มิลลิเมตรต่อปี และการวิเคราะห์ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending) ตรวจพบจุดภาพที่เป็น PS pixel เป็นค่าการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำทั้งหมด 7,501 จุด ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ออกจากดาวเทียม อยู่ที่ประมาณ -3.84 มิลลิเมตรต่อปี และมีค่าการเคลื่อนที่เข้าหาดาวเทียม อยู่ที่ประมาณ +5.84 มิลลิเมตรต่อปี โดยค่าที่ติดลบเกิดจากการที่สัญญาณเรดาร์ที่ตกกระทบไปยังอ่างพักน้ำได้สะท้อนการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่มีการเคลื่อนที่ออกจากสัญญาณดาวเทียม ในขณะที่ค่าที่เป็นผลบวกเกิดจากการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเข้าหาสัญญาณดาวเทียม ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าบริเวณที่แสดงผลเป็นสีแดง (ค่าที่ติดลบ) อาจมีการทรุดตัวเกิดขึ้น

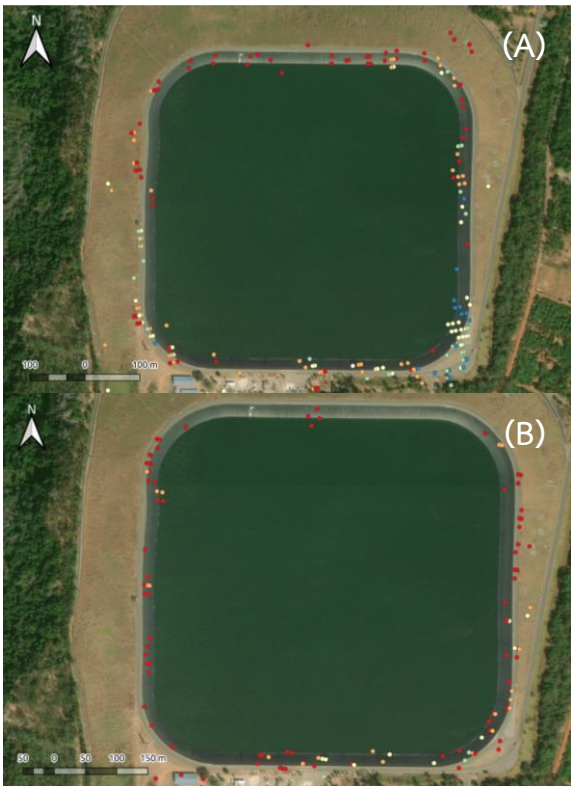


รูปที่ 9 อัตราการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา ในช่วงปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2566 โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending)



รูปที่ 10 อัตราการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา ในช่วงปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2566 โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending)

เมื่อพิจารณาบริเวณอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จะสังเกตได้ว่า ผลลัพธ์จากการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำ โดยการใช้ข้อมูลแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้นและแบบขาลง และประมวลผลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์นั้น แสดงอัตราการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน เช่น บริเวณที่แสดงผลเป็นจุดสีแดงเข้ม ซึ่งอาจเป็นบริเวณที่มีการทรุดตัวเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น พบค่าการทรุดตัวในบริเวณจุดสีแดงเข้มมีค่า -4.69 ถึง -1.68 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่ข้อมูลแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง พบค่าการทรุดตัว -3.84 ถึง -1.32 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 11 อย่างไรก็ตาม บริเวณที่แสดงผลเป็นจุดสีแดงเข้มจะเป็นบริเวณพื้นผิวรอบสันอ่างพักน้ำเป็นส่วนมาก ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจมีการทรุดตัวเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงเป็นบริเวณที่ควรให้ความสนใจและตรวจสอบเป็นพิเศษ



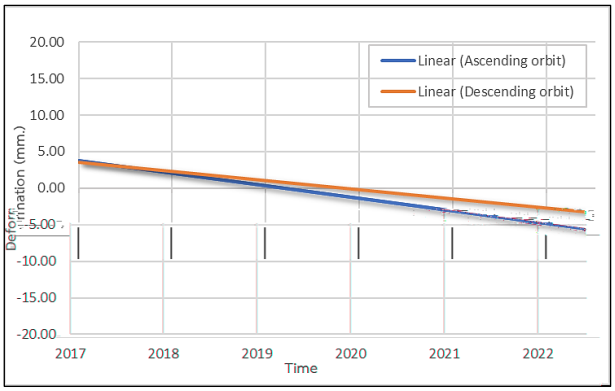
รูปที่ 11 ตัวอย่างบริเวณที่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นของสันอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา (a) โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) (b) โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending)

ทั้งนี้ ผลจากการวิเคราะห์ในการศึกษาเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น สามารถตรวจสอบบริเวณดังกล่าวเป็นพิเศษด้วยการลงพื้นที่สำรวจภาคสนาม หรือการติดตามและตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์มีความละเอียดถูกต้อง ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน 3 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับการสำรวจแบบอื่น ๆ และยังสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป เช่น การลงพื้นที่เพื่อตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวหรือการทรุดตัว และนำมาพัฒนาเพื่อการออกแบบระบบแจ้งเตือนสถานการณ์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างงานสำรวจแบบ Geodetic Engineering

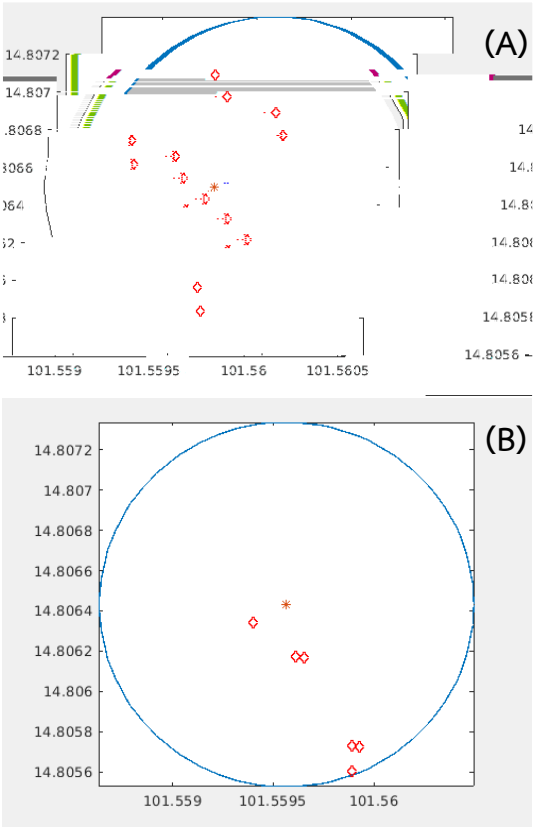
5.2 การตรวจสอบเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์แบบ Persistent Scatterer InSAR

จากการวิเคราะห์เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์แบบ Persistent Scatterer InSAR (PSI) โดยการใช้ StaMPS ในโปรแกรม MATLAB เพื่อประมวลผลจุดภาพที่เป็น PS pixel ผู้วิจัยได้เลือกพิกัดจุดตัวแทนของการทรุดตัวบริเวณสันอ่างพักน้ำ คือ บริเวณพิกัด ละติจูด 14.8065 ลองจิจูด 101.5595 จากรูปที่ 12 แสดงแนวโน้มการเคลื่อนตัวสะสมของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 ถึงวันที่ 1 มกราคม 2566 เป็นระยะเวลา 7 ปี ใน line of site dimension

(LOS) โดยแกนแนวนอน (แกน X) แสดงช่วงเวลาที่ได้มาของข้อมูล คือ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 ถึงวันที่ 1 มกราคม 2566 และแกนแนวตั้ง (แกน Y) แสดงค่าการเคลื่อนตัวในแต่ละปี โดยมีหน่วยระดับมิลลิเมตร และจุดที่อยู่ในรัศมีวงตรวจสอบ 100 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 13

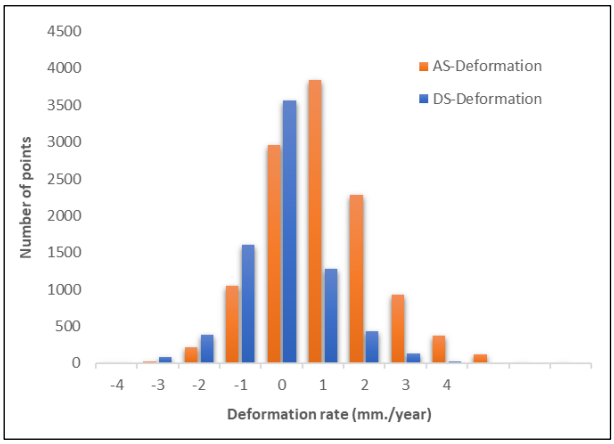


รูปที่ 12 แนวโน้มการเคลื่อนตัวสะสมระหว่างแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) ในช่วงปี พ.ศ. 2560 - 2566 บริเวณพิกัด Lat 14.8065 และ Long 101.5595



รูปที่ 13 จุดที่อยู่ในรัศมีวงตรวจสอบ 100 เมตร บริเวณพิกัด Lat 14.8065 และ Long 101.5595 (a) โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรแบบขาขึ้น (Ascending) (b) โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรแบบขาลง (Descending)

จากการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนตัวสะสมของพื้นที่ศึกษาในทิศทาง LOS และลักษณะการทรุดตัวเป็นบริเวณกว้างในรัศมีการตรวจสอบ 100 เมตร ที่ได้จากข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง (Descending) พิกัดจุดตัวแทน ละติจูด 14.8065 ลองจิจูด 101.5595 สังเกตได้ว่า การทรุดตัวมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีแนวโน้มการทรุดตัวมากขึ้น ในปี พ.ศ. 2566 ทั้งนี้ แนวโน้มการเคลื่อนตัวสะสมของพื้นที่ศึกษาที่ได้จากข้อมูลแนวโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้นและแบบขาลงมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะการกระเจิงในภาพ SAR ที่แสงตกกระทบและกระจายออกตามประเภทวัสดุที่ใช้กับเขื่อน จากทฤษฎีคอนกรีตเปลือกบาง (concrete shell) พื้นผิวถนนด้านบน (top road) ขั้นบันไดที่ฉาบปูน (plastered steps) และคูระบายน้ำ (drainage ditch) ล้วนมีพื้นผิวเรียบทำให้แสงเกิดการสะท้อนเป็นเงา ในขณะที่พื้นผิวที่ขรุขระ เช่น เนินหินและเนินหญ้าจะสะท้อนแบบกระจายเมื่อหันไปทางเรดาร์ซึ่งก็คือในระยะใกล้ และผนังด้านบนของเขื่อนอาจทำให้เกิดการกระเจิงของ dihedral ตามมุมมองของเรดาร์ [32]



รูปที่ 14 ฮิสโตแกรมสำหรับอัตราการเคลื่อนตัวของพื้นที่ศึกษา โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในแนวการโคจรแบบขาขึ้น (สีส้ม) และแบบขาลง (สีฟ้า)

แม้ว่าฮิสโตแกรม (Histogram) ของพื้นที่ศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในแนวการโคจรแบบขาขึ้น (Ascending) และแนวการโคจรแบบขาลง (Descending) จากรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งแบบขาขึ้นและแบบขาลง เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างนั้น มีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ทั้งสองควรมีความเชื่อมโยงที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง (Verification of Accuracy) นอกจากนี้ การพิจารณาความสอดคล้องระหว่างผลลัพธ์ที่ตรวจสอบกับการเสียรูปที่เกิดขึ้น ควรมีการเก็บข้อมูลจากภาคสนามจริง [33]

6. บทสรุป

การติดตามการเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series InSAR) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและประเมินสภาพโครงสร้าง เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์มีความละเอียดถูกต้อง สามารถติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของ

รอยเลื่อนได้ในระดับมิลลิเมตรเมื่อเทียบกับการสำรวจแบบอื่น ๆ และยังสามารถถ่ายภาพได้เป็นบริเวณกว้างในพื้นที่ยากต่อการเข้าถึง ทั้งนี้ การเคลื่อนตัวหรือการทรุดตัวของโครงสร้างอ่างพักน้ำสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย แต่โดยส่วนมากนั้นมักจะเกิดจากการกัดเซาะหรือการรั่วซึม (Seepage) ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานจึงเกิดการพิบัติของโครงสร้าง เพราะฉะนั้นจึงควรมีการตรวจสอบและติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างในระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อป้องกันการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ได้นำข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-1A ในระดับ Level-1 Single Look Complex (SLC) โดยใช้ภาพ SAR ที่มีการบันทึกภาพในช่วงเวลา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 ถึงวันที่ 1 มกราคม 2566 จำนวนอย่างละ 34 ภาพ ทั้งในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น (Ascending) และแบบขาลง (Descending) โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์ในหลากหลายรูปแบบ และจากการวิเคราะห์พบค่าการเคลื่อนตัวอยู่ที่ประมาณ -04.69 ถึง +05.62 มิลลิเมตรต่อปี ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้น และประมาณ -03.84 ถึง +05.84 มิลลิเมตรต่อปี ในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาลง จากผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของอ่างพักน้ำแสดงให้เห็นว่า ค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ทิศทางการโคจรของดาวเทียม ส่งผลให้มุมตกกระทบและสะท้อนกลับของสัญญาณในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้นและแบบขาลงแตกต่างกัน หรือลักษณะการกระเจิงในภาพ SAR เนื่องจากแสงที่ตกกระทบและกระจายออกตามประเภทวัสดุที่ใช้กับเขื่อน เป็นต้น การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลในแนวการโคจรของดาวเทียมแบบขาขึ้นหรือแบบขาลงอย่างเดียว อาจได้ผลลัพธ์ของจุด PS Pixel ซึ่งแสดงบริเวณที่มีการทรุดตัวไม่เพียงพอ จึงสามารถเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวโดยการใช้ข้อมูลในแนวการโคจรแบบขาขึ้นและแบบขาลงร่วมกัน ทั้งนี้ ผลจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการลงพื้นที่ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง หรือสามารถติดตามและตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน ซึ่งการสำรวจเสถียรภาพของพื้นดินและความปลอดภัยในการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐานเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเหล่านี้ ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีดาวเทียมเรดาร์อินเตอร์เฟอโรเมตรี (InSAR) จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของการเฝ้าระวังและการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอาจลดลงหลายล้านบาทต่อปีในระยะยาว ลดระยะเวลาในการสำรวจ ในขณะเดียวกันก็ช่วยให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดได้มากขึ้นและบ่อยครั้งขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีสภาพความปลอดภัยที่ดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นโปรแกรมระบบแจ้งเตือนและรายงานการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานและวิเคราะห์ย้อนประวัติ (Monitoring and Historical Back Analysis) ได้ต่อไป

6.1 ข้อเสนอแนะ

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ควรมีประสิทธิภาพสูง เพื่อความเสถียรในการทำงานและทำให้สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามีขนาดใหญ่และต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมากเพื่อผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ European Space Agency (ESA) สำหรับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จากโครงการ Copernicus ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมกราคม 2566 เผยแพร่โดย ASF DAAC และซอฟต์แวร์ Sentinels Application Platform (SNAP), ขอขอบคุณ Prof.Andy Hooper จาก Leed University สำหรับซอฟต์แวร์ Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) ที่ใช้ในการประมวลผลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series InSAR)

เอกสารอ้างอิง

[1] Soralump, S., Shrestha, A., Jotisankasa, A., Thongthamchart, C., & Isaroran, R. (2021). Use of geosynthetic clay liner as a remedial measure of claystone degradation in Lam Ta Khong hydropower plant. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), pp.1211-1228.

[2] Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), pp.1221-1250.

[3] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน (2558). คู่มือการบำรุงรักษาเขื่อนดินและอาคารประกอบ.

[4] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน (2558). คู่มือการตรวจสภาพเขื่อนดิน (Earthfill Dam Inspection Manual).

[5] สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ระบบติดตามตรวจวัดความปลอดภัยเขื่อนจากระยะไกล. สืบค้นข้อมูลจาก : URL: https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=28294

[6] Sousa, J., Hlaváčová, I., Bakon, I., Lazecký, M., Patrício, G., Guimarãese, P., Ruiz, A., Bastosi, L., Sousa, A. (2014). Potential of multi-temporal InSAR for bridges and dams monitoring. *Paper presented at the ScienceDirect Elsevier Procedia Technology*, pp.834-841.

[7] ปัทมา พอดี, อิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์, อนุเผ่า อบแพทย์ (2557). การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหว Tarlay ขนาด Mw 6.8 ปี 2011 ด้วยเทคนิค Time-Series InSAR. *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1.

[8] Wu, H., Zheng, X., Fan, H., & Tian, Z. (2022). *Deformation Monitoring of Tailings Reservoir Based on Polarimetric Time Series InSAR: Example of Kafang Tailings Reservoir, China*. Remote Sensing, 14(15), pp.3655.

[9] Giardina, G., Milillo, P., DeJong, M. J., Perissin, D., & Milillo, G. (2019). Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(2), e2285.

[10] สรศักดิ์ ชัยทวี (2557). *การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยเทคนิค Time-Series InSAR.* วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมสำรวจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[11] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา จ.นครราชสีมา*. สืบค้นข้อมูลจาก : URL: https://www.egat.co.th/home/lamtakong-pp/

[12] สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน (2557). จุลสารสำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา เคล็ด (ไม่) ลับงานมวลชนสัมพันธ์ในการบริหารจัดการน้ำ

[13] Aobpaet, A., Cuenca, M. C., & Trisirisatayawong, I. (2009). PS-InSAR Measurement of Land Subsidence in Bangkok Metropolitan Area. *Paper presented at the Proceedings of the 30th Asian Conference on Remote Sensing*, Beijing, China.

[14] ชิตยาภรณ์ สีทาสี, ดร.อนุเผ่า อบแพทย์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์. *ศักยภาพของดาวเทียม Sentinel-1 สำหรับการติดตามการเจริญเติบโตของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย*, วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน-ธันวาคม 2020, หน้า 33 – 57.

[15] European Space Agency. Sentinel-1 DATA ACCESS AND PRODUCTS. Available from: https://sentinel.esa.int/documents/247904/1653440/Sentinel-1_Data_Access_and_Products

[16] Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., & Talgre, L. (2016). Relating Sentinel-1 interferometric coherence to mowing events on grasslands. *Remote Sensing*, 8(10), pp.802.

[17] Acquisition Modes - Sentinel-1 SAR Technical Guide. Available from: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes (accessed on 1 March 2023).

[18] รศ.ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์. การประยุกต์ใช้ข้อมูลเรดาร์กับการติดตามความปลอดภัยของโครงสร้างพื้นฐานสาธารณะ. สืบค้นข้อมูลจาก : URL: http://project-wre.eng.chula.ac.th/watercu_th/sites/default/files/RS_Training/03-RadarApplicationInfra.pdf

[19] อรรถวุฒิ นารถกุลพัฒน์, ปัทมา พอดี, สุพรรณ กาญจนสุธรรม, แก้วนวลฉวี และ ปรีสาร รักวาทิน. (2560). การใช้เทคนิค Differential InSAR ในการศึกษาการเคลื่อนตัวของแผ่นดินขณะเกิดแผ่นดินไหวเชียงราย ขนาด Mw 6.3 ในประเทศไทย. Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization).

[20] พันตรี นราเทพ พฤกษหิรัญ และพันตรีหญิง รุ่งรัศมี สุวรรณวัฒนา. (2556). เอกสารการจัดการความรู้ในหัวข้อ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีเรดาร์ SAR (กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า).

[21] กิติศักดิ์ พรมโสภา. (2563). *การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 พื้นที่ศึกษาอำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย*, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[22] Chelbi, S., Khireddine, A., & Charles, J. (2011). Interferometry process for satellite images SAR. *Paper presented at the 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*.

[23] ปัทมา พอดี, อนุเผ่า อบแพทย์, ประสิทธิ์ มากสิน และ อรรถวุฒิ นารถกุลพัฒน์. (2561). *การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนแม่จันจังหวัดเชียงราย ด้วยเทคนิค TIME-SERIES INSAR*, มหาวิทยาลัยบูรพา.

[24] ชยณัฐ คีรีนารถ, อังคณา พุ่มพวง, อนิรุทธ์ ลดาวดี, สรวิศ สุภเวชย์ และ อนุเผ่า อบแพทย์. (2563). การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดินของกรุงเทพมหานครด้วยข้อมูล InSAR, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*.

[25] Ansar, A. M. H., Din, A. H. M., Latip, A., & Reba, M. N. M. (2022). a Short Review on Persistent Scatterer Interferometry Techniques for Surface Deformation Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, pp.23-31.

[26] ปวัน ภิรมย์ทอง, อิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์, และ อนุเผ่า อบแพทย์. (2558). *การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[27] Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007. 112(B7): pp.B07407.

[28] Fuhrmann, T., & Garthwaite, M. C. (2019). Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion. *Remote Sensing*, 11(3), pp.241.

[29] Fukushima, Y. (2011). Persistent scatterer interferometry by using StaMPS package. *journal of the geodetic society of japan*, 57(2), pp.41-48.

[30] The European Space Agency. Sentinel Application Platform toolbox. Available from: https://www.eoportal.org/other-

space-activities/snap-sentinel-application-platform#snap-sentinel-application-platform-toolbox (accessed on 13 March 2023).

[31] Soltanieh, A., & Macciotta, R. (2022). *Updated understanding of the Ripley landslide kinematics using satellite InSAR*. Geosciences, 12(8), pp.298.

[32] Li, T., Motagh, M., Wang, M., Zhang, W., Gong, C., Xiong, X., Liu, J. (2019). Earth and rock-filled dam monitoring by high-resolution X-band interferometry: Gongming dam case study. *Remote Sensing*, 11(3), pp.246.

[33] Hu, B., & Li, Z. (2021). Time-Series InSAR Technology for Ascending and Descending Orbital Images to Monitor Surface Deformation of the Metro Network in Chengdu. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, pp.12583-12597.