

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การติดตามการหลุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy

ณัฐริณีย์ เอี้ยวรัตนวดี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>

 Part of the [Engineering Commons](#)

Recommended Citation

เอี้ยวรัตนวดี, ณัฐริณีย์, "การติดตามการหลุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6585.

<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6585>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยเทคนิค
อินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MONITORING LAND SUBSIDENCE IN BANGKOK DURING 2018 - 2022 USING TIME-SERIES
INSAR ANALYSIS WITH MINTPY SOFTWARE



Miss Nattharinee Aieorattanawadee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรม

เวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy

โดย

น.ส.ณัฏฐริณีย์ เอี้ยวรัตนวดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ปวัน ภิรมย์ทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ปวัน ภิรมย์ทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุเฒ่า อบแพทย์)

ณัฐริณีย์ เอี้ยวรัตนวดี : การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ช่วงปี
ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy. (
MONITORING LAND SUBSIDENCE IN BANGKOK DURING 2018 - 2022 USING TIME-
SERIES INSAR ANALYSIS WITH MINTPY SOFTWARE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ปวัน
ภิรมย์ทอง

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดและติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยการประมวลผลเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ MintPy โดยใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ซึ่งเป็นข้อมูลในวงโคจรขาขึ้น ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022 และชุดข้อมูลในวงโคจรขาลง ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ผลการวิจัยตรวจพบค่าอัตราการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วงน้อยกว่า -30 ถึงมากกว่า 10 มม./ปี โดยในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีค่าอัตราการทรุดตัวค่อนข้างคงที่ ส่วนปริมณฑลตรวจพบในบางพื้นที่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวสูงในช่วง 35 ถึง 40 มม./ปี เช่น บริเวณอำเภอบ้านแพ้วและอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร อำเภอบางพลีและอำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นต้น

ในงานวิจัยได้มีการคัดเลือกพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูงและหาระดับความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ทั้งสองชุดด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 – 0.9 หมายถึงข้อมูลมีความสอดคล้องกันอย่างมากมีนัยยะสำคัญและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้สามารถสนับสนุนได้ว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นจริงและควรมีการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินต่อไป นอกเหนือจากนี้ผลลัพธ์การทดสอบทางสถิติ t-test ร่วมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องทั้งหมด 7 สถานี พบสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินสอดคล้องกัน ในชุดวงโคจรขาขึ้น 4 สถานี ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง 2 สถานี และตรวจพบสถานีที่ข้อมูลไม่สอดคล้องกันแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ ข้อมูลจากภาคสนามเร็วกว่าข้อมูลอินซาร์และข้อมูลจากภาคสนามช้ากว่าข้อมูลอินซาร์ อาจมีสาเหตุมาจากข้อมูลอินซาร์มีการบันทึกบนชั้นดินในขณะที่ข้อมูลภาคสนามมีการเก็บบนอาคารที่มีการวางโครงสร้างแข็งแรง ข้อมูลภาคสนามมีน้อยเกินไปรวมไปถึงข้อมูลอินซาร์มีการเฉลี่ยจุดผลลัพธ์การทรุดตัวบริเวณรอบมาด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470318721 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD: InSAR, Time-series InSAR, Monitoring land subsidence, MintPy software

Nattharinee Aieorattanawadee : MONITORING LAND SUBSIDENCE IN BANGKOK DURING
2018 - 2022 USING TIME-SERIES INSAR ANALYSIS WITH MINTPY SOFTWARE. Advisor:
PAWAN PIROMTHONG, Doctor of philosophy

This research applies time-series InSAR analysis using the Small Baseline technique to detect ground motion in Bangkok metropolis and vicinity. Two stacks of Sentinel-1 SAR images, which were acquired in ascending orbit during 2017 – 2022 and descending orbit during 2018 – 2022, are independently processed using MintPy software. The observed displacements are in the range less than -30 to 10 mm/yr. In the Bangkok area, the subsidence rates are relatively stable. On the other hand, some areas in the vicinity have been found with high subsidence trends in which the maximum rates are 35–40 mm/yr, such as Ban Phaeo, Mueang districts in Samut Sakhon province and Bang Phli, Bang Sao Thong districts in Samut Prakan province.

In this research, six areas with high subsidence were selected and discussed. The correlation of displacements from the two datasets in these selected areas are in the range 0.6 – 0.9. This shows that the subsidence rates are reliable and land subsidence could be monitored continuously by InSAR technique. This research also compares the results with data from 7 CORS stations using the t-test analysis. The number of stations that land subsidence rates consistent with the InSAR results are 4 stations and 2 stations compared to ascending and descending data, respectively. Stations which are inconsistent were found to subside with both higher and lower rates than detected in the InSAR results. This disagreement might be a result of the fact that InSAR data displays ground surface movements while CORS data, collected on buildings, induce the structural movements, CORS data is temporally lacked, and the compared InSAR displacements are average of subsidence rates of the surrounding areas.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปวัน ภิรมย์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ซึ่งประสิทธิ์ประสาทวิชาทั้งทางด้านวิชาการและด้านปฏิบัติแก่ข้าพเจ้า ผู้ให้ความช่วยเหลือ ควบคุมคุณภาพ คอยชี้แนะแนวทางการเขียนวิทยานิพนธ์และสนับสนุนให้เกิดการศึกษาวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขึ้นมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุเผ่า ออบแพทย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับคำแนะนำเพื่อเติมเต็มให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ชัยยุทธ เจริญผล ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station)

ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องจากภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้กำลังใจและมอบมิตรภาพอันดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณนาย ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency, ESA) สำหรับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 – 2022 และขอขอบพระคุณ Zhang Yunjun ที่ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ MintPy ขึ้นมาสำหรับการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา เทคนิค Small Baseline

และท้ายที่สุดข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ซึ่งสั่งสอนและเสียสละส่งมอบโอกาสทางการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้า คุณพ่อไอรุณ คุณแม่ธนาภรณ์ พี่ชาย คุณยายและครอบครัวเอื้อยรัตนวดีทุกท่านที่คอยเป็นแรงกำลังใจให้กับข้าพเจ้าในวันที่พบกับอุปสรรค ความท้อแท้และความเหนื่อยล้าเสมอมา

ณัฐริณีย์ เอื้อยรัตนวดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	3
1.3.2 ช่วงเวลาของข้อมูล	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1.1 การสูบน้ำบาดาล	7
2.1.2 เทคนิคอินซาร์ (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR).....	7
2.1.3 การประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR, TS-InSAR)	11
2.1.4 เทคนิค Persistent Scatter (PS).....	12
2.1.5 เทคนิค Small Baseline (SB).....	13
2.1.6 ระบบภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1	14

2.1.7 The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) Software	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3	22
3.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.3 การประมวลผลข้อมูล.....	24
3.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล	25
3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล	30
3.3.3 ขั้นตอนประเมินผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้.....	34
3.4.1 ศึกษาผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล.....	35
3.4.2 คัดเลือกตัวอย่างพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง.....	35
3.4.3 ประเมินประสิทธิภาพพร้อมกับข้อมูลสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station).....	36
บทที่ 4	38
4.1 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	38
4.2 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง.....	46
4.2.1 สนามบินสุวรรณภูมิ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ.....	47
4.2.2 สนามบินดอนเมือง เขตดอนเมือง.....	50
4.2.3 ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า เขตสะพานสูง	52
4.2.4 ถนนกัลปพฤกษ์ เขตจอมทองและเขตบางแค	54
4.2.5 ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4 เขตตลิ่งชันและเขตทวีวัฒนา	56
4.2.6 ย่านศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 เขตบางขุนเทียน	59
4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพพร้อมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง	63

4.3.1 สถานี DPT9	64
4.3.2 สถานี SBKK	66
4.3.3 สถานี BPLE	69
4.3.4 สถานี PKKT	71
4.3.5 สถานี KTBN	74
4.3.6 สถานี NKPT	77
4.3.7 สถานี CCSO	79
บทที่ 5	84
5.1 อภิปรายผลการศึกษา	84
5.1.1 อภิปรายผลการศึกษาร่วมกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา	84
5.1.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วย เทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาร่วมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง ..	85
5.2 สรุปผลการศึกษา	85
5.3 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก ขั้นตอนก่อนการประมวลผล อธิบายการส่งประมวลผลภาพ Interferogram และดาวน์โหลดข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy โดย ละเอียด.....	93
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy โดยละเอียด	101
ประวัติผู้เขียน	130

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลชุดภาพที่ใช้ในงานวิจัย	5
ตารางที่ 2 ความถี่และความยาวคลื่น	8
ตารางที่ 3 ลักษณะของเทคนิค Persistent Scatter และ เทคนิค Small Baseline.....	12
ตารางที่ 4 รูปแบบการบันทึกข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1	15
ตารางที่ 5 รายละเอียดข้อมูลของสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station).....	37
ตารางที่ 6 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (r) บริเวณพื้นที่ที่มี แนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง	62
ตารางที่ 7 ผลลัพธ์การตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินทางสถิติ t-test ระหว่างข้อมูลในชุด วงในวงโคจรขาขึ้นและสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง	83
ตารางที่ 8 ผลลัพธ์การตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินทางสถิติ t-test ระหว่างข้อมูลในชุด วงในวงโคจรขาลงและสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง	83

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษากำหนดโดยเฟรมภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 กรอบสี่เหลี่ยมหมายถึง ภาพในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล และกรอบสี่เหลี่ยมหมายถึง ภาพในวงโคจรขาลง (Descending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	4
รูปที่ 2 แสดงระบบบันทึกภาพเรดาร์ในลักษณะ Side-Looking system (SLR).....	9
รูปที่ 3 ลักษณะของจุดภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) จุดภาพทั่วไปมีลักษณะกระจัดกระจาย (b) ภาพที่มีจุด Persistent Scatter มีความเสถียรสูง	13
รูปที่ 4 ลักษณะการจับคู่ภาพ (a) เทคนิค Persistent Scatter (b) เทคนิค Small Baseline.....	14
รูปที่ 5 การทำงานของซอฟต์แวร์ MintPy (Yunjun et al., 2019).....	22
รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพ Interferogram ที่ใช้ในการประมวลผล ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ศึกษา	23
รูปที่ 7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
รูปที่ 8 ผลลัพธ์การค้นหา จากหน้าเว็บ ASF (https://search.asf.alaska.edu)	25
รูปที่ 9 หน้าจอการส่งงานประมวลผลคู่ภาพ Interferogram	26
รูปที่ 10 หน้าจอการตามสถานะของการประมวลผลคู่ภาพ Interferogram.....	27
รูปที่ 11 ผลลัพธ์ BaselineHistogr.png	27
รูปที่ 12 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf	28
รูปที่ 13 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.png.....	28
รูปที่ 14 ผลลัพธ์ BaselineHistogr.png	29
รูปที่ 15 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf	29
รูปที่ 16 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf	29
รูปที่ 17 หน้าจอการประมวลผลใน Terminal เมื่อเสร็จสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล....	32
รูปที่ 18 โฟลเดอร์ mintpy เก็บไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล	33
รูปที่ 19 โฟลเดอร์ pic เก็บรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล	33

รูปที่ 20 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงค่าพิกัด เปิดตัวโปรแกรม QGIS.....	34
รูปที่ 21 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระยะเวลา ค.ศ. 2017 – 2022 โดยเฉดสีแดง หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูง ไส้ระดับไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวน้อย.....	39
รูปที่ 22 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระยะเวลา ค.ศ. 2018 – 2022 โดยเฉดสีแดง หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูง ไส้ระดับไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวน้อย.....	40
รูปที่ 23 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน (มม./ปี)	41
รูปที่ 24 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน (มม./ปี)	41
รูปที่ 25 ตัวอย่างตารางข้อมูลเชิงบรรยายของจุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ชุดข้อมูลวง โคจรขาขึ้น ได้แก่ ค่าความสูง, ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน, ค่าระดับคุณภาพและค่าการเคลื่อน ตัวของแผ่นดิน.....	42
รูปที่ 26 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสมุทรสาคร ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022.....	43
รูปที่ 27 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022.....	44
รูปที่ 28 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022	44
รูปที่ 29 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดนครปฐม ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022.....	45
รูปที่ 30 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดนครปฐม ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022	45
รูปที่ 31 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยกรอบสีแดง หมายถึง พื้นที่คัดเลือกเพื่อศึกษาแนวโน้มการทรุดตัวในงานวิจัย.....	46

รูปที่ 32 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิ (a) ชุดข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (b) ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน	47
รูปที่ 33 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และ กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณอาคารผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ	48
รูปที่ 34 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณรันเวย์เครื่องบิน สนามบินสุวรรณภูมิ	48
รูปที่ 35 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการเคลื่อนตัวสูงสุดภายในสนามบินสุวรรณภูมิ	49
รูปที่ 36 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่สนามบินดอนเมือง (a) ชุดข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (b) ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน	50
รูปที่ 37 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณกรมกำลังพลทหารอากาศภายในสนามบินดอนเมือง	51
รูปที่ 38 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณรันเวย์เครื่องบิน สนามบินดอนเมือง	51
รูปที่ 39 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนศรีนครินทร์-ร่วมเกล้า ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน	52

เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการทรุดตัวสูง ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4	58
รูปที่ 50 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกยกระดับ ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4.....	58
รูปที่ 51 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน	59
รูปที่ 52 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน	60
รูปที่ 53 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณย่านศูนย์การค้าติดกับถนนพระราม 2.....	60
รูปที่ 54 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกยกระดับบางขุนเทียน ถนนพระราม 2.....	61
รูปที่ 55 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง จุดสามเหลี่ยมสีแดง หมายถึง ตำแหน่งสถานีอ้างอิงค่าพิภคแบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย	63
รูปที่ 56 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตปทุมธานี	64
รูปที่ 57 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตปทุมธานี	65
รูปที่ 58 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.)..	65
รูปที่ 59 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี DPT9 กรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตปทุมธานี	66

รูปที่ 60 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง	67
รูปที่ 61 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง	67
รูปที่ 62 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	68
รูปที่ 63 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี SBKK บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง	68
รูปที่ 64 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี	69
รูปที่ 65 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี	70
รูปที่ 66 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	70
รูปที่ 67 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี BPLE บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี	71
รูปที่ 68 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด	72
รูปที่ 69 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด	72
รูปที่ 70 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	73
รูปที่ 71 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี PKKT บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด .	73
รูปที่ 72 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน	74
รูปที่ 73 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน	75

รูปที่ 74 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	75
รูปที่ 75 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี KTBN บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน	76
รูปที่ 76 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี KTBN บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2023 จาก Google Maps).....	76
รูปที่ 77 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม.....	77
รูปที่ 78 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม.....	78
รูปที่ 79 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	78
รูปที่ 80 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี NKPT บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม	79
รูปที่ 81 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดฉะเชิงเทรา.....	80
รูปที่ 82 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดฉะเชิงเทรา.....	80
รูปที่ 83 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)..	81
รูปที่ 84 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี CCSO บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัด ฉะเชิงเทรา	81
รูปที่ 85 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี CCSO บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัด ฉะเชิงเทรา (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2023 จาก Google Maps).....	82

บทที่ 1

ที่มาและความสำคัญ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทรุดตัวของแผ่นดินมีสาเหตุมาจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เมื่อการทรุดตัวของแผ่นดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทวีความรุนแรงมากขึ้น อาจนำไปสู่ภัยพิบัติทางธรรมชาติอันก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน สิ่งปลูกสร้าง ที่อยู่อาศัยและประชากรได้ ไม่ว่าจะเป็นทางตรงที่การทรุดตัวทำให้มีความเสียหายทางโครงสร้างหรือทางอ้อมที่จะทำให้ประสบปัญหาในการบริหารจัดการน้ำในบางพื้นที่ โดยสาเหตุหลักที่ยังส่งผลต่อการทรุดตัวของแผ่นดินในบางพื้นที่คือ การใช้น้ำบาดาล (Aroonsrimorakot, 2020) ถึงแม้ว่าจะมีการออกกฎหมายควบคุมการใช้น้ำบาดาลแต่ก็ยังคงมีการใช้น้ำบาดาลเพื่ออุปโภคและบริโภคอยู่ อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการทรุดตัวคือ การขยายตัวของเขตเมือง การพัฒนาทางเศรษฐกิจ (สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, 2015) จากกิจกรรมการใช้ประโยชน์ของที่ดินที่ผ่านมาทำให้ในบางพื้นที่ที่อัตราการทรุดตัวที่ชะลอลงหรือยังมีการทรุดตัวแบบคงที่และรวมไปถึงการเติบโตของพื้นที่เมืองที่อาจส่งผลให้มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินเพิ่มขึ้นในอนาคต

ในปัจจุบันมีการตรวจสอบและติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินได้หลายวิธี วิธีแบบดั้งเดิมคือการเดินระดับ (Levelling) และวิธีที่ใช้กันมากขึ้นในปัจจุบันคือการใช้ค่าความสูงที่ได้จากระบบกำหนดตำแหน่งโลกด้วยระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) มีการตั้งตำแหน่งสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations, CORS station) ที่ให้ค่าความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ, 2020) ซึ่งถึงแม้ว่าการรังวัดทั้งสองจะให้ค่าความถูกต้องที่สูงแต่เนื่องจากข้อจำกัดของการทำให้สามารถตรวจวัดค่าความสูงได้ตำแหน่งเป็นจุด ทำให้การทำงานสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก รวมไปถึงมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการดำเนินงานสูง เทคนิคต่อมาคือการใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมซาร์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) ที่อาศัยหลักการเรดาร์ส่งคลื่นไมโครเวฟกระทบกับพื้นผิวโลกและรังวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังดาวเทียม ด้วยระบบดาวเทียมเรดาร์สามารถปฏิบัติงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน ได้ภาพถ่ายดาวเทียมไม่ขึ้นกับสภาวะอากาศ ซึ่งในปัจจุบันดาวเทียมมีการโคจรมาบันทึกภาพบริเวณพื้นที่เดียวกันอย่างเป็นระบบ เทคนิคนี้จะนำภาพพื้นที่เดียวกันแต่คนละช่วงเวลาามาเปรียบเทียบหาความแตกต่างกันของสัญญาณที่ตรวจจับได้และประมวลผลเพื่อหาการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน เรียกเทคนิคนี้ว่า Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) โดยเทคนิคนี้ถ้าหากมีการประมวลผลเป็นอนุกรมเวลา (Time-series analysis) สามารถให้ค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในระดับมม./

ปี มากไปกว่านั้นในทุก ๆ จุดภาพหมายถึงหนึ่งการรังวัด ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ปัจจุบันภาพถ่ายดาวเทียมสามารถเข้าถึงได้ง่ายและให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ข้อมูลได้ตามความต้องการ ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากการประมวลผลด้วยเทคโนโลยีนี้สำหรับการติดตามการเคลื่อนตัวในงานหลายประเภท ดังเช่น แผ่นดินไหว ภูเขาไฟ ธารน้ำแข็ง เหมืองถ่านหิน เชื้อเพลิงและสึนามิ เป็นต้น

เทคนิค Small Baseline เป็นการประมวลผลแบบอนุกรมเวลา (Time-series analysis) รูปแบบหนึ่ง โดยใช้หลักการจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะห่างจุดที่ถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal baseline) สั้นที่สุด เพื่อเป็นรักษาระดับคุณภาพ (Coherence) ของข้อมูลและด้วยลักษณะการประมวลผลที่มีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่น การประมวลผลที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าและใช้ค่าความละเอียดที่ต่ำ ทำให้มีระยะเวลาการประมวลผลน้อย สามารถครอบคลุมพื้นที่ขนาดกว้าง ด้วยสาเหตุนี้ทำให้เทคนิค Small Baseline เป็นวิธีที่สามารถอัปเดตข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เหมาะแก่การใช้ติดตามและเฝ้าระวัง (Monitoring) การเคลื่อนตัวของแผ่นดิน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยซอฟต์แวร์ The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) สำหรับการตรวจหาอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ซอฟต์แวร์ MintPy ถูกพัฒนาขึ้นรูปแบบภาษาไพทอน (Python) ในแง่ของการประมวลผลซอฟต์แวร์ MintPy มีการประมวลผลที่รวดเร็วกว่ามากถ้าหากเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์การประมวลผลอื่น ๆ เช่น ซอฟต์แวร์ StaMPS หรือซอฟต์แวร์ LiCSBAS โดยในการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy จะใช้ข้อมูล Single look complex (SLC) ที่มีองค์กรให้บริการสำหรับผลิตคู่ภาพ Interferogram โดยเฉพาะ ชื่อว่า Alaska SAR Facility เป็นหน่วยงานส่งเสริมการประยุกต์ใช้ข้อมูลเรดาร์ที่จัดเก็บข้อมูลเรดาร์จากดาวเทียมดวงต่าง ๆ ไว้บนเว็บไซต์ ASF Vertex ทำให้ผู้สามารถเลือกข้อมูลในขอบเขตพื้นที่และช่วงเวลาที่ต้องการได้ ถือเป็นการลดเวลาการทำงานและลดขั้นตอนที่มีความซับซ้อนแก่ผู้ใช้ ในการศึกษาการประเมินคุณภาพผลลัพธ์ที่ผ่านมาจากการทดสอบในพื้นที่ภูเขาไฟในกาลาปากอสโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 และ ALOS-1 ที่ได้จากซอฟต์แวร์ MintPy นั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลค่าระดับจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส (GPS) เป็นอย่างมาก (Yunjun et al., 2019)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและการประมวลผลของเทคโนโลยีอินซาร์ เทคนิค Small Baseline ด้วยซอฟต์แวร์ The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) จากนั้นตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่ประมวลผลได้ร่วมกับข้อมูลจากงานระดับที่เชื่อถือได้เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้อง เพื่อให้องค์กรในประเทศไทยสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีอินซาร์มากขึ้นและเป็นการเสนอทางเลือกที่เหมาะสมในการติดตามและเฝ้าระวัง

อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ ลดการทำงานซ้ำซ้อนและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การตรวจสอบหาค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้การประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR) เทคนิค Small Baseline ด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ช่วงเวลา ค.ศ. 2017 - 2022 ในชุดภาพวงโคจรขาขึ้นและช่วงเวลา ค.ศ. 2018 - 2022 ในชุดภาพวงโคจรขาลง จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพและประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

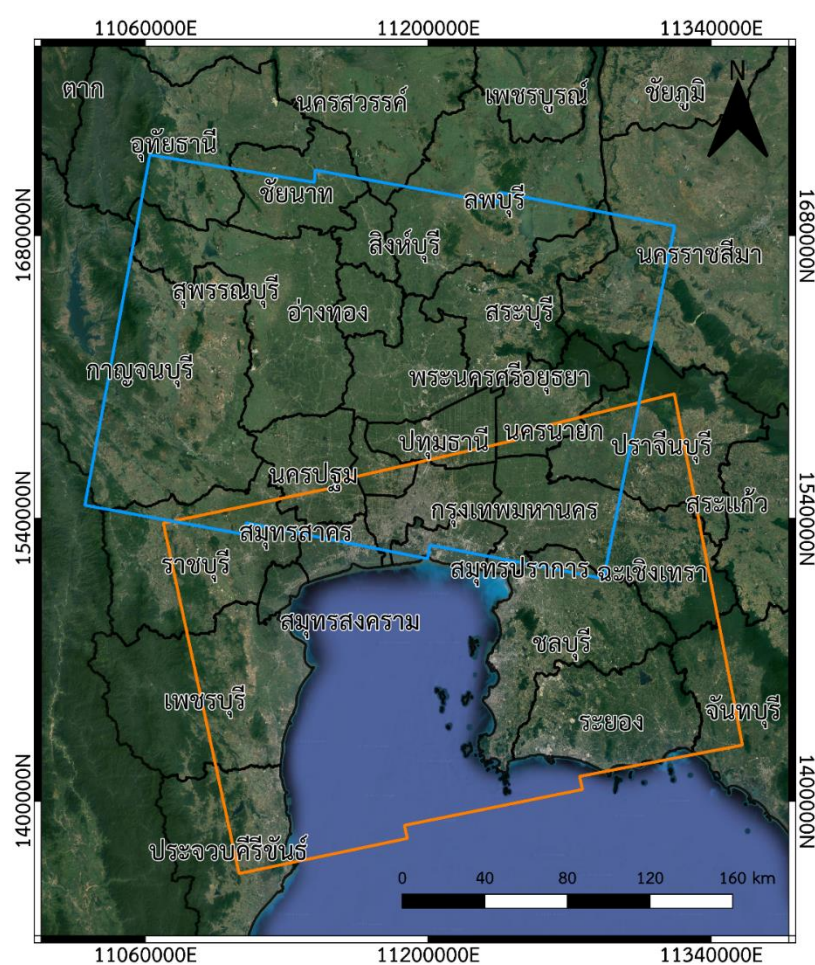
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Small Baseline ในการติดตามการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลา โดยเทคนิค Small Baseline มีจุดเด่นในเรื่องการครอบคลุมเชิงพื้นที่ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการตรวจสอบและติดตามการทรุดตัว แต่ถ้าหากมองในมุมมองของความละเอียด (Resolution) ของผลลัพธ์การทรุดตัวของแผ่นดิน การประมวลผลด้วยเทคนิค Persistent Scatter ที่มีการประมวลผลที่ไม่มีการลดความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียมจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดสูงแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนในการประมวลผล เวลาที่ใช้ในการประมวลผล นอกจากนี้เทคนิค Small Baseline ที่มีข้อได้เปรียบที่ให้ผลลัพธ์การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินครอบคลุมพื้นที่กว้างสามารถใช้เพื่อช่วยในการตรวจหาพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่สูงแล้วใช้เทคนิค Persistent Scatter ในการประมวลผลในพื้นที่เหล่านั้นเพื่อให้ได้ความละเอียดเพิ่มเติม เป็นการลดการดาวน์โหลดและประมวลผลข้อมูลปริมาณมาก ลดเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในงานได้

โดยจุดเด่นในการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลาด้วยซอฟต์แวร์ HyP3 และซอฟต์แวร์ MintPy ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ มีการรองรับการใช้ข้อมูล Interferogram ที่ผลิตได้จาก Alaska Satellite Facility (ASF) ซึ่งมีความสะดวกในการใช้อย่างมาก มากไปกว่านั้นในขั้นตอนการประมวลผลมีขั้นตอนขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทำ Unwrapping การให้ค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นของโครงข่าย Interferogram ก่อนนำไปคำนวณค่าการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลาและมีการคัดเลือกจุดภาพโดยใช้ค่า Coherence เป็นเกณฑ์ ซึ่งทำให้การประมวลผลได้รับผลกระทบจากจุดภาพที่มีคุณภาพต่ำลดลง นอกจากนี้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ที่ใช้ในการประมวลผลยังให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายและดาวเทียมมีการโคจรมาบันทึกภาพ ณ บริเวณตำแหน่งเดิมที่เป็นระบบ รวมไปถึง

ถึงการเพิ่มข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อนำไปประมวลผลที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ใช้เวลาประมวลผลไม่นาน

ขอบเขตในงานวิจัยนี้กำหนดพื้นที่ตามข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-1 และข้อมูลค่าระดับจากตำแหน่งสถานีฐาน (CORS Station) โดยแสดงดังรูปที่ 1 เป็นข้อมูลภาพในวงโคจรขาขึ้น (Ascending data) และวงโคจรขาลง (Descending data) ครอบคลุมพื้นที่ภาคกลางตอนล่างและภาคตะวันออกหลายจังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี นครปฐม สมุทรสาคร สมุทรปราการ นครนายก พระนครศรีอยุธยา สระบุรี สุพรรณบุรี ลพบุรี กาญจนบุรี ชลบุรี ระยองและฉะเชิงเทรา



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษากำหนดโดยเฟรมภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 กรอบสีส้มหมายถึง ภาพในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล และกรอบสีฟ้าหมายถึง ภาพในวงโคจรขาลง (Descending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ลักษณะทางกายภาพบริเวณภาคกลางตอนล่าง เป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญของประเทศไทย พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่ม ลักษณะทางธรณีวิทยา จากหลักฐานของชนิดตะกอนที่มาสะสม

ตัวและลักษณะภูมิประเทศพบว่าประกอบไปด้วยที่ลุ่มชื้นแฉะ ที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ดินดอนสามเหลี่ยม หาดทรายและสันดอนทราย มีแม่น้ำสายสำคัญคือ แม่น้ำเจ้าพระยา (คณะกรรมการบูรณาการนโยบายพัฒนาภาค, 2019)

ลักษณะทางกายภาพบริเวณภาคตะวันออก เป็นที่ราบภูเขาสูงและมีที่ราบชายฝั่งทะเล มีลักษณะเว้าแหว่งไปตามการกักเซาะของน้ำทะเลตามธรรมชาติ เป็นแหล่งนิคมอุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ลักษณะทางธรณีวิทยา เป็นดินปนทราย ระบายน้ำได้ดี (คณะกรรมการบูรณาการนโยบายพัฒนาภาค, 2019)

1.3.2 ช่วงเวลาของข้อมูล

ข้อมูลชุดภาพที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ข้อมูลภาพ Interferogram ที่ผลิตจากภาพซาร์ หรือ Single Look Complex (SLC) จากดาวเทียม Sentinel-1 มีค่าความละเอียดของจุดภาพในแนวโคจรของดาวเทียม (Azimuth resolution) ประมาณ 5 ม. และค่าความละเอียดของจุดภาพในทิศตั้งฉากกับแนวโคจรของดาวเทียม (Range resolution) ประมาณ 20 ม. อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีการเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) ทำให้มี Azimuth resolution ประมาณ 80 ม. และ Range resolution ประมาณ 80 ม. ทั้งในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) และวงโคจรขาลง (Descending) (ALTAMIRA) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลชุดภาพที่ใช้ในงานวิจัย

วงโคจร	จำนวนภาพ	จำนวนคู่ภาพ	ช่วงเวลา (วัน/เดือน/ปี)
ขาขึ้น (Ascending)	169	671	23/03/2017 - 22/12/2022
ขาลง (Descending)	219	1719	22/03/2018 - 28/08/2022

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถนำผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินมาใช้ในการตรวจสอบเฝ้าระวังและติดตามในพื้นที่ของประเทศไทย หรือรายพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินทรุด
- 1.4.2 สามารถใช้การประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy ในการติดตามอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินรายวันหรือรายเดือน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อประชาชนทั่วไปและ

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการเข้าถึงข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น เช่น กรมทรัพยากร
ธรณี กรมทางหลวง กรมที่ดิน เป็นต้น

- 1.4.3 ใช้ประโยชน์จากการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา เทคนิค Small
Baseline ในการหาแนวโน้มการทรุดตัวของพื้นที่ได้ว่าการทรุดตัวอย่าง
รวดเร็ว กำลังชะลอการทรุดตัวหรือหยุดการทรุดตัว



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การสูบน้ำบาดาล

เนื่องจากการทรุดตัวของแผ่นดินสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุและหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญ คือ การสูบน้ำบาดาลเกินขนาดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยน้ำบาดาล ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 หมายถึง น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน หิน กรวด หวาย น้ำบาดาลเกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมายังพื้นดินเรียกว่าน้ำผิวดิน ส่วนหนึ่งระเหยไปในอากาศ ส่วนที่เหลือแทรกซึมผ่านรอยแยกของผิวดินกลายเป็นน้ำใต้ดิน จากนั้นเมื่อน้ำใต้ดินซึมผ่านชั้นดินและหินต่าง ๆ ลงไปเรียกว่าน้ำบาดาล โดยสามารถพบแหล่งน้ำบาดาลได้แทบทุกพื้นที่ ระดับน้ำบาดาลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ฝนตกหนักหรือในบางประเทศที่มีหิมะละลายอาจทำให้ระดับน้ำสูงขึ้น หรือการสูบน้ำบาดาลอย่างหนักมีส่วนทำให้ระดับน้ำลดลงเช่นกัน

น้ำบาดาลเป็นองค์ประกอบในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น เกษตรกรรม โรงงาน อุตสาหกรรม อุปโภคและบริโภคในครัวเรือน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2020) ในอดีตมีการสูบน้ำจากบ่อน้ำบาดาลขึ้นมาเป็นจำนวนมากทำให้น้ำในชั้นดินลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้แผ่นดินเกิดการทรุดตัวในหลายพื้นที่ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการตราเป็นกฎหมายขึ้นเรียกว่า พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออนุรักษ์และป้องกันน้ำบาดาลไม่ให้เสียหายและสามารถนำมาใช้ได้ อย่างยั่งยืนแต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังคงมีการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการขุดเจาะน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง งานวิจัย Cigna and Tapete (2021) ได้กล่าวถึงการสูบน้ำบาดาลที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างและมีผลกระทบต่อประชากรโดยตรงในพื้นที่เมืองอาวกาสกาเลียนเตส (Aguascalientes) ประเทศเม็กซิโก มีอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินมากกว่า 10 ซม./ปี ซึ่งถือเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วรองจากเมืองหลวงอย่างเม็กซิโกซิตี โดยการสำรวจภาคพื้นดินในการประเมินความเสี่ยงนั้นทำได้ยาก จึงได้ใช้ข้อมูลภาพ SAR และการประมวลผลด้วยเทคโนโลยีอินซาร์ เทคนิค Small Baseline มาช่วยในการประเมินความเสี่ยงและตรวจสอบรูปแบบการทรุดตัวของแผ่นดินทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูล GPS และข้อมูลจากงานสำรวจภูมิประเทศ (Topographic Survey)

2.1.2 เทคนิคอินซาร์ (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)

ระบบเรดาร์ (Radio Detection and Ranging, Radar) คือระบบรังวัดระยะทางด้วยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงไมโครเวฟ โดยในระบบเรดาร์ที่ใช้กันในปัจจุบันมีการเลือกใช้ความถี่และความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไปได้ตั้งแต่ระดับมิลลิเมตรไปจนถึงเมตร ดังตารางที่ 2 ในการสำรวจ

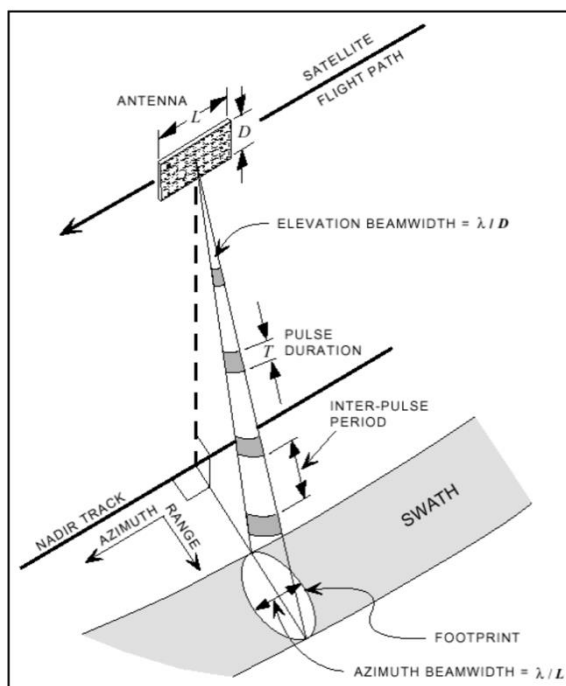
ระยะไกล (Remote sensing) ระบบถ่ายภาพดาวเทียมเรดาร์ถูกจัดว่าเป็น Active System เนื่องจากตัวระบบจะเป็นตัวสร้างพลังงานและส่งคลื่นไมโครเวฟออกไป ทำให้สามารถบันทึกภาพได้ทั้งกลางวันและกลางคืนรวมไปถึงยังบันทึกภาพได้ในเกือบทุกสภาวะอากาศ แตกต่างจาก Passive System ที่ต้องอาศัยการรับค่าสะท้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไปตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับมา ยิ่งเสาสอากาศของดาวเทียมจึงทำให้ทำงานได้ในเฉพาะเวลากลางวันเท่านั้น และยังมีปัญหาเมื่อและยังมีปัญหาเมื่อสภาพอากาศมีเมฆปกคลุมพื้นที่

ตารางที่ 2 ความถี่และความยาวคลื่น

แถบความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
X-band	8 - 12.5 กิกะเฮิรตซ์	2.4 - 3.8 ซม.
C-band	4 - 8 กิกะเฮิรตซ์	3.8 - 7.5 ซม.
L-band	1 - 2 กิกะเฮิรตซ์	15 - 30 ซม.
P-band	0.3 - 1 กิกะเฮิรตซ์	30 - 100 ซม.

หลักการทำงานโดยทั่วไประบบจะส่งคลื่นไมโครเวฟในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือที่เรียกว่า Pulse ออกไปจากเสาสอากาศส่ง (Transmitting Antenna) ในแนวข้างของอากาศยานหรือดาวเทียม (Side-Looking system) ดังรูปที่ 2 เนื่องจากระบบเรดาร์อาศัยหลักการวัดระยะเวลาที่คลื่นไมโครเวฟใช้ในการเดินทางจากเซ็นเซอร์จนไปสะท้อนกับวัตถุเพื่อนำมาคำนวณระยะทางจากเซ็นเซอร์จนถึงวัตถุ เพราะฉะนั้นถ้าหากระบบส่งสัญญาณไปในแนวตั้ง วัตถุที่อยู่ห่างออกไปทั้งสองฝั่งจะให้ระยะห่างระหว่างวัตถุและเสาสอากาศที่มีระยะเท่ากัน ทำให้ไม่สามารถแยกวัตถุได้ว่าเป็นมาจากทางซ้ายหรือทางขวาของเสาสอากาศ เพราะฉะนั้นในการบันทึกภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ เมื่อ Pulse ที่ส่งเดินทางมากระทบกับพื้นโลกหรือวัตถุเกิดการสะท้อนไปในทิศทางต่าง ๆ (Scattering) ส่วนหนึ่งของคลื่นที่กระเจิงนั้นจะอยู่ในทิศทางที่สะท้อนกลับมายังเสารับสัญญาณ (Receiving Antenna) จะทำให้สามารถบันทึกตำแหน่งของแต่ละวัตถุในภาพโดยไม่มีความกำกวม (Ambiguity) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีทั้งแบบที่เป็นตัวเดียวกันกับเสาสอากาศส่งหรือแบบที่เป็นคนละตัวกัน คลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากพื้นโลกหรือวัตถุกลับมายังระบบจะเรียกว่า Backscatter ส่วนภาพที่บันทึกได้จะมีชื่อเรียกว่า ภาพ RAR (Real Aperture Radar) ซึ่งภาพ RAR ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญในเรื่องของความละเอียดจุดภาพ (Resolution) ซึ่งมีขนาดหลายกิโลเมตร ทำให้ระบบเรดาร์จำเป็นต้องใช้เทคนิคที่ชื่อว่า Synthetic Aperture Radar (SAR) อาศัยการใช้หลักการ Doppler Frequency ในการแยกแยะวัตถุ โดยสังเกตว่าเมื่อดาวเทียมเคลื่อนที่เข้าใกล้วัตถุ ความถี่จะสูงขึ้นแล้วจะลดลงเมื่อวัตถุอยู่ดาวเทียมกำลังเคลื่อนตัวห่างออกไป ร่วมกับการใช้เทคนิค Chirped Pulse ในการส่ง Pulse หลาย ๆ ความถี่ ไหลระดับจาก

ต่ำไปสูง เพื่อให้ได้ค่าความละเอียดจุดภาพในทิศทางเดียวกับแนวนอน (Azimuth Resolution) และค่าความละเอียดจุดภาพในทิศทางตั้งฉากกับแนวนอน (Range Resolution) ที่ดียิ่งขึ้นด้วยเหตุนี้ทำให้ภาพถ่ายเรดาร์เรียกว่า ภาพซาร์ (SAR imagery)



รูปที่ 2 แสดงระบบบันทึกภาพเรดาร์ในลักษณะ Side-Looking system (SLR)

ที่มา : SAR-Guidebook (SARMAP, 2009)

ในแต่ละจุดภาพของภาพถ่ายเรดาร์จะบันทึก Echo ซึ่งเป็นผลรวมเวกเตอร์ของ Backscatter ที่สะท้อนจากหลายวัตถุในพื้นที่จุดภาพนั้นๆ กลับมายังเสาอากาศรับสัญญาณ นำมาผ่านกระบวนการ Analog-to-Digital Converter ได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบ x (In-Phase, I) และ y (Quadrature, Q) ถูกบันทึกในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนลงในแต่ละจุดภาพ โดยที่ค่า I และ Q สามารถคำนวณเป็นแอมพลิจูด (Amplitude, A) ได้ผลลัพธ์คือ ภาพแอมพลิจูด และเมื่อนำมาค่าแอมพลิจูดมายกกำลังสองจะได้ผลลัพธ์คือ ภาพความสว่าง (Intensity image) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณเป็นค่าเฟส (Phase, ϕ) ของ Echo ได้ผลลัพธ์คือ ภาพเฟส (Phase Image) ซึ่งจะเป็นค่าผลลัพธ์ที่สำคัญในการทำงานเทคนิค Interferometric SAR

เมื่อนำภาพเฟสที่เป็นผลลัพธ์จากการบันทึกภาพด้วยระบบเรดาร์ 2 ภาพ ณ ตำแหน่งเดียวกันแต่คนละห้วงเวลา ตามหลักสมมติฐานถ้าหากแผ่นดินบริเวณที่บันทึกภาพไม่มีการเคลื่อนตัวหรือตำแหน่งของวัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่าต่างเฟสของระยะทางไปยังเซนเซอร์ของทั้ง 2 ภาพ ดังสมการที่ 1 เมื่อนำมาลบกันควรมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าหากแผ่นดินมีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นค่าต่างเฟสที่

ได้จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เรียกค่าต่างเฟสนี้ว่า Interferometric phase ภาพของค่าต่างเฟสนี้เรียกว่า Interferogram

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$$

แต่เนื่องจากเป็นกรณีของระบบรับสัญญาณเพียงงานเดียว (Mono-static) ทำให้ระยะทางทั้งหมดที่คลื่นเดินทางเป็นระยะทางทั้งไปและกลับ ดังสมการที่ 4

$$\Delta\phi = 2\left(\frac{2\pi R_1}{\lambda}\right) - 2\left(\frac{2\pi R_2}{\lambda}\right) \quad [2]$$

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right) - \left(\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \quad [3]$$

$$\Delta\phi = -\left(\frac{4\pi\Delta R}{\lambda}\right) \quad [4]$$

โดย $\Delta\phi$ หมายถึง ค่าต่างเฟสของระยะทางไปยังเซนเซอร์ของทั้ง 2 ภาพ

ΔR หมายถึง ระยะการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศในทิศทาง line of sight (LOS)

λ หมายถึง ความยาวคลื่น

ซึ่งในความเป็นจริงผลลัพธ์ของค่าต่างเฟสนี้ยังมีค่าเฟสจากส่วนอื่นๆ นอกเหนือจากค่าเฟสจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ (ϕ_{def}) ปะปนเข้ามา ดังสมการที่ 5

$$\Delta\phi_{\text{int}} = \Delta\phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{geom}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_{\text{noise}} \quad [5]$$

- ค่าเฟสจากตำแหน่งที่บันทึกภาพทั้งสองไม่ทับกันสนิท (ϕ_{geom}) และค่าเฟสจากลักษณะภูมิประเทศ (ϕ_{topo})

ในการประมวลผล InSAR มักจะบันทึกภาพให้มีตำแหน่ง (Spatial baseline) ใกล้เคียงกันมากที่สุดหรือทับกันสนิท แต่โดยทั่วไปแล้วภาพ SAR 2 ภาพไม่สามารถทับกันได้สนิท ทำให้เกิดค่าเฟสจากตำแหน่งที่บันทึกภาพทั้งสองไม่ทับกันสนิทและค่าเฟสจากลักษณะภูมิประเทศที่ปะปนเข้ามาในระบบ ซึ่งสามารถจัดออกด้วยการใช้ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ (SRTM DEM) และข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (orbit) คำนวณกลับเป็นค่าเฟสแล้วลบออกจากค่าต่างเฟสที่ได้

- ค่าเฟสจากความคลาดเคลื่อนจากคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ (ϕ_{atm})

ถึงแม้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงอนุภาคต่างๆ ในชั้นบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตามการเดินทางผ่านส่วนประกอบในชั้นบรรยากาศ เช่น เมฆ หมอก ละอองน้ำ หรือแม้แต่ว่าความแตกต่างของสภาพอากาศระหว่างช่วงเวลาที่ทำการบันทึกภาพ ส่งผลกระทบต่อคลื่นสัญญาณในลักษณะดีเลย์ (delay) ทำให้ใช้เวลาในการเดินทางมากกว่าที่ควรจะเป็น วิธีการบรรเทาความคลาดเคลื่อนจากการที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศคือ ใช้การประมวลผลแบบ Time-series InSAR ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนภาพ Interferogram เพื่อขยายระยะเวลาในการบันทึกภาพ หรือการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยข้อมูลภายนอกเช่น ข้อมูลสภาพอากาศ ณ เวลาที่มีการบันทึกภาพ

- ค่าเฟสจากความแปรปรวน (ϕ_{noise})

ค่าเฟสที่ปะปนเข้ามาที่รังวัดได้จากภาพ Interferogram อีกชนิดคือ ค่าเฟสจากความแปรปรวน ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยแต่ปัจจัยที่ใหญ่ที่สุดมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิว ค่าเฟสจากความแปรปรวนนั้นยากที่จะหาวิธีกำจัด ทำได้เพียงแค่หาวิธีลดหรือวิธีหลีกเลี่ยงเพียงเท่านั้น โดยการหลีกเลี่ยงค่าเฟสจากความแปรปรวนจะพิจารณาจากดัชนีที่บอกระดับความแปรปรวนของภาพ Interferogram คือ ค่า Coherence มีค่าในช่วง 0 – 1 โดยถ้าหากมีค่า Coherence สูง หมายถึงมีค่าความแปรปรวนน้อย คุณภาพดี เช่น พื้นที่เมือง สิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เปิด ในทางกลับกันถ้าหากมีค่า Coherence ต่ำ จะมีค่าความแปรปรวนมาก คุณภาพต่ำ เช่น พื้นที่ป่าไม้หนาแน่น ซึ่งในการประมวลผลจะใช้วิธีเลือกทำการประมวลผลเฉพาะจุดภาพที่มีค่า Coherence เพียงพอ

2.1.3 การประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR, TS-InSAR)

การใช้เทคนิคอินซาร์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน จำเป็นต้องใช้การประมวลผลภาพอินซาร์ในรูปแบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR, TS-InSAR) เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวที่มีขนาดเล็กระดับมม./ปี เพื่อขจัดหรือลดค่าเฟสอื่น ๆ จำเป็นจะต้องอาศัยจำนวนภาพในการประมวลผล (Li et al., 2019) ซึ่งการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ประเภทแรกคือ เทคนิค Persistent Scatter (PS) โดยมีลักษณะในการผลิตคู่ภาพ Interferogram คือ จับคู่ภาพไปที่ภาพ Master เพียงภาพเดียวและมีขั้นตอนการประมวลผลอย่างละเอียดในการเลือกจุดภาพที่มีคุณภาพสูงเท่านั้นมาใช้ในการประมวลผล ประเภทต่อมาคือเทคนิค Small Baseline (SB) ลักษณะเด่นที่สำคัญคือ จะใช้การจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะห่างของตำแหน่งถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal

baseline) สั้นที่สุดทำให้มีภาพ Master ได้หลายภาพ ซึ่งจะอธิบายหลักการโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

จากการศึกษาที่ผ่านมา เทคนิค Persistent Scatter เหมาะกับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นพื้นที่เมืองมากกว่า เนื่องจากสามารถหาจุดภาพที่มีสัญญาณที่เสถียรหรือหมายถึงจุดภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นดินน้อยได้มากกว่า เช่น หลังคาบ้านเรือน อาคารตึกสูง ต่างจากเทคนิค Small Baseline ที่เป็นการประมวลผลโดยไม่ได้สนใจเฉพาะจุดสัญญาณมีความเสถียรมากแต่จะเป็นการประมวลผลกับจุดภาพโดยรวม โดยอาศัยหลักการการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) จากการเฉลี่ยจุดภาพให้มีความละเอียดต่ำลงดังที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยเหตุนี้ทำให้เทคนิค Small Baseline เหมาะกับการตรวจสอบและติดตามพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น การเคลื่อนตัวของภูเขาไฟ แผ่นดินไหว ธารน้ำแข็ง หรือ ดินถล่ม เป็นต้น นอกจากนี้ในมุมมองของการประมวลผล เนื่องจากเทคนิค Persistent Scatter จำเป็นต้องมีการประมวลผลที่ซับซ้อนหลายขั้นตอนเพื่อตรวจสอบหาจุดภาพที่เสถียรจากชุดภาพทั้งหมดในอนุกรมเวลาและต้องทำการประมวลผลที่ความละเอียดจุดภาพที่สูงทำให้เทคนิค Persistent Scatter จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่รองรับการประมวลผลที่สูงและใช้เวลานานกว่าเทคนิค Small Baseline มาก โดยสามารถสรุปข้อเด่นของทั้งสองเทคนิคได้ดังตารางที่ 3 โดยจะอธิบายลักษณะของแต่ละเทคนิคโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

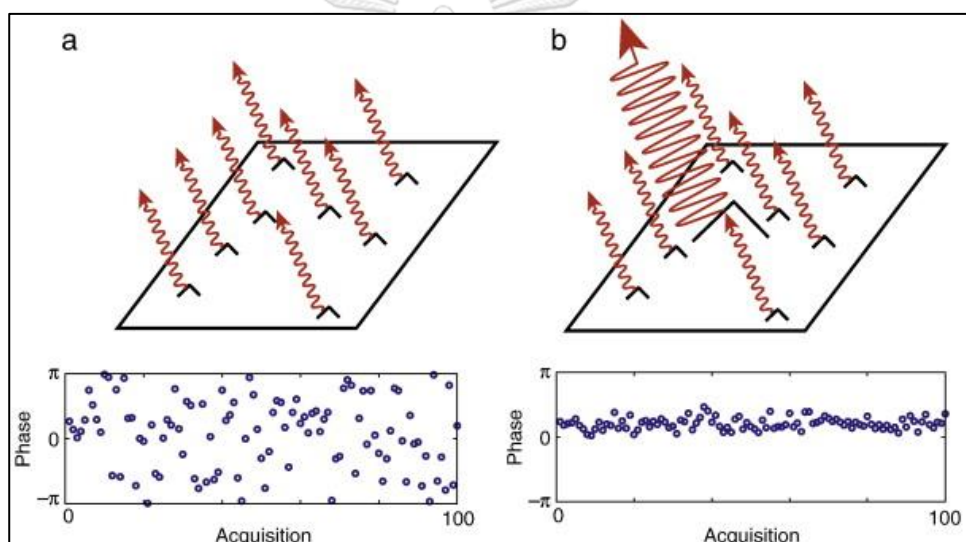
ตารางที่ 3 ลักษณะของเทคนิค Persistent Scatter และ เทคนิค Small Baseline

เทคนิค Persistent Scatter	เทคนิค Small Baseline
เหมาะกับพื้นที่เมือง เพราะมี PS Pixel จำนวนมาก	เหมาะกับพื้นที่ที่ไม่ใช่เมือง
มีการประมวลผลเต็มความละเอียด (Full resolution) จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลานาน	มีการเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) เพื่อลดระดับค่า Noise ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลและพื้นที่จัดเก็บข้อมูลน้อย
เหมาะกับงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานและสิ่งปลูกสร้าง เช่น อาคาร, ถนน เป็นต้น	เหมาะกับงานที่ต้องการติดตามการทรุดตัวในเชิงพื้นที่, งานทางด้านธรณีวิทยาและแผ่นดินไหว
จำเป็นต้องผลิต Interferogram ด้วยตนเอง	มีองค์กรให้บริการผลิตภาพ Interferogram ซึ่งมีรูปแบบเดียวกันกับที่ใช้ในเทคนิค Small Baseline

2.1.4 เทคนิค Persistent Scatter (PS)

เทคนิค Persistent Scatter ในการผลิตคู่ภาพ Interferogram จะประกอบคู่ภาพ Interferogram กับภาพ Master เพียงภาพเดียวเท่านั้น โดยหลักการที่สำคัญของเทคนิคนี้คือจะเลือก

การประมวลผลเฉพาะจุดภาพที่มีลักษณะที่มีความเสถียรสูง (Stability) รูปที่ 3 ซึ่งวัตถุที่สอดคล้องกับหลักการนี้จะเป็นวัตถุที่เป็น Man-made object เช่น หลังคา ถนน เป็นต้น โดยจุดภาพเหล่านี้จะมีความแปรปรวนตลอดช่วงเวลาในอนุกรมเวลาน้อยกว่า โดยในทางทฤษฎีการประมวลผลประเภทนี้จะไม่มีการลดขนาดความละเอียดของจุดภาพทำให้การประมวลผลประเภทนี้มีความเหมาะสมในการตรวจสอบโครงสร้างที่มีความละเอียดสูงได้ แต่ในบางการศึกษาที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ อย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเปลือกโลก เทคนิค Persistent Scatter อาจไม่สอดคล้อง ซอฟต์แวร์ที่ให้บริการประมวลผลด้วยเทคนิค Persistent Scatter ได้แก่ StaMPS (Hooper et al., 2007) ที่ประมวลผลแบบที่ไม่มีการลดความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม (Full resolution) แต่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการทำงานและเวลา



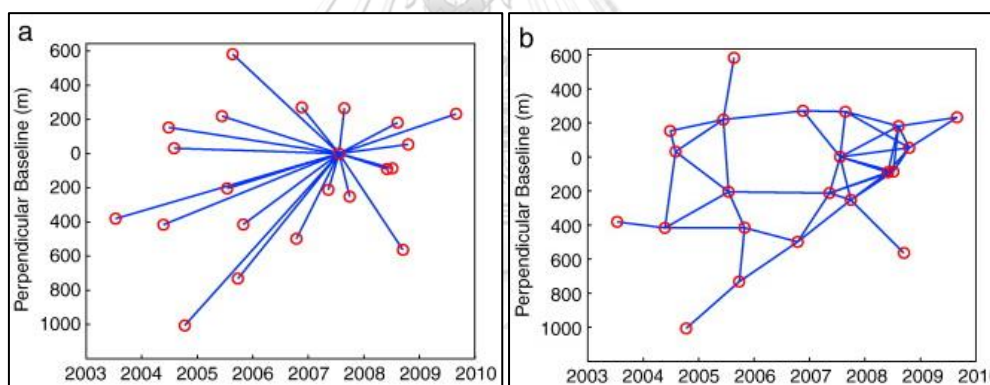
รูปที่ 3 ลักษณะของจุดภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (a) จุดภาพทั่วไปมีลักษณะกระจัดกระจาย (b) ภาพที่มีจุด Persistent Scatter มีความเสถียรสูง

ที่มา : (Hooper et al., 2012)

2.1.5 เทคนิค Small Baseline (SB)

เทคนิค Small Baseline ลักษณะเด่นที่สำคัญคือจะการใช้การจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะห่างจุดที่ถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal baseline) สั้นที่สุด และมีการจับคู่ภาพให้เหมือนมีการรังวัดซ้ำเพื่อเป็นการเพิ่ม Redundancy ซึ่งได้ลักษณะการจับคู่ภาพคล้ายโครงข่าย รูปที่ 4 การจับคู่กันด้วยวิธีนี้จะช่วยลดความแตกต่างของเวลาและค่ามุมการถ่ายภาพทำให้สัญญาณรบกวนที่ไม่มีค่าสหสัมพันธ์กัน (Decorrelation noise) ลดลงด้วยเช่นกัน เพื่อเป็นการรักษาค่า Coherence ที่เป็นดัชนีบอกคุณภาพข้อมูลให้อยู่ในระดับสูง และในทางทฤษฎีหลักการนี้มีขั้นตอน

การเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) ของข้อมูลภาพถ่ายเพื่อเป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าจุดภาพข้างเคียงกันที่นำมาหาค่าเฉลี่ยมีลักษณะการเคลื่อนตัวที่คล้ายกัน เพราะฉะนั้นในการประมวลผลประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องประมวลผลเฉพาะจุดภาพที่เป็นโครงสร้างเมืองเท่านั้น เมื่อจับคู่โครงข่าย Interferogram ที่เชื่อมต่อกันได้อย่างสมบูรณ์ (Fully-connected) แล้วจะนำมาคำนวณเป็นข้อมูลการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (LS) หรือ L1-norm minimization (Lauknes et al., 2011) ซอฟต์แวร์ที่ให้บริการประมวลผลด้วยวิธี Small Baseline เช่น GInT (Agram, 2012), MSBAS (Samsonov et al., 2017), MintPy (Yunjun et al., 2019), PyRate เป็นต้น นอกจากการใช้ประโยชน์ในเรื่องการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินโดยเฉพาะในพื้นที่เมือง เหมือง และโครงสร้างพื้นฐาน อย่างเช่น ถนน ทางรถไฟ เป็นต้น เทคนิค Small Baseline สามารถใช้ประโยชน์ในเรื่องการติดตามและเฝ้าระวังการเคลื่อนตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ได้ เช่น แผ่นดินไหว แผ่นดินถล่ม ธารน้ำแข็งละลาย ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น หรือใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวในพื้นที่ที่มีความไม่เป็นเมืองหรือพื้นที่ที่มีระดับค่า Coherence ต่ำได้



รูปที่ 4 ลักษณะการจับคู่ภาพ (a) เทคนิค Persistent Scatter (b) เทคนิค Small Baseline โดยที่วงกลมสีแดงหมายถึง ภาพ Interferogram เส้นสีน้ำเงินหมายถึง การจับคู่กันของภาพ Interferogram แกน x หมายถึง วันที่ทำการบันทึกภาพ และแกน y หมายถึง ระยะห่างระหว่างตำแหน่งบันทึกภาพ

ที่มา : (Hooper et al., 2012)

2.1.6 ระบบภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1

การประมวลผลภาพอินซาร์ในวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ที่ให้บริการโดย European Space Agency (ESA) ที่ บันทึกภาพในย่านความถี่ C-band ช่วงความถี่ 5.045 กิกะเฮิร์ตซ์ โคจรรอบโลกในวงโคจรใกล้ขั้วโลก (Near-orbit satellite) ระบบบันทึกภาพแบบแนวฝั่งขวาของดาวเทียม (Right-looking) ประกอบด้วย Sentinel-1A และ Sentinel-1B ใช้ระนาบการโคจร

เดียวกัน รอบโคจรทุก 24 วัน ในปี ค.ศ. 2014 - ปลายปี 2016 และเปลี่ยนเป็นรอบโคจรทุก 12 วัน ตั้งแต่ 2017 เป็นต้นมา ถ้าหากดาวเทียมทั้งสองดวงทำงานพร้อมกันจะใช้รอบโคจรทุก 6 วัน แต่เนื่องจากในช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2021 ดาวเทียม Sentinel-1B ประสบปัญหาเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟของแพลตฟอร์มดาวเทียมทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลกลับมาได้ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อรอบการโคจร ดาวเทียม Sentinel-1 มีรูปแบบการบันทึกข้อมูล 4 ลักษณะ ได้แก่ Strip Map Mode (SM), Interferometric Wide Swath Mode (IW), Extra Wide Swath Mode (EM), Wave Mode (WV) (Agency, 2012) ดังตารางที่ 4 โดยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ที่เลือกใช้ในงานศึกษาอยู่ในโหมด IW ซึ่งเป็นโหมดทั่วไปในการทำงาน ครอบคลุมพื้นที่ 250 กิโลเมตร มุมตกกระทบ (Incidence Angle) มีค่าในช่วงตั้งแต่ 29.1° ถึง 46.0°

ตารางที่ 4 รูปแบบการบันทึกข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1

รูปแบบ	ความกว้างแนวนอน	ความละเอียดทิศทางเดียวกับแนวนอน (Azimuth Resolution)	ความละเอียดทิศทางตั้งฉากกับแนวนอน (Range Resolution)
Strip Map Mode	80 กม.	5 ม.	5 ม.
Interferometric Wide Swath Mode	250 กม.	5 ม.	20 ม.
Extra Wide Swath Mode	400 กม.	20 ม.	40 ม.
Wave Mode	400 กม.	150 ม.	150 ม.

ปัจจุบันดาวเทียม Sentinel-1 ให้ข้อมูลบริการครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกและสามารถให้บริการผ่าน Alaska Satellite Facility (ASF) ให้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ L0 Raw data, L1 Single look complex, L2 Ocean ทำให้การใช้เทคโนโลยีอินซาร์ในการตรวจสอบการทรุดตัวของแผ่นดินสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.1.7 The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) Software

ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์มากมายที่สามารถประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาคือ ซอฟต์แวร์ The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดในรูปแบบภาษาไพทอน (Python) เวอร์ชัน 3 นำเสนอการประมวลผลรูปแบบใหม่สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในรูปแบบอนุกรมเวลาด้วยเทคนิค Small Baseline รองรับข้อมูล Interferogram ที่มีการจับคู่ภาพที่ระยะห่างทางตำแหน่งและเวลาที่สั้นมาก

เพื่อให้ได้คุณภาพข้อมูลที่ดีที่สุด ทำให้เหมาะกับข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 ที่ในงานศึกษานี้เลือกใช้ และมีการกรองอย่าง ASF Vertex คอยผลิตข้อมูลให้ เนื่องจากเวลาโคจรวนซ้ำ (revisit) ที่สั้น ซึ่งในแง่ของผู้ใช้ถือว่ามีความสะดวก นอกจากนี้ยังเป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

ซอฟต์แวร์ MintPy ประกอบด้วยการประมวลผลหลัก 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก คำนวณข้อมูลเฟส Interferogram ในรูปแบบอนุกรมเวลาด้วยการทำ Inversion ด้วยเทคนิค Small Baseline มีการจับคู่ภาพ Interferogram หลายคู่ทำให้ได้ค่า Coherence แตกต่างกันไป ซอฟต์แวร์จึงมีวิธีการถ่วงน้ำหนักข้อมูลให้เลือก 4 รูปแบบ ได้แก่ Inverse of covariance, Finisher Information Matrix (FIM), Spatial coherence, No weighting ในซอฟต์แวร์มีขั้นตอนในการตัดจุดภาพที่มีค่า Coherence เหลือต่ำออกเพื่อลดข้อมูลเฟสที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวออกไป ขั้นตอนที่สอง แก้ไขข้อมูลเฟสที่มาจากแหล่งข้อมูลที่ผิดพลาดของค่าเฟสที่เกี่ยวข้องกับเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศ (Tropospheric Delays) และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากภูมิประเทศ (Topographic Residuals) จะถูกเก็บรักษาไว้หลังจากการทำ Inversion ขั้นตอนที่สาม การประเมิน noise ในแต่ละภาพ MintPy สามารถแยกแยะเฟสที่เหลืออยู่ว่าเป็นการรวมกันของการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Delays) การเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere Delays) ที่ไม่ได้รับการแก้ไขและความแปรปรวน (Noise) ที่ขาดค่าสหสัมพันธ์กัน โดยซอฟต์แวร์จะใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) คำนวณค่าเฟสเหล่านี้แล้วไม่รวมเข้าไปในขั้นตอนการประมาณค่าอัตราเร็วของการทรุดตัว (Karamvasis and Karathanassi, 2020) โดยซอฟต์แวร์สามารถรองรับการประมวลผลคู่ภาพ Interferogram จำนวนมากและใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็วซึ่งในส่วนนี้ถือว่าเป็นข้อได้เปรียบอย่างมาก นอกจากนี้ผู้ใช้อย่างยังสามารถดำเนินการผ่าน Python ได้อย่างสะดวก ไม่ซับซ้อน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีการแบบดั้งเดิมจะใช้เป็นค่าระดับความสูงที่ได้จากการเดินระดับ (Leveling) ซึ่งในประเทศไทยมีหน่วยงานที่รับผิดชอบในส่วนนี้คือ กรมแผนที่ทหาร แต่ปัจจุบันได้มีการยกเลิกไปแล้วเนื่องจากเป็นงานที่ต้องใช้ทรัพยากรบุคคล เวลาและงบประมาณเป็นจำนวนมาก วิธีถัดมาคือการใช้ค่าความสูงจากระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS) มีการติดตั้งสถานีอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS Station) ซึ่งล้วนเป็นวิธีที่ให้ค่าความถูกต้องและความแม่นยำสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการได้ผลลัพธ์ในรูปแบบจุด ไม่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และจำเป็นจะต้องเก็บข้อมูลจนซ้ำถึงจะสามารถนำมาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาได้ รวมไปถึงในบางองค์กรจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเข้าถึงข้อมูลเหล่านี้ วิธีการต่อมาคือการใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing)

เนื่องจากปัจจุบันมีดาวเทียมที่มีการบันทึกข้อมูลบริเวณเดิมแบบเป็นระบบมากยิ่งขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีอินซาร์ (InSAR) ซึ่งเป็นการใช้ภาพถ่ายดาวเทียม ณ บริเวณตำแหน่งเดิมแต่คนละช่วงเวลากันมาหาความแตกต่างของคลื่นสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังดาวเทียมแล้วนำมาคำนวณออกมาเป็นค่าการเคลื่อนตัวที่สมบูรณ์ ถ้าหากพื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงไปกล่าวคือมีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศเกิดขึ้น สัญญาณที่ส่งกลับมายังดาวเทียมย่อมมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน และเมื่อใช้ชุดภาพมาประมวลผลเป็นในรูปแบบอนุกรมเวลาจะทำให้ได้ค่าการเคลื่อนตัวถึงระดับมิลลิเมตร ทำให้ข้อมูลมีศักยภาพที่จะนำข้อมูลมาติดตามการเคลื่อนตัวของแผ่นดินได้ นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ให้ผลลัพธ์ครอบคลุมในเชิงพื้นที่ เลือกช่วงเวลาที่น่าสนใจได้และข้อมูลไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

ในการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ด้วยเทคนิค Small Baseline โดยเทคนิคนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกในงานวิจัย Berardino et al. (2002) ที่นำเสนอเทคนิคการเลือกจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะสั้นเท่านั้น (Small baseline) ลักษณะโครงข่ายเพื่อลดข้อมูลที่ขาดค่าสหสัมพันธ์กัน (Decorrelation) และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากลักษณะภูมิประเทศ (Topographic Error) โดยใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม ERS-1/ERS-2 จับคู่ภาพ Interferogram ได้ทั้งหมด 70 คู่ภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) 20 จุดภาพ ในทิศทางเดียวกับแนวบิน (Azimuth) และ 4 จุดภาพ ในทิศตั้งฉากกับแนวบิน (Range) โดยได้ค่าเฉลี่ยจุดภาพที่ลดความละเอียดลงแล้วอยู่ที่ 80×80 ตารางม. เพื่อเป็นการลดข้อมูลจุดภาพที่ไม่สัมพันธ์กันออกและเพื่อปรับปรุงค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ทำให้สามารถแยกแยะข้อมูลได้มากขึ้นแต่ในทางกลับกันก็จะเป็นการสูญเสียความละเอียดของภาพลง ด้วยเหตุนี้ทำให้เทคนิค Small Baseline ไม่เหมาะกับการตรวจสอบที่ต้องการความละเอียดสูง โดยพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณทางตอนใต้ของประเทศอิตาลี และมีการนำผลลัพธ์มาตรวจสอบกับข้อมูล GPS ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องกันของค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจพบ นอกจากนี้ยังสามารถบอกได้ถึงแนวโน้มการทรุดตัวของจุดภาพในพื้นที่ศึกษาที่จะมีการทรุดตัวต่อไปในอนาคตหรือจุดที่แนวโน้มชะลอการทรุดตัวจนแทบจะไม่มีทรุดตัวแล้ว

ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบบ่อยมักเป็นในบางพื้นที่จากระดับจากสถานี GNSS ไม่สามารถเข้าไปทำการรังวัดได้จึงมีความสนใจการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ในการช่วยตรวจสอบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน ได้มีการศึกษาที่ใช้ประโยชน์จากเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาเพื่อติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินมากมาย ดังเช่นในงานวิจัย Haghshenas Haghighi and Motagh (2019) ใช้เทคนิค Small Baseline ตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ราบเตหะราน ประเทศอิหร่าน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วและการขยายตัวทางเศรษฐกิจทำให้มีการสร้างเขื่อนเพื่อใช้น้ำบาดาลในด้านอุตสาหกรรมและการเกษตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003 – 2017 ใช้ข้อมูลดาวเทียมที่ต่างกันคือ ดาวเทียม Envisat (ค.ศ. 2003 – 2007) ดาวเทียม ALOS (ค.ศ. 2003 – 2010) ดาวเทียม

TerraSAR-X (ค.ศ. 2012 – 2014) และ ดาวเทียม Sentinel-1 (ค.ศ. 2015 – 2017) จำนวนภาพ Interferogram มากกว่า 400 ภาพ ผลลัพธ์จากการศึกษาพบว่า ทางฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของเมือง تهران พบความคล้ายคลึงกันของข้อมูลในช่วงเวลา 15 ปี มีค่าอัตราการทรุดตัวสูงสุด 25 ซม./ปี และลดลงเหลือ 20 ซม./ปี เนื่องมาจากมีการควบคุมการใช้น้ำบาดาล นอกจากนี้ยังตรวจพบการทรุดตัวบริเวณใกล้กับสนามบินนานาชาติอิหม่ามโคมัยนี (Imam Khomeini International Airport) ประมาณ 5 ซม./ปี โดยจุดสูงสุดของการทรุดตัวมีแนวโน้มเคลื่อนเข้าสนามบิน อาคารผู้โดยสารและรันเวย์ พบอัตราการทรุดตัว 2 ซม./ปี ทางด้านเมืองวรามินตรวจพบอัตราการทรุดตัวสูงสุด 22 ซม./ปี นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นถึง 2 พื้นที่ที่มีการทรุดตัวรอบเมืองวรามิน

จากการตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิคอินซาร์และค่าระดับมีความสัมพันธ์กัน ยกเว้นในบางพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยในระดับ ซม./ปี หรือดังในงานวิจัย Cigna et al. (2021) มีความสนใจพื้นที่เมืองอาวาสกาเลียนเตส (Aguascalientes) ประเทศเม็กซิโก ซึ่งมีอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างรวดเร็ว (มากกว่า -150 มม./ปี) ใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-1 ระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014 – 2016 การประมวลผลของเทคนิค Persistent Scatter เลือกใช้ซอฟต์แวร์ StaMPS และในขั้นตอน applying orbits, subswath splitting, coregistration, generating interferogram ดำเนินการในซอฟต์แวร์ SNAP ในขณะที่เทคนิค Small Baseline เลือกการประมวลแบบ Parallel-SBAS (P-SBAS) ผ่านซอฟต์แวร์ Geohazards TEP รวมไปถึงใช้ SRTM ที่ความละเอียด 30 ม. สำหรับหาค่าพิกัดประเทศ จากวิธีทั้ง 2 ได้ผลลัพธ์ค่าความเร็วของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งแล้วนำมาตรวจสอบประสิทธิภาพพร้อมกับข้อมูลจากสถานี GNSS ถาวรทั้งหมด 84 จุดและได้มีการรังวัดค่าระดับเพิ่มเติมอีก 50 จุด พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ได้จากเทคนิค Persistent Scatter และเทคนิค Small Baseline ต่างกับข้อมูลจาก GNSS อยู่ประมาณน้อยกว่า 1 มม./ปี และ 2 มม./ปี ตามลำดับ ในขณะที่ต่างกับข้อมูลรังวัดงานระดับอยู่ประมาณ 3 มม./ปี และ 1 มม./ปี ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล GNSS ประมาณ 9 - 10 มม./ปี เนื่องมาจากในพื้นที่ศึกษายังมีพื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่อยู่ทางเหนือของหุบเขา ถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่เพาะปลูกถาวรที่สามารถสะท้อนสัญญาณได้แต่ก็ถูกจำกัด ด้วยเหตุนี้ทำให้การจับคู่ภาพ Interferogram อาจได้รับผลกระทบเกี่ยวกับค่า Coherence ต่ำในบางพื้นที่

โดยในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MintPy ในการประมวลผลและพบผลลัพธ์การเคลื่อนตัวในรูปแบบอนุกรมเวลาที่น่าสนใจ ดังในงานวิจัย Yunjun et al. (2019) นั้นได้ทำการทดสอบในพื้นที่ภูเขาไฟในกาลาปากอสโดยใช้ข้อมูล Sentinel-1 และ ALOS-1 ในการประเมินคุณภาพของการประมวลผลรูปแบบใหม่ด้วยซอฟต์แวร์ MintPy และเปรียบเทียบกับข้อมูล GPS ที่มีความเชื่อถือได้ พบว่าข้อมูลจากเทคนิคอินซาร์และค่ารังวัด GPS มีความสัมพันธ์กัน หรือในงานวิจัยของ Karamvavis and Karathanassi (2020) เล็งเห็นข้อจำกัดในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณเหมืองที่มี

ความยุ่งยากและมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นดินอย่างรวดเร็วจากการขุดเจาะ รวมไปถึงเครื่องมือทางธรณีวิทยาที่มีต้นทุนและค่าบำรุงรักษาสูง จึงเลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเข้ามาช่วยวิเคราะห์และติดตามอัตราการทรุดตัว ในพื้นที่ทางตะวันออกของภูมิภาคมาซิโดเนีย ประเทศกรีซ ซึ่งประกอบไปด้วยเมืองย่อยหลายเมืองและมีจำนวนประชากรหนาแน่น โดยเน้นไปที่การทรุดตัวของเหมืองที่เป็นแหล่งผลิตพลังงานหลักของประเทศ ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ทั้งหมด 125 ภาพ ระยะเวลาการศึกษาตั้งแต่ ค.ศ. 2016 – กลางปี 2018 ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ 3 ชนิด ได้แก่ StaMPS, GInterT, MintPy โดยเลือกจุดอ้างอิง (Reference point) ซึ่งเป็นจุดเดียวกันทั้งหมดและมีค่า Coherence สูง ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบแรสเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงผล จากนั้นแปลงเป็นข้อมูลเวกเตอร์เพื่อให้สะดวกต่อการใช้ซอฟต์แวร์ GIS ในการเปรียบเทียบ พบว่าผลลัพธ์การทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ที่มีการขุดเจาะจากทั้ง 3 ซอฟต์แวร์มีความคล้ายคลึงกันและบางพื้นที่มีค่าคลาดเคลื่อนจากค่า Coherence ต่ำ เนื่องจากมีพืชปกคลุม ซอฟต์แวร์ MintPy ให้ผลลัพธ์ข้อมูลการทรุดตัวที่หนาแน่นกว่าซึ่งข้อได้เปรียบของ MintPy คือมีโมดูลที่ช่วยจัดค่าคลาดเคลื่อนในขั้นตอน Unwrapping ทำให้ลดผลกระทบในการสร้างข้อมูลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา รวมไปถึงมีเกณฑ์ในการคัดจุดภาพที่ขาดค่าสหสัมพันธ์กันและขจัดออก ทำให้อัตราการทรุดตัวไม่เอนเอียง (unbias) และไม่ไวต่อจุดภาพที่มีค่า Coherence ต่ำ แต่ยังคงพบค่าผิดปกติในบางพื้นที่เนื่องมาจากปัจจัยความแปรปรวน (Noise) เช่น ความชื้นในดิน หุบเขา พื้นที่ทางการเกษตรที่มีพืชปกคลุมอยู่หนาแน่น เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยในพื้นที่ทวีปเอเชียที่ใช้ประโยชน์จากเทคนิคอินซาร์ในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างในงานวิจัย Morishita (2021) ได้ใช้เทคนิค Small Baseline ตรวจวัดอัตราการทรุดตัวครอบคลุมพื้นที่ประเทศญี่ปุ่น ใช้ข้อมูล Looking Into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar (LiCSAR) 34 เฟรม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 สำหรับติดตามการทรุดตัวในพื้นที่ขนาดใหญ่ ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ LiCSBAS ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2014 – เดือนเมษายน 2020 พบว่าในพื้นที่เหมืองมีแนวโน้มการทรุดตัวจำนวนมาก ส่วนเขตอุตสาหกรรมยังคงมีการทรุดตัวเช่นกัน เนื่องจากการใช้น้ำบาดาลอย่างหนักในพื้นที่ฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิกมีแนวโน้มขยายตัวสูงขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของแผ่นดินหลังจากแผ่นดินไหวเมื่อปี ค.ศ. 2011 ส่วนในพื้นที่เมืองมีการอัตราการทรุดตัวอย่างช้า ๆ เนื่องจากมีกฎหมายควบคุมการใช้น้ำบาดาล สามารถแบ่งรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแผ่นดินได้ 3 ลักษณะคือ การทรุดตัวของแผ่นดิน 10 พื้นที่ การยกตัวของแผ่นดิน 10 พื้นที่ การทรุดตัวในลักษณะประจำปี 3 พื้นที่ เนื่องจากฤดูหนาวมีหิมะตกหนักและใช้น้ำบาดาลในการละลายหิมะ ฤดูร้อนมีการสูบน้ำบาดาลเพื่อทำการเกษตรรวมถึงลักษณะทางธรณีมีการหดตัวง่าย แต่ในงานศึกษานี้ไม่ได้นำพื้นที่เพาะปลูกข้าวมาวิเคราะห์เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมหนาแน่นทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนสูง

หรือในงานวิจัยของ Zhou et al. (2020) ได้ใช้เทคนิค Small Baseline เพื่อหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณมณฑลปักกิ่ง มณฑลเหอเป่ย์ และมณฑลเหอเป่ย์ ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศจีนซึ่งเป็นแหล่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมและพบการสูบน้ำบาดาลเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้ภูมิภาคนี้เผชิญกับปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินมาอย่างยาวนานและอัตราการทรุดตัวมากที่สุดในประเทศจีน โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Radarsat-1 126 ภาพและข้อมูลดาวเทียม Sentinel-1 184 ภาพ ตรวจสอบการทรุดตัวตั้งแต่ปี ค.ศ. 2012 – 2018 ผลลัพธ์จากการศึกษาพบว่า มณฑลปักกิ่ง ปี ค.ศ. 2012 – 2013 มีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินเพิ่มขึ้นจาก 120 มม. เป็น 148 มม. และมีค่าการทรุดตัวลดลง ในช่วงปี ค.ศ. 2016 (148 มม.) – 2018 (106 มม.) บริเวณสนามบินปักกิ่ง มีค่าการทรุดตัวคงที่ ประมาณ 40 มม. มณฑลเหอเป่ย์มีการทรุดตัวค่อนข้างรุนแรงกว่าพื้นที่อื่น ๆ โดยมีค่าการทรุดตัว 145 มม. แต่อย่างไรก็ตามผลลัพธ์มีแนวโน้มการทรุดตัวลดลง มณฑลเหอเป่ย์พบค่าการเคลื่อนตัว 131 มม. และแสดงแนวโน้มการทรุดตัวที่ลดลงทุกปีจึงสรุปว่าพื้นที่มณฑลเหอเป่ย์กำลังชะลอการทรุดตัวของแผ่นดิน นอกจากนั้นนำผลลัพธ์ค่าการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิคอินซาร์เปรียบเทียบกับค่าระดับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) อยู่ที่ 0.97 และ 0.95 ซึ่งบ่งชี้ว่าผลลัพธ์ของเทคนิคอินซาร์มีความสัมพันธ์กับค่าระดับสูง

ในพื้นที่ประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยการใช้ Time-series InSAR ที่น่าสนใจคือ งานวิจัย Aobpaet (2012) ที่ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยการใช้เทคนิค Persistent Scatter ร่วมกับเทคนิค Small Baseline ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Radarsat-1 ทั้งหมด 29 ภาพ ช่วงเวลาเดือนตุลาคม ค.ศ. 2005 - เดือนมีนาคม 2010 ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ DORIS และ StaMPS พบอัตราการทรุดตัวมากที่สุดอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ และอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ประมาณ 30 มม./ปี ทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาพบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 10 มม./ปี ทางทิศเหนือและด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานคร 10 – 20 มม./ปี นอกจากนั้นยังตรวจพบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างรวดเร็วในเขตสะพานสูงและเขตลาดกระบัง จากนั้นตรวจสอบกับค่าจากงานระดับ (leveling) ด้วยตัวหลักการทางสถิติ t-test พบว่า 52 พื้นที่ จากทั้งหมด 65 พื้นที่ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน และ 10 พื้นที่ พบความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเป็นพื้นที่ชานเมืองทำให้เกิด double-bounce ขึ้นระหว่างช่องว่างของตึก หรือในงานวิจัยของ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ที่ใช้การประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ระยะเวลา ค.ศ. 2009 – 2012 พบว่าในพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครมีอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 5 – 10 มม./ปี ส่วนพื้นที่ปริมณฑลอย่างจังหวัดสมุทรปราการและจังหวัดปทุมธานีพบค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 10 - 15 มม./ปี โดยมีการพิจารณาร่วมกับข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลพบว่าข้อมูลอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์มีความสัมพันธ์กันในระดับหนึ่งและแนวโน้มความสัมพันธ์ไปใน

ทิศทางเดียวกัน หรืออย่างในงานวิจัย ปวัน ภิรมย์ทอง (2015) ที่ได้ทำการศึกษาตรวจสอบหาอัตรา การทรุดตัวในพื้นที่เดียวกัน โดยการใช้เทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา พบว่าในพื้นที่สองฝั่งแม่น้ำ เจ้าพระยามีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0 – 44 มม./ปี บริเวณเขตดอนเมืองและสายไหมมีการทรุด ตัว 35 – 44 มม./ปี และจากการตรวจสอบการทรุดตัวสะสมพบว่าบริเวณตำบลปากน้ำ จังหวัด สมุทรปราการ มีค่าประมาณ 30 ซม. ทำให้เป็นพื้นที่ที่ควรเฝ้าระวังความเสี่ยงมากที่สุด

หรืออย่างในงานวิจัยของ นันทชพร ปิยะมะรัตน์ (2022) ที่ได้ใช้หลักการของ Time-series InSAR เทคนิค Persistent Scatter ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อน โดยในงานศึกษาใช้ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จำนวน 24 ภาพ ช่วงเดือนตุลาคม ค.ศ. 2017 - เดือนสิงหาคม 2021 ครอบคลุมพื้นที่เขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี ผลลัพธ์จากการศึกษาพบค่าการเคลื่อนตัว ในทิศทางเดียวกับดาวเทียม 11,347 จุด มีค่าประมาณ -5.22 - 7.04 มม./ปี และแสดงผลผ่าน แพลตฟอร์มในรูปแบบสามมิติเพื่อให้ผู้ใช้สะดวกต่อการเข้าถึงข้อมูล ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะคือ ค่าที่ ได้จากการศึกษาเป็นเพียงแค่การเคลื่อนตัวของเขื่อนเท่านั้น ไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัดว่าเกิดจาก สาเหตุใดและในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุต้องพิจารณาจากข้อมูลจากด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม

บทที่ 3

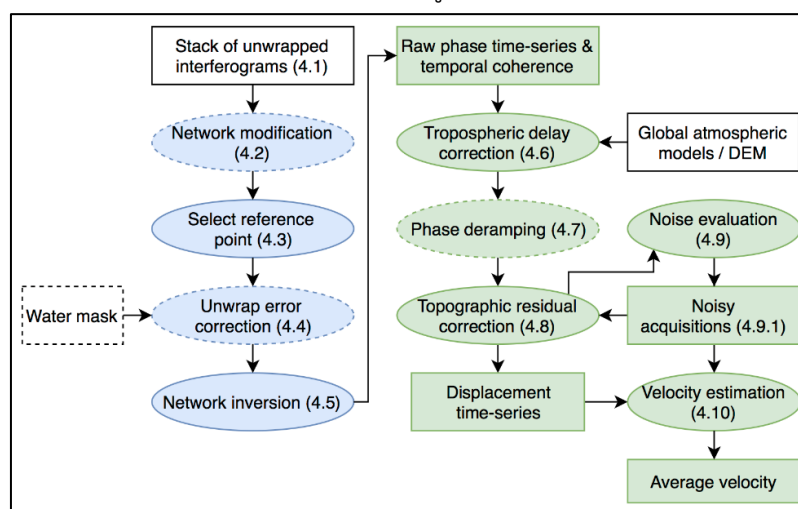
วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ The Miami INsar Time-series software in PYthon (MintPy) เป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่าย โดยมีจุดประสงค์เฉพาะเพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลด้วยอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR analysis) รองรับรูปภาพได้ทีละจำนวนมาก และใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็ว โดยซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นอ้างอิงกับภาษาไพทอน (Python) เป็นหลัก

ซอฟต์แวร์ MintPy ใช้เทคนิค Small Baseline (SB) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือคือจะการใช้การจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะห่างจุดที่ถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal baseline) สั้นเพื่อช่วยลดความแตกต่างของเวลาและค่ามุมการถ่ายภาพ ทำให้สัญญาณรบกวนที่ขาดค่าสหสัมพันธ์กัน (Decorrelation noise) ลดลงและเพื่อรักษาค่าระดับคุณภาพข้อมูล (Coherence) ให้สูงทุกภาพ โดยเทคนิคนี้ใช้ประโยชน์จากการวัดซ้ำของข้อมูล (Redundancy) และการเพิ่มค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) จากการใช้ Distributed Scatter (DS pixel) ในการลดค่าความแปรปรวน (Noise) โดยรูปที่ 5 อธิบายการประมวลผลของซอฟต์แวร์ MintPy ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

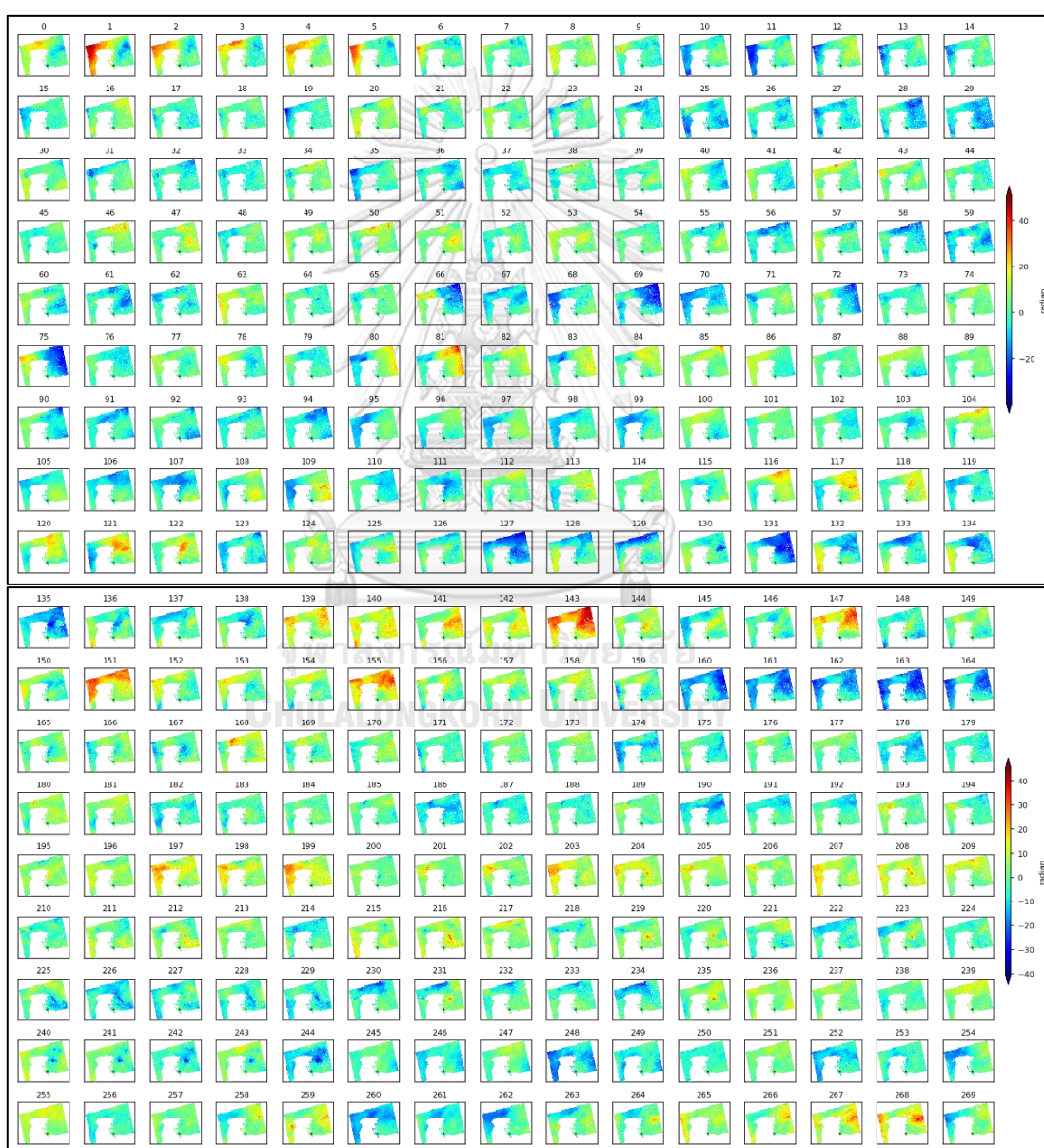
1. ขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล Interferograms และประเมินคุณภาพข้อมูล
2. ขั้นตอนการคำนวณหาการเคลื่อนตัวแบบอนุกรมเวลา ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จะยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ ปะปนอยู่จึงจำเป็นต้องขจัดออกในขั้นตอนต่อไป
3. ขั้นตอนการขจัดความคลาดเคลื่อนจากแหล่งที่มาต่าง ๆ เช่น จากชั้นบรรยากาศจากวงโคจรดาวเทียม จากลักษณะภูมิประเทศ เป็นต้น



รูปที่ 5 การทำงานของซอฟต์แวร์ MintPy (Yunjun et al., 2019)

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

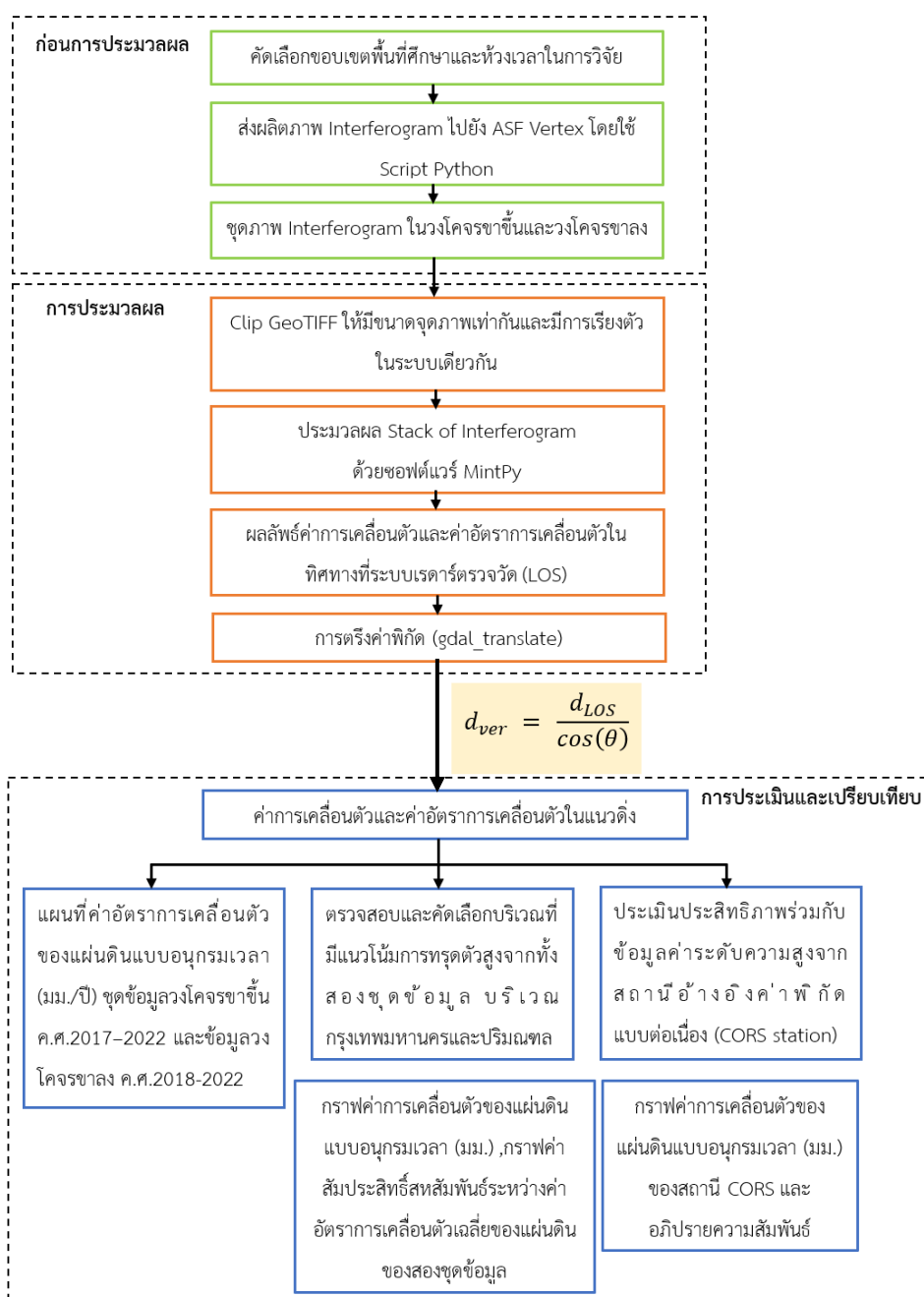
ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลภาพ Interferogram จากดาวเทียม Sentinel-1 ในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) จำนวน 169 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล เริ่มตั้งแต่ 23 มีนาคม ค.ศ. 2017 – 7 กรกฎาคม ค.ศ. 2022 จำนวนข้อมูลคู่ภาพทั้งหมด 671 คู่ และในวงโคจรขาลง (Descending) จำนวน 219 ภาพ จำนวนข้อมูลคู่ภาพทั้งสิ้น 1778 คู่ ระยะเวลาตั้งแต่ 22 มีนาคม ค.ศ. 2018 – 28 สิงหาคม ค.ศ. 2022 ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพ Interferogram ที่ใช้ในการประมวลผล ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ศึกษา

3.3 การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลข้อมูลในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนก่อนการประมวลผล ขั้นตอนการประมวลผล และขั้นตอนการประเมินผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ ดังในรูปที่ 7 โดยจะอธิบายละเอียดในหัวข้อถัดไป

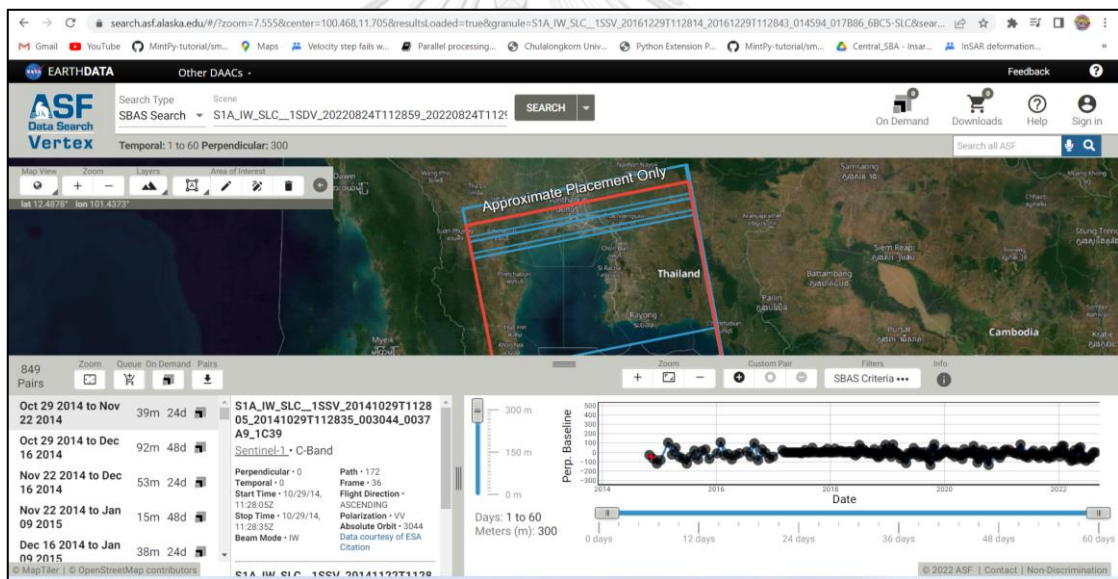


รูปที่ 7 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

3.3.1.1 ส่งประมวลผลภาพ Interferogram โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้บริการทางอินเทอร์เน็ตของ ASF (Alaska SAR Facility) และเป็นภาพ Sentinel-1 โดยจะต้องมีการลงทะเบียนเข้าสู่ระบบ NASA EARTHDATA ก่อน โดยจะจำกัดการผลิต Interferogram ได้ไม่เกินเดือนละ 1,000 คู่ภาพต่อบัญชีผู้ใช้ จากนั้นส่งงานไปประมวลผลโดยต้องระบุเงื่อนไข ได้แก่ พื้นที่ศึกษา รูปแบบผลิตภัณฑ์ Beam mode และวงโคจรดาวเทียม ได้แก่ วงโคจรขาขึ้น (Ascending) และ วงโคจรขาลง (Descending) ดังรูปที่ 8

จากนั้นทำการเลือกคู่ภาพตามเงื่อนไขวันที่บันทึกภาพ ระยะห่างตำแหน่งบันทึกภาพ (Perpendicular Baseline) และระยะห่างทางเวลาบันทึกภาพ (Temporal Baseline) เมื่อได้บรรดาคู่ภาพตามที่ต้องการ ให้ผู้ใช้เลือกข้อมูลคู่ภาพ (Pairs) จากการสืบค้นทั้งหมดโดยดาวน์โหลดรายชื่อชุดภาพ Interferogram เป็นรูปแบบไฟล์ CSV

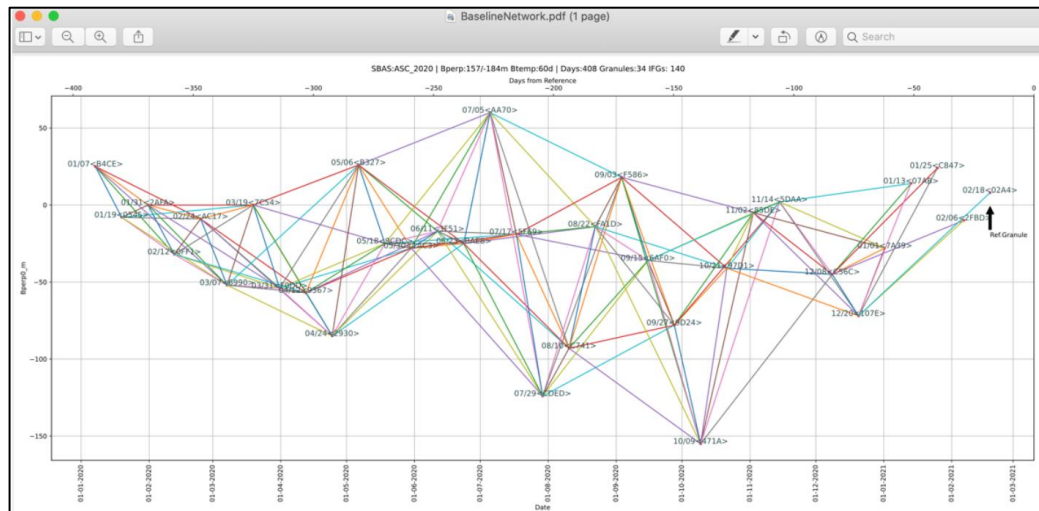


รูปที่ 8 ผลลัพธ์การค้นหา จากหน้าเว็บ ASF (<https://search.asf.alaska.edu>)

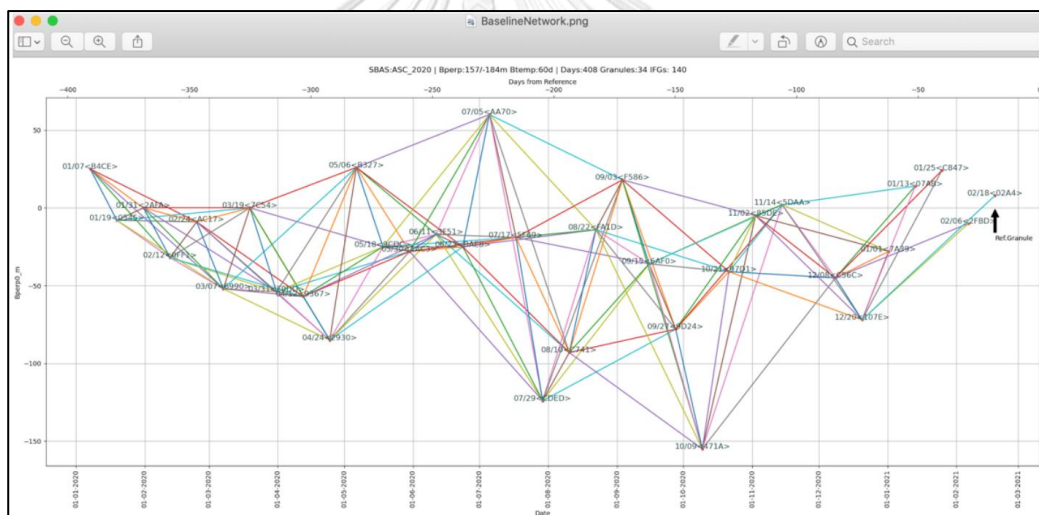
เมื่อมีข้อมูลรายละเอียดคู่ภาพในรูปแบบไฟล์ CSV โดยจะต้องนำไว้ในโฟลเดอร์ที่ต้องการจัดเก็บผลิตภัณฑ์ผลลัพธ์ก่อน ต่อมาใช้ Script file สำหรับใช้ในการส่งรายชื่อชุดภาพ Interferogram ไปยังระบบ ASF จากนั้นระบบจะดำเนินการผลิตภาพ Interferogram ให้แก่ผู้ใช้ โดย Script file นี้จะอาศัยการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ไพทอน (Python) ดังตัวอย่างที่ใช้ในงานนี้เป็น Script file ชื่อ 4_job_submit.py หลังจากนั้นระบุชื่องาน (เช่นชื่อ ASC_2020) ตามด้วยตำแหน่งของไฟล์ CSV รายละเอียดภาพ (เช่นชื่อ sbas-pair-ASC-2020.csv) และลงท้ายด้วย -x เพื่อสั่งให้ดำเนินงานทันที

3.3.1.2 การติดตามการประมวลผลภาพ Interferogram สามารถติดตามได้จากการรัน Script file ที่มีชื่อว่า 1_job_find.py ลงไว้ในโฟลเดอร์เดียวกับไฟล์ CSV เรียบร้อยแล้ว โดยการศึกษาผลตามชื่องาน จำเป็นต้องเติม -j ตาม ด้วยชื่องาน (เช่นชื่อ ASC_2020) โปรแกรมจะรายงานสถานะ เมื่อประมวลผลสำเร็จแล้ว โดยขึ้นสถานะว่า “SUCCEEDED” ผู้ใช้สามารถใช้คำสั่ง -d ในการดาวน์โหลดผลิตภัณฑ์เพื่อประมวลผลต่อได้เลย ถ้าหากพบสถานะว่า “FAIL” ต้องพิจารณาส่งงานใหม่ต่อไป ตัวอย่างการแสดงผลโปรแกรมเป็นไปดังรูปที่ 10

[illegible]

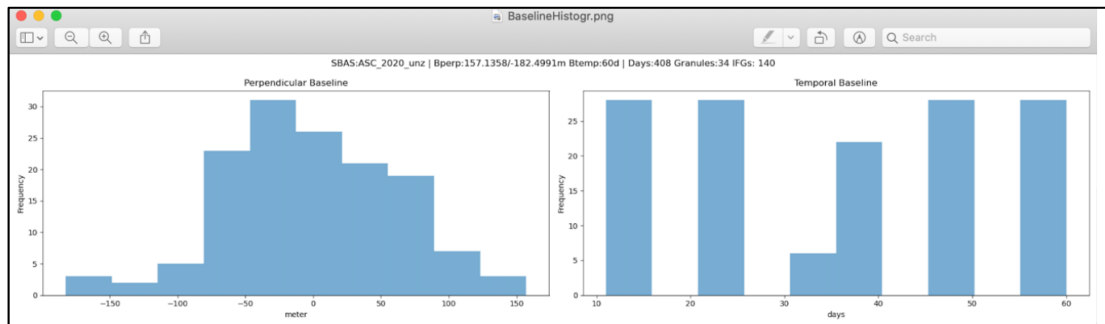


รูปที่ 12 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf

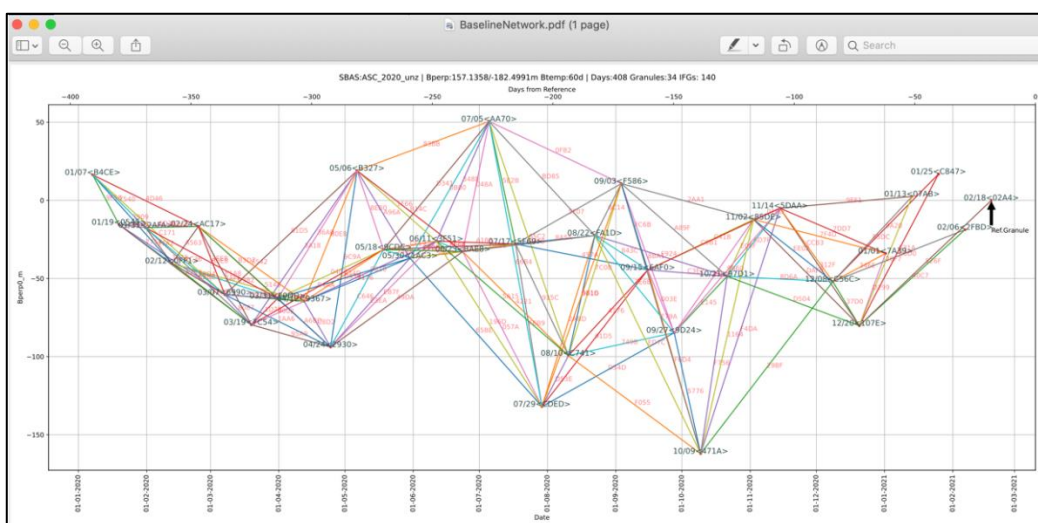


รูปที่ 13 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.png

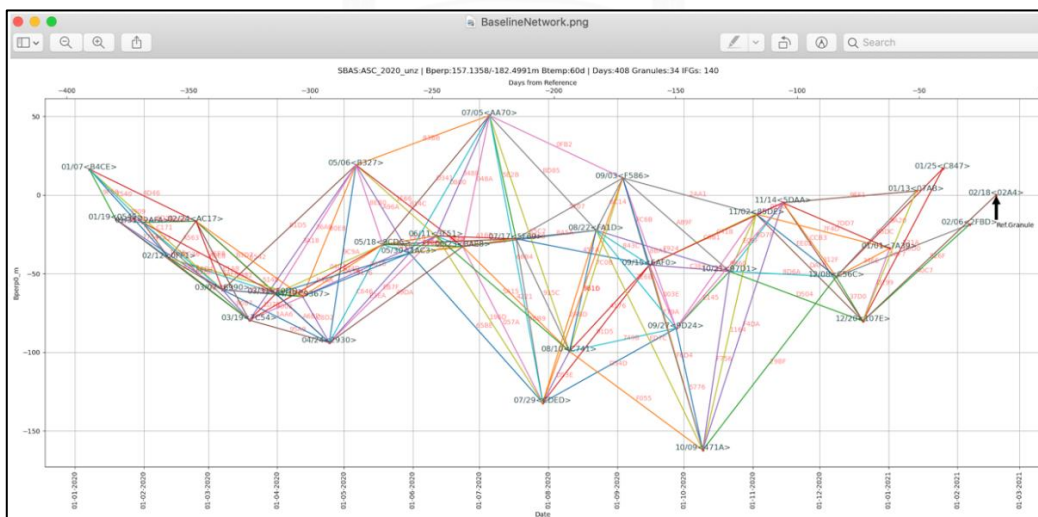
นอกจากนี้สามารถใช้ Script file ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของคู่ภาพ ซึ่งจะอาศัยการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ไพทอน (Python) ดังตัวอย่างที่ใช้ในงานนี้เป็น Script file ชื่อ 3_PlotBL_Hyp3Zip.py ซึ่งจะใช้กับ Text file ที่ได้จากการ Unzip ไฟล์จากการประมวลผลภาพ Interferogram สามารถใช้งานได้ผ่าน Linux เช่นเดียวกัน ด้วยการระบุ Path โฟลเดอร์ที่เก็บ Text file อยู่ ได้ผลลัพธ์ทั้งหมด 3 ไฟล์ ดังรูปที่ 14, 15 และ 16 ตามลำดับ



รูปที่ 14 ผลลัพธ์ BaselineHistr.png



รูปที่ 15 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf



รูปที่ 16 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.png

3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล

3.3.2.1 การเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล ประกอบไปด้วย ไฟล์ zip ของคู่ภาพ Interferogram ทั้งหมดที่ดาวเทียมโหลดออกมาจากระบบ, ไฟล์ clip_image.sh และ ไฟล์ run_unzip_clean.sh นำไฟล์ทั้งหมดรวบรวมไว้ในโฟลเดอร์เดียวกัน

3.3.2.2 แยกไฟล์คู่ภาพ Interferogram ที่ได้จากระบบ Alaska Satellite Facility (ASF) และลบไฟล์ข้อมูลบางส่วนที่ไม่จำเป็นในไฟล์ที่ Unzip แล้วออกไปเพื่อลดขนาดของข้อมูล

3.3.2.3 ดำเนินการตัดแต่ง (Clip) ข้อมูลในรูปแบบ GeoTIFF ให้มีขนาดเท่ากันทุกภาพ เนื่องจากการคำนวณการเคลื่อนตัวจำเป็นต้องมีขนาดของจุดภาพ (pixel) เท่ากันและอยู่ใน Reference frame เดียวกันทุกภาพ กล่าวคือทุกไฟล์ Unwrapped phase, Coherence image รวมถึงข้อมูลที่ใช้ในการช่วยประมวลผลทั้งไฟล์แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (DEM) และไฟล์ค่ามุม Incident angle จะต้องมีความจุดภาพที่เท่ากันและมีการเรียงตัวในระบบเดียวกัน

3.3.2.4 เตรียมโฟลเดอร์สำหรับการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy เพื่อให้สามารถระบุที่จัดเก็บไฟล์ภาพต่าง ๆ ให้แก่ MintPy และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ค่าละติจูด (Latitude) และค่าลองจิจูด (Longitude) ของจุดอ้างอิง (Reference point) เป็นต้น

3.3.2.5 เริ่มประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy เพื่อให้การประมวลผลสามารถทำงานได้ Conda สามารถสร้าง Environment แยกขึ้นมาใหม่ได้ ซึ่งจะติดตั้งโปรแกรมเสริมที่จำเป็นทั้งหมดไว้โดยไม่รบกวน Environment หลัก โดยจะประมวลผลโดยใช้ Environment ที่ติดตั้ง MintPy เรียบร้อยแล้ว

3.3.2.5.1 Loading InSAR stack ขั้นตอนการโหลดข้อมูลทั้งหมดมาเก็บไว้ในไฟล์ .h5

3.3.2.5.2 Network modification เป็นการตรวจสอบและประเมินคุณภาพ Phase-unwrapping ของ Interferogram ก่อนที่จะทำการคำนวณเป็นค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

3.3.2.5.3 Select reference point เป็นการระบุจุดอ้างอิง (Reference point) สามารถเลือกให้เป็น auto ได้ ตัว MintPy จะคัดเลือกจุดที่มีค่า Coherence สูงที่สุด (เกณฑ์เริ่มต้นคือ 0.85)

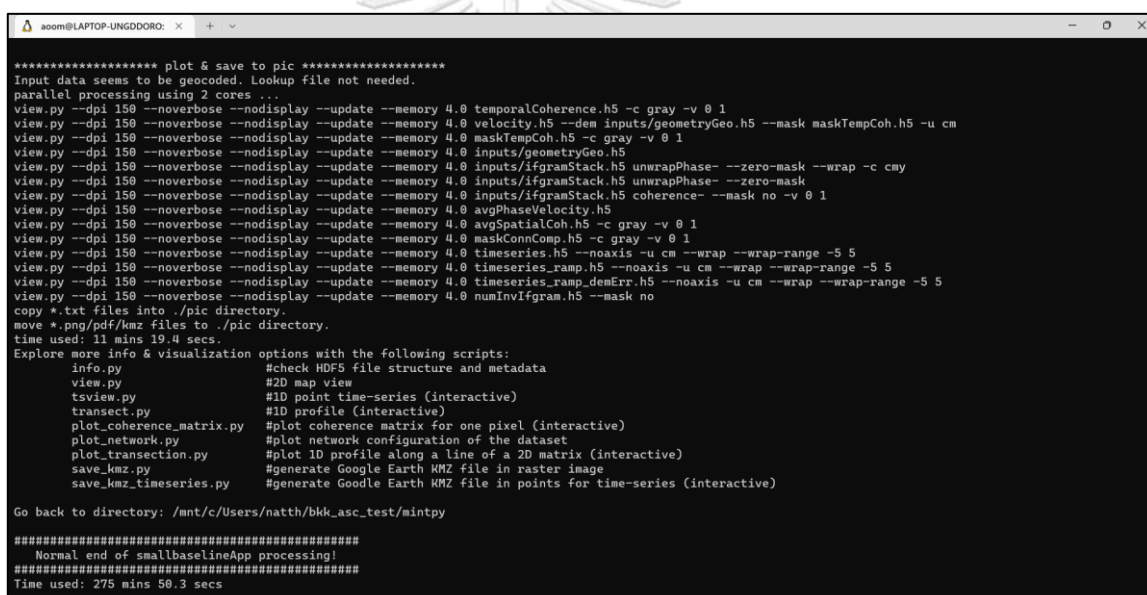
3.3.2.5.4 Quick overview เป็นการประเมินและแสดงผลลัพธ์แบบรวดเร็ว

- 3.3.2.5.5 Phase-unwrapping error correction เป็น การ แก้ไข ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทำ Unwrapping หรือเป็นการตัดจุดภาพที่มีปัญหา
- 3.3.2.5.6 Network inversion เป็นขั้นตอนในการคำนวณข้อมูลการเคลื่อนตัวแบบสะสม (Cumulative Displacement) วิธีการถ่วงน้ำหนักข้อมูลแบบ Weighted Least Squares (WLS) แต่ข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ได้มานี้ยังมีค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ ปะปนมาด้วย จึงจำเป็นต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนก่อน
- 3.3.2.5.7 Correct local oscillator drift ขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในข้อมูลจากดาวเทียม Envisat เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ภาพจากดาวเทียม Sentinel-1 จึงสามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้
- 3.3.2.5.8 Correct Solid Earth Tide เป็นค่าแก้การเคลื่อนตัวที่เกิดจากแรงหมุนของโลก รวมไปถึงแรงโน้มถ่วงจากดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ที่มีผลทำให้แผ่นดินเกิดการเคลื่อนตัว
- 3.3.2.5.9 Tropospheric delay correction เป็น การ แก้ไข ค่าคลาดเคลื่อนของระบบเรดาร์ซึ่งได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศ Troposphere
- 3.3.2.5.10 Phase deramping ขั้นตอนขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวงโคจรของดาวเทียม
- 3.3.2.5.11 Topographic residual (DEM error) correction เป็นการขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่จากข้อมูลความสูงภูมิประเทศ (DEM) ที่ใช้
- 3.3.2.5.12 Phase residual RMS for noise evaluation จะเป็นการคำนวณ RMSE ของค่าเฟสของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เหลืออยู่ จากนั้น MintPy จะเลือกค่า RMSE ต่ำสุดเป็นค่าอ้างอิงค่าคลาดเคลื่อนที่มี RMSE เกินค่าอ้างอิงจะไม่ถูกรวมเข้าไปในขั้นตอนการประมาณค่าการเคลื่อนตัว
- 3.3.2.5.13 Change reference date เลือกวันที่อ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ไฟล์อนุกรมเวลาของเฟสทั้งหมดมีการเคลื่อนตัวเป็นศูนย์
- 3.3.2.5.14 Velocity เป็นการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 3.3.2.5.15 Geocoding

3.3.2.5.16 Output to Google Earth format บันทึกผลลัพธ์ในไฟล์ kmz

3.3.2.5.17 Save to HDF-EOS5 format บันทึกผลลัพธ์ลงในไฟล์ hdf5

นอกจากนี้ ถ้าหากผู้ใช้ไม่ต้องการพิมพ์คำสั่งทุกขั้นตอนสามารถใช้การพิมพ์คำสั่งเพียงครั้งเดียวให้ซอฟต์แวร์ประมวลได้ เพื่อเป็นการลดข้อผิดพลาดหรือข้ามบางขั้นตอนไปเนื่องจากทุกขั้นตอนมีความสำคัญมาก ขาดขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งไปก็อาจได้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดเช่นกัน ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่งเป็นดังรูปที่ 17 ส่วนผลลัพธ์จากการประมวลผลจะรวบรวมไว้ในโฟลเดอร์ mintpy และโฟลเดอร์ pic ดังรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ โดยสามารถศึกษาการใช้งานซอฟต์แวร์ MintPy โดยละเอียดได้ในส่วนของภาคผนวก



```

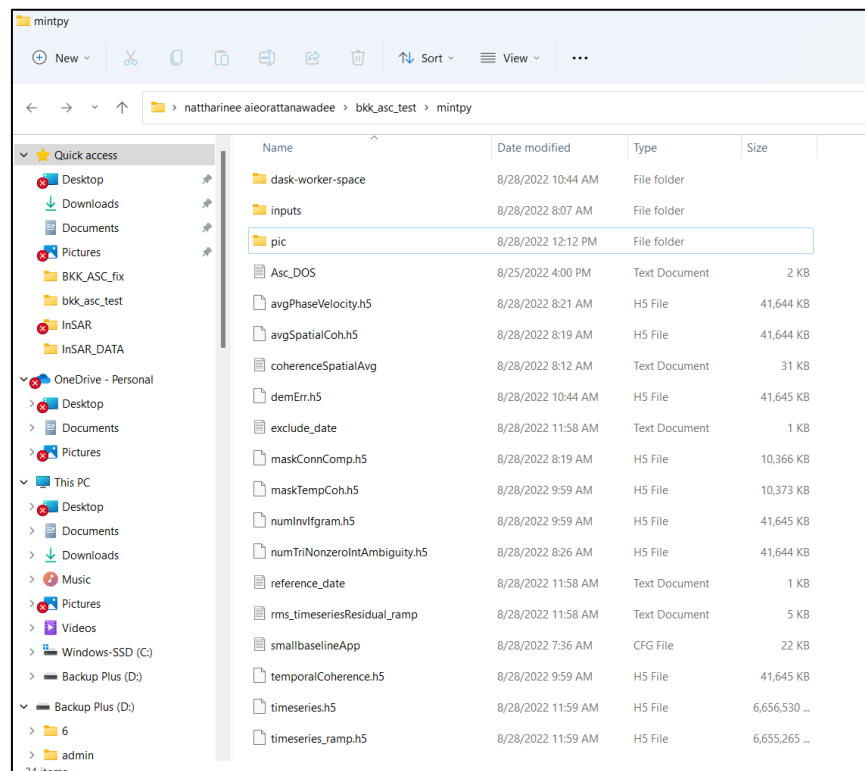
***** plot & save to pic *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
parallel processing using 2 cores ...
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 temporalCoherence.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 velocity.h5 --dem inputs/geometryGeo.h5 --mask maskTempCoh.h5 -u cm
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 maskTempCoh.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/geometryGeo.h5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 unwrapPhase- --zero-mask --wrap -c cm
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 unwrapPhase- --zero-mask
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 coherence- --mask no -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 avgPhaseVelocity.h5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 avgSpatialCoh.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 maskConnComp.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries_ramp.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries_ramp_demErr.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 numInvIfgram.h5 --mask no
copy *.txt files into ./pic directory.
move *.png/pdf/kmz files to ./pic directory.
time used: 11 mins 19.4 secs.
Explore more info & visualization options with the following scripts:
info.py #check HDF5 file structure and metadata
view.py #2D map view
tsview.py #1D point time-series (interactive)
transect.py #1D profile (interactive)
plot_coherence_matrix.py #plot coherence matrix for one pixel (interactive)
plot_network.py #plot network configuration of the dataset
plot_transection.py #plot 1D profile along a line of a 2D matrix (interactive)
save_kmz.py #generate Google Earth KMZ file in raster image
save_kmz_timeseries.py #generate Google Earth KMZ file in points for time-series (interactive)

Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/bkk_asc_test/mintpy

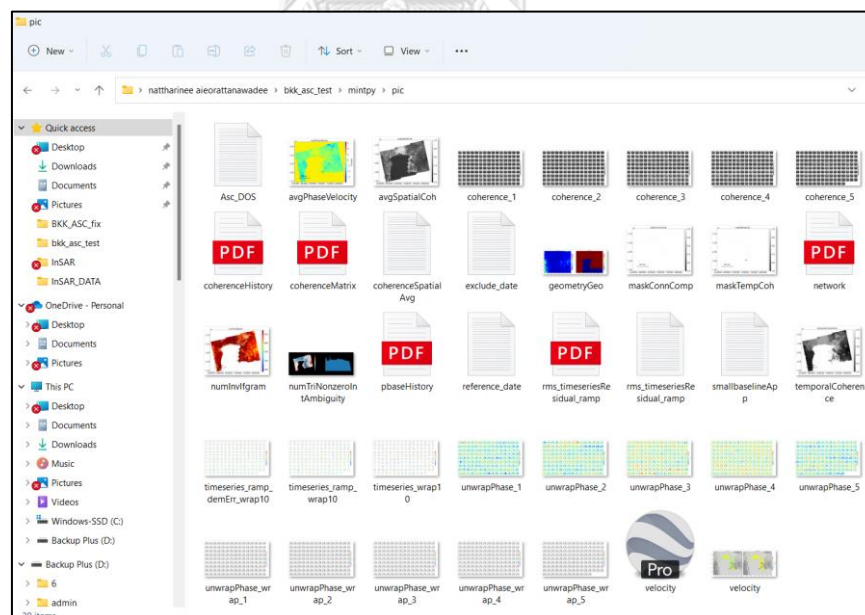
*****
Normal end of smallbaselineApp processing!
*****
Time used: 275 mins 50.3 secs

```

รูปที่ 17 หน้าจอการประมวลผลใน Terminal เมื่อเสร็จสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 18 โพลเดอร์ mintpy เก็บไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล

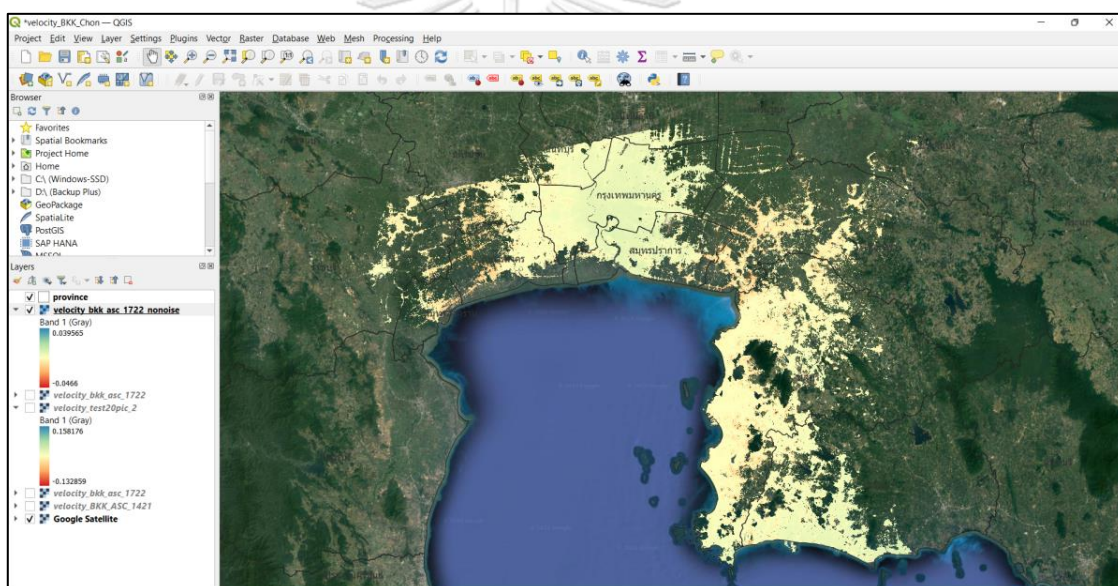


รูปที่ 19 โพลเดอร์ pic เก็บรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล

3.3.2.6 หลังจากการแปลงค่าพิกัด (gdal_translate) สำหรับไฟล์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวแบบอนุกรมเวลา (ไฟล์ velocity.h5)

ก่อนการแปลงค่าพิกัดจะเริ่มด้วยการกำจัดส่วนที่เป็นพื้นที่น้ำหรือไฟล์ maskTempCoh.h5 ออกก่อน โดยใช้การรัน script ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยจะต้องนำ script ไว้ในโฟลเดอร์เดียวกันกับข้อมูล velocity.h5 และ maskTempCoh.h5

หลังจากการกำจัดข้อมูลที่ไม่ต้องการออกแล้ว เนื่องจากไฟล์ velocity.h5 ที่ได้นั้นเป็นภาพ subset และยังไม่ได้กำหนดค่าพิกัดทำให้เมื่อนำภาพไปเปิดจะไม่อยู่บนตำแหน่งที่แท้จริงของภาพ ต้องดำเนินการแปลงค่าพิกัดเสียก่อนด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ OSGeo4W shell ที่มาพร้อมกับโปรแกรม QGIS และหลังจากแปลงค่าพิกัดแล้ว สามารถเปิดผลลัพธ์ผ่านโปรแกรม QGIS ได้ ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงค่าพิกัด เปิดด้วยโปรแกรม QGIS

3.3.3 ขั้นตอนประเมินผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

เนื่องจากค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราการเคลื่อนตัวที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลายังคงเป็นการเคลื่อนตัวในทิศทางที่ระบบเรดาร์ตรวจวัด (Line-of-sight, LOS) ทำให้จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อแปลงข้อมูลผลลัพธ์ให้เป็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้งอย่างเดียว โดยใช้สมการที่ 6

$$d_{ver} = \frac{d_{LOS}}{\cos(\theta)} \quad [6]$$

โดย θ หมายถึง มุมระหว่างทิศทางที่เซ็นเซอร์ดาวเทียมมองลงมากับเส้นตั้งฉากกับผิวโลก หรือ Incidence angle ซึ่งภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ที่ใช้ในงานวิจัยจะมีค่ามุม Incidence angle อยู่ที่ประมาณ $29.1^\circ - 46.0^\circ$

หลักจากการคำนวณได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งแบบอนุกรมเวลา แล้วจะทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ดังกล่าวข้อต่อไป

3.4.1 ศึกษาผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

เป็นการศึกษาภาพรวมของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลทั้งในรูปแบบแรสเตอร์ และเวกเตอร์ จากนั้นจัดแสดงเป็นแผนที่อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา ทั้งในวงโคจรขาขึ้น ระยะเวลา ค.ศ. 2017 - 2022 และในวงโคจรขาลง ระยะเวลา ค.ศ. 2018 - 2022 ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3.4.2 คัดเลือกตัวอย่างพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

3.4.2.1 ผู้วิจัยพิจารณาคัดเลือกพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูงจากภาพรวมของผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแล้วทำการสร้างจุดที่ต้องการศึกษา (point) ซึ่งเป็นจุดเดียวกันทั้งในข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและในวงโคจรขาลง

3.4.2.2 จากนั้นทำการกำหนดรัศมี (Buffer) ออกไป 300 ม. จากจุดที่ต้องการศึกษาแล้วเฉลี่ยค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาที่อยู่ภายในรัศมี

3.4.2.3 บันทึกค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาและค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินของแต่ละพื้นที่ไว้ในรูปแบบไฟล์ xlsx โดยเก็บข้อมูลเรียงตามวันที่ที่มีการบันทึกข้อมูลจากดาวเทียม

3.4.2.4 ทำการหารระดับความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นและข้อมูลวงโคจรขาลงโดยที่ชุดข้อมูลทั้งสองมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ดังสมการที่ 7 โดยผลลัพธ์จากการคำนวณจะถูกนำมาใช้อธิบายทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง +1

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad [7]$$

โดยที่ r หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

x หมายถึง ค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาขึ้น

\bar{x} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาขึ้น

y หมายถึง ค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาลง

\bar{y} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาลง

3.4.2.5 จัดแสดงในรูปแบบกราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา ทั้งในวงโคจรขาขึ้นและขาลง โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) จากนั้นทำการอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้

3.4.3 ประเมินประสิทธิภาพร่วมกับข้อมูลสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station)

3.4.3.1 ดำเนินการกำหนดรัศมี (Buffer) ออกไป 300 ม. จากตำแหน่งพิกัดสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง

3.4.3.2 เฉลี่ยค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาที่อยู่ภายในรัศมีและบันทึกข้อมูลที่ได้ในรูปแบบ xlsx

3.4.3.3 จัดแสดงในรูปแบบแผนที่จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา ทั้งในวงโคจรขาขึ้นและขาลง และ กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.)

3.4.3.4 จากนั้นทำการทดสอบทางสถิติ t-test ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลร่วมกับข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง ดังสมการที่ 8 ที่ค่าระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วทำการอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้

$$t = \frac{v_{InSAR} - v_{CORS}}{\sqrt{(\sigma_{InSAR})^2 + (\sigma_{CORS})^2}} \quad [8]$$

โดย v_{InSAR} หมายถึง ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์ในงานวิจัย

σ_{InSAR} หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราการเคลื่อนตัวที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์

v_{CORS} หมายถึง ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station)

และ σ_{CORS} หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราการเคลื่อนตัวจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียดข้อมูลของสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station)

ลำดับ	สถานี	ตำแหน่งที่ตั้ง	อัตราการเคลื่อนตัว (มม./ปี)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (มม./ปี)
1	DPT9	กรมโยธาธิการและผังเมือง จ.กรุงเทพมหานคร	-6.21	1.5
2	SBKK	กรมแผนที่ทหาร จ.กรุงเทพมหานคร	-4.65	1.4
3	BPLE	สำนักงานที่ดิน จ.สมุทรปราการ	-3.75	1.6
4	PKKT	สำนักงานที่ดิน จ.นนทบุรี	-4.17	1.6
5	KTBN	สำนักงานที่ดิน จ.สมุทรสาคร	-6.69	1.7
6	NKPT	สำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จ.นครปฐม	7.09	1.7
7	CCSO	สำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จ.ฉะเชิงเทรา	6.61	1.7

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

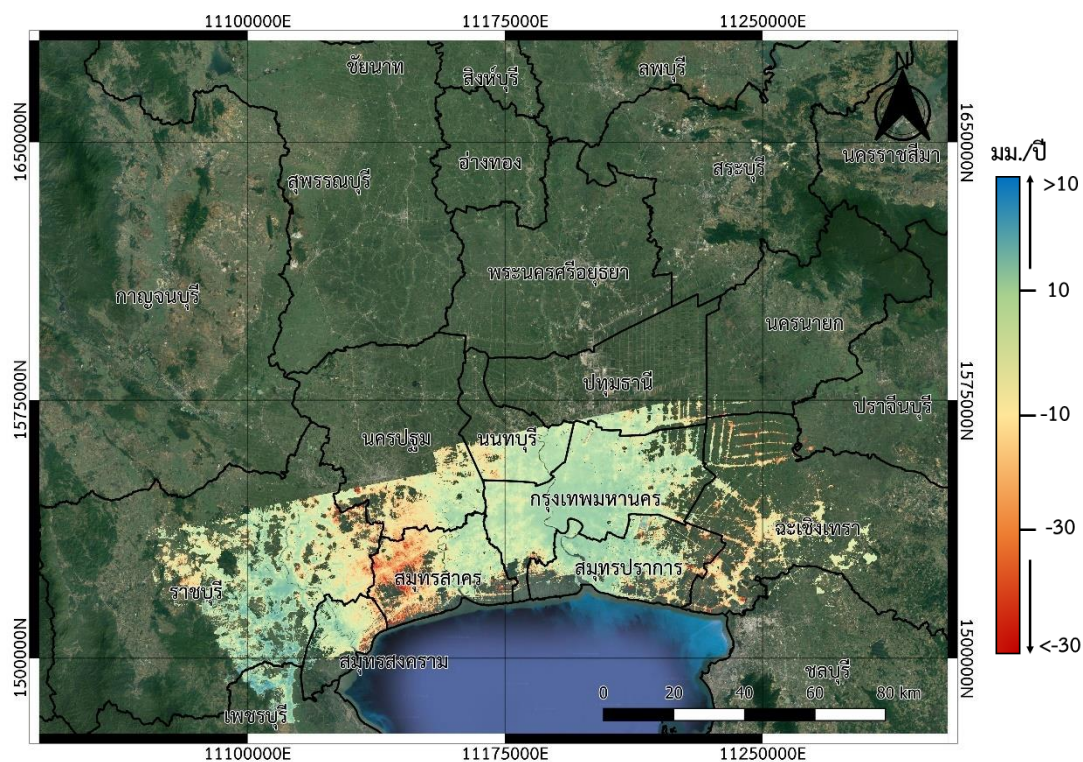
4.1 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

การประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลาด้วยเทคนิค Small Baseline โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending Data) จากวันที่ 23 มีนาคม ค.ศ. 2017 ถึง 22 ธันวาคม ค.ศ. 2022 ระยะเวลา 6 ปี จำนวน 169 ภาพ และในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending Data) ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม ค.ศ. 2018 ถึง 28 สิงหาคม ค.ศ. 2022 ระยะเวลา 5 ปี จำนวน 219 ภาพ ครอบคลุมจังหวัดในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออก ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี นครปฐม สมุทรสาคร สมุทรปราการ นครนายก พระนครศรีอยุธยา สระบุรี สุพรรณบุรี ลพบุรี กาญจนบุรี ชลบุรี ระยองและฉะเชิงเทรา

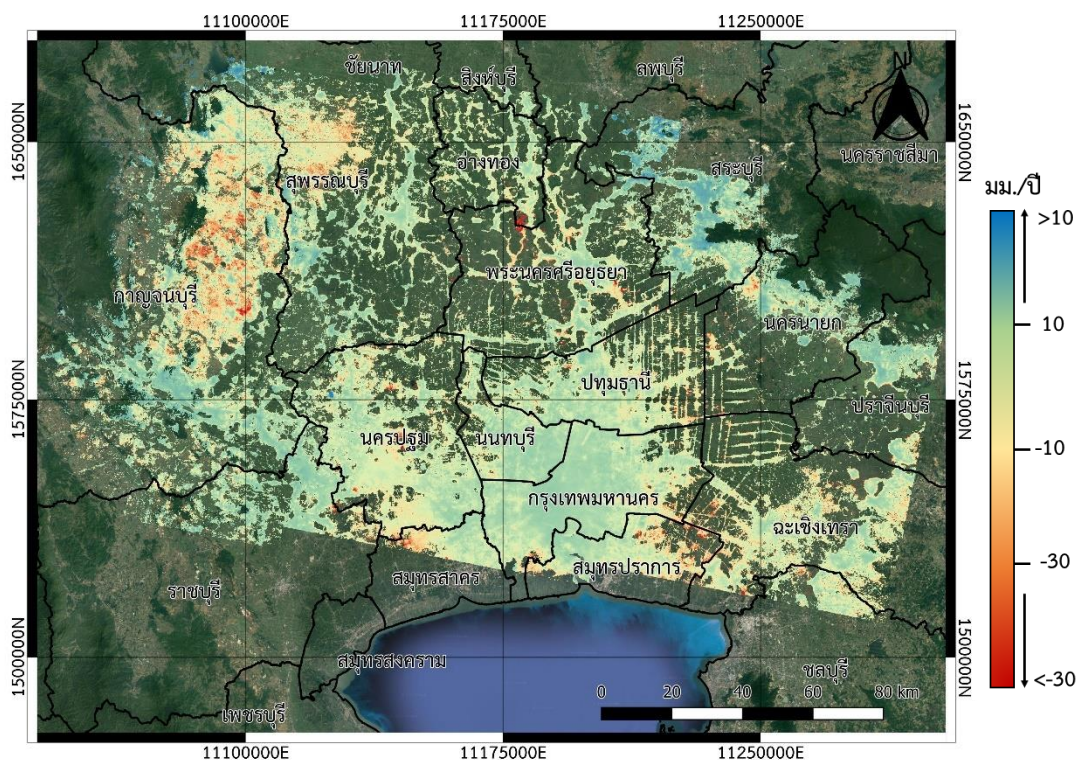
ในขั้นตอนการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy มีการกำหนดจุดอ้างอิง (Reference Point) หรือหมายถึงการกำหนดให้เป็นจุดที่มีการเคลื่อนตัวเท่ากับศูนย์เนื่องจากการผลลัพธ์จากการประมวลผลการเคลื่อนตัวด้วยเทคนิคอินซาร์เป็นในรูปแบบสัมพัทธ์ (Relative) เท่านั้น โดยกำหนดที่สถานี CUSV ที่ทราบค่าระดับความสูงจากสถานีอ้างอิงค่าปกติแบบต่อเนื่อง (CORS station) ละติจูด $13^{\circ} 44' 9.2898''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 32' 2.1228''$ ตั้งอยู่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy จัดแสดงผ่านทางโปรแกรม QGIS บนแผนที่หลัก Google Satellite ในวงโคจรขาขึ้น รูปที่ 21 และในวงโคจรขาลง รูปที่ 22 ตรวจพบค่าอัตราการเคลื่อนตัวอยู่ในช่วงน้อยกว่า -30 ถึงมากกว่า 10 มม./ปี โดยสีแดง หมายถึง ลักษณะของแผ่นดินที่เคลื่อนที่ห่างจากดาวเทียมซึ่งในบริเวณพื้นที่ศึกษาสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่ามาจากการทรุดตัว ไหลระดับไปจนถึงสิ้นน้ำเงิน หมายถึง ลักษณะของแผ่นดินที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ดาวเทียมหรือหมายถึงบริเวณที่มีค่าการทรุดตัวเล็กน้อย โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองชุดข้อมูลอยู่ในช่วง 0 ถึง 2.8 มม./ปี ดังรูปที่ 23 และรูปที่ 24 ตามลำดับ จากผลลัพธ์ข้อมูลทั้งสองชุดภาพที่มีการบันทึกภาพและประมวลผลเป็นอิสระต่อกัน จะสังเกตได้ว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ค่าอัตราการเคลื่อนตัวที่ได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงได้ แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยในบางพื้นที่ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามา ทิศทางการมองของดาวเทียมหรือสภาพอากาศขณะบันทึกภาพ

ผลลัพธ์จากการประมวลผลแสดงให้เห็นว่าพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีค่าอัตราการทรุดตัวค่อนข้างคงที่ และพบพื้นที่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวสูงบริเวณกรุงเทพฝั่งตะวันตก อย่างในเขตบางขุนเทียน, เขตทุ่งครุและบางพื้นที่ของเขตบางบอน มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 35 มม./ปี ส่วนบริเวณกรุงเทพฝั่งตะวันออกพบพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูง ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึงมากกว่า 40 มม./ปี

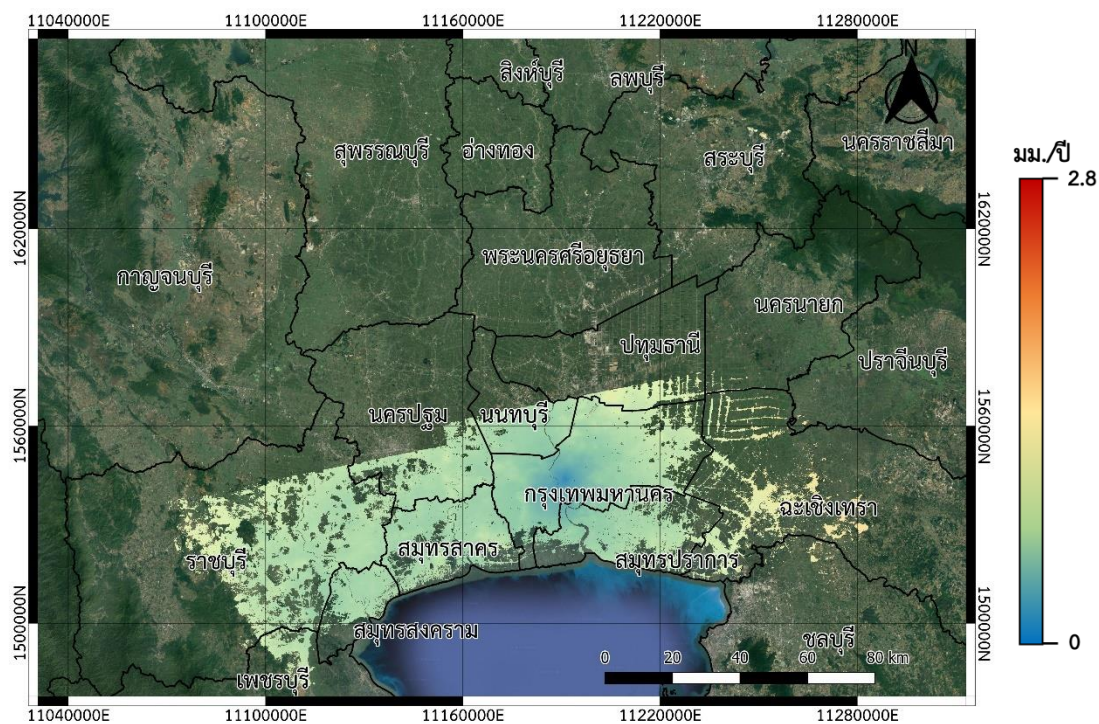
อย่างเช่น เขตลาดกระบัง เขตหนองจอก เขตสะพานสูง เขตสายไหมและเขตดอนเมือง นอกจากนี้ยังพบพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินในอนาคตเพิ่มเติม เช่น ในบางพื้นที่ของเขตห้วยขวาง มีค่าอัตราการทรุดตัวประมาณ 4 ถึง 18 มม./ปี



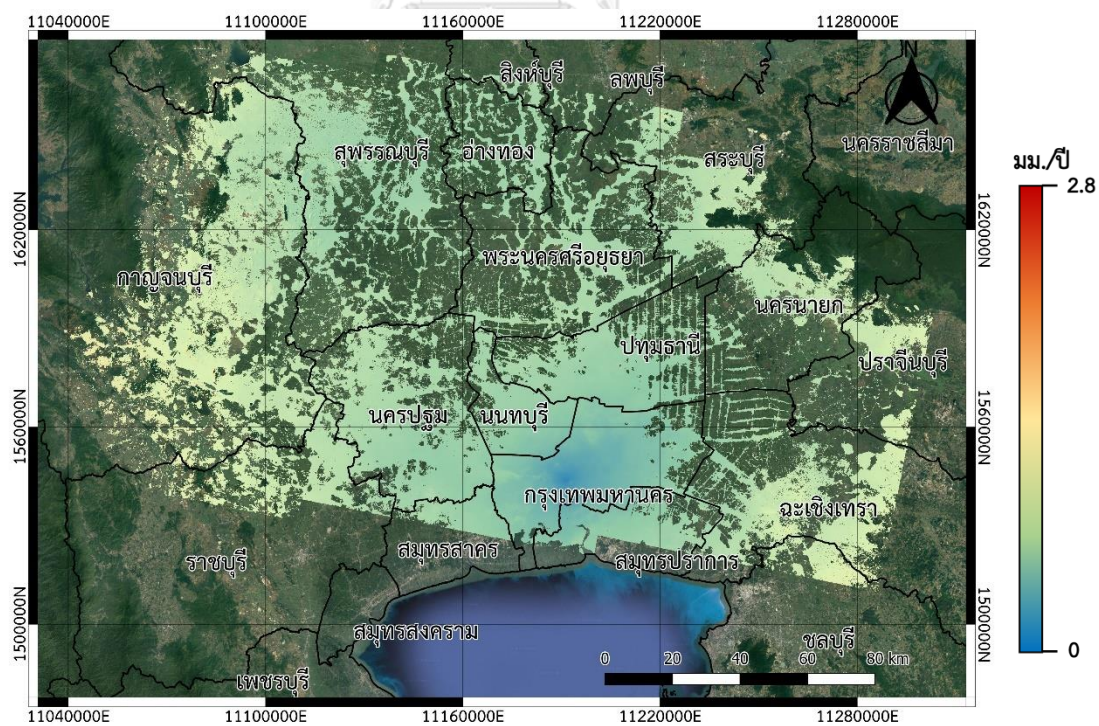
รูปที่ 21 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระยะเวลา ค.ศ. 2017 – 2022 โดยเฉดสีแดง หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูง ไล่ระดับไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวน้อย



รูปที่ 22 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) ชุดข้อมูลลงโคจรขาลง (Descending) พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระยะเวลา ค.ศ. 2018 – 2022 โดยเฉดสีแดง หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูง ไ้ระดับไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัวน้อย



รูปที่ 23 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน (มม./ปี)
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ระยะเวลา ค.ศ. 2017 – 2022



รูปที่ 24 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน (มม./ปี)
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) ระยะเวลา ค.ศ. 2018 – 2022

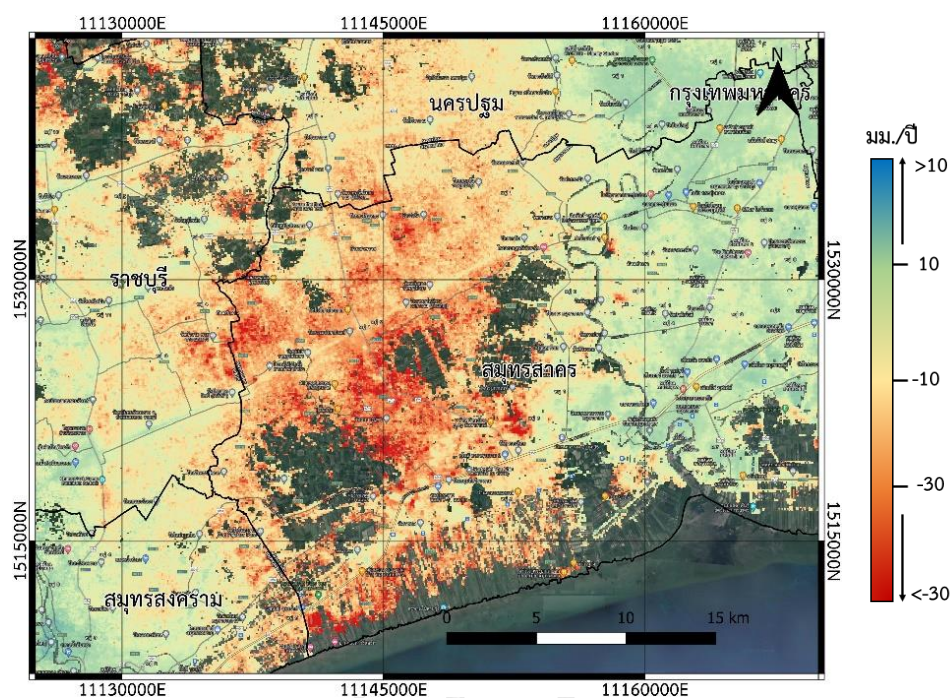
ซอฟต์แวร์ MintPy ที่ใช้ในการประมวลผลในงานวิจัยมีขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของผลลัพธ์ซึ่งสัมพันธ์กับค่าระดับคุณภาพของข้อมูล (Coherence) โดยจะมีการตัดจุดภาพที่มีค่าเฉลี่ย Coherence ต่ำออก ตรวจสอบจุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน หน่วยมม./ปี ในวงโครงขาขึ้นทั้งหมด 898,466 จุด และในวงโครงขาลงทั้งหมด 2,282,084 จุด ซึ่งการแบ่งภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ทำให้ในชุดข้อมูลวงโครงขาลงครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมากกว่าในชุดข้อมูลวงโครงขาขึ้น และเมื่อพิจารณาผลลัพธ์จะพบว่าในบริเวณพื้นที่ที่มีความเป็นเมืองจะมีความหนาแน่นของจุดผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวมากกว่าพื้นที่ที่ไม่เป็นเมือง (Rural Area) โดยแต่ละจุดค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินสามารถเปิดตารางข้อมูลเชิงบรรยาย (Attribute Table) ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลความสูง (Height) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความสูง (V_STDEV) ข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (Velocity) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (V_STDEV) ค่าระดับคุณภาพ (Coherence) ค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน รูปแบบ 'Dปีเดือนวัน' เช่น D20170323 หมายถึงข้อมูล ณ วันที่ 23 มีนาคม ค.ศ. 2017 เป็นต้น พิกัด X หรือละติจูด (xcoord) และ พิกัด Y หรือลองจิจูด (ycoord) ดังรูปที่ 25

	CODE	HEIGHT	H_STDEV	VEL	V_STDEV	COHERENCE	EFF_AREA	D20170323	D20170404	D20170416	D20170428	D20170510	D20170522	D20170603
1	00000001	-26.84	0	-7.47	0.91	0.617	1	-10.27	13.27	1.70	-14.58	11.64	5.91	-37.98
2	00000002	-26.57	0	0.47	0.93	0.613	1	-8.95	14.75	1.69	-13.08	6.66	2.42	-39.22
3	00000003	-26.44	0	-5.84	0.9	0.601	1	-11.06	12.79	1.68	-12.41	11.78	3.42	-37.89
4	00000004	-26.45	0	-6.45	0.91	0.606	1	-11.49	9.05	0.37	-13.42	10.98	2.99	-37.63
5	00000005	-26.46	0	-4.24	0.92	0.631	1	-22.35	6.83	-1.29	-22.93	9.62	-10.92	-41.24
6	00000006	-24.19	0	-2.49	0.94	0.626	1	-15.36	13.26	5.59	-16.51	17.58	3.63	-33.45
7	00000007	-24.89	0	-0.26	0.92	0.651	1	-21.75	6.89	0.13	-20.65	11.56	-2.91	-39.64
8	00000008	-25.49	0	-6.85	0.94	0.609	1	-23.68	6.02	-4.81	-26.08	7.63	-9.86	-41.95
9	00000009	-26.04	0	-3.96	0.9	0.651	1	-5.76	10.09	2.47	-12.18	6.62	3.20	-37.64
10	0000000a	-25.93	0	-3.50	0.91	0.635	1	-7.14	10.64	0.29	-13.48	5.77	1.43	-38.82
11	0000000b	-25.29	0	-2.67	0.91	0.642	1	-14.53	13.08	4.07	-16.19	15.17	2.23	-38.49
12	0000000c	-25.87	0	-4.40	0.94	0.634	1	-6.60	10.21	0.69	-15.19	4.82	-3.74	-39.32
13	0000000d	-25.89	0	-6.23	0.91	0.619	1	-9.34	8.88	-1.49	-18.51	1.82	-3.02	-40.85
14	0000000e	-26.06	0	-4.63	0.92	0.642	1	-11.75	8.53	-3.39	-18.81	1.23	-3.19	-42.51
15	0000000f	-26.15	0	-4.44	0.91	0.642	1	-4.05	13.67	2.71	-13.33	8.02	2.98	-37.18
16	00000010	-26.23	0	-4.38	0.89	0.634	1	-7.20	12.58	-1.65	-16.37	6.56	4.63	-37.72
17	00000011	-24.73	0	-1.73	0.94	0.673	1	-17.72	13.16	5.43	-15.25	17.36	0.11	-35.99
18	00000012	-26.64	0	-3.89	0.91	0.638	1	-2.81	13.42	3.84	-10.73	9.32	4.50	-35.49
19	00000013	-26.62	0	-6.04	0.91	0.642	1	-9.69	7.74	-4.03	-16.60	5.86	-1.67	-38.60
20	00000014	-26.64	0	-6.59	0.92	0.63	1	-7.29	5.87	-1.08	-17.09	5.50	-1.59	-37.02
21	00000015	-27.15	0	-4.75	0.92	0.624	1	-1.64	9.61	2.43	-12.90	9.23	-0.65	-33.89
22	00000016	-27.00	0	-3.89	0.92	0.64	1	-5.57	5.84	1.59	-14.32	9.22	-3.02	-35.61
23	00000017	-26.95	0	-5.29	0.91	0.615	1	-10.68	4.35	-0.81	-16.16	5.75	-5.08	-38.23
24	00000018	-26.74	0	-6.00	0.91	0.636	1	-18.63	18.28	10.37	-15.23	15.85	6.44	-29.23

รูปที่ 25 ตัวอย่างตารางข้อมูลเชิงบรรยายของจุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ชุดข้อมูลวงโครงขาขึ้น ได้แก่ ค่าความสูง, ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน, ค่าระดับคุณภาพและค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

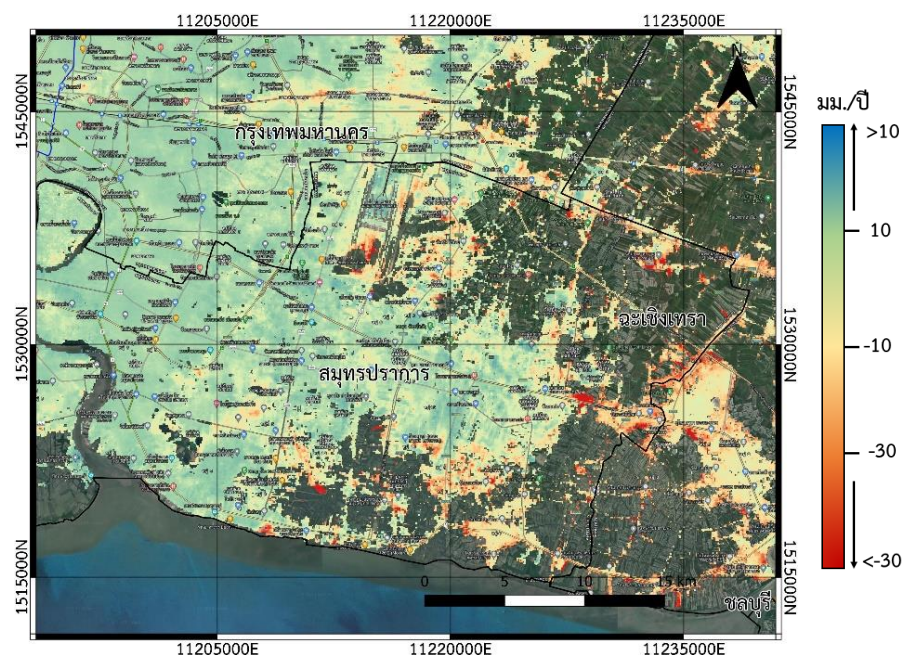
จากผลลัพธ์การประมวลผลค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาวิธี Small Baseline ในแง่ของการติดตาม (Monitoring) เมื่อนำมาพิจารณาสามารถระบุพื้นที่ที่พบการเคลื่อนตัวสูง ดังเช่น บริเวณอำเภอบ้านแพ้วและอำเภอมือง จังหวัดสมุทรสาคร ซึ่งประกอบไป

ด้วยพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร รวมไปถึงเป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ถนนที่มีการก่อสร้างและใช้เป็นเส้นทางการสัญจรของรถบรรทุก โดยพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวสูงพบค่า การทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินประมาณ 70 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 10 ถึงมากกว่า 35 มม./ปี ระยะเวลา 6 ปี ตั้งแต่ ค.ศ. 2017 – 2022 รวมไปถึงในพื้นที่ติดกับชายฝั่งทะเลพบอัตราการ เคลื่อนตัวสูงเช่นกัน แต่ด้วยขอบเขตของภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในการประมวลผลในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้ผลลัพธ์เฉพาะในวงโคจรขาขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 26

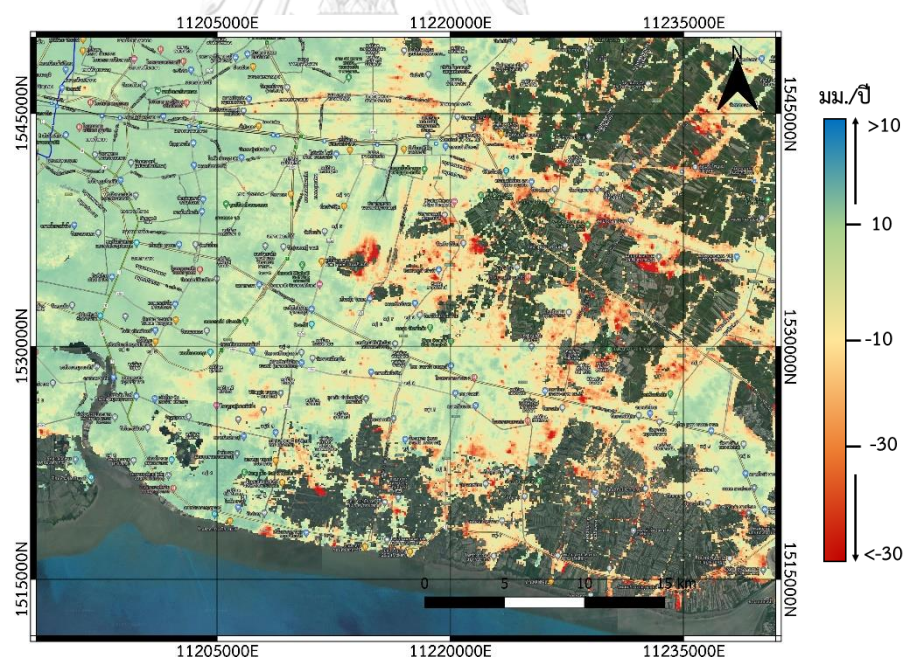


รูปที่ 26 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานี
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 - 2022

พื้นที่ปริมาณทลายอย่างในจังหวัดสุราษฎร์ธานีการตรวจพบแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูงใน อำเภอบางพลีและอำเภอบางเสาธงซึ่งติดกับเขตลาดกระบังและเขตประเวศ กรุงเทพมหานคร มีค่า อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน 3 ถึง 40 มม./ปี ทั้งในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลง ส่วน อำเภอบางบ่อที่ติดกับจังหวัดฉะเชิงเทรา ในข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 0 ถึง 35 มม./ปี ในข้อมูลวงโคจรขาลงมีค่าอยู่ที่ 10 ถึง 45 มม./ปี ซึ่งพื้นที่ที่พบการทรุดตัวสูงส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในบริเวณใกล้กับชายฝั่งทะเล รวมไปถึงเป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม สนามบินและ ท่าเรือ ดังในรูปที่ 27 และรูปที่ 28



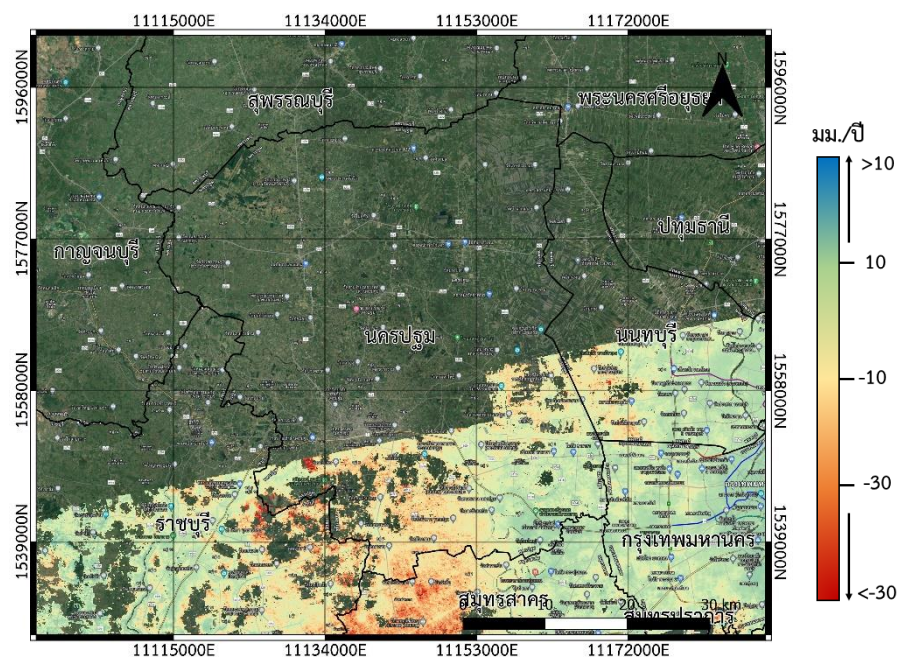
รูปที่ 27 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022



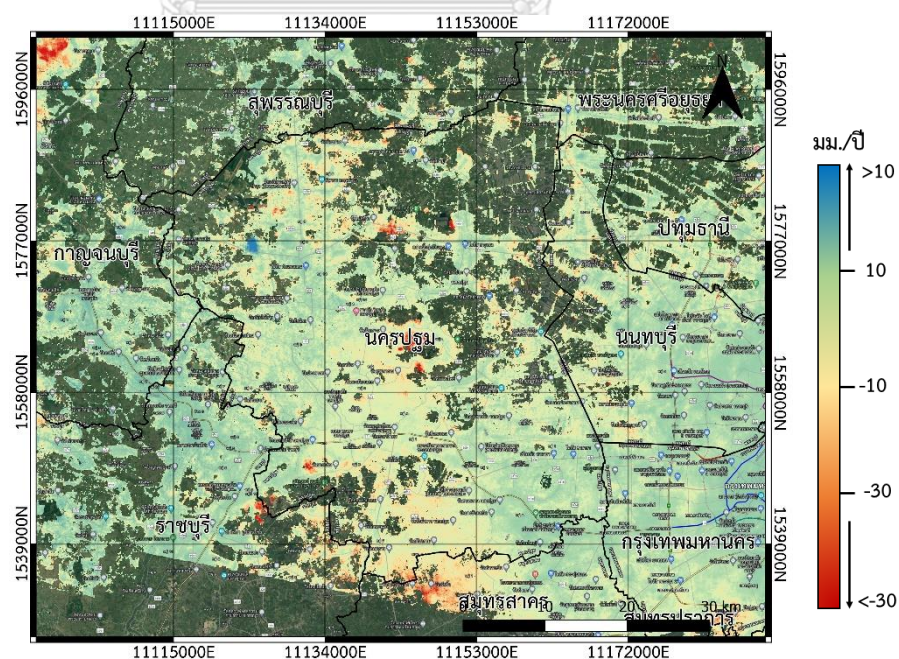
รูปที่ 28 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022

นอกจากนี้ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ผลลัพธ์จากการประมวลผลทั้งในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลง ดังรูปที่ 29 และ 30 พบบางส่วนของอำเภอเมืองและอำเภอสามปราชญ์ซึ่งติดกับจังหวัดสมุทรสาคร มีค่าอัตราการทรุดตัวในช่วงประมาณ 10 ถึง 20 มม./ปี ทั้งในสองวงโคจรและมี

แนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง โดยจากรูปที่ 30 จะเห็นว่าทางทิศเหนือของนครปฐม ในอำเภอ บางเลนและกำแพงแสนมีข้อมูลขาดหายไป โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมหนาแน่น สาเหตุเพราะมีค่า Coherence ต่ำ ทำให้ซอฟต์แวร์ MintPy มีการตัดจุดภาพบริเวณนี้ออกไป



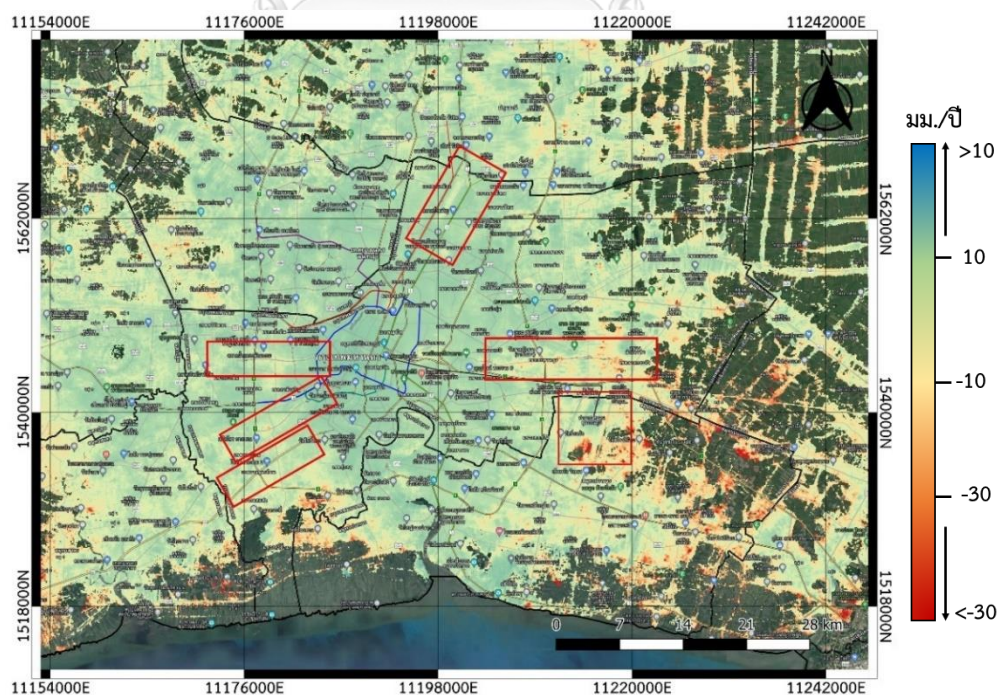
รูปที่ 29 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดนครปฐม
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (Ascending) ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022



รูปที่ 30 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (มม./ปี) บริเวณจังหวัดนครปฐม
ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (Descending) ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022

4.2 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

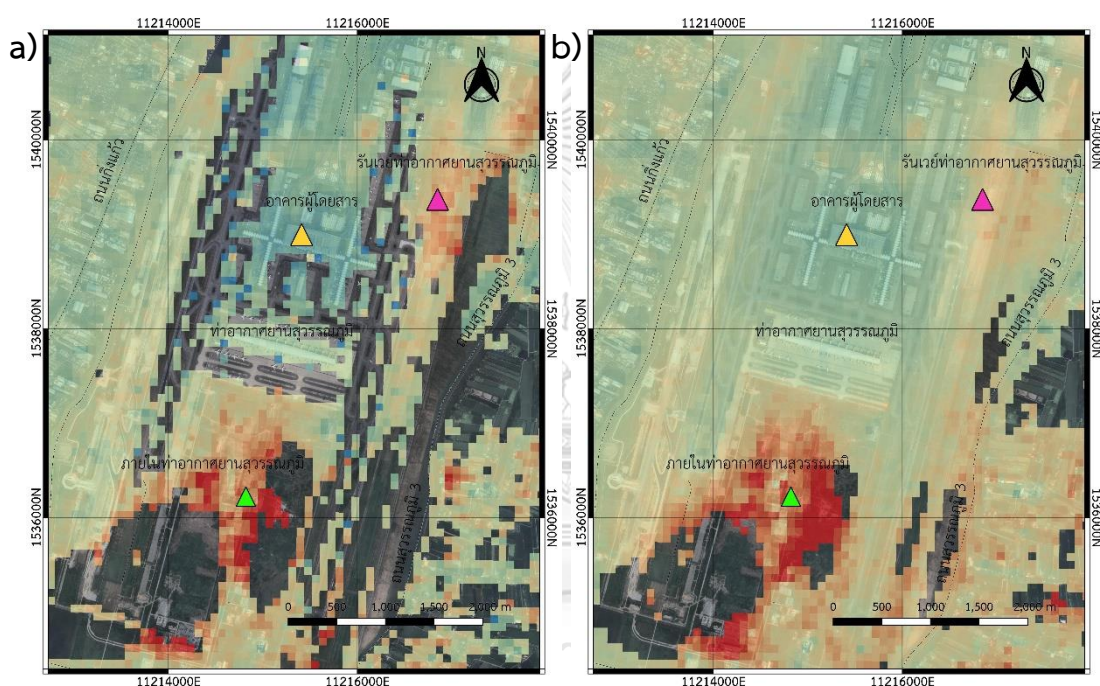
ในงานวิจัยได้มีการตรวจสอบและคัดเลือกบริเวณที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูงจากทั้งสองชุดข้อมูล บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ทำการกำหนดรัศมี (Buffer) ออกไป 300 ม. เนื่องจากค่าความละเอียดของจุดภาพที่ได้จากการประมวลผลมีขนาด 80×80 ม. ดังนั้นถ้าหากกำหนดรัศมีน้อยเกินไปจะทำให้จุดข้อมูลอัตราการทรุดตัวที่ได้มีจำนวนน้อยจนไม่เห็นแนวโน้มการทรุดตัว จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าจุดข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดินที่ได้ทั้งหมด 6 พื้นที่ ได้แก่ สนามบินสุวรรณภูมิ สนามบินดอนเมือง ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า ถนนกัลปพฤกษ์ ถนนพราหมณ์-พุทธมณฑลสาย 4 ย่านศูนย์การค้า และถนนพระราม 2 ดังในกรอบสี่เหลี่ยมรูปที่ 31 โดยจะอธิบายด้วยกราฟค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (Vertical displacement) หน่วยมิลลิเมตร จากนั้นตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวที่ประมวลผลได้เพื่อประเมินประสิทธิภาพ และความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยเลือกพิจารณาเป็นตำแหน่งเดียวกันในชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทั้งในวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลงที่เป็นอิสระต่อกันแล้วอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างสองชุดข้อมูล มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 โดยเข้าใกล้ค่าบวกหมายถึงข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน เข้าใกล้ค่าลบ หมายถึง ข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้าม และถ้าหากเท่ากับ 0 หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์กัน อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อย่อยถัดไป



รูปที่ 31 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยกรอบสีแดง หมายถึง พื้นที่คัดเลือกเพื่อศึกษาแนวโน้มการทรุดตัวในงานวิจัย

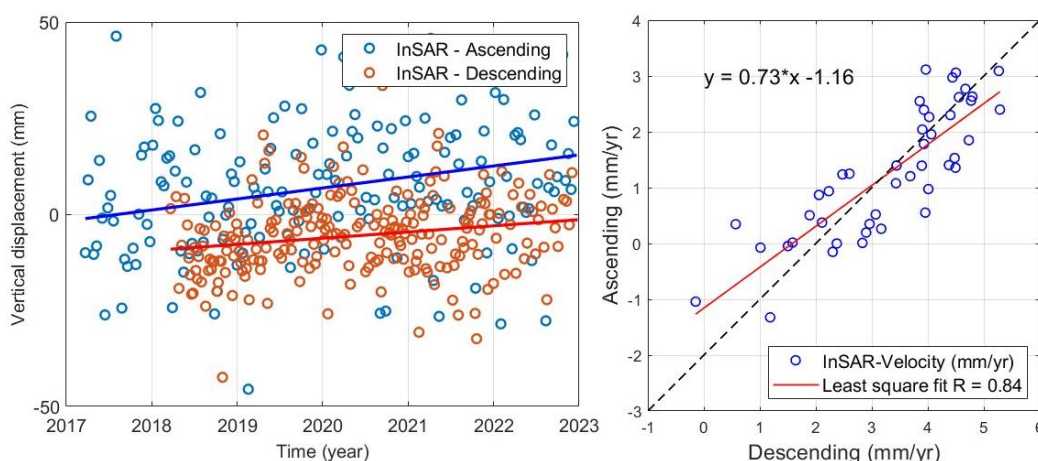
4.2.1 สนามบินสุวรรณภูมิ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

สนามบินสุวรรณภูมิ เป็นสนามบินที่ตั้งอยู่ที่ถนนเทพรัตนและทางพิเศษบูรพาวิถี ในเขตตำบลหนองปรือและตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ เป็นท่าอากาศยานที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยและมีสายการบินจำนวนมากที่สุด ดังนั้นจึงถือเป็นท่าอากาศยานหลักของประเทศไทย ในการติดตามการทรุดตัวในพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิจะพิจารณาทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ พื้นที่อาคารผู้โดยสาร (สามเหลี่ยมสีเหลือง) พื้นที่รันเวย์สนามบิน (สามเหลี่ยมสีชมพู) และอีกพื้นที่เป็นบริเวณที่พบค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดภายในสนามบินสุวรรณภูมิ (สามเหลี่ยมสีเขียว) ดังรูปที่ 32



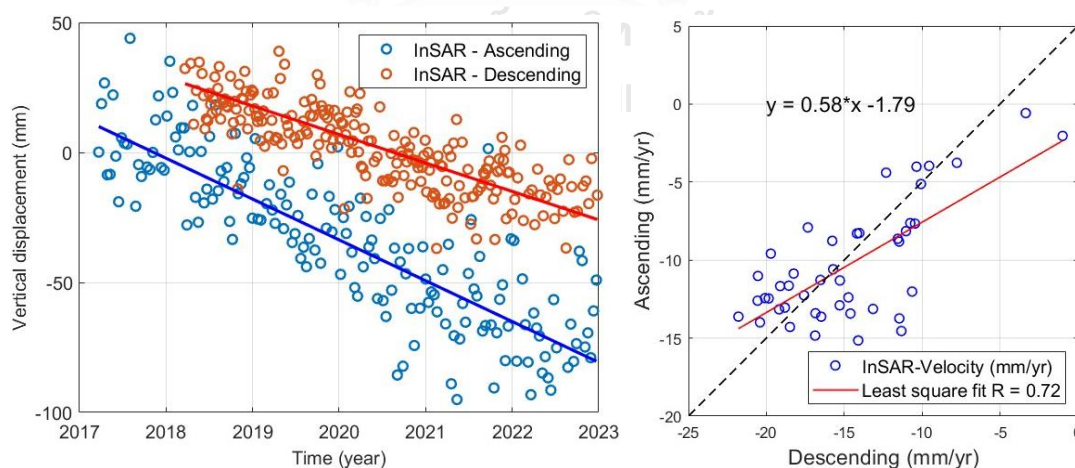
รูปที่ 32 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิ (a) ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (b) ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

พื้นที่อาคารผู้โดยสาร ในวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวประมาณ 14 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 มม./ปี ในวงโคจรขาลงมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ 8 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 5 มม./ปี และจะเห็นได้ว่ามีค่าการเคลื่อนตัวค่อนข้างคงที่ เพราะเป็นพื้นที่โครงสร้างอาคารทำให้มีการวางฐานรากในชั้นดินลึก โดยกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสองชุดข้อมูลมีค่า 0.84 ซึ่งบ่งบอกว่าชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 33



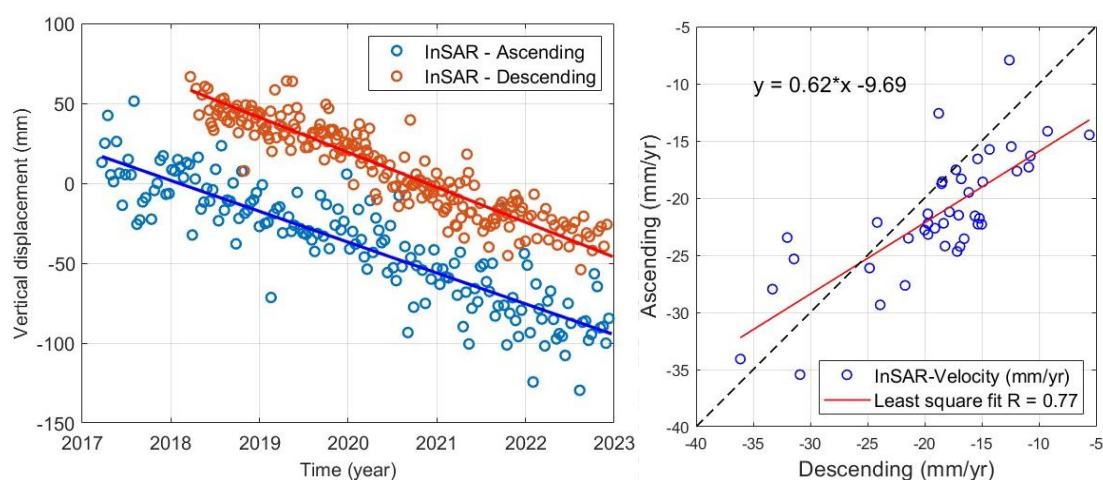
รูปที่ 33 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และ กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณอาคารผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ

ส่วนบริเวณรันเวย์สนามบินมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ 90 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในช่วง 0 ถึง 16 มม./ปี ส่วนวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดิน 48 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 2 ถึง 20 มม./ปี สาเหตุที่ค่าการทรุดตัวสูงอาจเพราะบริเวณพื้นที่รันเวย์มีการบินขึ้นและลงของเครื่องบินอยู่ตลอดเวลา ในขณะที่บริเวณอาคารผู้โดยสารมีแนวโน้มการทรุดตัวที่น้อยกว่าเนื่องจากเป็นอาคารทำให้มีการฝังโครงสร้างในชั้นดินที่ลึก ซึ่งค่าสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.84 ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณรันเวย์เครื่องบิน สนามบินสุวรรณภูมิ

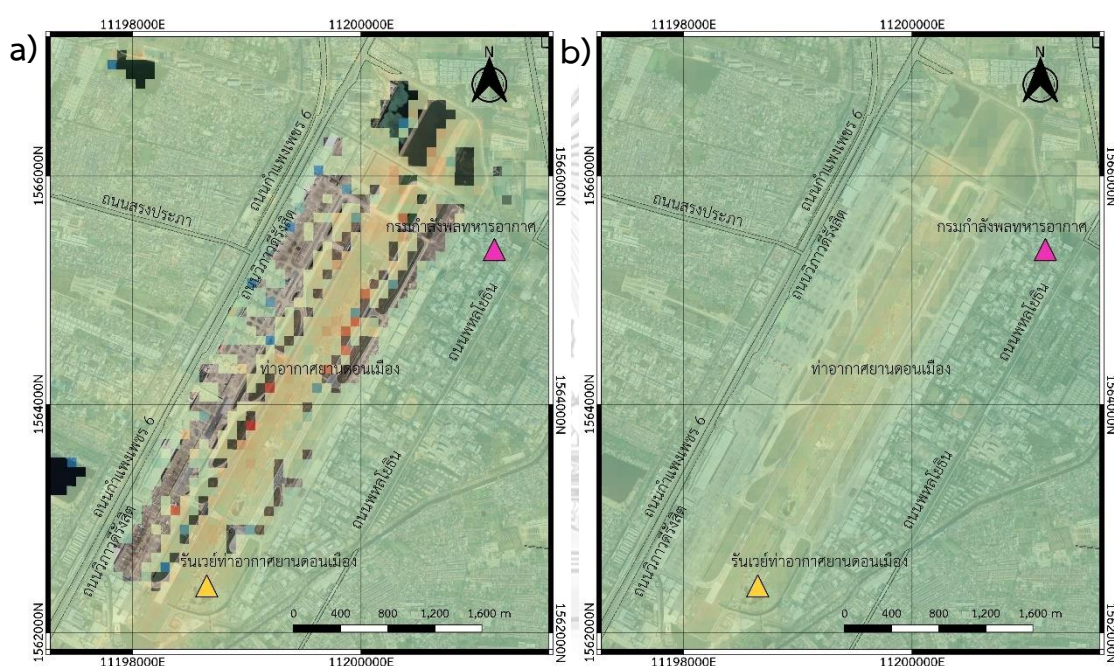
นอกจากนี้ยังตรวจพบพื้นที่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวสูงที่สุดในสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 110 มม. และพบค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 10 ถึง 35 มม./ปี ในวงโคจรขาขึ้น ส่วนชุดข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 102 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในช่วง 5 ถึง 35 มม./ปี และจะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสองชุดข้อมูลเท่ากับ 0.77 ดังรูปที่ 35



รูปที่ 35 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการเคลื่อนตัวสูงสุดภายในสนามบินสุวรรณภูมิ

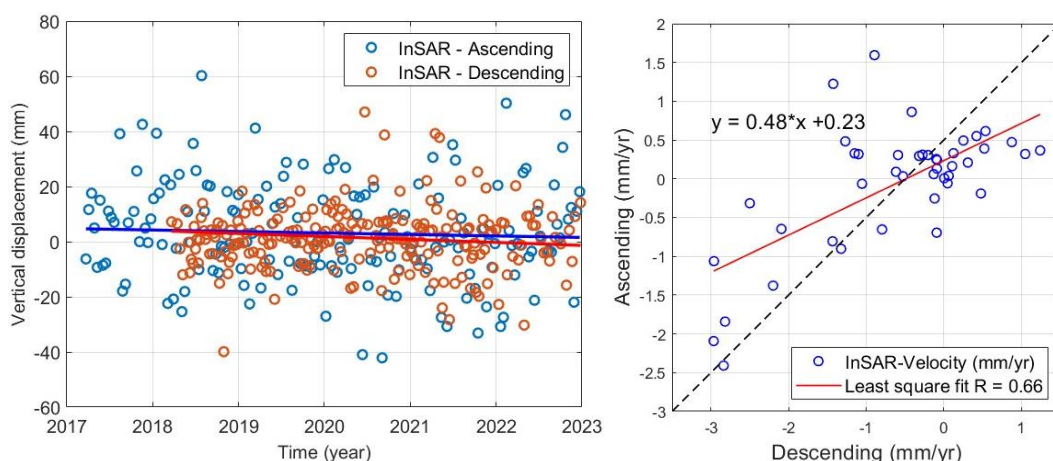
4.2.2 สนามบินดอนเมือง เขตดอนเมือง

พื้นที่สนามบินดอนเมือง ที่ตั้งอยู่บนถนนวิภาวดีรังสิต แขวงสนามบิน เขตดอนเมือง ทางตอนเหนือของกรุงเทพมหานคร โดยในงานวิจัยมีการคัดเลือก 2 พื้นที่ ได้แก่ บริเวณอาคารผู้โดยสาร แต่ในจุดข้อมูลในชุดวงโคจรขาขึ้นในพื้นที่นี้มีค่าระดับคุณภาพ (Coherence) ต่ำเลยถูกตัดออกไปจากในขั้นตอนการประมวลผลของซอฟต์แวร์ MintPy ทำให้ในงานวิจัยเลือกพื้นที่ที่กรมกำลังพลทหารอากาศที่อยู่ภายในสนามบินดอนเมืองแทน (สามเหลี่ยมสีชมพู) และอีกพื้นที่คือ บริเวณรันเวย์สนามบิน (สามเหลี่ยมสีเหลือง) ดังรูปที่ 36



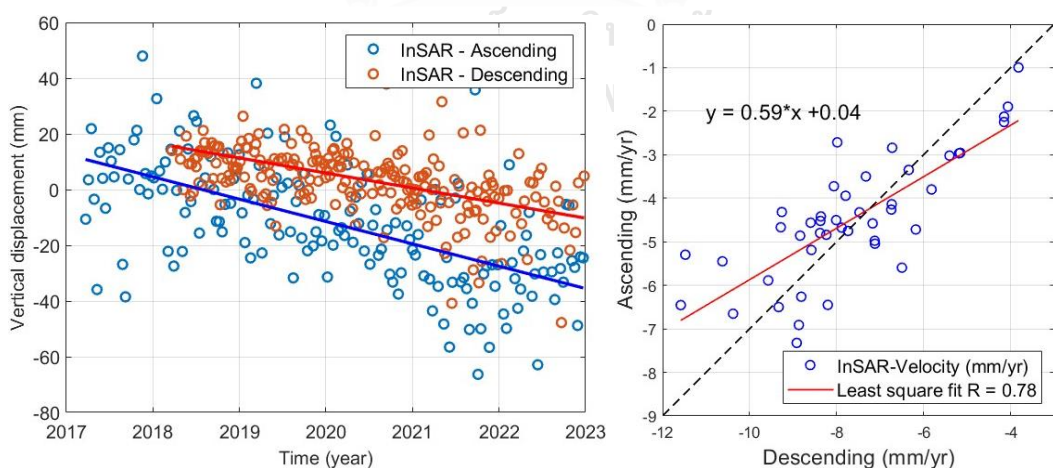
รูปที่ 36 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่สนามบินดอนเมือง (a) ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (b) ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

พื้นที่สนามบินดอนเมืองพบข้อมูลส่วนใหญ่มีแนวโน้มการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกัน โดยพื้นที่ที่กรมกำลังพลทหารอากาศที่อยู่ภายในสนามบินดอนเมือง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวอยู่ที่ 5 มม. และค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 มม./ปี ส่วนในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวอยู่ที่ 5 มม. และค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 3 มม./ปี โดยค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.69 ดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณกรมกำลังพลทหารอากาศภายในสนามบินดอนเมือง

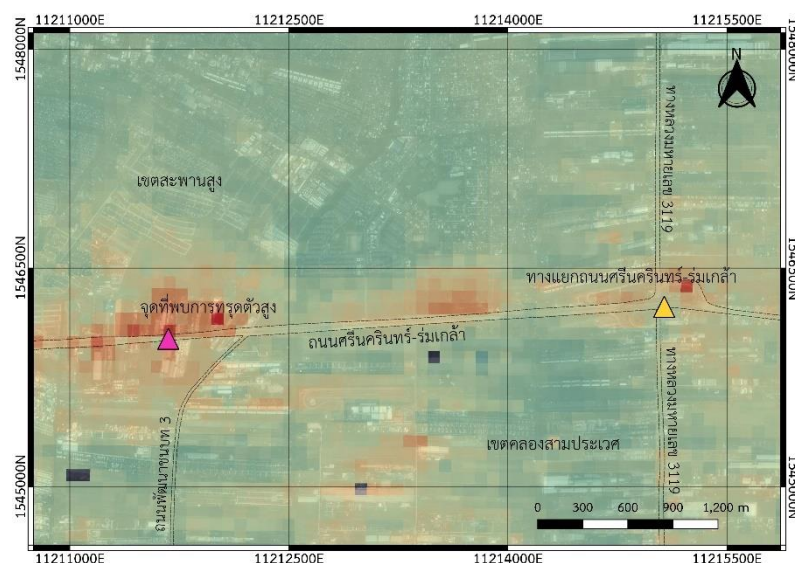
ส่วนในพื้นที่บริเวณรันเวย์สนามบินดอนเมือง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 45 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 1 ถึง 7 มม./ปี และในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 25 มม. มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4 ถึง 11 มม./ปี ซึ่งถ้าหากเปรียบเทียบกับสนามบินสุวรรณภูมิถือว่าพบการทรุดตัวที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาภาพรวมของค่าอัตราการทรุดตัวระหว่างสองชุดข้อมูลจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับหนึ่งโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.78 ดังรูปที่ 38



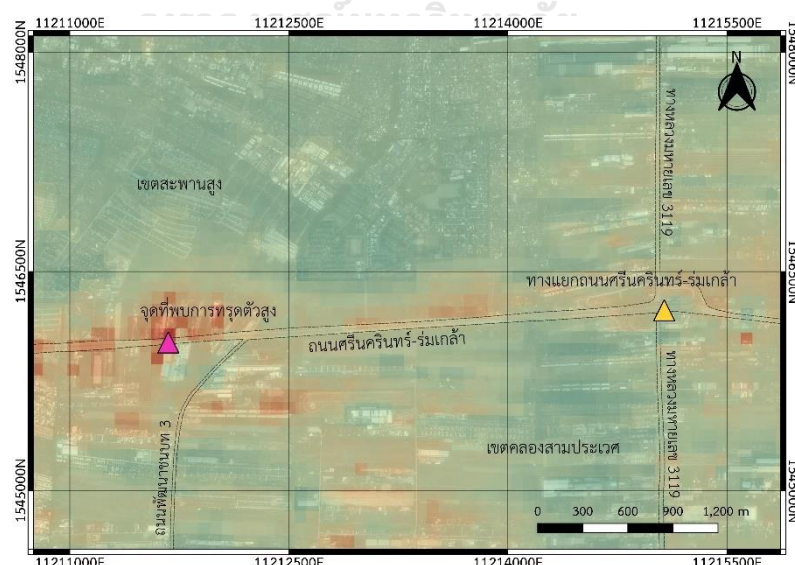
รูปที่ 38 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณรันเวย์เครื่องบิน สนามบินดอนเมือง

4.2.3 ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า เขตสะพานสูง

ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า ตั้งอยู่บริเวณกรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออก ในพื้นที่เขตสะพานสูง โดยมีการก่อสร้างปรับปรุงเส้นทางและขยายถนนเพื่อไม่ต้องผ่านแยกสัญญาณจราจร จากภาพรวมผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาจะพิจารณา 2 จุด คือบริเวณทางแยกยกระดับ (สามเหลี่ยมสีเหลือง) และบริเวณที่พบการทรุดตัวสูง (สามเหลี่ยมสีชมพู) ดังรูปที่ 39 ในวงโคจขาขึ้น และรูปที่ 40 ในวงโคจรขาลง

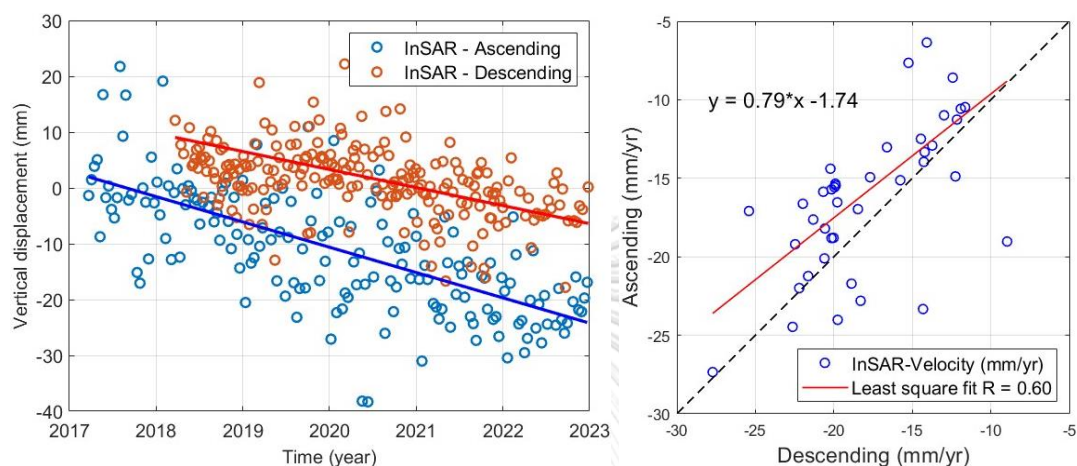


รูปที่ 39 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า
ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน



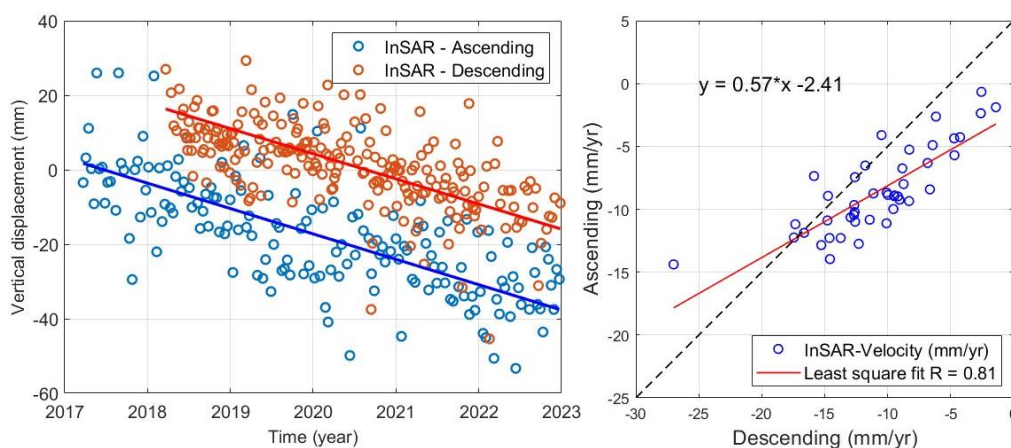
รูปที่ 40 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า
ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

พื้นที่แรกที่มีการทรุดตัวที่น่าสนใจคือ ทางแยกระดับถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้าตัดกับทางหลวงหมายเลขที่ 3119 จากผลลัพธ์ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 100 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9 ถึง 28 มม./ปี ส่วนในวงโคจรขาลงมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 76 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยระหว่าง 3 ถึง 28 มม./ปี โดยค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.6 ดังรูปที่ 41



รูปที่ 41 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า

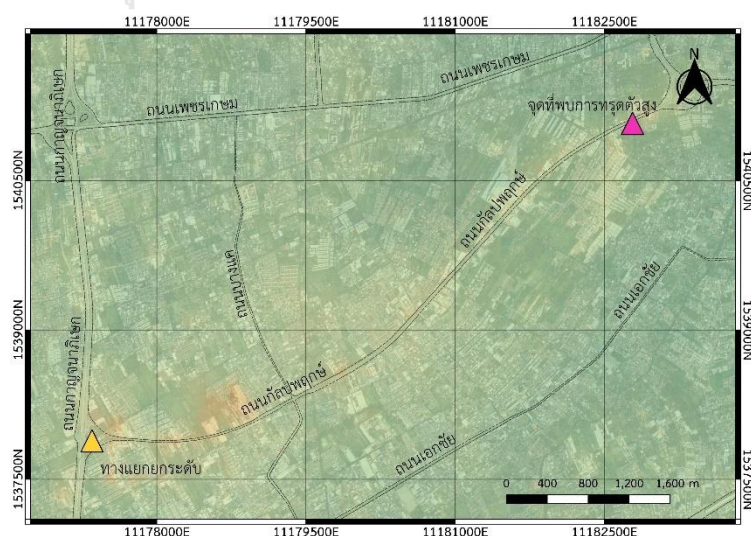
นอกจากนี้พบบริเวณที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูงที่สุดโดยในข้อมูลวงโคจรขาขึ้นมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 65 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินประมาณ 2 ถึง 15 มม./ปี ส่วนในข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 45 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 2 ถึง 28 มม./ปี เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ตั้งอยู่ใกล้กับนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบังรวมถึงมีโครงการบ้านจัดสรรเป็นจำนวนมากในพื้นที่นี้ซึ่งอาจส่งผลให้มีแนวโน้มการทรุดตัวสูง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.81 ซึ่งหมายถึงชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 42



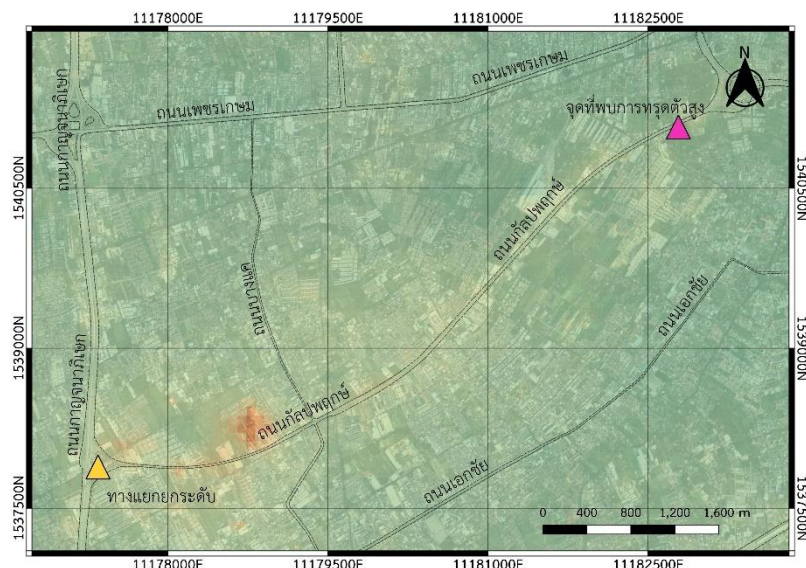
รูปที่ 42 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการทรุดตัวสูง ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า

4.2.4 ถนนกัลปพฤกษ์ เขตจอมทองและเขตบางแค

ถนนกัลปพฤกษ์ หรือทางหลวงชนบท กท.1001 ตั้งอยู่บริเวณฝั่งธนบุรี พื้นที่กรุงเทพมหานคร เป็นเส้นทางคมนาคมเชื่อมต่อระหว่างถนนราชพฤกษ์กับถนนกาญจนาภิเษก ในช่วงปี ค.ศ. 2017 ถึง 2019 ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างจากถนนคอนกรีตไปเป็นถนนลาดยาง 6 ช่องจราจร จากการพิจารณาผลลัพธ์ตรวจพบ 2 พื้นที่ที่มีการทรุดตัวน่าสนใจ คือ บริเวณปลายทางทิศตะวันออกเป็นพื้นที่ที่พบการทรุดตัวสูง (สามเหลี่ยมสีชมพู) และบริเวณปลายทางทิศตะวันตกเป็นทางแยกยกระดับติดกับถนนกาญจนาภิเษก (สามเหลี่ยมสีเหลือง) ดังรูปที่ 43 และ 44

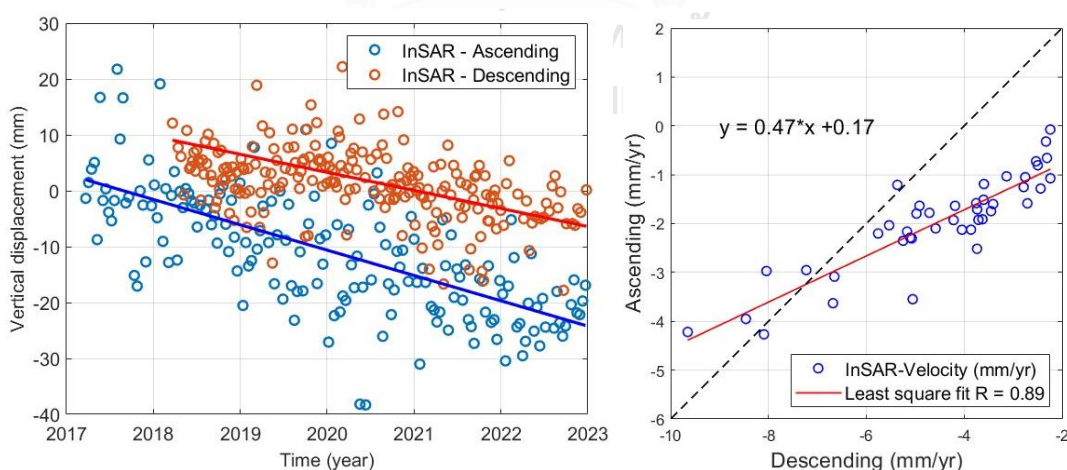


รูปที่ 43 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนกัลปพฤกษ์ ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน



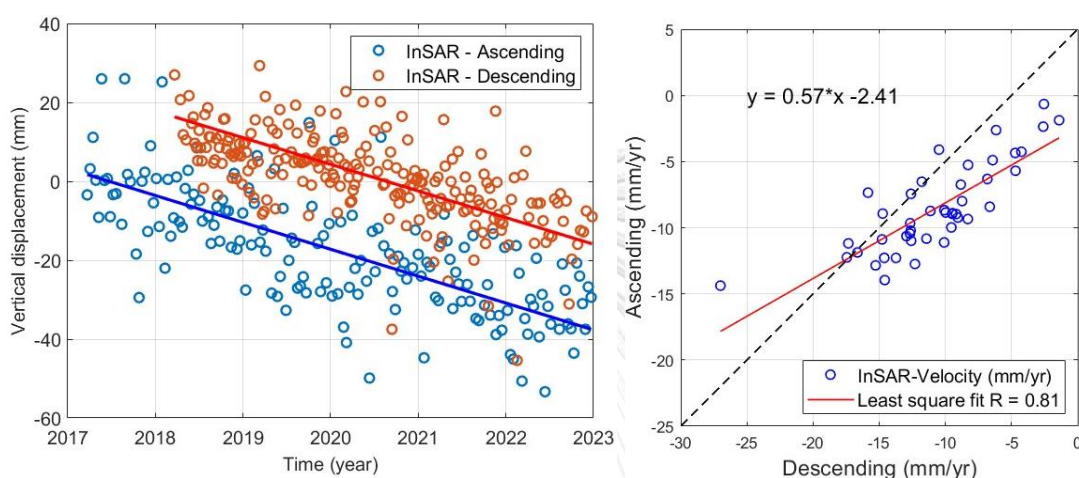
รูปที่ 44 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนกัลปพฤกษ์
ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

พื้นที่พบการทรุดตัวสูง ตั้งอยู่บริเวณปลายทิศฝั่งตะวันตกของถนนกัลปพฤกษ์ ใกล้กับทาง
แยกเชื่อมเข้าถนนราชพฤกษ์ บริเวณรอบประกอบด้วยหมู่บ้าน อาคารสำนักงานและสวนสาธารณะ
โดยจากผลลัพธ์การประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัว
ของแผ่นดินประมาณ 20 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 4 มม./ปี และในวง
โคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวประมาณ 15 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 ถึง 10 มม./ปี
โดยค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.89 ดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y
หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการ
เคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูล
วงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการทรุดตัวสูง ถนนกัลปพฤกษ์

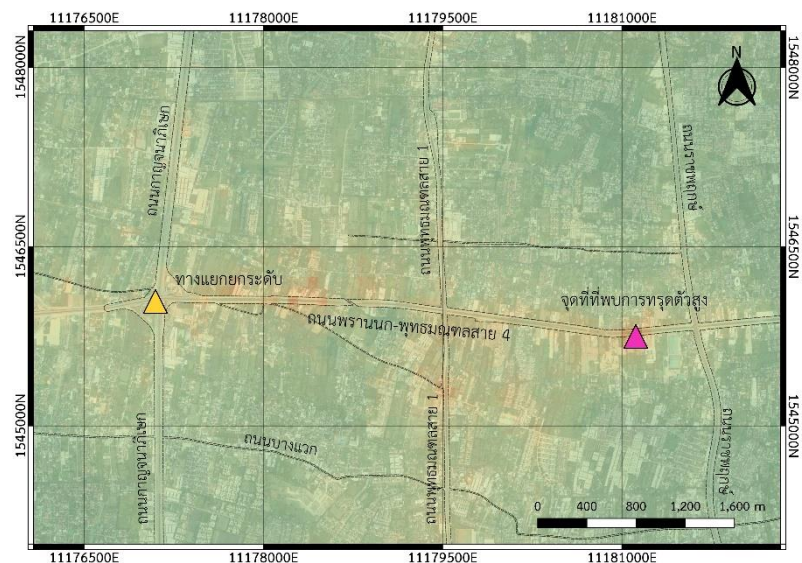
อีกพื้นที่ที่พบแนวโน้มการทรุดตัวสูงคือ บริเวณปลายทิศตะวันออกของถนนกัลปพฤกษ์ จุดเชื่อมต่อตัดกับถนนกาญจนาภิเษกที่มีการสัญจรค่อนข้างหนาแน่น โดยในวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวประมาณ 38 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยระหว่าง 4 ถึง 14 มม./ปี ส่วนในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 30 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 ถึง 13 มม./ปี โดยชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันและแนวโน้มการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.86 ดังในรูปที่ 46



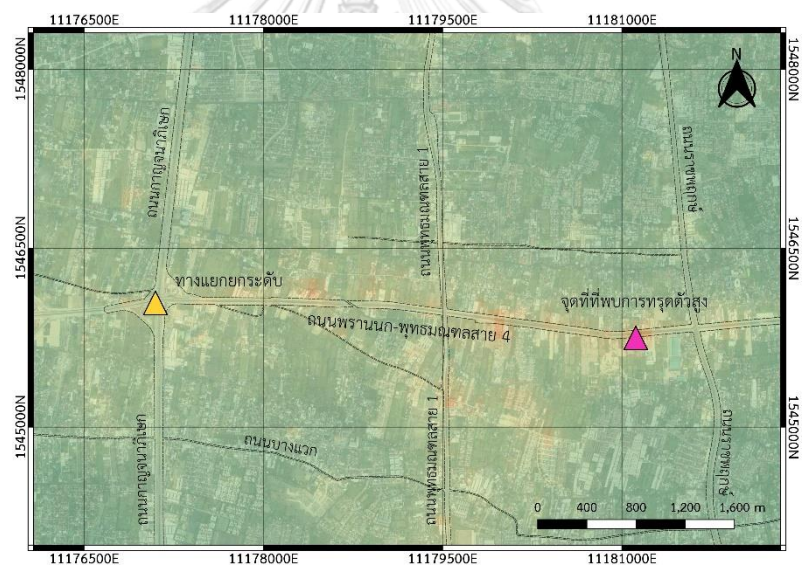
รูปที่ 46 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกยกระดับ ถนนกัลปพฤกษ์

4.2.5 ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4 เขตตลิ่งชันและเขตทวีวัฒนา

ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4 ตั้งอยู่ระหว่างเขตตลิ่งชันและเขตทวีวัฒนา ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดนครปฐม เป็นถนนตัดใหม่โดยต่อขยายจากถนนพราณนก แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกผ่านที่ถนนราชพฤกษ์ ช่วงที่สองผ่านที่ถนนพุทธมณฑลสาย 2 และถนนพุทธมณฑลสาย 3 ไปติดต่อกับถนนพุทธมณฑลสาย 4 ลักษณะเป็นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก 6 ช่องจราจร โดยในงานวิจัยได้คัดเลือกพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัว คือ บริเวณที่มีการทรุดตัวสูง ใกล้กับทางแยกตัดกับถนนราชพฤกษ์ (สามเหลี่ยมสี่ชมพู) และบริเวณทางแยกยกระดับตัดกับถนนกาญจนาภิเษก (สามเหลี่ยมสี่เหลือง) ดังในรูปที่ 47 และ 48

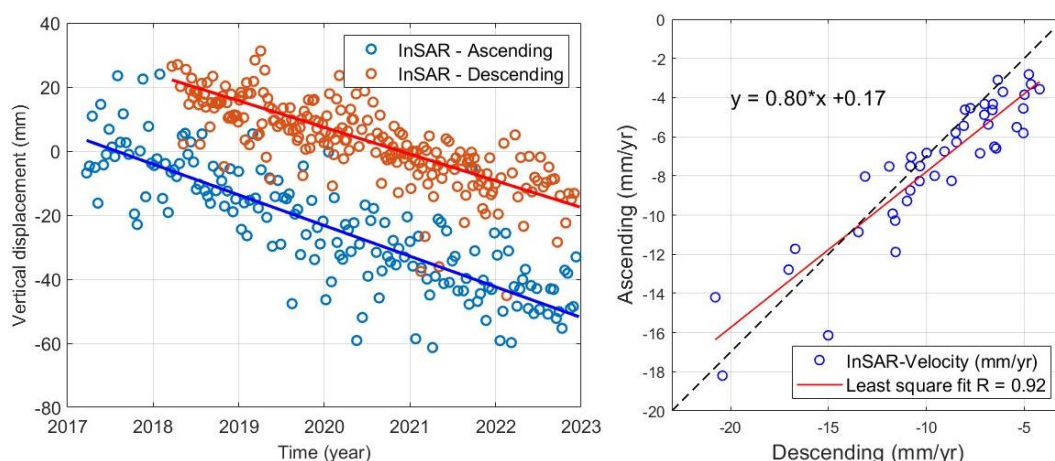


รูปที่ 47 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนพหลโยธินสาย 4
ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน



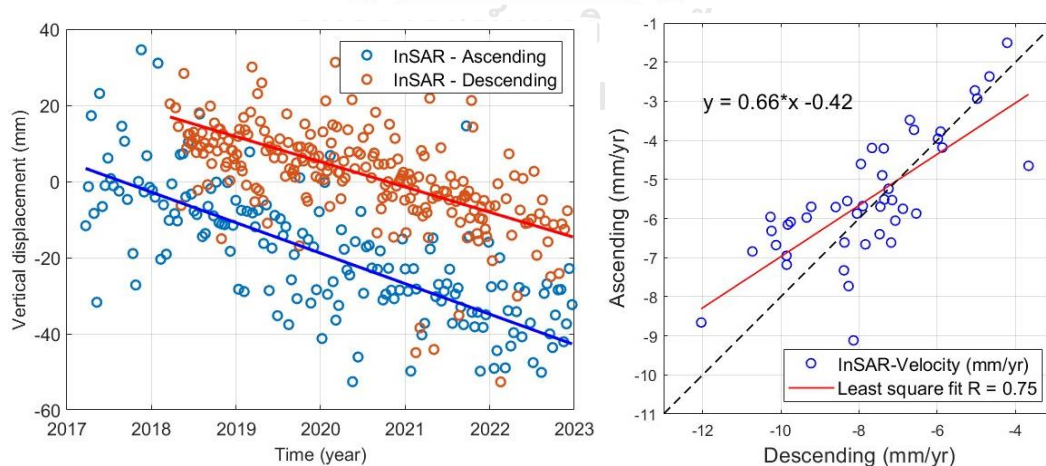
รูปที่ 48 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ถนนพหลโยธินสาย 4
ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูงสุดอยู่ใกล้กับทางแยกตัดกับถนนราชพฤกษ์โดยจากผลลัพธ์จะเห็นว่ายังมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่โครงการที่อยู่อาศัย ร้านค้าและพื้นที่สำหรับเกษตรกรรม ตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 54 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 ถึง 16 มม./ปี ในวงโคจรขาขึ้น และพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 38 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 ถึง 14 มม./ปี ในวงโคจรขาลง โดยค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.92 ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณที่พบการทรุดตัวสูง ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4

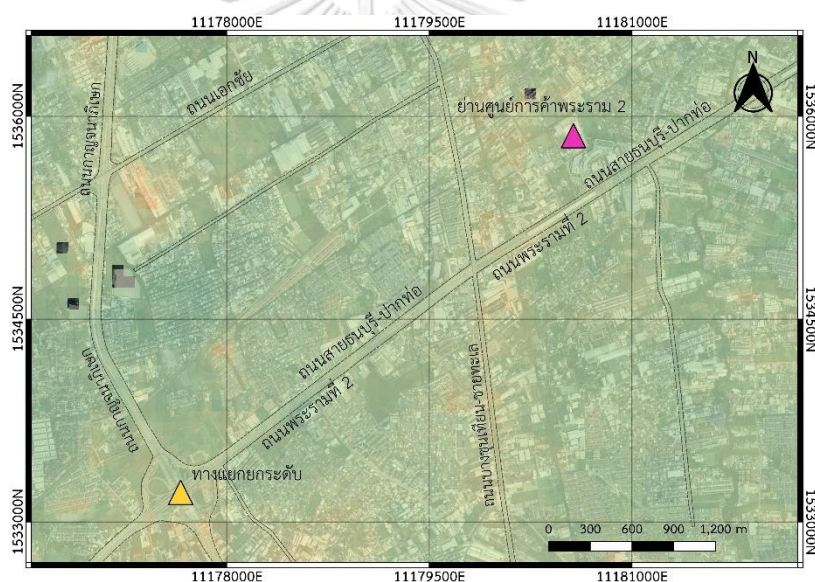
ส่วนบริเวณทางแยกยกระดับตัดกับถนนบรมราชชนนี ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 45 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ประมาณ 1.5 ถึง 9 มม./ปี ส่วนข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวประมาณ 30 มม. และค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 12 มม./ปี เนื่องจากเป็นถนนที่มีโครงการหมู่บ้านจัดสรรตลอดทั้งสองฝั่งถนนและมีรถสัญจรอยู่ตลอดเวลาจึงควรมีการติดตามและเฝ้าระวังโครงสร้างถนนสายนี้ โดยค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.75 ดังรูปที่ 50



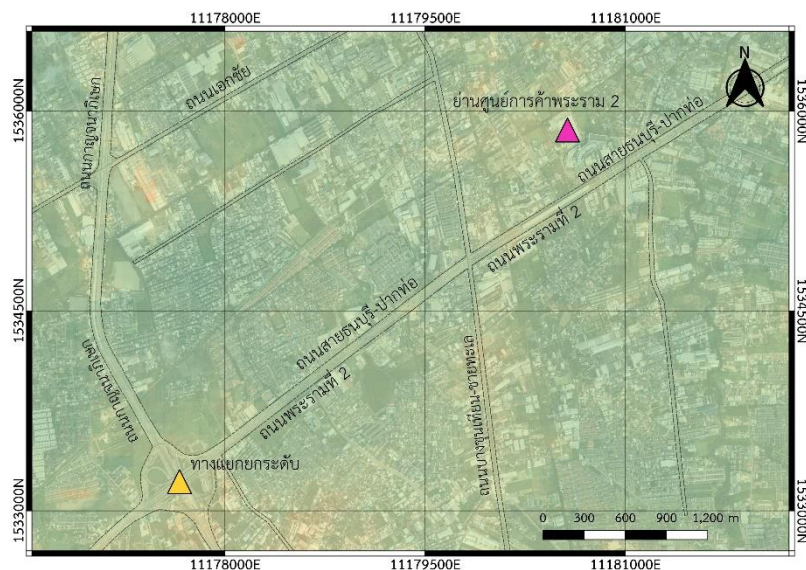
รูปที่ 50 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกยกระดับ ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4

4.2.6 ย่านศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 เขตบางขุนเทียน

ถนนพระราม 2 ตั้งอยู่ในเขตบางขุนเทียน เส้นถนนตัดผ่านหลายจังหวัด ได้แก่ จังหวัด กรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสงครามและจังหวัดราชบุรี แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งถนนพระรามที่ 2 เป็นเส้นทางคมนาคมสายหลักไปสู่ภาคใต้ทำให้มีการสัญจรอย่างหนาแน่นและเป็นเส้นทางที่มีรถบรรทุกใช้งานเป็นจำนวนมาก รวมไปถึงเป็นแหล่งที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรม ศูนย์การค้า มีการก่อสร้างขยายช่องจราจรอยู่หลายครั้งทำให้เป็นพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวที่น่าสนใจ โดยคัดเลือกพื้นที่ ดังรูปที่ 51 และ 52 คือ บริเวณศูนย์การค้าขนาดใหญ่ติดกับถนนพระราม 2 (สามเหลี่ยมสีชมพู) และทางแยกต่างระดับบางขุนเทียน (สามเหลี่ยมสีเหลือง) เนื่องจากเคยมีการก่อสร้างขยายถนนจาก 10 ช่องจราจร เป็น 14 ช่องจราจร เมื่อระหว่างปี ค.ศ. 2018 ถึง 2020

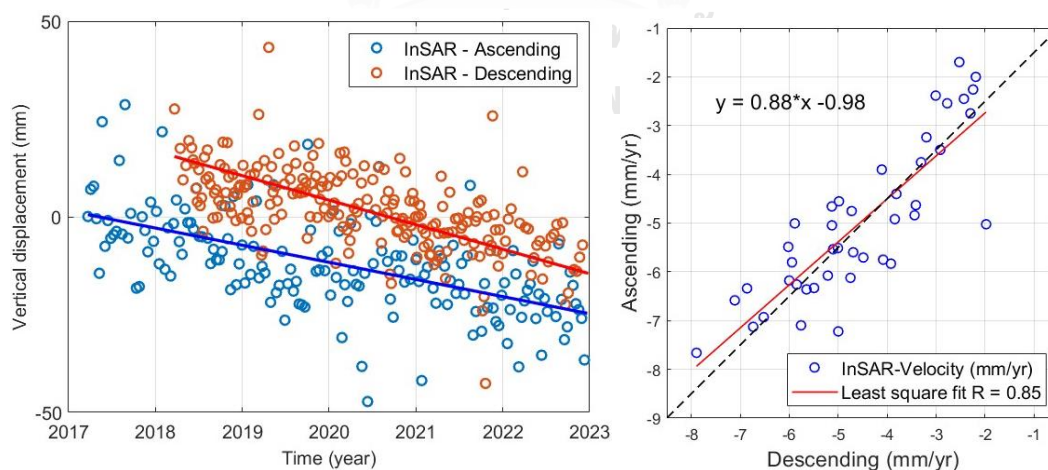


รูปที่ 51 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา พื้นที่ศูนย์การค้าและถนนพระราม 2
ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน



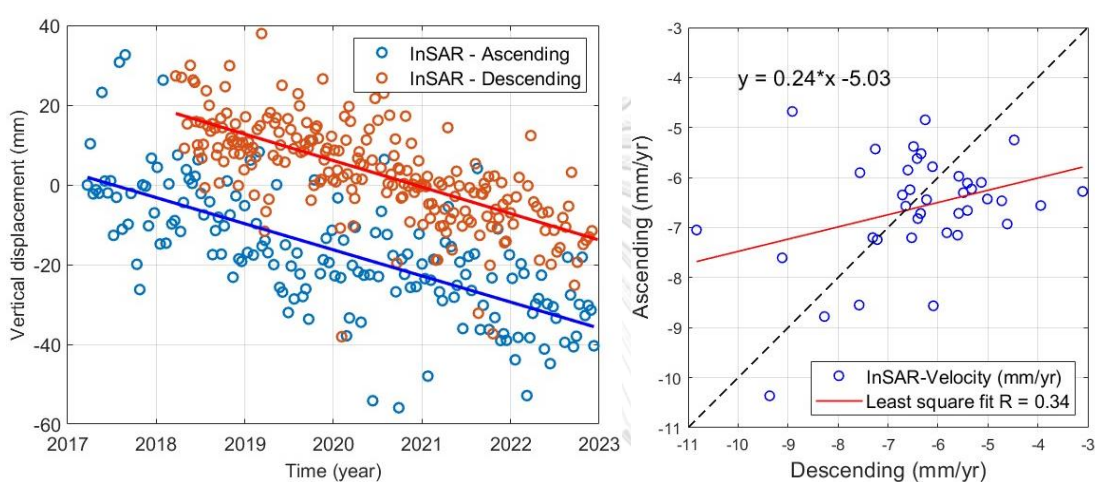
รูปที่ 52 ผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแนวถนนพระราม 2 พื้นที่ศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง โดยจุดสี หมายถึง จุดที่ใช้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน

ย่านศูนย์การค้าติดกับถนนพระราม 2 ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวประมาณ 25 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 8 มม./ปี และข้อมูลวงโคจรขาลงตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ 30 มม. มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2 ถึง 8 มม./ปี ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟการทรุดตัวจะเห็นว่าแนวโน้มการทรุดตัวอย่างช้า ๆ เนื่องจากเป็นโครงสร้างอาคารขนาดใหญ่ ทำให้มีการวางฐานรากที่มั่นคง โดยมีค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.85 หมายถึงชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กัน ดังในรูปที่ 53



รูปที่ 53 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแนวถนน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณย่านศูนย์การค้าติดกับถนนพระราม 2

นอกจากนี้ บริเวณถนนพระราม 2 แยกทางต่างระดับบางขุนเทียน ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวที่ประมาณ 45 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 4.5 ถึง 10 มม./ปี ข้อมูลวงโคจรขาลงมีค่าการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 50 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ประมาณ 3 ถึง 11 มม./ปี เมื่อดูภาพรวมในกราฟค่าการทรุดตัวจะเห็นได้ว่ามีลักษณะการทรุดตัวมากขึ้นและยังคงมีทิศทางการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการสัญจรของรถบรรทุกขนาดใหญ่ รวมไปถึงเป็นตัวเมืองที่มีโครงการหมู่บ้าน ร้านค้าอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรมีการติดตามและเฝ้าระวังการทรุดตัว โดยมีค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.34 ดังรูปที่ 54



รูปที่ 54 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดิน โดยแกน x หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาลง (มม./ปี), แกน y หมายถึง ข้อมูลวงโคจรขาขึ้น (มม./ปี) บริเวณทางแยกยกระดับบางขุนเทียน ถนนพระราม 2

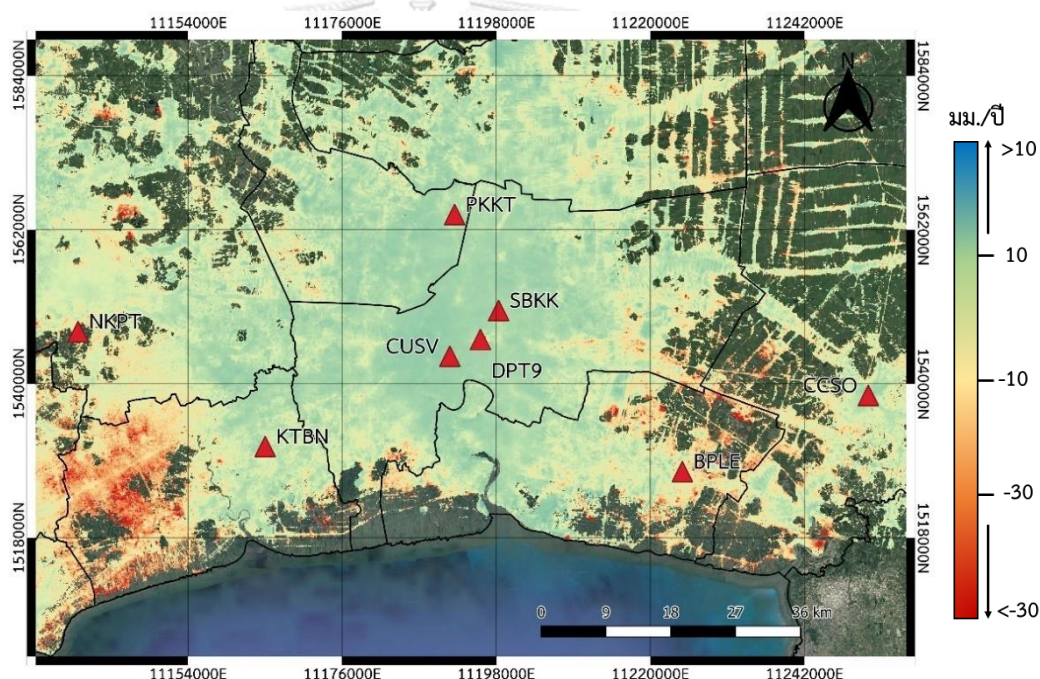
จากผลลัพธ์การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินระหว่างชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง ในทั้งหมด 13 จุดจาก 6 พื้นที่ สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 6 โดย n หมายถึง จำนวนจุดผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวที่อยู่ภายในรัศมี (Buffer) พบค่าสหสัมพันธ์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.60 ถึง 0.90 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของทั้งสองชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยยะสำคัญและมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ชุดข้อมูลทั้งสองมีการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คณะกรรมการถ่ายภาพและคณะสภาพอากาศกัน ทำให้การประมวลผลของชุดข้อมูลทั้งสองมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 6 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง (r) บริเวณพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

ลำดับ	พื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลง (r)	n
1	อาคารผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ	0.84	45
2	รันเวย์สนามบิน สนามบินสุวรรณภูมิ	0.72	45
3	พื้นที่ที่พบการทรุดตัวสูงสุดภายในสนามบินสุวรรณภูมิ	0.77	42
4	กรมกำลังพลทหารอากาศ สนามบินดอนเมือง	0.69	41
5	รันเวย์สนามบิน สนามบินดอนเมือง	0.78	44
6	บริเวณทางแยกยกระดับ ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า	0.60	42
7	พื้นที่ที่พบการทรุดตัวสูง ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า	0.81	44
8	ปลายทางทิศตะวันออก ถนนกัลปพฤกษ์	0.89	43
9	ปลายทางทิศตะวันตก ทางแยกยกระดับถนนกัลปพฤกษ์	0.86	44
10	บริเวณทางแยกยกระดับ ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4	0.92	43
11	พื้นที่ที่พบการทรุดตัวสูง ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4	0.75	43
12	ศูนย์การค้าขนาดใหญ่ติดกับถนนพระราม 2	0.85	42
13	ทางแยกต่างระดับบางขุนเทียน ถนนพระราม 2	0.34	39

4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพร่วมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง

ในงานศึกษาใช้ชุดข้อมูลค่าระดับความสูงจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station) ในการประเมินประสิทธิภาพของผลลัพธ์อินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมโยธาธิการและผังเมือง กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดินและสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ทั้งหมด 8 สถานี ดังรูปที่ 55 โดยใช้ 1 สถานี ในการปรับค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (Offset) ของทุกสถานี คือ สถานี CUSV เนื่องจากลักษณะการทรุดตัวค่อนข้างคงที่และเป็นจุดที่มีค่า Coherence สูง ตั้งอยู่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตำแหน่งพิกัด ละติจูด $13^{\circ} 44' 9.2898''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 32' 2.1228''$ ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับจุดอ้างอิง (Reference Point) ในขั้นตอนการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลาด้วยซอฟต์แวร์ MintPy เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลกันได้



รูปที่ 55 ผลลัพธ์อัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาลง จุดสามเหลี่ยมสีแดง หมายถึง ตำแหน่งสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย

โดยทำการปรับค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน (offset) ของสถานีที่เหลือด้วยค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของสถานี CUSV และในส่วนของข้อมูลอินซาร์แบบอนุกรมเวลาที่ได้จากการประมวลผลทำการกำหนดรัศมีออกไป 300 ม. แล้วนำจุดข้อมูลค่าการเคลื่อนตัวภายในรัศมีมาเฉลี่ย จากนั้นนำมาพล็อตร่วมกันโดยแสดงด้วยกราฟค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาทั้งในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลง แกน x หมายถึง เวลา (ปี) และแกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม./ปี) อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อย่อยถัดไป

4.3.1 สถานี DPT9

สถานี DPT9 ตั้งอยู่ที่กรมโยธาธิการและผังเมือง บริเวณถนนพระราม 9 แขวงพญาไท เขตพญาไท โดยตำแหน่งพิกัดคือ ละติจูด $13^{\circ} 45' 24.4038''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 34' 23.5344''$ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 26 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 ถึง 9 มม./ปี ดังรูปที่ 56 ส่วนในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 24 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 ถึง 8 มม./ปี ดังในรูปที่ 57

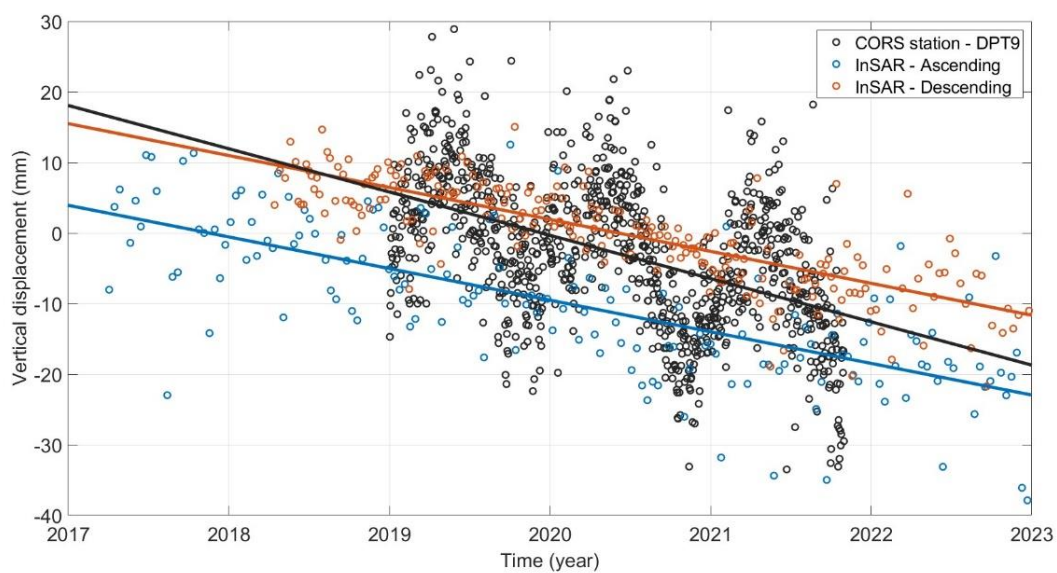
โดยภาพรวมผลลัพธ์จากกราฟในรูปที่ 58 พบว่าผลลัพธ์จากเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาของชุดข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลงมีความสอดคล้องกัน มีลักษณะการทรุดตัวของแผ่นดินใกล้เคียงกัน รวมไปถึงเมื่อพิจารณาค่าระดับความสูงที่วัดได้จากสถานี DPT9 พบว่ามีแนวโน้มการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกันกับทั้งสองชุดข้อมูลแต่จะมีในบางช่วงที่มีความแตกต่างกัน โดยมีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 6.21 มม./ปี และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.5 มม./ปี อธิบายเพิ่มเติมได้จากรูปที่ 59 จะเห็นได้ว่าพื้นที่จริงที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมตั้งอยู่บนอาคารสูง 15 ชั้น ในขณะที่ดาวเทียมเก็บข้อมูลจากชั้นพื้นดินเท่านั้น



รูปที่ 56 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตพญาไท



รูปที่ 57 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตพญาไท



รูปที่ 58 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี DPT9 ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)



รูปที่ 59 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี DPT9 กรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 9 เขตพญาไท

4.3.2 สถานี SBKK

สถานี SBKK ตั้งอยู่ในพื้นที่กรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว แขวงวังทองหลาง เขตวังทองหลาง ตำแหน่งพิกัดคือ ละติจูด $13^{\circ} 47' 34.5984''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 35' 47.3784''$ จากการประมวลผลอินซาร์ ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 3 มม. และมีความอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 0 ถึง 1 มม./ปี ดังรูปที่ 60 ส่วนในชุดข้อมูลวงโคจรขาลงตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 4 มม. และมีความอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 0 ถึง 2 มม./ปี ดังรูปที่ 61

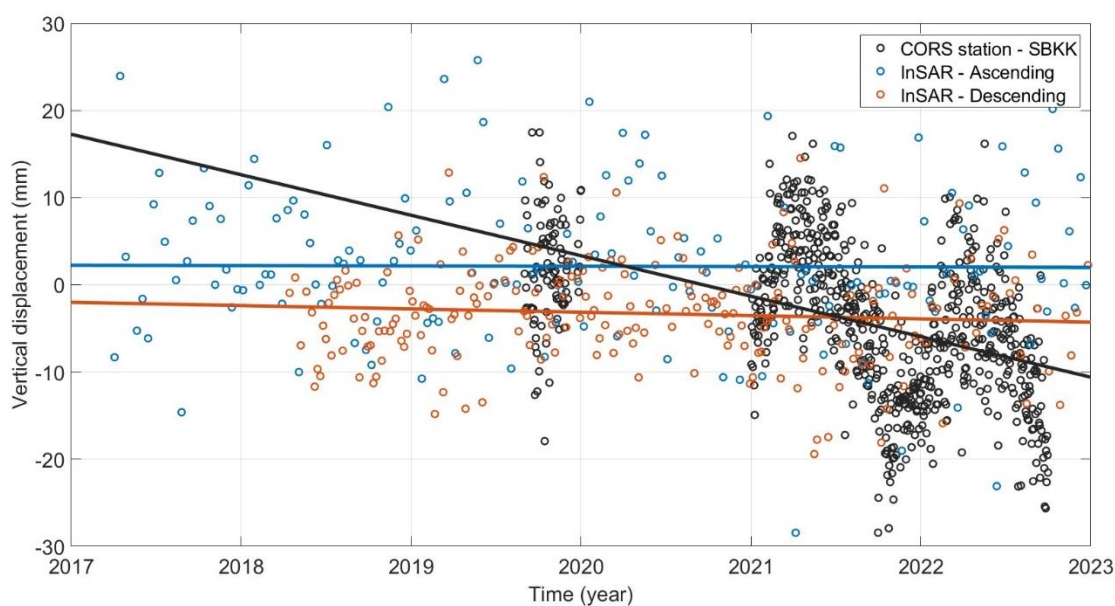
จากการประเมินประสิทธิภาพร่วมกับค่าระดับความสูง ดังรูปที่ 62 พบว่าผลลัพธ์จากเทคนิคอินซาร์มีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมากกล่าวคือมีแนวโน้มการทรุดตัวคงที่ แตกต่างจากข้อมูลของสถานี SBKK ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวเร็วกว่าข้อมูลที่ประมวลผลจากเทคนิคอินซาร์ ในวงโคจรขาขึ้นอยู่ประมาณ 4.55 มม./ปี และในวงโคจรขาลงอยู่ 4.47 มม./ปี โดยอาจมีสาเหตุมาจากการเก็บข้อมูลของดาวเทียมซึ่งในชั้นพื้นดินอาจมีความหนาแน่นมากจนชะลอการทรุดตัวไปแล้วในขณะที่ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมบันทึกข้อมูลจากชั้นดาดฟ้าของอาคาร ดังในรูปที่ 63 จึงทำให้มีแนวโน้มการทรุดตัวที่มากกว่า และเนื่องจากข้อมูลค่าระดับของสถานี SBKK ในช่วงปี ค.ศ. 2020 ได้รับผลกระทบจากการติดตั้งอุปกรณ์ทำให้มีข้อมูลขาดหายไป



รูปที่ 60 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น
สถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง



รูปที่ 61 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง
สถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง



รูปที่ 62 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี SBKK ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)



รูปที่ 63 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี SBKK บริเวณกรมแผนที่ทหาร ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง

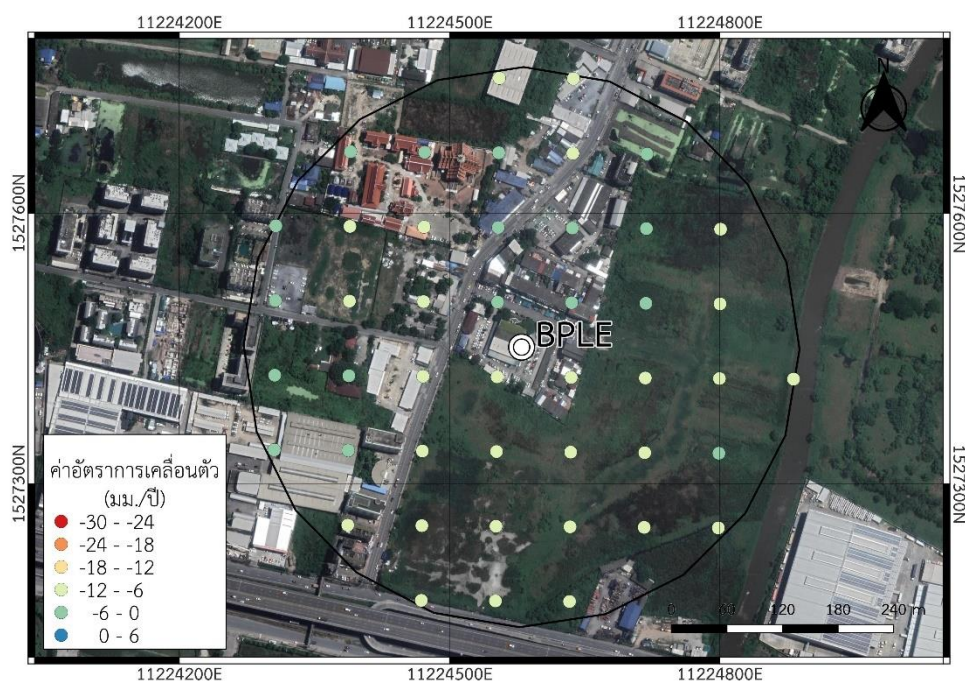
4.3.3 สถานี BPLE

สถานี BPLE เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมในสังกัดกรมที่ดิน ตั้งอยู่บริเวณสำนักงานที่ดิน จังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี ถนนบางนา-ตราด กม.26 ตำบลบางเสาธง กิ่งอำเภอบางเสาธง พิกัดตำแหน่ง ละติจูด $13^{\circ} 35' 31.2864''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 49' 55.6356''$ จากผลลัพธ์การประมวลผล อินซาร์แบบอนุกรมเวลาตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 15 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 0 ถึง 5 มม./ปี ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น ดังรูปที่ 64 และในวงโคจรขาลง ตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 25 มม. มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 มม./ปี ดังรูปที่ 65

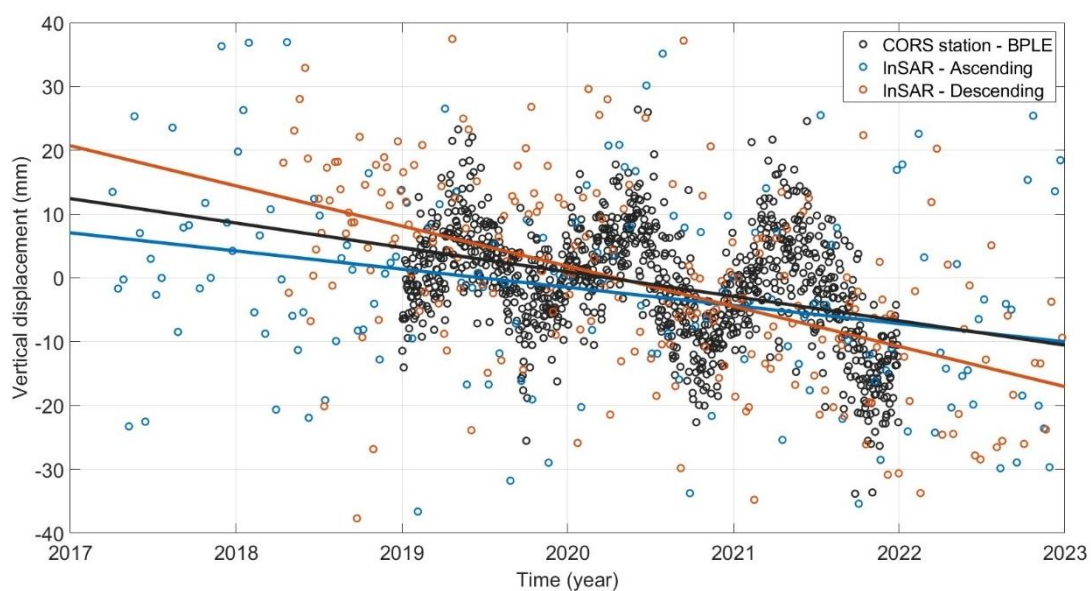
จากกราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวในรูปที่ 66 พบว่าภาพรวมผลลัพธ์ของชุดข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินใกล้เคียงกับข้อมูลจากสถานี BPLE โดยเฉพาะช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ. 2022 เป็นต้นมา และชุดข้อมูลในวงโคจรขาลงมีแนวโน้มการทรุดตัวสอดคล้องกับสถานี BPLE เช่นกัน โดยมีค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 3.75 มม./ปี ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.6 มม./ปี และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายพื้นที่จริง ในรูปที่ 67 พบว่าการติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมอยู่บนชั้นดาดฟ้าของอาคารที่ไม่สูงจากชั้นดินมาก ทำให้ข้อมูลค่าการทรุดตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์มีความใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัดและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลจากภาคสนาม



รูปที่ 64 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี



รูปที่ 65 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี



รูปที่ 66 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี BPLE ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)

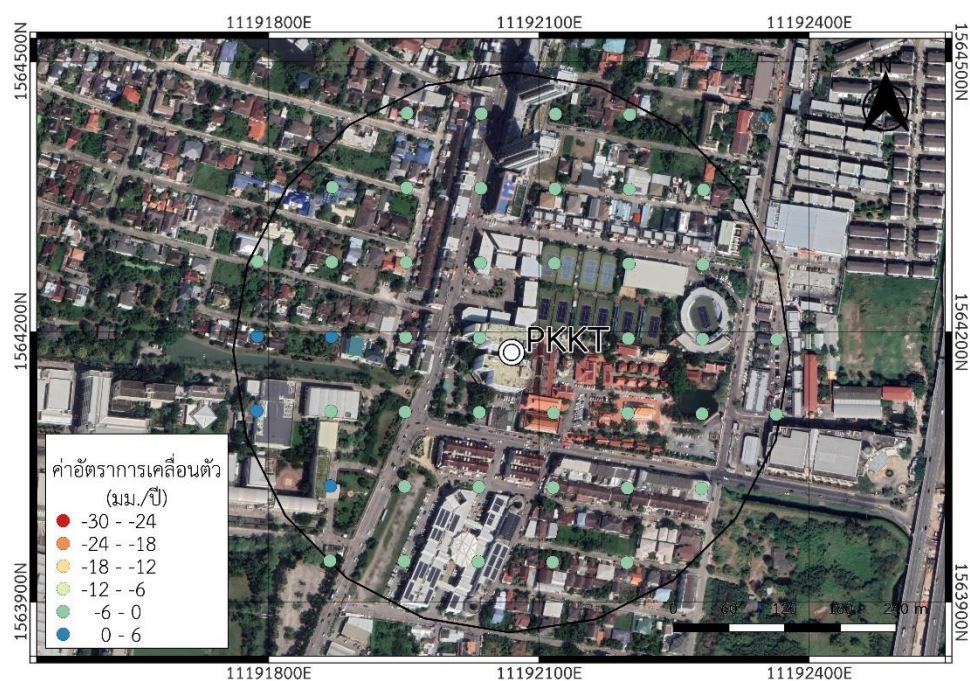


รูปที่ 67 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี BPLE บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรปราการ สาขาบางพลี

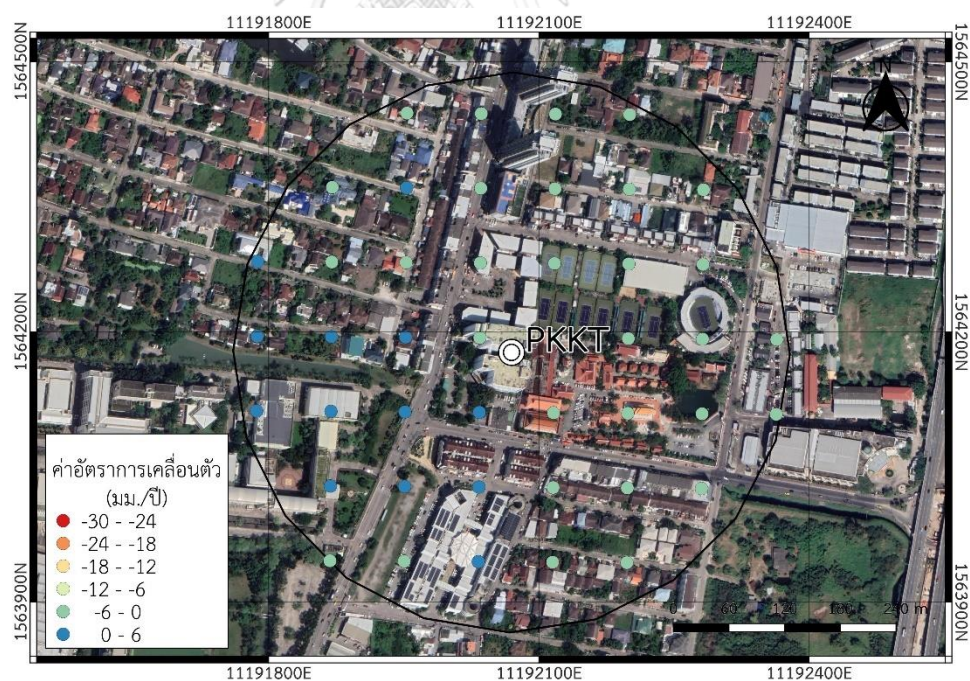
4.3.4 สถานี PKKT

สถานี PKKT เป็นหนึ่งในสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องของกรมที่ดิน ตั้งอยู่บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด ติดกับอาคารรังวัดและทำแผนที่ ถนนนนทบุรี 1 อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี ตำแหน่งพิกัด ละติจูด $13^{\circ} 54' 44.91''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 32' 24.273''$ โดยผลลัพธ์จากการประมวลผลอินซาร์ ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 12 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 0 ถึง 3 มม./ปี ดังรูปที่ 68 ส่วนในชุดข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดิน 2 มม. และค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง 1 มม./ปี ดังในรูปที่ 69

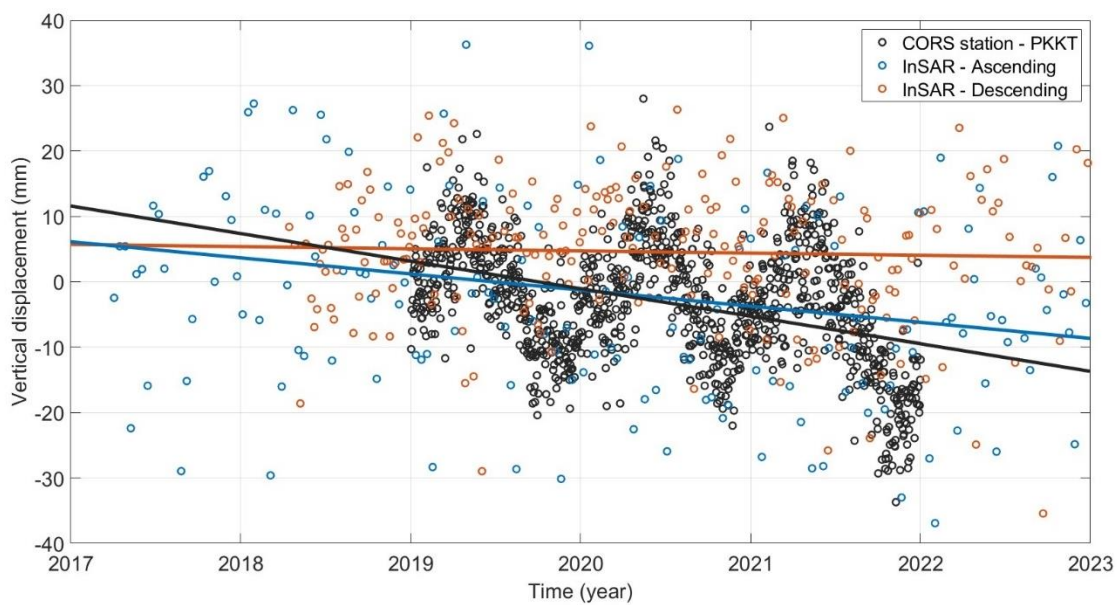
จากกราฟผลลัพธ์ในรูปที่ 70 ค่าระดับความสูงของสถานี PKKT มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินเร็วกว่าชุดข้อมูลทั้งสองอย่างเห็นได้ชัดแต่จะมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงปี ค.ศ. 2020 แต่จะยังมีค่าอัตราการทรุดตัวช้ากว่าข้อมูลในภาคสนามอยู่ประมาณ 2.5 มม./ปี ส่วนแนวโน้มการทรุดตัวในชุดวงโคจรขาลงนั้นแทบจะคงที่แล้วโดยมีค่าอัตราการทรุดตัวช้ากว่าข้อมูลภาคสนามอยู่ประมาณ 3.9 มม./ปี จากรูปที่ 71 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ติดตั้งอยู่บนอาคารสูงจากพื้นดิน 8 ชั้นและมีการวางฐานรากมั่นคงจึงทำให้มีผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกันในบางช่วง



รูปที่ 68 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด



รูปที่ 69 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด



รูปที่ 70 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี PKKT ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.)

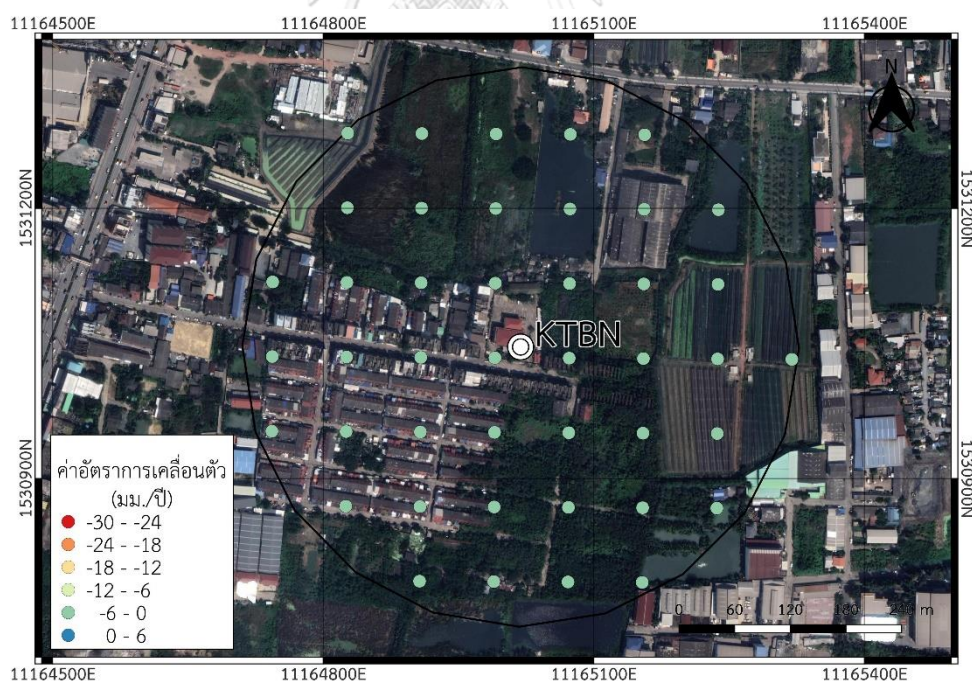


รูปที่ 71 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี PKKT บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด

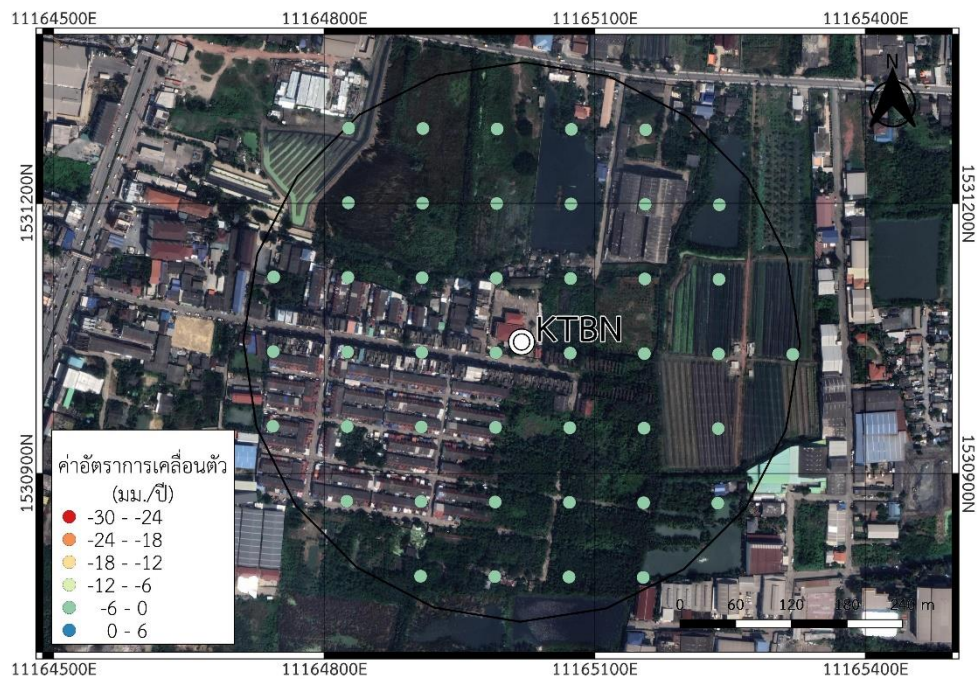
4.3.5 สถานี KTBN

สถานี KTBN ตั้งอยู่ในพื้นที่ของสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน หมู่บ้านเอเชียนคร ตำบลคลองมะเดื่อ อำเภอกะทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร พิกัดตำแหน่ง ละติจูด $13^{\circ} 37' 24.261''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 17' 49.4658''$ ผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 10 มม. ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 0 ถึง 4 มม./ปี ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น ดังรูปที่ 72 และตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดิน 8 มม. มีค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 มม./ปี ในชุดข้อมูลวงโคจรขาลง ดังรูปที่ 73

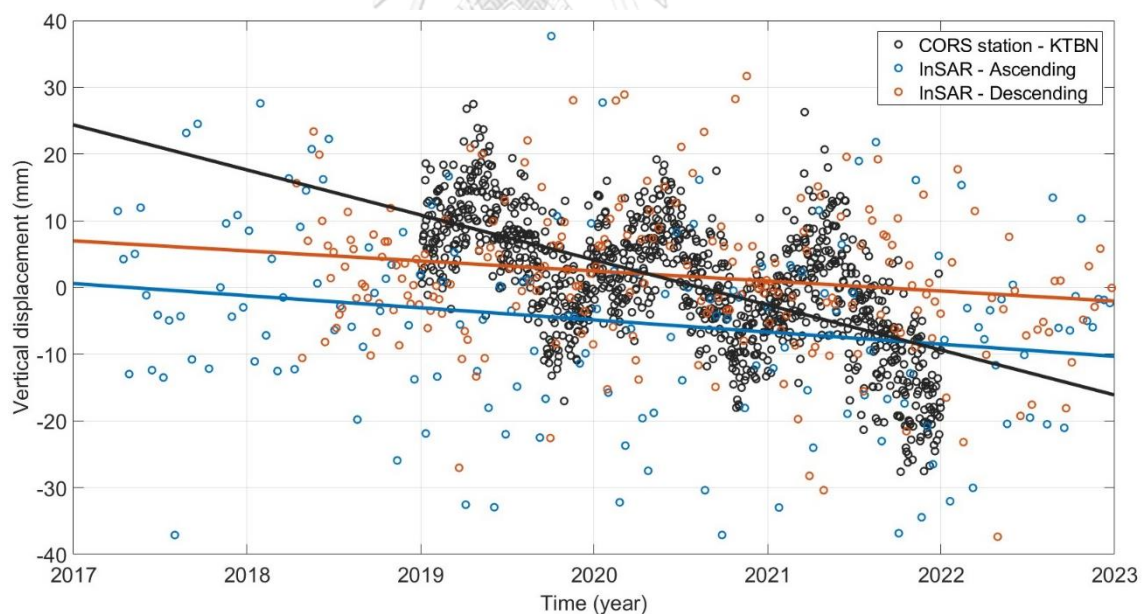
จากกราฟ ดังรูปที่ 74 เมื่อพิจารณาการทรุดตัวของแผ่นดินเฉพาะจากชุดข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นและในวงโคจรขาลงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวที่มากกว่าและเมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อมูลค่าระดับความสูงจะเห็นว่าข้อมูลจากภาคสนามมีแนวโน้มการทรุดตัวที่เร็วกว่าข้อมูลจากเทคนิคอินซาร์ ในวงโคจรขาขึ้นอยู่ประมาณ 5.2 มม./ปี และในวงโคจรขาลงอยู่ประมาณ 5.7 มม./ปี ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากที่ตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมอยู่บนอาคาร ในขณะที่ข้อมูลอินซาร์เก็บจากชั้นพื้นดินจึงอาจทำให้มีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินแตกต่างกัน ดังรูปที่ 75 และ 76



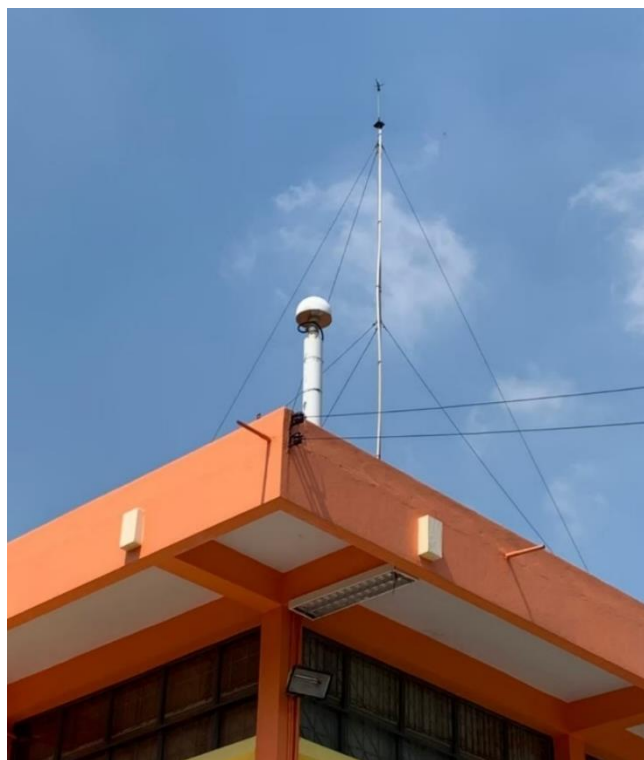
รูปที่ 72 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น
สถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน



รูปที่ 73 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน



รูปที่ 74 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี KTBN ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)



รูปที่ 75 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี KTBN บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร
สาขากระทุ่มแบน

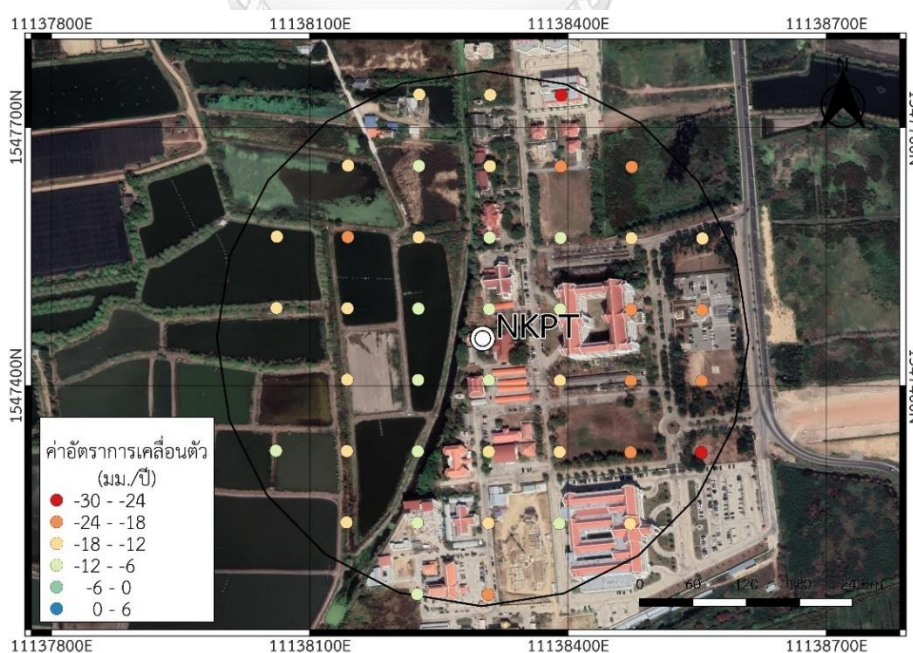


รูปที่ 76 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี KTBN บริเวณสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร
สาขากระทุ่มแบน (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2023 จาก Google Maps)

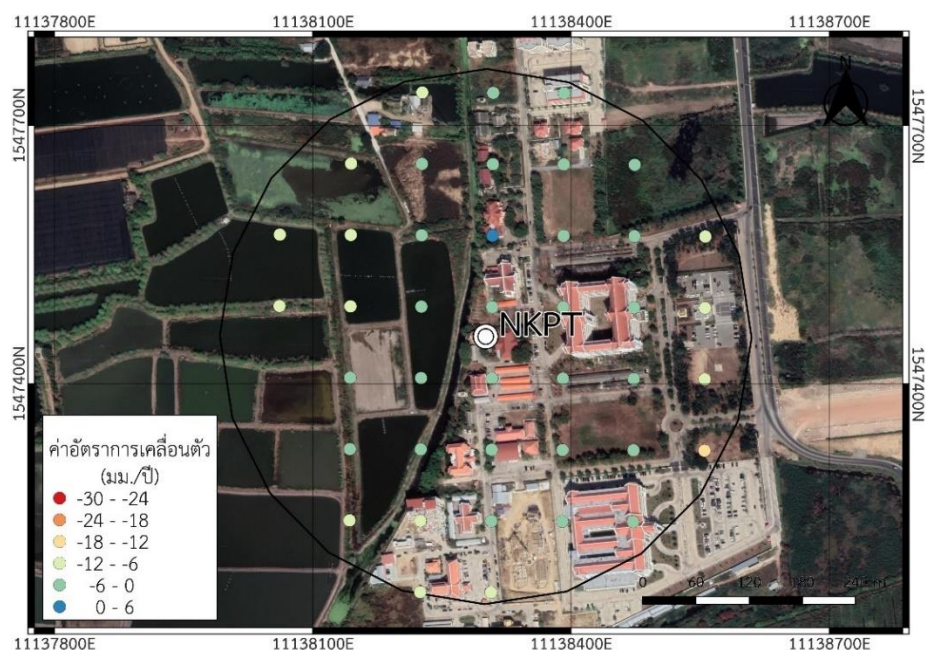
4.3.6 สถานี NKPT

สถานี NKPT เป็นหนึ่งในสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) ตั้งอยู่บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม ชั้น 3 (ส่วนต่อเติม) ตำบลถนนขาด อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ใกล้กับศาลากลางจังหวัดนครปฐม พิกัดตำแหน่ง ละติจูด $13^{\circ} 45' 59.8314''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 3' 25.416''$ จากผลลัพธ์การประมวลผลตรวจพบข้อมูลวงโคจรขาขึ้น มีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 70 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินอยู่ในช่วง 8 ถึง 25 มม./ปี ดังรูปที่ 77 ส่วนในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 25 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย 2 ถึง 15 มม./ปี ดังรูปที่ 78

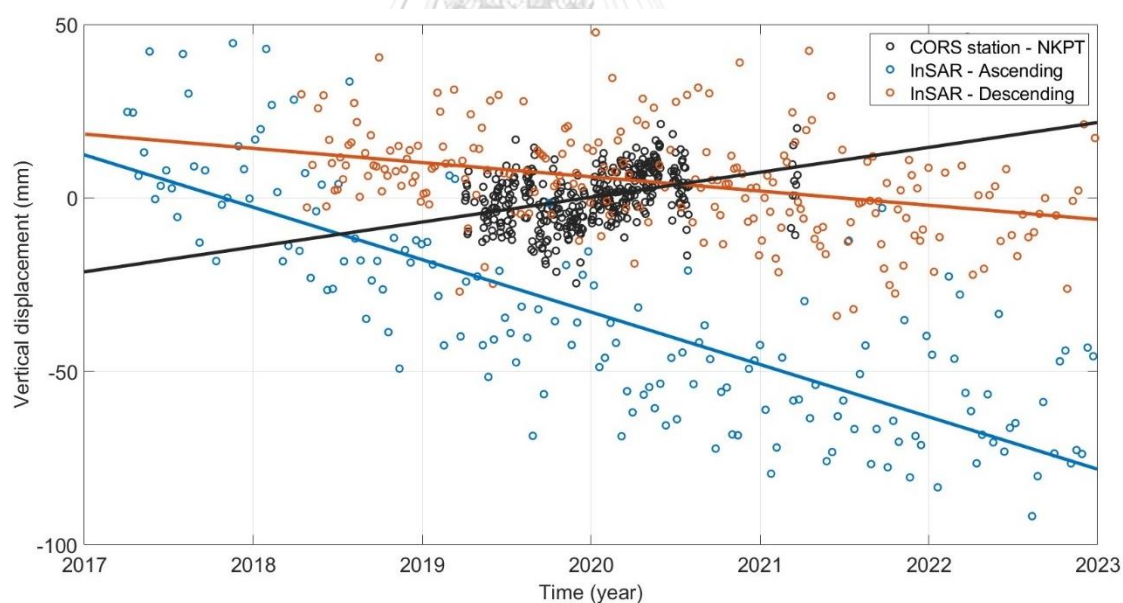
เนื่องจากสถานี NKPT มีข้อมูลบางส่วนขาดหายไปจึงทำให้สามารถดูแนวโน้มได้เพียงแค่เฉพาะปี ค.ศ. 2019 ถึง 2021 ดังนั้นเมื่อพิจารณาภาพรวมของกราฟในรูปที่ 79 จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์ ในวงโคจรขาขึ้นมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินมากกว่าในวงโคจรขาลงแต่ยังคงมีแนวโน้มการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกันอยู่ ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวจากภาคสนามโดยมีแนวโน้มการทรุดตัวในทิศทางตรงกันข้าม มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 7 มม./ปี และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.7 มม./ปี ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 80 อยู่บนอาคารแต่ข้อมูลอินซาร์บันทึกบนชั้นพื้นดิน หรืออาจมีสาเหตุมาจากข้อมูลจากภาคสนามมีน้อยเกินไปและข้อมูลที่ได้จากเทคนิคอินซาร์มีการเฉลี่ยการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณรอบมาด้วย อย่างเช่น ท่งหญ้า พื้นที่เกษตรกรรม เป็นต้น



รูปที่ 77 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม



รูปที่ 78 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม



รูปที่ 79 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี NKPT ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (มม.)

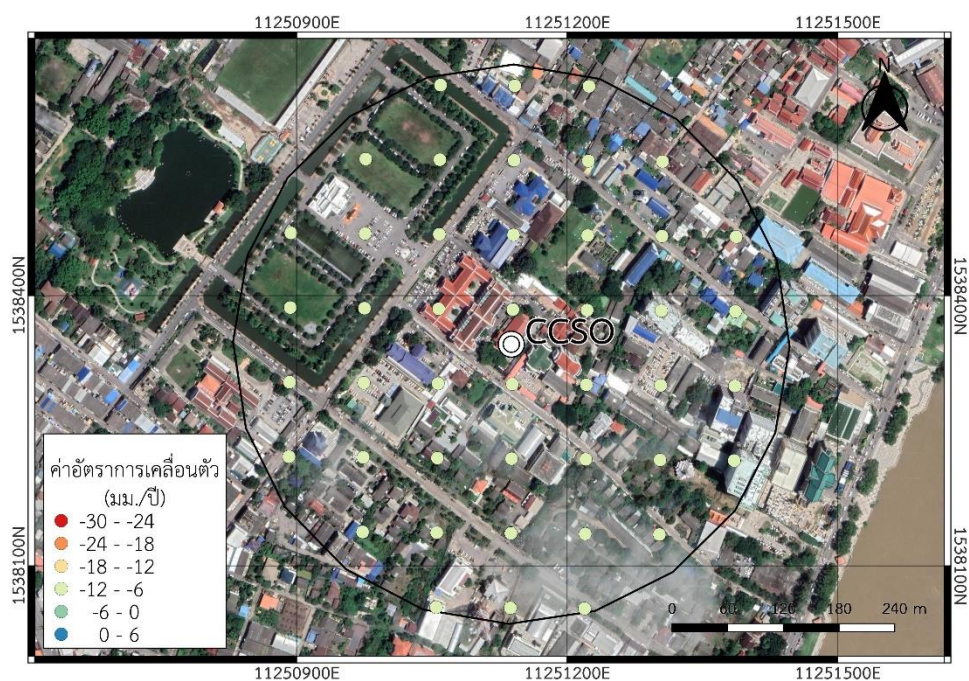


รูปที่ 80 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี NKPT บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครปฐม

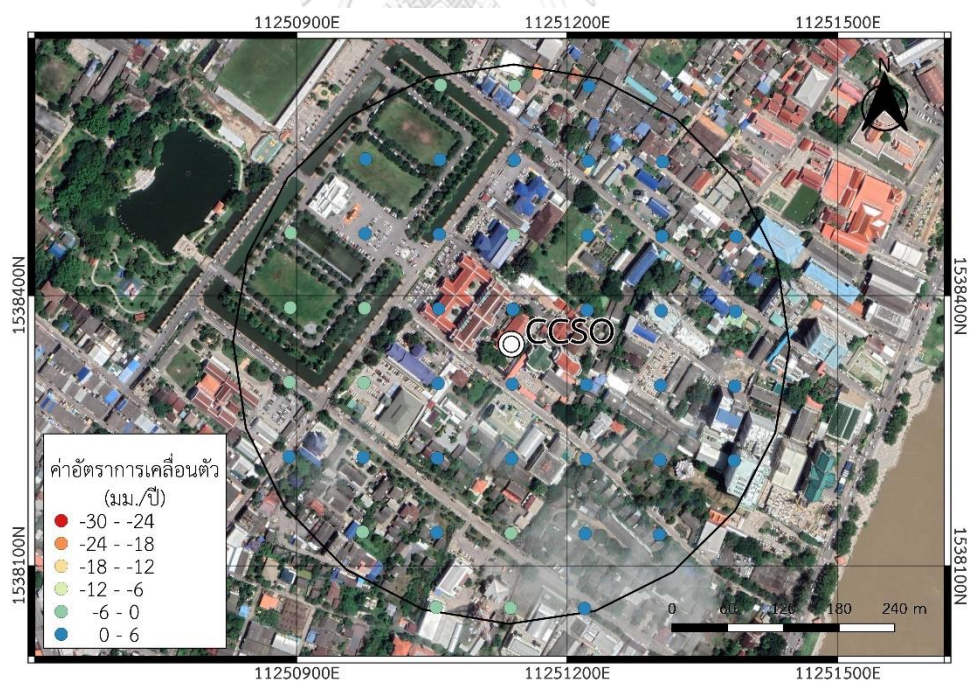
4.3.7 สถานี CCSO

สถานี CCSO เป็นสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่องของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (สสน.) ตั้งอยู่ในพื้นที่สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดฉะเชิงเทรา ถนนยุทธดำเนิน ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมืองฉะเชิงเทรา ตำแหน่งพิกัดละติจูด $13^{\circ} 41' 13.6674''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 4' 14.4984''$ โดยในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 35 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย 7 ถึง 9 มม./ปี ดังรูปที่ 81 ส่วนในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 3 มม. และมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย 0 ถึง 1 มม./ปี ดังรูปที่ 82

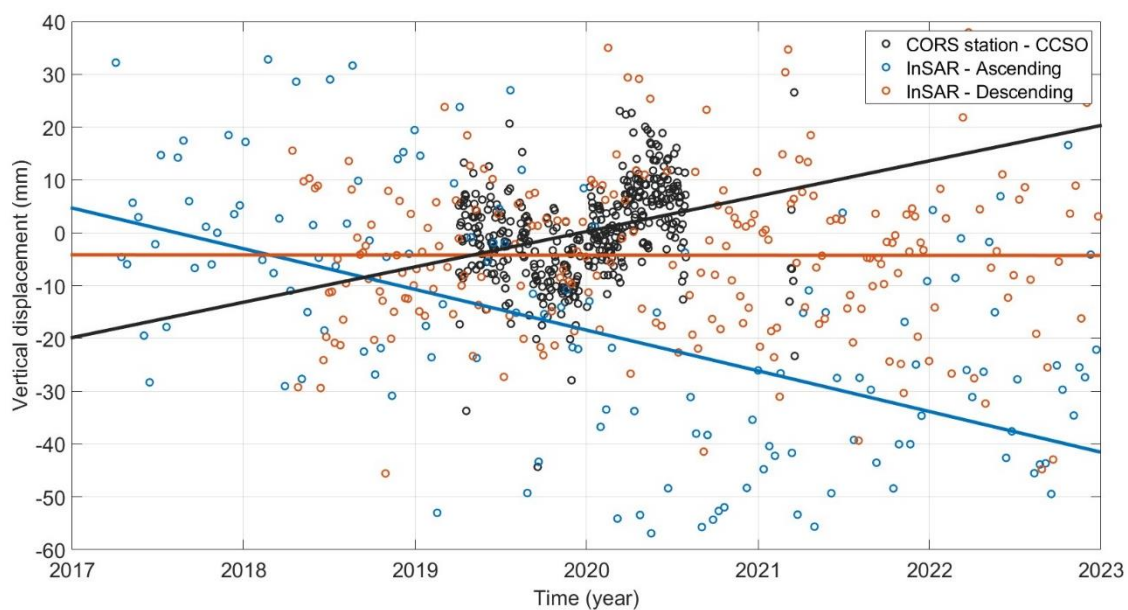
และเนื่องจากสถานี CCSO มีข้อมูลขาดหายไปทำให้สามารถดูแนวโน้มได้เฉพาะปี ค.ศ. 2019 ถึง 2021 เท่านั้น ดังนั้นจากกราฟในรูปที่ 83 ข้อมูลในชุดวงโคจรขาขึ้นมีแนวโน้มการทรุดตัวมากกว่าทุกข้อมูลอย่างเห็นได้ชัดและไม่สอดคล้องกับข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวจากทางภาคสนามที่มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 6.6 มม./ปี ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.7 มม./ปี ส่วนข้อมูลในชุดวงโคจรขาลงมีแนวโน้มการทรุดตัวที่ค่อนข้างคงที่แล้ว อาจมีสาเหตุมาจากข้อมูลจากเทคนิคอินซาร์มีการบันทึกจากชั้นดินแต่ข้อมูลค่าระดับความสูงจากภาคสนามมีการเก็บข้อมูลบนอาคารที่มีการวางโครงสร้างแข็งแรง ดังในรูปที่ 84 และ 85



รูปที่ 81 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาขึ้น สถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดฉะเชิงเทรา



รูปที่ 82 จุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม./ปี) วงโคจรขาลง สถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดฉะเชิงเทรา



รูปที่ 83 กราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) ของสถานี CCSO ในรัศมี 300 ม. โดยแกน x หมายถึง เวลา (ปี), แกน y หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.)



รูปที่ 84 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี CCSO บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัด ฉะเชิงเทรา



รูปที่ 85 ภาพถ่ายพื้นที่จริงของสถานี CCSO บริเวณสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัด
ฉะเชิงเทรา (สืบค้นเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2023 จาก Google Maps)

โดยในงานวิจัยได้มีการตรวจสอบด้วยวิธีการทางสถิติ t-test ระหว่างค่าอัตราการเคลื่อนตัวจากการประมวลผลและค่าอัตราการเคลื่อนตัวจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการพิจารณาในชุดข้อมูลขาขึ้นเป็นดังตารางที่ 7 และในชุดข้อมูลลงโคจรขาลง ดังตารางที่ 8

จากผลลัพธ์ทางสถิติพบว่า ในชุดข้อมูลลงโคจรขาขึ้นมีสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินสอดคล้องกัน 3 สถานีคือ สถานี DPT9 สถานี PKKT และสถานี BPLE ส่วนสถานีที่มีข้อมูลไม่สอดคล้องกัน 4 สถานี โดยเป็นสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวเร็วกว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์ 2 สถานี ได้แก่ สถานี SBKK เร็วกว่าอยู่ประมาณ 4.53 มม./ปี และสถานี KTBN ซึ่งเร็วกว่าอยู่ 4.78 มม./ปี นอกจากนี้มีสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวช้ากว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์ 2 สถานี ได้แก่ สถานี NKPT ช้ากว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์อยู่ 22.11 มม./ปี และสถานี CCSO ช้ากว่าประมาณ 14.37 มม./ปี

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์การตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินทางสถิติ t-test ระหว่างข้อมูลในชุดวงในวงโคจรขาขึ้นและสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง

ลำดับ	สถานี	InSAR (mm/yr)			CORS (mm/yr)			dof	95%	t
		V_{InSAR}	SD_{InSAR}	n_{InSAR}	V_{CORS}	SD_{CORS}	n_{CORS}			
1	DPT9	-4.41	0.37	41	-6.21	1.5	1	40	2.021	1.165
2	SBKK	-0.12	0.46	41	-4.65	1.4	1	40	2.021	3.074
3	PKKT	-2.05	0.76	41	-4.17	1.6	1	40	2.021	1.196
4	KTBN	-1.91	0.71	41	-6.69	1.7	1	40	2.021	2.594
5	BPLE	-2.73	0.83	39	-3.75	1.6	1	38	2.024	0.565
6	NKPT	-15.02	0.88	41	7.09	1.7	1	40	2.021	-11.55
7	CCSO	-7.76	1.27	41	6.61	1.7	1	40	2.021	-6.771

ส่วนผลลัพธ์ในชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น ดังตารางที่ 9 ตรวจสอบพบสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินสอดคล้องกัน 2 สถานีคือ สถานี DPT9 และสถานี BPLE ส่วนสถานีที่มีข้อมูลไม่สอดคล้องกัน 4 สถานี โดยเป็นสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวเร็วกว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์ 3 สถานี ได้แก่ สถานี SBKK เร็วกว่าอยู่ประมาณ 4.43 มม./ปี สถานี PKKT เร็วกว่าอยู่ 3.84 มม./ปี และสถานี KTBN ซึ่งเร็วกว่าอยู่ 5.47 มม./ปี ส่วนสถานีที่มีค่าอัตราการทรุดตัวช้ากว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์ 2 สถานี ได้แก่ สถานี NKPT ช้ากว่าค่าจากเทคนิคอินซาร์อยู่ 11.75 มม./ปี และสถานี CCSO ช้ากว่าประมาณ 6.34 มม./ปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์การตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินทางสถิติ t-test ระหว่างข้อมูลในชุดวงในวงโคจรขาขึ้นและสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง

ลำดับ	สถานี	InSAR (mm/yr)			CORS (mm/yr)			dof	95%	t
		V_{InSAR}	SD_{InSAR}	n_{InSAR}	V_{CORS}	SD_{CORS}	n_{CORS}			
1	DPT9	-4.48	0.21	41	-6.21	1.5	1	40	2.021	1.142
2	SBKK	-0.22	0.27	41	-4.65	1.4	1	40	2.021	3.107
3	PKKT	-0.33	0.51	41	-4.17	1.6	1	40	2.021	2.286
4	KTBN	-1.22	0.56	41	-6.69	1.7	1	40	2.021	3.056
5	BPLE	-6.6	0.64	39	-3.75	1.6	1	38	2.024	-1.653
6	NKPT	-4.66	0.64	39	7.09	1.7	1	38	2.024	-6.468
7	CCSO	0.27	0.87	41	6.61	1.7	1	40	2.021	-3.319

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 อภิปรายผลการศึกษา

5.1.1 อภิปรายผลการศึกษา ร่วมกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา

การอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline ร่วมกับงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันทั้งในเรื่องของผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินกับงานวิจัยในอดีตในพื้นที่ศึกษาเดียวกัน ดังนี้

งานวิจัยของ Aobpaet (2012), สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) และปวัน ภิรมย์ทอง (2015) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาเช่นเดียวกับงานศึกษานี้ โดยเป็นการศึกษาในช่วงระยะเวลา 2005-2012, 2009-2012 และ 1996-2000 ตามลำดับ ในแง่ของผลลัพธ์การประมวลผลพบว่า บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งมีพื้นที่บางส่วนซ้อนทับกับงานวิจัยนี้ได้แก่ พื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออก พื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันตก และจังหวัดสมุทรปราการ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครมีลักษณะการทรุดตัวค่อนข้างคงที่ ส่วนในพื้นที่ปริมณฑลพบบางบริเวณที่มีลักษณะการเคลื่อนตัวแตกต่างจากในวิจัยก่อนหน้านี้ โดยจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) พื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวเร็วขึ้น ดังเช่น อำเภอบางพลีและอำเภพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ เป็นต้น
- 2) พื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวช้าลง ดังเช่น อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี, พื้นที่ทางใต้ฝั่งตะวันออกของจังหวัดนครปฐม เป็นต้น
- 3) พื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวคงที่ ดังเช่น อำเภอเมืองและอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

ดังที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดนี้เป็นเพียงแค่การพิจารณาแนวโน้มการทรุดตัวเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยทั้ง 3 รวมไปถึงงานวิจัยนี้เป็นคนละช่วงเวลา ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาจากดาวเทียมคนละดวงซึ่งมีความถี่แตกต่างกัน ขนาดของรัศมีในการเฉลี่ยจุดข้อมูลค่าอัตราการเคลื่อนตัว รวมไปถึงการเลือกจุดอ้างอิงที่กำหนดให้ค่าการเคลื่อนตัวเป็นศูนย์เป็นคนละตำแหน่งกัน

5.1.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาร่วมกับข้อมูลจากสถานีอ้างอิงค่าพิกต์แบบต่อเนื่อง

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่ได้จากงานศึกษาและข้อมูลจากภาคสนามด้วยการพิจารณากราฟค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลาและการทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินจากเทคนิคอินซาร์สอดคล้องกับค่าจากภาคสนามและค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินจากเทคนิคอินซาร์ไม่สอดคล้องกับค่าจากภาคสนาม แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ค่าอัตราการเคลื่อนตัวจากเทคนิคอินซาร์เร็วกว่าค่าจากภาคสนามและค่าอัตราการเคลื่อนตัวจากเทคนิคอินซาร์ช้ากว่าค่าจากภาคสนาม โดยอาจมีสาเหตุมาจากการเก็บข้อมูลจากเทคนิคอินซาร์บันทึกข้อมูลที่บริเวณชั้นดิน ในขณะที่ภาคสนามบันทึกข้อมูลบนอาคารซึ่งพบว่าทุกสถานีมีการติดตั้งอุปกรณ์อยู่ที่ชั้นดาดฟ้าที่มีการวางโครงสร้างหรือฐานรากลงไปในชั้นดินลึก หรือสาเหตุมาจากบางสถานีอ้างอิงพิกต์แบบต่อเนื่องมีข้อมูลน้อยเกินไปเนื่องจากได้รับผลกระทบจากการติดตั้งอุปกรณ์หรือค่าคลาดเคลื่อน หรือข้อมูลจากเทคนิคอินซาร์ได้รับผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามา รวมไปถึงการเฉลี่ยจุดข้อมูลค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินบริเวณรอบสถานีนั้น ๆ มาด้วยซึ่งอาจมีจุดที่ซ้อนทับกับพื้นที่อื่น ๆ อย่างเช่น พื้นที่ทุ่งนาและพื้นที่เกษตรกรรม จึงอาจมีส่วนทำให้ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์และภาคสนามไม่สอดคล้องกันได้

ถึงอย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากเทคนิคอินซาร์แสดงให้เห็นข้อจำกัดของการเก็บข้อมูลจากภาคสนาม เนื่องจากเทคนิคอินซาร์ให้ผลลัพธ์ครอบคลุมเป็นในเชิงพื้นที่และเป็นข้อมูลที่ไม่มีค่าใช้จ่ายบุคคลทั่วไปเข้าถึงข้อมูลได้ด้วยตนเอง ในขณะที่ข้อมูลภาคสนามให้ผลลัพธ์ในรูปแบบจุดและจำเป็นต้องเก็บข้อมูลวนซ้ำทุก ๆ ปีเพื่อนำมาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในรูปแบบอนุกรมเวลารวมทั้งมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่าย ทรัพยากรเวลาและบุคคล

5.2 สรุปผลการศึกษา

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline ประกอบด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) จำนวน 169 ภาพ ในช่วงระยะเวลา 23 มีนาคม 2017 ถึง 22 ธันวาคม 2022 และชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาลง (Descending) จำนวน 219 ภาพ ช่วงระหว่าง 22 มีนาคม ค.ศ. 2018 ถึง 28 สิงหาคม ค.ศ. 2022 โดยในงานศึกษานี้ใช้ซอฟต์แวร์ MintPy ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผล ลดเวลาการทำงานและลดทรัพยากรในการจัดเก็บข้อมูล นอกจากนี้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ที่ใช้ในการประมวลผลยังให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายและดาวเทียมมีการโคจรมา

บันทึกภาพ ณ บริเวณตำแหน่งเดิมที่เป็นระบบและดาวเทียมเรดาร์ยังมีแผนการทำงานในอนาคตอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการประมวลผลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ใช้เวลาประมวลผลไม่นาน ทำให้ขั้นตอนการปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในทางเลือกเพื่อใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของประเทศไทยอย่างเป็นระบบในอนาคต

ผลการศึกษาพบจุดข้อมูลทั้งหมด 898,466 จุด ในชุดภาพวงโคจรขาขึ้น และ 2,282,084 จุด ในชุดภาพวงโคจรขาลง ในภาพรวมผลลัพธ์การทรุดตัวในพื้นที่ส่วนใหญ่ค่อนข้างคงที่ แต่จะมีในบางพื้นที่ที่พบค่าอัตราการทรุดตัวมากกว่า 30 มม./ปี และมากที่สุด 35 ถึง 40 มม./ปี อย่างเช่น พื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันตกติดกับจังหวัดสมุทรปราการ ในเขตบางขุนเทียนและทุ่งครุ พื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกติดกับจังหวัดสมุทรปราการ ในเขตลาดกระบังและเขตมีนบุรี พื้นที่นิคมอุตสาหกรรม จังหวัดสมุทรสาคร เป็นต้น จากภาพรวมผลลัพธ์จะเห็นได้ว่าชุดข้อมูลทั้งสองที่มีความเป็นอิสระต่อกันมีรูปแบบและแนวโน้มที่สอดคล้องกันแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล เมื่อพิจารณาร่วมกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในพื้นที่ศึกษาเดียวกันพบว่าค่าอัตราการทรุดตัวใกล้เคียงกันแต่ในบางพื้นที่พบค่าอัตราการทรุดตัวลดลง ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าเทคนิคการประมวลผลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline ผ่านซอฟต์แวร์ MintPy สามารถใช้เป็นอีกหนึ่งวิธีในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดข้อจำกัดของงานภาคสนามในเรื่องของเวลา ค่าใช้จ่ายและการเข้าไปรังวัดเก็บข้อมูลในพื้นที่จริง

จากผลการศึกษารายพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของแผ่นดินสูงตรวจพบพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวสูงและมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง อย่างเช่น สนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ, ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า เขตสะพานสูง เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างทั้งอาคารและถนนในพื้นที่ดังกล่าว โดยเฉพาะในพื้นที่เดียวกันแต่มีลักษณะการทรุดตัวแตกต่างกันซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องดำเนินการหาสาเหตุรวมทั้งประชาชนสามารถเตรียมพร้อมรับมือเหตุการณ์ในอนาคตที่อาจเกิดขึ้นได้ และจากผลจากการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาสามารถอธิบายได้ว่าชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาขึ้นมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาลงจึงสามารถสนับสนุนว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นจริง แต่ในบางพื้นที่อย่างเช่น พื้นที่ที่ไม่ใช่เมือง (Rural Area) ยังพบการขาดหายของจุดข้อมูลการทรุดตัวซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามา มุมมองการถ่ายภาพดาวเทียม และสภาพอากาศขณะทำการบันทึกภาพ

ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสองชุดข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันในบริเวณพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูงทั้งหมด 13 จุด จาก 6 พื้นที่ และเมื่อพิจารณาภาพรวมพบว่าค่าสหสัมพันธ์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.60 ถึง 0.90 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของทั้งสองชุดข้อมูลมีความสอดคล้องกันในระดับหนึ่งจึงสนับสนุนได้ว่ามี

การทรุดตัวเกิดขึ้นในพื้นที่นั้นจริง โดยพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กันของข้อมูลมากที่สุดคือบริเวณทางแยก
 ยกระดับตัดกับถนนบรมราชชนนี ถนนพรานนก-พุทธมณฑลสาย 4 มีค่าเท่ากับ 0.92 รองลงมาคือ
 ปลายทางทิศตะวันออก ถนนกัลปพฤกษ์ มีค่าเท่ากับ 0.89 แต่ในบางพื้นที่ที่ผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกัน
 อย่างในพื้นที่ทางแยกต่างระดับบางขุนเทียน ถนนพระราม 2 มีค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสองชุดข้อมูล
 เท่ากับ 0.34 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากมุมมองดาวเทียมหรือได้รับผลกระทบจากค่าคลาดเคลื่อนในชั้น
 บรรยากาศเนื่องจากทั้งสองชุดข้อมูลเก็บคนละช่วงเวลาจึงอาจมีส่วนทำให้มีค่าสหสัมพันธ์ค่อนข้าง
 น้อย

สำหรับผลลัพธ์การประเมินประสิทธิภาพร่วมกับชุดข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวจากสถานี
 อ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง (CORS station) ทั้ง 7 สถานี ด้วยสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 พบว่าสถานีที่มีแนวโน้มค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการประมวลผล
 ด้วยเทคนิคอินซาร์ ในชุดวงโคจรขาขึ้น ได้แก่ สถานี DPT9 สถานี PKKT และสถานี BPLE ส่วนในชุด
 ข้อมูลวงโคจรขาลง ได้แก่ สถานี DPT9 และสถานี BPLE ส่วนสถานีที่ข้อมูลไม่สอดคล้องกับข้อมูล
 จากเทคนิคอินซาร์จำแนกได้เป็น 2 รูปแบบคือ ข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวจากอินซาร์เร็วกว่าข้อมูล
 จากภาคสนาม และอีกรูปแบบคือ ข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวจากอินซาร์ช้ากว่าข้อมูลจากภาคสนาม
 ซึ่งอาจเป็นเพราะข้อมูลอินซาร์มีการบันทึกบนชั้นดินแต่ข้อมูลภาคสนามมีการบันทึกบนอาคารซึ่งอาจ
 มีโครงสร้างชั้นฐานรากแตกต่างกัน ข้อมูลภาคสนามในบางสถานีมีน้อยเกินไป ข้อมูลจากอินซาร์มีการ
 เฉลี่ยจุดผลลัพธ์การทรุดตัวบริเวณรอบมาด้วย อย่างเช่น ท่งหญ้า พื้นที่เกษตรกรรม พื้นน้ำ เป็นต้น
 นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากสถานีภาคสนามมีลักษณะเป็นวัฏจักร
 รายปีแตกต่างจากผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิคอินซาร์อาจมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่
 ปะปนเข้ามากับข้อมูลผลลัพธ์ซึ่งถึงแม้ว่าข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยจากเทคนิคอินซาร์แบบ
 อนุกรมเวลา วิธี Small Baseline ที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy อาจมีบางสถานีที่
 ข้อมูลไม่สัมพันธ์กันอยู่บ้าง แต่ถ้าหากพิจารณาในเชิงพื้นที่จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการทรุดตัวจากกราฟ
 ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยสามารถบอกได้ว่าการทรุดตัวเกิดขึ้น ณ บริเวณนั้นๆ จริงและแสดงให้เห็น
 ว่าเหมาะกับงานประเภทใช้ติดตาม (Monitoring) และเฝ้าระวังการทรุดตัวของแผ่นดิน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ MintPy พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าสามารถตรวจสอบการทรุดตัวได้จริง และถือได้ว่าเป็นความใกล้เคียงกับค่าระดับความสูงจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง ซึ่งอาจมีการนำเสนอให้กับหน่วยงานที่สนใจสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการติดตามและเฝ้าระวังการทรุดตัวเนื่องจากการอัดเทปภาพถ่ายดาวเทียมเพิ่มเข้าไปและประมวลผลออกมาเป็นค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ไม่ซับซ้อน ซอฟต์แวร์และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลไม่มีค่าใช้จ่าย โดยสามารถจัดทำเป็นระบบขึ้น อัปเดตข้อมูลทุก ๆ 1 ถึง 3 เดือน มีการจัดแสดงบนแผนที่ออนไลน์เพื่อให้บุคคลทั่วไปเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและมีการเตรียมการเฝ้าระวังได้ด้วยตัวเอง

5.2.2 ในงานวิจัยเป็นการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยการประมวลผลข้อมูลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา ซึ่งในงานวิจัยเป็นการตรวจสอบและติดตามค่าการทรุดตัวของแผ่นดินโดยการพิจารณาจากผลลัพธ์เพียง 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและข้อมูลวงโคจรขาลง และพิจารณาร่วมกับค่าระดับความสูงจากสถานีอ้างอิงค่าพิกัดแบบต่อเนื่อง แต่ถ้าหากนำผลลัพธ์ที่ได้มาพิจารณาร่วมกับข้อมูลทางภูมิศาสตร์อื่น ๆ อาจสามารถระบุสาเหตุและแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างละเอียดได้ อย่างเช่น ข้อมูลความหนาแน่นประชากร ข้อมูลการเกิดดินถล่ม ข้อมูลจุดอ่อนน้ำท่วม ข้อมูลธรณีวิทยาหรือข้อมูลสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

5.2.3 จากผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในงานวิจัยจะเห็นได้ว่ามีหลายพื้นที่ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่มีอัตราการทรุดของแผ่นดินเริ่มจะคงที่หรือมีการชะลอการทรุดตัวบ้างแล้ว และเนื่องจากข้อดีของซอฟต์แวร์ MintPy ที่ใช้เวลาในการประมวลผลข้อมูลไม่นาน จึงมีข้อเสนอแนะในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ภูมิภาคอื่น ๆ ในประเทศไทย อย่างเช่น บริเวณทางภาคเหนือที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ลาดชันเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินถล่ม, พื้นที่ราบติดชายฝั่งทะเล เป็นต้น คล้ายคลึงกับในงานวิจัยของ Morishita (2021) ที่ได้ใช้การประมวลผลเทคนิค Small Baseline ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวครอบคลุมทุกภูมิภาคในประเทศไทยญี่ปุ่น ถึงแม้ว่าขนาดความละเอียดของผลลัพธ์จะเป็นในเชิงพื้นที่แต่ยังสามารถตรวจจับการเคลื่อนตัวของแผ่นดินได้ เพื่อให้หน่วยงานสามารถเตรียมพร้อมรับมือและประชาชนสามารถเฝ้าระวังกับเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้

บรรณานุกรม

- Agency, E. S. (2012). Sentinel-1 : ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. In.
- Agram, P. J., R. ; Riel, B. V. ; Simons, M. ; Doin, M. ; Lasserre, C. ; Hetland, E. A. (2012). *GIAnt - Generic InSAR Analysis Toolbox*.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012AGUFM.G43A0897A/abstract>
- ALTAMIRA, T. SAR Imagery. <https://site.tre-altamira.com/insar/>.
- Aobpaet, A. (2012). *Insar time series analysis for land subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area* Chulalongkorn University]. Chulalongkorn University.
<http://doi.org/10.14457/CU.the.2012.918>
- Aroonsrimorakot, S. (2020). COASTAL LAND SUBSIDING AND EROSION OF UPPER GULF OF THAILAND. 24(73). https://so05.tci-thaijo.org/index.php/DPU_Suthiparithat_Journal/article/view/246115
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792>
- Cigna, F., Esquivel Ramirez, R., & Tapete, D. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sensing*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 254.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112254>
- Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arian, M. (2012). Recent advances in SAR

- interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B7). <https://doi.org/10.1029/2006jb004763>
- Karamvavis, K., & Karathanassi, V. (2020). Performance Analysis of Open Source Time Series InSAR Methods for Deformation Monitoring over a Broader Mining Region. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/rs12091380>
- Li, Z., Cao, Y., Wei, J., Duan, M., Wu, L., Hou, J., & Zhu, J. (2019). Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Science Reviews*, 192, 258-284. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.008>
- Morishita, Y. (2021). Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00402-7>
- Samsonov, S. V., Feng, W., Peltier, A., Geirsson, H., d'Orey, N., & Tiampo, K. F. (2017). Multidimensional Small Baseline Subset (MSBAS) for volcano monitoring in two dimensions: Opportunities and challenges. Case study Piton de la Fournaise volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344, 121-138. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.04.017>
- SARMAP. (2009). SAR-Guidebook. In.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>
- Zhou, C., Gong, H., Chen, B., Gao, M., Cao, Q., Cao, J., Duan, L., Zuo, J., & Shi, M. (2020). Land Subsidence Response to Different Land Use Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Remote Sensing*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/rs12030457>
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2020). โครงการระบบติดตามเฝ้าระวังระดับน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาลทั่วประเทศ งบประมาณรายจ่ายประจำปี พ.ศ.2563.

คณะกรรมการบูรณาการนโยบายพัฒนาภาค. (2019). แผนพัฒนาภาค พ.ศ. 2560-2565 (ฉบับทบทวน).

ชัยทวี, ส. ก. (2015). การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและ
ปริมณฑลโดยเทคนิค *Time-Series InSAR* (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย)

ปิยะมหารัตน์, น. น. ช. (2022). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์เพื่อติดตามการเคลื่อนตัว
ของเขื่อนศรีนครินทร์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27,

ภิรมย์ทอง, ป. น. (2015). การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และ
แนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ. (2020). โครงข่ายสถานีอ้างอิง ค่าพิกัด ค่าระดับและเวลามาตรฐาน
ประเทศไทย แบบรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร เพื่อประเมินความเสียหายในพื้นที่เสี่ยง
ภัย (GNSS CORS NETWORK). In.

สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. (2015). วาระปฏิรูปที่ 27 : การปฏิรูปเพื่อรับมือวิกฤตการณ์น้ำ
ทะเลขึ้นสูงและแผ่นดินทรุดพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. ISBN : 978-616-399-006-
8, 25.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

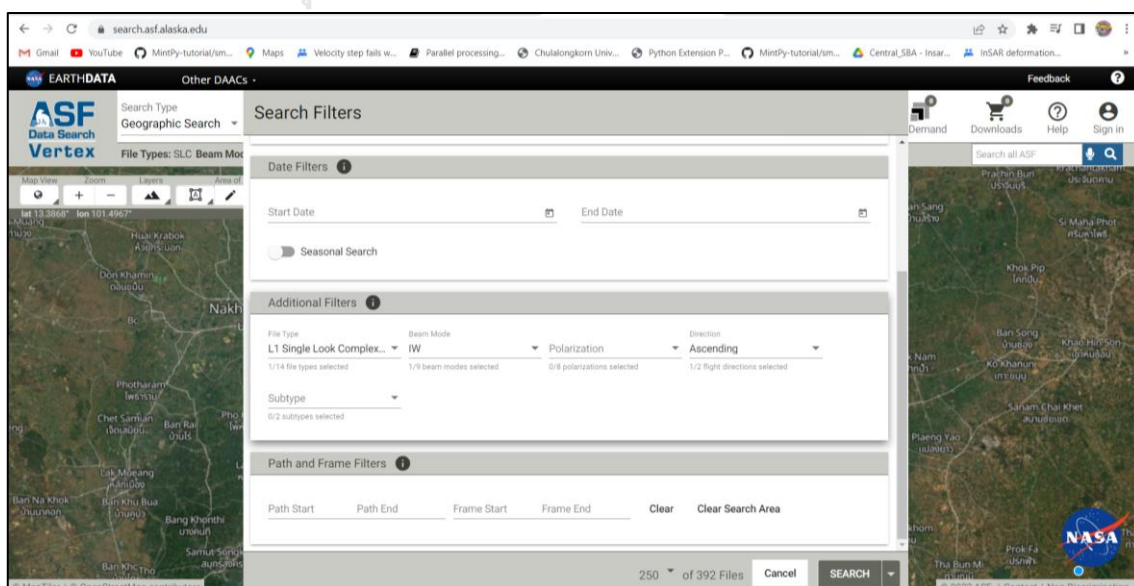
ภาคผนวก ก ขั้นตอนก่อนการประมวลผล อธิบายการส่งประมวลผลภาพ Interferogram และดาวน์โหลดข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy โดยละเอียด

ขั้นตอนที่ 1 : การส่งประมวลผลภาพ Interferogram

ปัจจุบันมีองค์กรที่เข้ามามีบทบาทในการให้บริการการประมวลผลภาพ Interferogram ทำให้มีความรวดเร็วในการทำงานกับข้อมูลขนาดใหญ่และเพิ่มความเข้าถึงได้ถึงเทคนิคการประมวลผล InSAR เพราะซอฟต์แวร์การประมวลผลคู่ภาพ InSAR มีราคาแพงและต้องการความรู้ความเข้าใจในการประมวลผลสูง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้บริการทางอินเทอร์เน็ตของ ASF (Alaska SAR Facility) และเป็นภาพ Sentinel-1 โดยจะต้องมีการลงทะเบียนเข้าสู่ระบบ NASA EARTHDATA ก่อนจึงสามารถเข้าไปเลือกคู่ภาพ Interferogram ตามเงื่อนไขที่ต้องการ จากนั้นส่งงานไปประมวลผลแล้วทำการดาวน์โหลดผลิตภัณฑ์ที่ได้

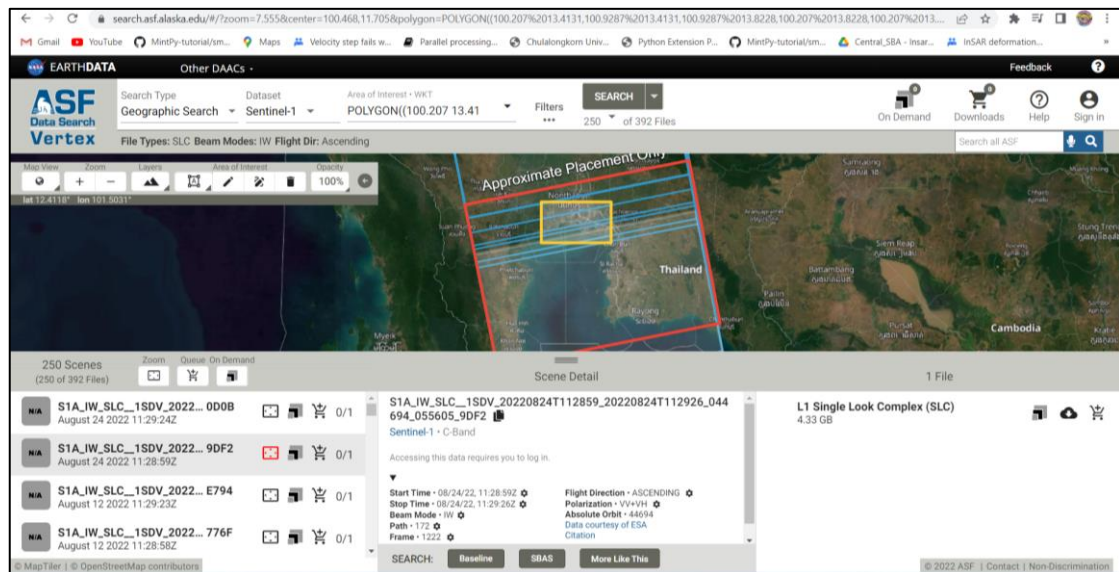
วิธีการส่งคำสั่งผลิตงานคู่ภาพ Interferogram สามารถทำได้จากหน้าเว็บ ASF โดยต้องระบุเงื่อนไข เพื่อให้ทาง ASF ทำการสืบค้นภาพ ได้แก่

1. พื้นที่ศึกษา โดยผู้ใช้สามารถระบุขอบเขตพื้นที่ได้จาก shapefile หรือเลือกติกรอบพื้นที่ได้เอง
2. รูปแบบผลิตภัณฑ์ ในที่นี้เลือกผลิตภัณฑ์แบบ L1 Single look complex (SLC)
3. Beam mode เลือก IW (Interferometric Wide-Swath mode)
4. วงโคจร ได้แก่ วงโคจรขาขึ้น (Ascending) และ วงโคจรขาลง (Descending)



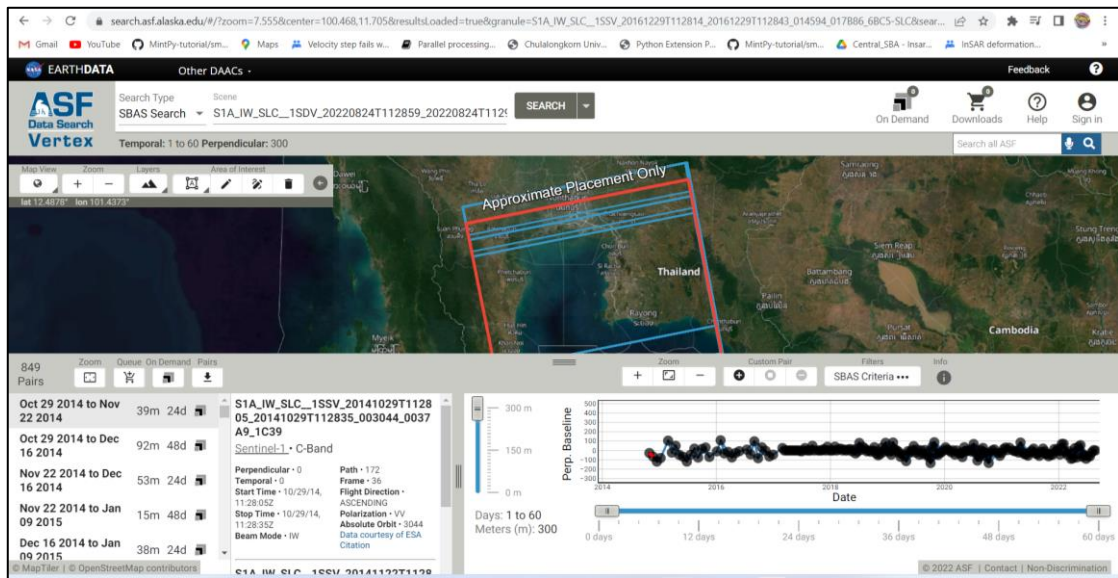
รูปที่ ก.1 เงื่อนไขในการค้นหาจากหน้าเว็บ ASF (<https://search.asf.alaska.edu>)

ผลจากการค้นหาเป็นดังรูป ผู้ใช้สามารถเลือกข้อมูลภาพ SLC ที่ต้องการนำไปผลิตเป็นชุดภาพ Interferogram หลังจากนั้นนำภาพนั้นไปค้นหาใน SBAS Search Mode ได้ โดยเว็บ ASF จะดำเนินการจับคู่ภาพ Interferogram ให้โดยมีภาพที่เลือกเป็นตำแหน่งโดยประมาณ



รูปที่ ก.2 การค้นหาจากหน้าเว็บ ASF (<https://search.asf.alaska.edu>)

จากนั้นทำการเลือกคู่ภาพตามเงื่อนไขวันที่บันทึกภาพ Perpendicular baseline และ Temporary baseline ดังรูปที่ ก.3 เมื่อได้บรรดาคู่ภาพที่ต้องการ ให้ผู้ใช้เลือกข้อมูลคู่ภาพ (Pairs) จากการสืบค้นทั้งหมดโดยดาวน์โหลดรายชื่อชุดภาพ Interferogram เป็นรูปแบบไฟล์ CSV ดังรูปที่ ก.4

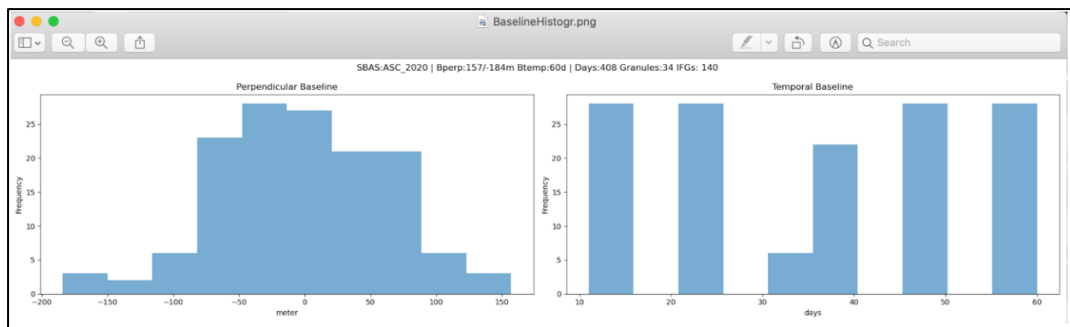


รูปที่ ก.3 ผลลัพธ์การค้นหา จากหน้าเว็บ ASF (<https://search.asf.alaska.edu>)

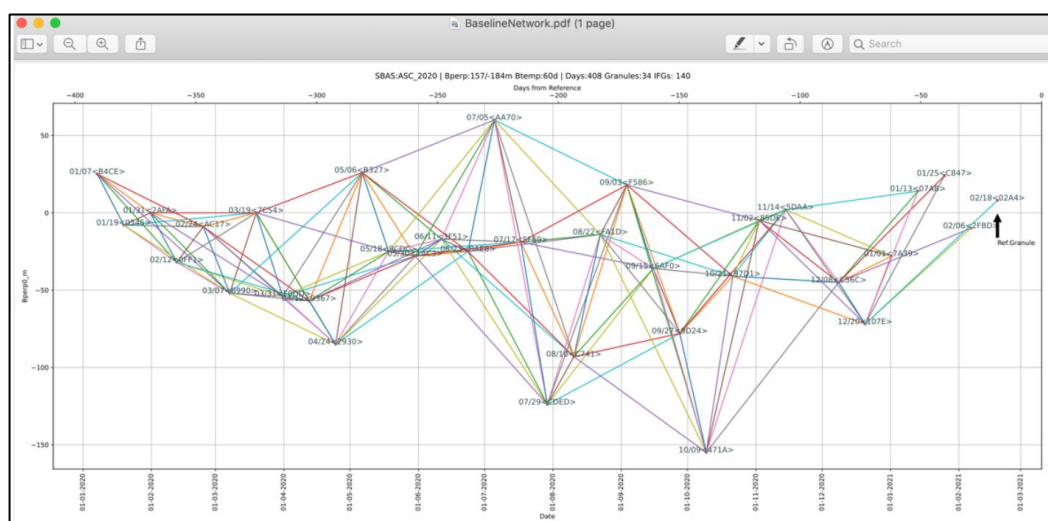
File	Home	Insert	Page Layout	Formulas	Data	Review	View	Help	Comments	Share
Q26										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Reference	Reference	Secondary	Secondary	Secondary	Pair	Temporal	Baseline (days)	
2	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
3	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
4	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
5	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
6	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
7	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
8	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
9	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
10	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
11	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
12	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
13	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
14	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
15	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
16	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
17	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
18	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
19	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
20	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
21	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
22	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
23	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
24	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
25	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
26	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
27	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				
28	S1A_IW_SLC_1SDV_20211121T112916_20211121T112946_040669_04D34C_09B0	https://da	-46 S1A_IW_SLC_1SDV_20220108T112916_20220108T112944_041369_04EB1F_9C1A	https://da	-46	48				

รูปที่ ก.4 ตัวอย่างไฟล์ CSV บันทึกการละเอียดค่าภาพ

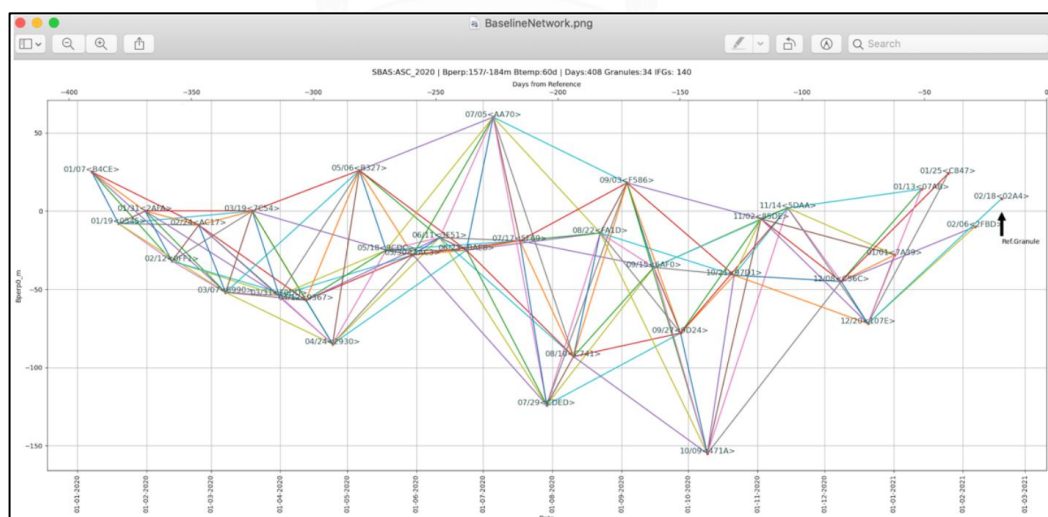
เมื่อมีข้อมูลรายละเอียดค่าภาพในรูปแบบไฟล์ CSV โดยจะต้องนำไว้ในโฟลเดอร์ที่ต้องการจัดเก็บผลิตภัณฑ์ผลลัพธ์ก่อน ต่อมาใช้ Script file สำหรับใช้ในการส่งรายชื่อชุดภาพ Interferogram ไปยังระบบ ASF จากนั้นทางระบบจะดำเนินการผลิตภาพ Interferogram ให้แก่ผู้ใช้ โดย Script file นี้จะอาศัยการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ไพทอน (Python) ดังตัวอย่างที่ใช้ในงานนี้เป็น Script file ชื่อ 4_job_submit.py หลังจากนั้นระบุชื่องาน (เช่นชื่อ ASC_2020) และตำแหน่งของไฟล์รายละเอียดค่าภาพ ลงท้ายด้วย -x เพื่อสั่งให้ดำเนินงานทันที



รูปที่ ก.7 ผลลัพธ์ BaselineHistogr.png



รูปที่ ก.8 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf



รูปที่ ก.9 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.png

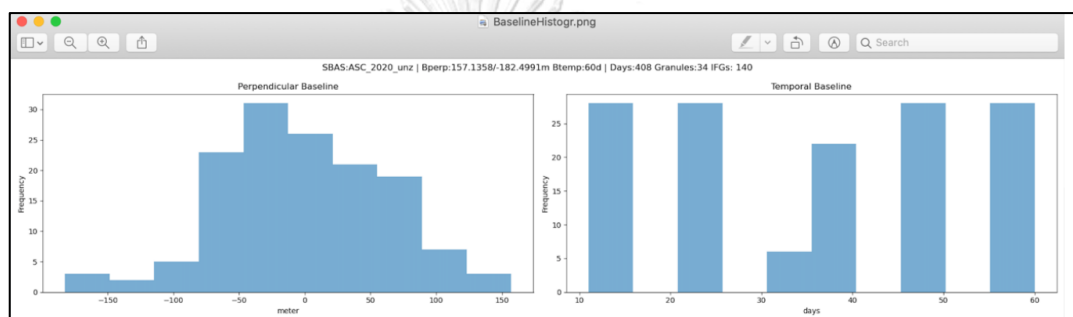
นอกจากนี้สามารถใช้ Script file ในการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของคู่ภาพ ซึ่งจะอาศัยการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ไพทอน (Python) ดังตัวอย่างที่ใช้ในงานนี้เป็น Script file

ชื่อ 3_PlotBL_Hyp3Zip.py ซึ่งจะใช้กับ Text file ที่ได้จากการ Unzip ไฟล์จากการประมวลผลภาพ Interferogram สามารถใช้งานได้ผ่าน Linux เช่นเดียวกัน ด้วยการระบุ Path โพลเดอร์ที่เก็บ Text file อยู่

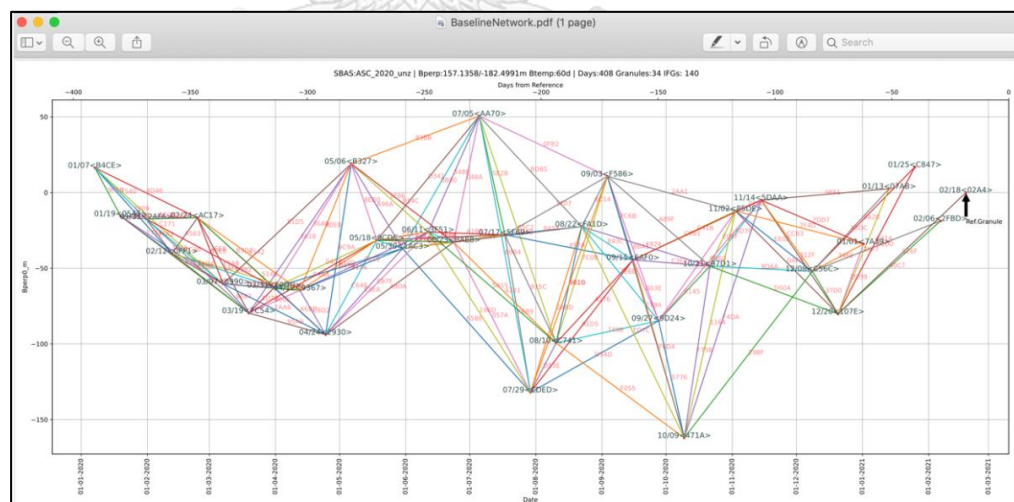
คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
python 3_PlotBL_Hyp3Zip.py /pathโฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ CSV
```

ได้ผลลัพธ์ทั้งหมด 3 ไฟล์ ดังรูปที่ ก.10, ก.11 และ ก.12 ตามลำดับ



รูปที่ ก.10 ผลลัพธ์ BaselineHistr.png



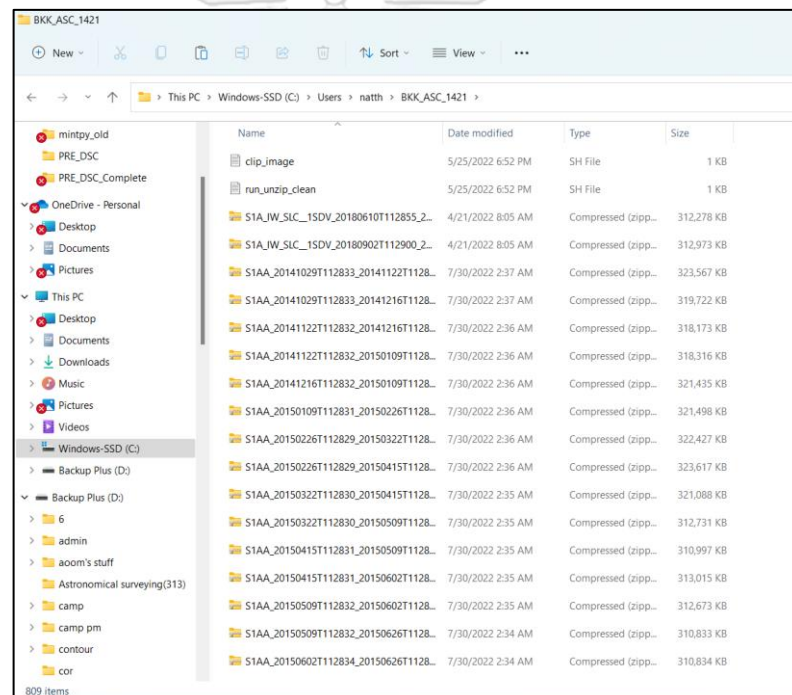
รูปที่ ก.11 ผลลัพธ์ BaselineNetwork.pdf

ภาคผนวก ข ขั้นตอนการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy โดยละเอียด

ขั้นตอนที่ 1 : การเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนแรก ดำเนินการสร้างโฟลเดอร์สำหรับประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ยกตัวอย่าง เช่น ในการศึกษางานวิจัยมีพื้นที่การศึกษา คือ บริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล วงโคจรขาขึ้น ระยะเวลาตั้งแต่ปี 2017 - 2022 เพื่อความเป็นระเบียบเรียบร้อยจึงตั้งชื่อว่า BKK_ASC_1722 ซึ่งในโฟลเดอร์จะประกอบไปด้วย

1. ไฟล์ zip ของคู่ภาพ Interferogram ทั้งหมดที่ดาวโหลดออกมาจากระบบ
2. ไฟล์ clip_image.sh
3. ไฟล์ run_unzip_clean.sh ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 โฟลเดอร์ BKK_ASC_1722

ต่อมาใน Terminal เลือก Directory ไปที่ Path ของโฟลเดอร์ BKK_ASC_1421 แล้วใช้คำสั่ง `ls S1* > zip_name.txt` เพื่อสร้างไฟล์ .txt ไว้สำหรับเก็บชื่อโฟลเดอร์ของคู่ภาพ Interferogram ทั้งหมด ดังรูปที่ ข.2

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:~$ cd ..
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/home$ cd ..
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/~$ cd mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ ls S1* > zip_name.txt
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ |

```

รูปที่ ข.2 การใช้คำสั่งใน Terminal

เมื่อคำสั่งถูกต้องจะปรากฏไฟล์ zip_name.txt ในโฟลเดอร์ และในขั้นตอนนี้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ด้วยคำสั่ง cat zip_name.txt จะแสดงชื่อไฟล์ของคู่ภาพ Interferogram ซึ่งยังอยู่ในลักษณะของ zip_file ทั้งหมดที่เก็บไว้ด้านใน ผลลัพธ์ดังรูปที่ ข.3

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:~$ cd ..
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/home$ cd ..
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/~$ cd mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ ls S1* > zip_name.txt
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ cat zip_name.txt
S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14.zip
S1AA_20141029T112833_20141216T112832_VVP048_INT80_G_wef_3A1B.zip
S1AA_20141122T112832_20141216T112832_VVP024_INT80_G_wef_91D9.zip
S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP048_INT80_G_wef_6AEC.zip
S1AA_20141216T112832_20150109T112831_VVP024_INT80_G_wef_F462.zip
S1AA_20150109T112831_20150226T112829_VVP048_INT80_G_wef_3D4E.zip
S1AA_20150226T112829_20150322T112830_VVP024_INT80_G_wef_A522.zip
S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP048_INT80_G_wef_0F80.zip
S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP024_INT80_G_wef_A813.zip
S1AA_20150322T112830_20150509T112832_VVP048_INT80_G_wef_FFDB.zip
S1AA_20150415T112831_20150509T112832_VVP024_INT80_G_wef_58D8.zip
S1AA_20150415T112831_20150602T112834_VVP048_INT80_G_wef_E950.zip
S1AA_20150509T112832_20150602T112834_VVP024_INT80_G_wef_6DD4.zip
S1AA_20150509T112832_20150626T112835_VVP048_INT80_G_wef_63BE.zip
S1AA_20150602T112834_20150626T112835_VVP024_INT80_G_wef_59A7.zip
S1AA_20150602T112834_20150720T112836_VVP048_INT80_G_wef_F6D1.zip
S1AA_20150626T112835_20150720T112836_VVP024_INT80_G_wef_B0F8.zip
S1AA_20150626T112835_20150813T112837_VVP048_INT80_G_wef_1E19.zip
S1AA_20150720T112836_20150813T112837_VVP024_INT80_G_wef_1F97.zip
S1AA_20150720T112836_20150906T112838_VVP048_INT80_G_wef_6924.zip
S1AA_20150813T112837_20150906T112838_VVP024_INT80_G_wef_DF8B.zip
S1AA_20150813T112837_20150930T112839_VVP048_INT80_G_wef_60D7.zip
S1AA_20150906T112838_20150930T112839_VVP024_INT80_G_wef_4A3E.zip
S1AA_20150906T112838_20151024T112839_VVP048_INT80_G_wef_ED8D.zip
S1AA_20150930T112839_20151024T112839_VVP024_INT80_G_wef_165E.zip
S1AA_20150930T112839_20151117T112833_VVP048_INT80_G_wef_AA71.zip
S1AA_20151024T112839_20151117T112833_VVP024_INT80_G_wef_D6C4.zip
S1AA_20151117T112833_20160104T112831_VVP048_INT80_G_wef_6630.zip
S1AA_20160104T112831_20160128T112830_VVP024_INT80_G_wef_1264.zip
S1AA_20160104T112831_20160221T112830_VVP048_INT80_G_wef_A6B7.zip
S1AA_20160128T112830_20160221T112830_VVP024_INT80_G_wef_4859.zip
S1AA_20160128T112830_20160316T112831_VVP048_INT80_G_wef_0446.zip
S1AA_20160221T112830_20160316T112831_VVP024_INT80_G_wef_4C5C.zip
S1AA_20160221T112830_20160409T112831_VVP048_INT80_G_wef_D9E6.zip
S1AA_20160316T112831_20160409T112831_VVP024_INT80_G_wef_742A.zip

```

รูปที่ ข.3 ข้อมูลด้านในของไฟล์ zip_name.txt

ขั้นตอนที่ 2 : การแตกไฟล์คู่ภาพ Interferogram ที่ได้จากระบบ Alaska Satellite Facility (ASF)

ขั้นตอนถัดไป เป็นการแตกไฟล์และลบไฟล์ข้อมูลบางส่วนที่ไม่จำเป็นในไฟล์ที่ Unzip แล้วออกไปเพื่อลดขนาดของข้อมูล ด้วยการใช้คำสั่ง ./run_unzip_clean.sh โดยในไฟล์ Shell script นี้ประกอบไปด้วยคำสั่ง Unzip แล้วตามด้วยคำสั่ง rm -rf ซึ่งเป็นการลบไฟล์ที่ไม่ต้องการ ดังรูปที่ ข.4

```

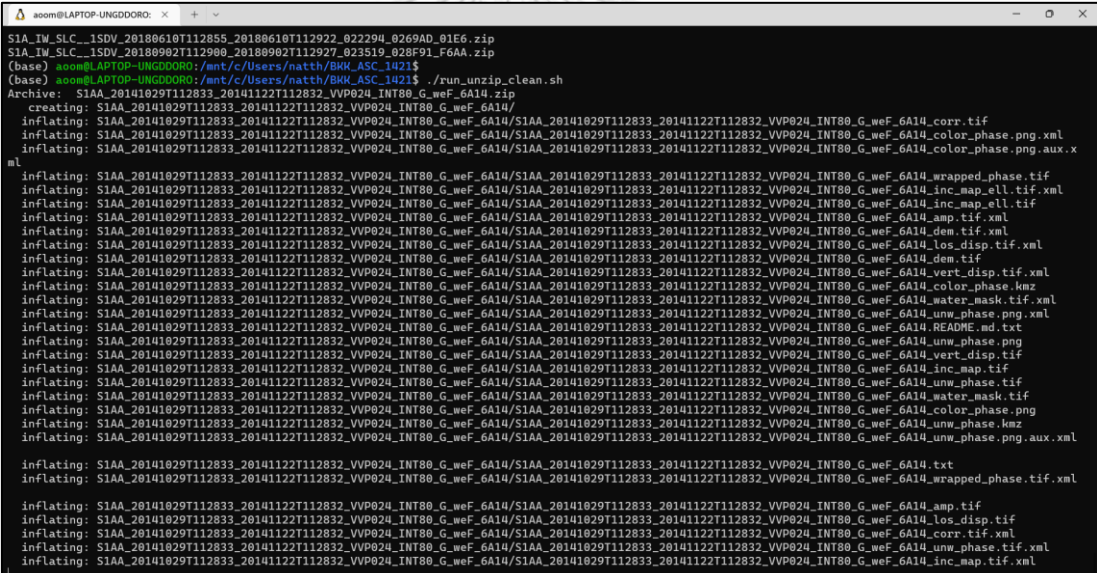
run_unzip_clean - Notepad
File Edit View

for ifg in `cat zip_name.txt`; do
unzip $ifg
rm -rf ./S*/*.kmz
#rm -rf ./S*/* color_phase.png.*
rm -rf ./S*/*los_disp*
rm -rf ./S*/*lv_phi*
rm -rf ./S*/*amp*
rm -rf ./S*/*inc_map_ell*
rm -rf ./S*/*vert_disp*
rm -rf ./S*/*wrapped*
rm -rf $ifg
done

```

รูปที่ ข.4 ข้อมูลด้านในของไฟล์ run_unzip_clean.sh

ผลลัพธ์หลังจากใช้คำสั่ง ./run_unzip_clean.sh จะเห็นว่าตัว Terminal จะ Unzip ไฟล์ข้อมูลก่อนแล้วจึงกำจัดไฟล์ที่ไม่ต้องการออก การทำงานเป็นดังรูปที่ ข.5



```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + -
SIAA_IW_SLC_1SDV_20180610T112855_20180610T112922_0227204_0269AD_01E6.zip
SIAA_IW_SLC_1SDV_20180902T112900_20180902T112927_023519_028F91_F6AA.zip
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$
(base) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$ ./run_unzip_clean.sh
Archive: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14.zip
  creating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_corr.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_color_phase.png.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_color_phase.png.aux.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_wrapped_phase.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_inc_map_ell.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_inc_map_ell.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_amp.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_dem.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_los_disp.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_dem.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_vert_disp.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_color_phase.kmz
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_water_mask.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.png.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_INC.md.txt
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.png
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_vert_disp.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_inc_map.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_water_mask.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_color_phase.png
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.kmz
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.png.aux.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14.txt
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_wrapped_phase.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_amp.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_los_disp.tif
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_corr.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.tif.xml
  inflating: SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/SIAA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_inc_map.tif.xml

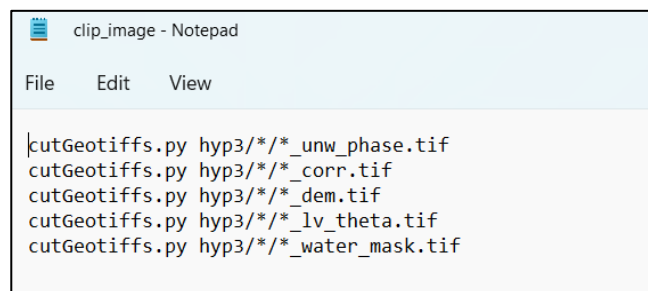
```

รูปที่ ข.5 การทำงานของคำสั่ง ./run_unzip_clean.sh ใน Terminal

ขั้นตอนที่ 3 : การตัดภาพ (Clip) จากไฟล์คู่ภาพ Interferogram ที่ Unzip แล้ว

ขั้นตอนถัดมา จะใช้คำสั่ง ./clip_image.sh เพื่อดำเนินการ Clip ในรูปแบบ GeoTIFF ให้มีขนาดเท่ากันทุกภาพ เนื่องจากการคำนวณการเคลื่อนตัวจำเป็นต้องมีขนาดของจุดภาพ (pixel) เท่ากันและอยู่ใน Reference frame เดียวกันทุกภาพ กล่าวคือทุกไฟล์ Unwrapped phase, Coherence image รวมถึงข้อมูลที่ใช้ในการช่วยประมวลผลทั้ง DEM, Incident angle ทุก ๆ ไฟล์ จะต้องมีความยาวจุดภาพที่เท่ากันและมีการเรียงตัวในระบบเดียวกัน

ในขั้นตอนนี้อาจใช้เวลาานาน ดังนั้นผู้ใช้สามารถเลือกเฉพาะโพลเดอร์ที่ต้องการนำไปประมวลผลในซอฟต์แวร์ MintPy ต่อ โดยจะต้องมีการติดตั้ง Package hyp3lib ก่อนเพื่อสามารถใช้คำสั่งนี้ได้ ภายในไฟล์ประกอบด้วยคำสั่ง cutGeotiffs.py แล้วตามด้วยไฟล์ที่ต้องการ Clip ดังรูปที่ ข.6



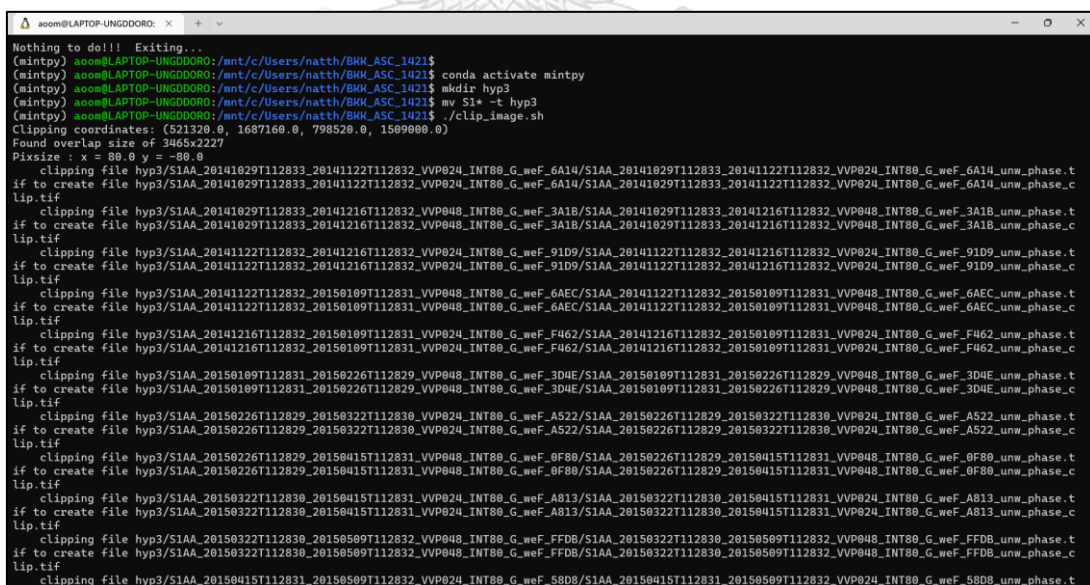
```
clip_image - Notepad

File Edit View

|cutGeotiffs.py hyp3/*/*_unw_phase.tif
cutGeotiffs.py hyp3/*/*_corr.tif
cutGeotiffs.py hyp3/*/*_dem.tif
cutGeotiffs.py hyp3/*/*_lv_theta.tif
cutGeotiffs.py hyp3/*/*_water_mask.tif
```

รูปที่ ข.6 ข้อมูลด้านในของไฟล์ clip_image.sh

ใน Terminal ดำเนินการเตรียมข้อมูลด้วยการสร้าง โพลเดอร์ ชื่อ hyp3 แล้วย้ายโพลเดอร์ที่ Unzip แล้วไว้ด้านใน จากนั้นใช้คำสั่ง ./clip_image.sh จะทำการ Clip ไฟล์ตามที่ระบุไว้ทีละโพลเดอร์ การทำงานเป็นดังรูปที่ ข.7 จนเสร็จสมบูรณ์แล้วประมวลผลในซอฟต์แวร์ MintPy ในขั้นตอนต่อไป



```
Nothing to do!!! Exiting...
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$ conda activate mintpy
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$ mkdir hyp3
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$ mv S1* -t hyp3
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421$ ./clip_image.sh
Clipping coordinates: (521320.0, 1687160.0, 798520.0, 1509000.0)
Found overlap size of 3465x2227
Pixsize : x = 80.0 y = -80.0
clipping file hyp3/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP024_INT80_G_wef_6A14_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP048_INT80_G_wef_3A1B/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP048_INT80_G_wef_3A1B_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP048_INT80_G_wef_3A1B/S1AA_20141029T112833_20141122T112832_VVP048_INT80_G_wef_3A1B_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20141122T112832_20141216T112832_VVP024_INT80_G_wef_9109/S1AA_20141122T112832_20141216T112832_VVP024_INT80_G_wef_9109_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20141122T112832_20141216T112832_VVP024_INT80_G_wef_9109/S1AA_20141122T112832_20141216T112832_VVP024_INT80_G_wef_9109_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP048_INT80_G_wef_6AEC/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP048_INT80_G_wef_6AEC_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP048_INT80_G_wef_6AEC/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP048_INT80_G_wef_6AEC_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP024_INT80_G_wef_F462/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP024_INT80_G_wef_F462_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP024_INT80_G_wef_F462/S1AA_20141122T112832_20150109T112831_VVP024_INT80_G_wef_F462_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150109T112831_20150226T112829_VVP048_INT80_G_wef_3D4E/S1AA_20150109T112831_20150226T112829_VVP048_INT80_G_wef_3D4E_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20150109T112831_20150226T112829_VVP048_INT80_G_wef_3D4E/S1AA_20150109T112831_20150226T112829_VVP048_INT80_G_wef_3D4E_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150226T112829_20150322T112830_VVP024_INT80_G_wef_A522/S1AA_20150226T112829_20150322T112830_VVP024_INT80_G_wef_A522_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20150226T112829_20150322T112830_VVP024_INT80_G_wef_A522/S1AA_20150226T112829_20150322T112830_VVP024_INT80_G_wef_A522_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150226T112829_20150415T112831_VVP048_INT80_G_wef_0F80/S1AA_20150226T112829_20150415T112831_VVP048_INT80_G_wef_0F80_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20150226T112829_20150415T112831_VVP048_INT80_G_wef_0F80/S1AA_20150226T112829_20150415T112831_VVP048_INT80_G_wef_0F80_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP024_INT80_G_wef_A813/S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP024_INT80_G_wef_A813_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP024_INT80_G_wef_A813/S1AA_20150322T112830_20150415T112831_VVP024_INT80_G_wef_A813_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150322T112830_20150509T112832_VVP048_INT80_G_wef_FFDB/S1AA_20150322T112830_20150509T112832_VVP048_INT80_G_wef_FFDB_unw_phase.t
if to create file hyp3/S1AA_20150322T112830_20150509T112832_VVP048_INT80_G_wef_FFDB/S1AA_20150322T112830_20150509T112832_VVP048_INT80_G_wef_FFDB_unw_phase.c
lip.tif
clipping file hyp3/S1AA_20150415T112831_20150509T112832_VVP024_INT80_G_wef_58D8/S1AA_20150415T112831_20150509T112832_VVP024_INT80_G_wef_58D8_unw_phase.t
```

รูปที่ ข.7 การทำงานของคำสั่ง ./clip_image.sh ใน Terminal

ขั้นตอนที่ 4 : เตรียมโพลเดอร์สำหรับการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy

สร้างไฟล์เตอร์ชื่อ mintpy ไว้ใช้ในการประมวลผลและบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ ในไฟล์เตอร์นี้จำเป็นจะต้องมี Configuration file ซึ่งเป็น Text file ที่มีไว้เพื่อระบุที่จัดเก็บไฟล์ภาพต่าง ๆ ให้แก่ MintPy และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ค่า Latitude และค่า Longitude ของจุดอ้างอิง (Reference point) เป็นต้น ตัวอย่าง Configuration file เป็นดังรูปที่ ข.8



```

vim: set filetype=cfg:
mintpy.compute.cluster = local
mintpy.load.processor = hyp3
##-----interferogram datasets:
mintpy.load.umaFile = ../hyp3/*/*uma_phase_clip.tif
mintpy.load.corFile = ../hyp3/*/*corr_clip.tif
##-----geometry datasets:
mintpy.load.demFile = ../hyp3/*/*dem_clip.tif
mintpy.load.incAngleFile = ../hyp3/*/*lv_theta_clip.tif
mintpy.load.waterMaskFile = ../hyp3/*/*water_mask_clip.tif
##-----subset (optional):
## if both yx and lalo are specified, use lalo option unless a) no lookup file AMD b) dataset is in radar coord
mintpy.subset.yx = auto #[y0:y1,x0:x1 / no], auto for no
mintpy.subset.lalo = auto #[S:N,M:E / no], auto for no
###mintpy.subset.lalo = 391e4:400e4,39e4:51e4 #[S:N,M:E / no], auto for no
###mintpy.subset.lalo = 2158500:2163400,504400:508600 #[S:N,M:E / no], auto for no
###mintpy.subset.lalo = 1380000:1460000,675000:750000 #[S:N,M:E / no], auto for no

###mintpy.reference.lalo = 391.5e4,45e4
mintpy.reference.lalo = auto
###mintpy.reference.lalo = 2160000, 505798
###mintpy.reference.lalo = 1430302.7153, 707168.7957
###mintpy.reference.lalo = 1509706, 674279
mintpy.networkInversion.weightFunc = no
###mintpy.troposphericDelay.method = pyaps
mintpy.troposphericDelay.method = no
mintpy.topographicResidual = yes
mintpy.topographicResidual.pixelwiseGeometry = no

mintpy.networkInversion.minTempCoh = 0.6

mintpy.deramp = linear
mintpy.deramp.maskFile = auto

mintpy.save.hdfEos5 = auto

```

รูปที่ ข.8 ข้อมูลด้านในของ Configuration file ชื่อ Asc_DOS.txt

ขั้นตอนที่ 5 : ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy

ในการทำงานบางครั้งผู้ใช้อาจมีความจำเป็นต้องใช้โปรแกรมภาษาไพธอน (Python) หลายโปรแกรมเสริมในการประมวลผล เช่น numpy และเพื่อให้การประมวลผลสามารถทำงานได้ Conda สามารถสร้าง Environment แยกขึ้นมาใหม่ได้ ซึ่งจะ Install โปรแกรมเสริมที่จำเป็นทั้งหมดไว้โดยไม่รบกวน Environment หลัก ถ้าหากต้องการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลงานอื่น ๆ ดังนั้นในขั้นตอนการดำเนินงานจะประมวลผลโดยใช้ Environment ที่ติดตั้ง MintPy เรียบร้อยแล้ว รูปแบบในการรันคำสั่งคือ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep [step] หรือเลือกประมวลผลทั้งหมดทุกขั้นตอนได้โดยไม่ต้องระบุขั้นตอนใดต่อท้าย ตัวซอฟต์แวร์จะดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนแรกถึงขั้นตอนสุดท้าย นอกจากนี้ผู้ใช้สามารถใช้ --h เพื่อเรียกดูขั้นตอนทั้งหมดของซอฟต์แวร์ MintPy ได้ ดังรูปที่ ข.9

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: ~$ cd /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ mkdir mintpy
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421$ cd mintpy/
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --h
usage: smallbaselineApp.py [-h] [--dir WORKDIR] [-g] [-H] [-v] [--plot] [--start STEP] [--end STEP] [--dostep STEP] [customTemplateFile]

Routine Time Series Analysis for Small Baseline InSAR Stack

positional arguments:
  customTemplateFile  custom template with option settings.
                        ignored if the default smallbaselineApp.cfg is input.

options:
  -h, --help            show this help message and exit
  --dir WORKDIR, --work-dir WORKDIR
                        work directory (default: ./).
  -g                    generate default template (if it does not exist) and exit.
  -H                    print the default template file and exit.
  -v, --version          print software version and exit
  --plot                plot results [only] without running smallbaselineApp.

steps processing (start/end/dostep):
  Command line options for steps processing with names are chosen from the following list:
  ['load_data', 'modify_network', 'reference_point', 'quick_overview', 'correct_unwrap_error']
  ['invert_network', 'correct_LOD', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography']
  ['residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfeos5']

  In order to use either --start or --dostep, it is necessary that a
  previous run was done using one of the steps options to process at least
  through the step immediately preceding the starting step of the current run.

  --start STEP          start processing at the named step (default: load_data).
  --end STEP, --stop STEP
                        end processing at the named step (default: hdfeos5)
  --dostep STEP         run processing at the named step only

reference:
  Yunjun, Z., H. Fattahi, and F. Amelung (2019), Small baseline InSAR time series analysis:
  Unwrapping error correction and noise reduction, Computers & Geosciences, 133, 104331,
  doi:10.1016/j.cageo.2019.104331.

```

รูปที่ ข.9 ขั้นตอนทั้งหมดของซอฟต์แวร์ MintPy ใน Terminal

โดยในส่วนถัดไปจะอธิบายขั้นตอนการประมวลผลของซอฟต์แวร์ MintPy โดยสังเขป

5.1 Loading InSAR stack

ขั้นตอนการโหลดข้อมูลทั้งหมดของ Unwrap interferogram มาเก็บไว้ในไฟล์ .h5 เช่น

- 1) ข้อมูล Coherence
- 2) ข้อมูล Baseline
- 3) ข้อมูล Incidence Angle
- 4) ข้อมูลลักษณะทาง Geometry ต่าง ๆ

สำหรับการประมวลผลขั้นตอนต่อไป

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep load_data
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep load_data
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 11:08:03.579871--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['load_data']
Remaining steps: ['modify_network', 'reference_point', 'quick_overview', 'correct_unwrap_error', 'invert_network', 'correct_L00', 'correct_SET', 'correct_toposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfeos5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
copy default template file /home/aoom/anaconda3/envs/mintpy/lib/python3.10/site-packages/mintpy/defaults/smallbaselineApp.cfg to work directory
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
  mintpy.compute_cluster: auto --> local
  mintpy.load_processor: auto --> hyp3
  mintpy.load.unwFile: auto --> ../hyp3/*/*unw_phase_clip.tif
  mintpy.load.corFile: auto --> ../hyp3/*/*corr_clip.tif
  mintpy.load.demFile: auto --> ../hyp3/*/*dem_clip.tif
  mintpy.load.incAngleFile: auto --> ../hyp3/*/*lv_theta_clip.tif
  mintpy.load.waterMaskFile: auto --> ../hyp3/*/*water_mask_clip.tif
  mintpy.networkInversion.weightFunc: auto --> no
  mintpy.networkInversion.minTempCoh: auto --> 0.6
  mintpy.troposphericDelay.method: auto --> no
  mintpy.deramp: auto --> linear
  mintpy.topographicResidual: auto --> yes
  mintpy.topographicResidual.pixelwiseGeometry: auto --> no
copy Asc_DOS.txt to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy Asc_DOS.txt to pic directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - load_data *****
load_data.py --template /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt --project Asc_DOS
processor : hyp3
SAR platform/sensor : unknown from project name "Asc_DOS"
-----
prepare metadata files for hyp3 products

```

รูปที่ ข.10 ขั้นตอน Loading InSAR stack

5.2 Network modification

เป็นการตรวจสอบและประเมินคุณภาพ Phase-unwrapping ของ Interferogram ก่อนที่จะทำ Inversion ในขั้นตอนต่อไป ถ้าหากไม่พบข้อผิดพลาดจาก Phase-unwrapping ตัว MintPy จะข้ามขั้นตอนนี้ไป

ซอฟต์แวร์ Mintpy จะคำนวณค่าเฉลี่ยของ Coherence ของแต่ละ Interferogram จากนั้นจะหา Minimum Spending Tree (MST) ซึ่งเป็นการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละเส้นในโครงข่าย โดยพิจารณาจากค่า Coherence แล้วเลือกเส้นที่มีค่าน้ำหนักน้อยที่สุด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep modify_network
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + -
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep modify_network
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 11:38:48.194265--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['modify_network']
Remaining steps: ['reference_point', 'quick_overview', 'correct_unwrap_error', 'invert_network', 'correct_LOD', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfeos5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - modify_network *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
generate /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/waterMask.h5 from /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/geometryGeo.h5 for convenience
create HDF5 file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/waterMask.h5 with w mode
create dataset /waterMask of bool in size of (2227, 3465) with compression=None
finished writing to /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/waterMask.h5

modify_network.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
No lookup table info range/lat found in files.
read options from template file: smallbaselineApp.cfg
No input option found to remove interferogram
Keep all interferograms by enable --reset option

reset dataset 'dropIfgram' to True for all interferograms for file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5
All dropIfgram are already True, no need to reset.

plot_network.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg --nodisplay -d c
herence -v 0.2 1.0
read options from template file: smallbaselineApp.cfg
read temporal/spatial baseline info from file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5
open ifgramStack file: ifgramStack.h5

```

รูปที่ ข.11 ขั้นตอน Network modification

5.3 Select reference point

ในการทำงานจำเป็นต้องเลือกจุดที่กำหนดให้การเคลื่อนตัวเป็นศูนย์ ดังนั้นขั้นตอนนี้จะเป็นการระบุจุดอ้างอิง (Reference point) โดยทั่วไปสามารถเลือกให้เป็น auto ให้ตัว MintPy คัดเลือกจุดที่มีค่า Coherence สูงที่สุด (เกณฑ์เริ่มต้นคือ 0.85) ขณะเดียวกันผู้ใช้สามารถใช้อ็ควมรู้เฉพาะที่มีในพื้นที่ศึกษาในการเลือกให้ค่าพิกัดจุดอ้างอิง (latitude, longitude) ได้เองเช่นกัน

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep reference_point
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง


```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep reference_point
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 11:47:30.894875--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['reference_point']
Remaining steps: ['quick_overview', 'correct_unwrap_error', 'invert_network', 'correct_L0D', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topogr_
aphy', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - reference_point *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.

generate_mask.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 --nonzero -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/maskConnComp.h5 --update
input ifgramStack file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5
-----
update mode: ON
1) output file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/maskConnComp.h5 NOT exist.
run or skip: run.
calculate the common mask of pixels with non-zero unwrapPhase value
[=====] 714/714 213s / 4s
create HDF5 file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/maskConnComp.h5 with w mode
create dataset /mask of bool in size of (2227, 3465) with compression=None
finished writing to /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/maskConnComp.h5

temporal_average.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 --dataset coherence -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgSpatialCoh
.h5 --update
output file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgSpatialCoh.h5
-----
update mode: ON
1) output file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgSpatialCoh.h5 NOT exist.
run or skip: run.

```

รูปที่ ข.12 ขั้นตอน Select reference point

5.4 Quick overview

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการประเมินแบบรวดเร็วและให้ผลลัพธ์ 2 ไฟล์ ได้แก่

- 1.) avgPhaseVelocity.h5 ไฟล์อัตราการทรุดตัวเฉลี่ยที่ได้จากการใช้เทคนิค Traditional stacking ซึ่งเป็นการประเมินการทรุดตัวที่อาจเป็นไปได้เพียงเบื้องต้นเท่านั้น
- 2.) numTriNonzeroIntAmbiguity.h5 ไฟล์สำหรับการตรวจสอบการประมวลผลใน Phase-unwrapping เพราะถ้าหากเกิดข้อผิดพลาดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อค่าคำนวณในขั้นตอนอื่น ๆ ได้

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep quick_overview
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + x
touch avgSpatialCoh.h5
touch maskConnComp.h5
Done.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 05 mins 36.6 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep quick_overview
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 12:13:30.940232--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['quick_overview']
Remaining steps: ['correct_unwrap_error', 'invert_network', 'correct_LOD', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_R
MS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - quick_overview *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.

temporal_average.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 --dataset unwrapPhase -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgPhaseVel
ocity.h5 --update
output file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgPhaseVelocity.h5
-----
update mode: ON
1) output file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/avgPhaseVelocity.h5 NOT exist.
run or skip: run.
calculate the temporal average of unwrapPhase in file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 ...
[==>          6%          ] lines 140/2227   0s /   0s

```

รูปที่ ข.13 ขั้นตอน Quick overview

5.5 Phase-unwrapping error correction

การหาค่าต่างเฟสของจุดภาพภายใน Interferogram แล้วจึงหาผลรวมอีกครั้ง เพื่อให้ได้เฟสที่ต่อเนื่องกัน เรียกว่า Phase-unwrapping ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทำ Phase-unwrapping ของ Interferogram แต่เนื่องจากการผลิต Interferogram ทำให้ไม่สามารถใช้งานขั้นตอนนี้ได้เพราะฉะนั้นในเรื่องความผิดพลาดนี้การประมวลผลจะเป็นการตัดจุดภาพที่มีปัญหาแทน

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_unwrap_error
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
create dataset /mask of float32 in size of (2227, 3465) with compression=None
finished writing to /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/numTriNonzeroIntAmbiguity.h5
plot and save figure to file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/numTriNonzeroIntAmbiguity.png
time used: 03 mins 53.7 secs
Done.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 05 mins 9.8 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_unwrap_error
MintPy version v1.3.3, date 2022-08-14
--RUN-at-2022-08-08 12:19:13.628955--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['correct_unwrap_error']
Remaining steps: ['invert_network', 'correct_LOD', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - correct_unwrap_error *****
phase-unwrapping error correction is OFF.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.0 secs

```

รูปที่ ข.14 ขั้นตอน Phase-unwrapping error correction

5.6 Network inversion

เป็นขั้นตอนในการคำนวณข้อมูลการเคลื่อนตัวแบบสะสม (Cumulative Displacement) วิธีการถ่วงน้ำหนักข้อมูลแบบ Weighted Least Squares (WLS) แต่ข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ได้มานี้ยังมีค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ ปะปนมาด้วย เช่น ค่าดีเลย์ในชั้นบรรยากาศ ค่าคลาดเคลื่อนจากความสูงภูมิประเทศ เป็นต้น โดยขั้นตอนประมวลผลในขั้นตอนถัดไปจะเป็นขั้นตอนการกำจัดหรือบรรเทาค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนมานี้ให้เหลือเพียงแค่ค่าการเคลื่อนตัวเท่านั้น

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep invert_network
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + -
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep invert_network
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN at 2022-08-08 12:19:38.679794--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['invert_network']
Remaining steps: ['correct_LOD', 'correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocod
e', 'google_earth', 'hdfeos5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - invert_network *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.

ifgram_inversion.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/inputs/ifgramStack.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg --update
use dataset "unwrapPhase" by default
-----
update mode: ON
1) NOT ALL output files found: ['timeseries.h5', 'temporalCoherence.h5', 'numInvIfgram.h5'].
run or skip: run.
save the original settings of ['OMP_NUM_THREADS', 'OPENBLAS_NUM_THREADS', 'MKL_NUM_THREADS', 'NUMEXPR_NUM_THREADS', 'VECLIB_MAXIMUM_THREADS']
set OMP_NUM_THREADS = 1
set OPENBLAS_NUM_THREADS = 1
set MKL_NUM_THREADS = 1
set NUMEXPR_NUM_THREADS = 1
set VECLIB_MAXIMUM_THREADS = 1
reference pixel in y/x: (1663, 353) from dataset: unwrapPhase
-----
least-squares solution with L2 min-norm on: deformation velocity
minimum redundancy: 1.0
weight function: no
calculate covariance: False

```

รูปที่ ข.15 ขั้นตอน Network inversion

5.7 Correct local oscillator drift

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในข้อมูลจากดาวเทียม Envisat เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ภาพจากดาวเทียม Sentinel-1 จึงสามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_LOD
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: ~$ create dataset /mask of bool in size of (2227, 3465) with compression=None
finished writing to /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/maskTempCoh.h5
time used: 00 mins 0.3 secs.
number of reliable pixels: 1781437
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 94 mins 38.5 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_LOD
MintPy version v1.3.3, date 2022-08-14
--RUN-at-2022-08-08 14:04:35.782713--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['correct_LOD']
Remaining steps: ['correct_SET', 'correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - correct_LOD *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
No local oscillator drift correction is needed for Sen.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.8 secs

```

รูปที่ ข.16 ขั้นตอน Correct local oscillator drift

5.8 Correct Solid Earth Tide

เป็นค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดจากแรงหมุนของโลก รวมไปถึงแรงโน้มถ่วงจากดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ที่มีผลทำให้แผ่นดินเกิดการเคลื่อนตัว แต่เนื่องจากผลกระทบในลักษณะที่เป็นการเปลี่ยนแปลงเคลื่อนตัวที่สัมพันธ์กับระยะทางที่ยาวมาก (ประมาณ 100 - 200 ม.) เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ที่ศึกษาการทรุดตัวเป็นหลักทำให้ไม่ได้รับผลกระทบ การประมวลผลในงานวิจัยนี้จึงข้ามขั้นตอนนี้ไป

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_SET
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง


```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: ~
***** step - correct_LOD *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
No local oscillator drift correction is needed for Sen.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.8 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_SET
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 14:04:55.014288--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['correct_SET']
Remaining steps: ['correct_troposphere', 'deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfeos5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - correct_SET *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
No solid Earth tides correction.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.7 secs

```

รูปที่ ข.17 ขั้นตอน Correct Solid Earth Tide

5.9 Tropospheric delay correction

เป็นการแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดที่เรดาร์ได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศในชั้น Troposphere ซึ่งอนุภาคในอากาศมีผลทำให้ค่าเฟสของ InSAR เปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปซอฟต์แวร์ Mintpy จะมีการดาวน์โหลดข้อมูลให้โดยอัตโนมัติหรือใช้ข้อมูลจากแหล่งอื่นได้ ซอฟต์แวร์ Mintpy มีวิธีการแก้ไขค่าคลาดเคลื่อน 2 วิธี คือ

- 1) pyaps แบบจำลอง Atmospheric จาก Global Atmospheric Models (GAMs) ซึ่งต้องมีการติดตั้งเพิ่มเติม
- 2) height_correlation อาศัยพื้นฐานความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความล่าช้าของเฟสและความสูง

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_troposphere
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: ~$ 
***** step - correct_SET *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
No solid Earth tides correction.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.7 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_troposphere
MintPy version v1.2.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 14:05:19.498448--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['correct_troposphere']
Remaining steps: ['deramp', 'correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - correct_troposphere *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
No tropospheric delay correction.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKH_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.6 secs

```

รูปที่ ข.18 ขั้นตอน Tropospheric delay correction

5.10 Phase deramping

ขั้นตอนแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของวงโคจรของดาวเทียม หรือที่เรียกว่า Orbital error ลักษณะความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น เรียกว่า ramp ดังนั้นขั้นตอนการกำจัด ramp ให้หายไปจึงเรียกว่า deramp

แนะนำให้ใช้ในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวเฉพาะที่ เช่น การเคลื่อนตัวจากภูเขาไฟ แผ่นดินถล่ม การทรุดตัวในพื้นที่เมือง แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับการเคลื่อนตัวในลักษณะ long wave length

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep deramp
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
Time used: 00 mins 0.6 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep deramp
HintPy version v1.3.3, date 2022-08-14
--RUN-at-2022-08-08 14:05:36.575571--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['deramp']
Remaining steps: ['correct_topography', 'residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']

-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - deramp *****
Remove for each acquisition a phase ramp: linear

remove_ramp.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5 -s linear -m maskTempCoh.h5 -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5
--update
-----
update mode: ON
1) output file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5 NOT found.
run or skip: run.
remove linear ramp from file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5
read mask file: maskTempCoh.h5
-----
grab metadata from ref_file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5
grab dataset structure from ref_file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5
create HDF5 file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5 with w mode
create dataset : bperp of float32 in size of (175,) with compression = None
create dataset : date of f58 in size of (175,) with compression = None
create dataset : timeseries of float32 in size of (175, 2227, 3465) with compression = None
close HDF5 file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5
estimating phase ramp one date at a time ...

```

รูปที่ ข.19 ขั้นตอน Phase deramping

5.11 Topographic residual (DEM error) correction

ขั้นตอนนี้เป็น การแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนที่จาก DEM เนื่องจากการประมวลผลภาพ InSAR จำเป็นจะต้องใช้ข้อมูล DEM เข้ามาด้วย

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_topography
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep correct_topography
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 14:52:29 822192--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['correct_topography']
Remaining steps: ['residual_RMS', 'reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - correct_topography *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.

dem_error.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp_demErr.h5 --update
Read options from template file: smallbaselineApp.cfg
-----
update mode: ON
1) output file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp_demErr.h5 NOT found.
run or skip: run.
save the original settings of ['OMP_NUM_THREADS', 'OPENBLAS_NUM_THREADS', 'MKL_NUM_THREADS', 'NUMEXPR_NUM_THREADS', 'VECLIB_MAXIMUM_THREADS']
set OMP_NUM_THREADS = 1
set OPENBLAS_NUM_THREADS = 1
set MKL_NUM_THREADS = 1
set NUMEXPR_NUM_THREADS = 1
set VECLIB_MAXIMUM_THREADS = 1
open timeseries file: timeseries_ramp.h5
-----
correct topographic phase residual (DEM error) (Fattahi & Amelung, 2013, IEEE-TGRS)
ordinal least squares (OLS) inversion with L2-norm minimization on: phase
temporal deformation model: polynomial order = 2
-----

```

รูปที่ ข.20 ขั้นตอน Topographic residual (DEM error) correction

5.12 Phase residual RMS for noise evaluation

ซอฟต์แวร์ MintPy สามารถแยกแยะเฟสที่เหลืออยู่ว่าเป็นการรวมกันของความล่าช้าในชั้นบรรยากาศที่ไม่ได้รับการแก้ไขและตรวจสอบวันที่สภาพอากาศแปรปรวนมาก รวมถึงค่าความแปรปรวนอื่นๆ (noise) ที่ไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันได้ โดยจะคำนวณ RMSE ของค่าเฟสที่เหลือเหล่านี้ จากนั้นตัว MintPy จะเลือกค่า RMSE ต่ำสุดเป็นค่าอ้างอิง noise ที่มี RMSE เกินค่าอ้างอิงจะไม่ถูกรวมเข้าไปในขั้นตอนการประมาณค่าการเคลื่อนตัว

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep residual_RMS
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 81 mins 49.8 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep residual_RMS
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 15:00:00.418443--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['residual_RMS']
Remaining steps: ['reference_date', 'velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfeos5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - residual_RMS *****

timeseries_rms.py timeseriesResidual.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
read options from template file: smallbaselineApp.cfg
remove quadratic ramp from file: timeseriesResidual.h5
read mask file: maskTempCoh.h5
-----
grab metadata from ref_file: timeseriesResidual.h5
grab dataset structure from ref_file: timeseriesResidual.h5
create HDF5 file: timeseriesResidual_ramp.h5 with w mode
create dataset : bperp of float32 in size of (175,) with compression = None
create dataset : date of float32 in size of (175,) with compression = None
create dataset : timeseries of float32 in size of (175, 2227, 3465) with compression = None
close HDF5 file: timeseriesResidual_ramp.h5
estimating phase ramp one date at a time ...

```

รูปที่ ข.21 ขั้นตอน Phase residual RMS for noise evaluation

5.13 Change reference date

ขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้เลือกว่าจะกำหนดเองหรือให้ระบบเลือกให้อัตโนมัติ ถ้าเลือกเป็น auto ตัว MintPy จะเลือกวันที่อ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ไฟล์อนุกรมเวลาของเฟสทั้งหมดมีการเคลื่อนตัวเป็นศูนย์

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep reference_date
```

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง


```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep reference_date
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 16:06:56.971120--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['reference_date']
Remaining steps: ['velocity', 'geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - reference_date *****

reference_date.py -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5 /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp.h5 /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp_demErr.h5
read reference date from file: reference_date.txt
input reference date: 20201021
-----
change reference date for file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5
split along y dimension (2227) into 3 boxes
with each box up to 743 in y dimension
-----
processing patch 1 out of 3 -----
box width: 3465
box length: 743
reading data ...
referencing in time ...
-----
open HDF5 file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5 in r+ mode
writing dataset /timeseries block: (0, 175, 0, 743, 0, 3465)
close HDF5 file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries.h5.
-----
processing patch 2 out of 3 -----
box width: 3465

```

รูปที่ ข.22 ขั้นตอน Change reference date

5.14 Velocity

จากขั้นตอนที่ผ่านมาเราได้ค่าการเคลื่อนตัวสะสมและได้แก้ไขค่าแก้ที่ปะปนเข้ามาในระบบ ขั้นตอนนี้จึงเป็นการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยแบบอนุกรมเวลา มีหน่วยเป็น ซม./ปี

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep velocity
```

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep velocity
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 16:18:17.296205--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['velocity']
Remaining steps: ['geocode', 'google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - velocity *****

timeseries2velocity.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/timeseries_ramp_demErr.h5 -t /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.h5 --update
read options from template file: smallbaselineApp.cfg
open timeseries file: timeseries_ramp_demErr.h5
exclude date:['20150602', '20160503', '20170428', '20170510', '20170814', '20180423', '20181008', '20190313', '20190512', '20210618']

dates from input file: 175
['20141029', '20141122', '20141216', '20150109', '20150226', '20150322', '20150415', '20150509', '20150602', '20150626', '20150720', '20150813', '20150906',
'20150930', '20151024', '20151117', '20160104', '20160128', '20160221', '20160316', '20160409', '20160503', '20160527', '20160714', '20160831', '20160831',
'20160924', '20161018', '20161111', '20161205', '20161229', '20170227', '20170311', '20170323', '20170404', '20170416', '20170428', '20170510', '20170522',
'20170603', '20170615', '20170627', '20170709', '20170721', '20170802', '20170814', '20170826', '20170907', '20170919', '20171013', '20171025', '20171106',
'20171118', '20171130', '20171212', '20171224', '20180105', '20180117', '20180129', '20180210', '20180222', '20180306', '20180318', '20180330', '20180411',
'20180422', '20180434', '20180446', '20180458', '20180510', '20180522', '20180534', '20180546', '20180558', '20180609', '20180621', '20180633', '20180645',
'20180657', '20180709', '20180721', '20180733', '20180745', '20180757', '20180809', '20180821', '20180833', '20180845', '20180857', '20180909', '20180921',
'20180933', '20180945', '20180957', '20181009', '20181021', '20181033', '20181045', '20181057', '20181109', '20181121', '20181133', '20181145', '20181157',
'20181209', '20181221', '20181233', '20181245', '20181257', '20190109', '20190121', '20190133', '20190145', '20190157', '20190209', '20190221', '20190233',
'20190245', '20190257', '20190309', '20190321', '20190333', '20190345', '20190357', '20190409', '20190421', '20190433', '20190445', '20190457', '20190509',
'20190521', '20190533', '20190545', '20190557', '20190609', '20190621', '20190633', '20190645', '20190657', '20190709', '20190721', '20190733', '20190745',
'20190757', '20190809', '20190821', '20190833', '20190845', '20190857', '20190909', '20190921', '20190933', '20190945', '20190957', '20191009', '20191021',
'20191033', '20191045', '20191057', '20191109', '20191121', '20191133', '20191145', '20191157', '20191209', '20191221', '20191233', '20191245', '20191257',
'20200109', '20200121', '20200133', '20200145', '20200157', '20200209', '20200221', '20200233', '20200245', '20200257', '20200309', '20200321', '20200333',
'20200345', '20200357', '20200409', '20200421', '20200433', '20200445', '20200457', '20200509', '20200521', '20200533', '20200545', '20200557', '20200609',
'20200621', '20200633', '20200645', '20200657', '20200709', '20200721', '20200733', '20200745', '20200757', '20200809', '20200821', '20200833', '20200845',
'20200857', '20200909', '20200921', '20200933', '20200945', '20200957', '20201009', '20201021', '20201033', '20201045', '20201057', '20201109', '20201121',
'20201133', '20201145', '20201157', '20201209', '20201221', '20201233', '20201245', '20201257', '20210109', '20210121', '20210133', '20210145', '20210157',
'20210209', '20210221', '20210233', '20210245', '20210257', '20210309', '20210321', '20210333', '20210345', '20210357', '20210409', '20210421', '20210433',
'20210445', '20210457', '20210509', '20210521', '20210533', '20210545', '20210557', '20210609', '20210621', '20210633', '20210645', '20210657', '20210709',
'20210721', '20210733', '20210745', '20210757', '20210809', '20210821', '20210833', '20210845', '20210857', '20210909', '20210921', '20210933', '20210945',
'20210957', '20211009', '20211021', '20211033', '20211045', '20211057', '20211109', '20211121', '20211133', '20211145', '20211157', '20211209', '20211221',
'20211233', '20211245', '20211257']

```

รูปที่ ข.23 ขั้นตอน Velocity

5.15 Geocoding

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep geocode

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
close HDFS file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.h5.
open HDFS file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.h5 in a mode
writing dataset /velocityStd block: [1671, 2227, 0, 3465]
close HDFS file /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.h5.
time used: 00 mins 24.4 secs
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 24.8 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO:/mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep geocode
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 16:11:05.006037--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['geocode']
Remaining steps: ['google_earth', 'hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - geocode *****
dataset is geocoded, skip geocoding and continue.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.3 secs

```

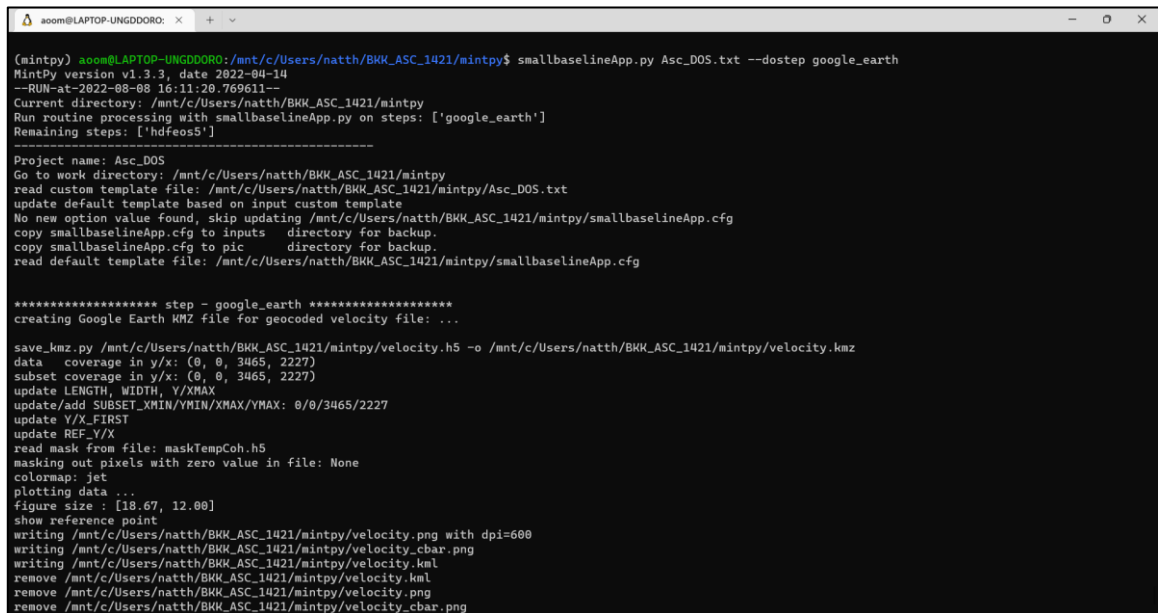
รูปที่ ข.24 ขั้นตอน Geocoding

5.16 Output to Google Earth format

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep google_earth
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง



```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: ~$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep google_earth
(MintPy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep google_earth
MintPy version v1.2.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 16:11:20.769611--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['google_earth']
Remaining steps: ['hdfEOS5']
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - google_earth *****
creating Google Earth KMZ file for geocoded velocity file: ...

save_kmz.py /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.h5 -o /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kmz
data coverage in y/x: (0, 0, 3465, 2227)
subset coverage in y/x: (0, 0, 3465, 2227)
update LENGTH, WIDTH, Y/XMAX
update/add SUBSET_XMIN/YMIN/XMAX/YMAX: 0/0/3465/2227
update Y/X_FIRST
update REF_Y/X
read mask from file: maskTempCoh.h5
masking out pixels with zero value in file: None
colormap: jet
plotting data ...
figure size : [18.67, 12.00]
show reference point
writing /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.png with dpi=600
writing /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity_cbar.png
writing /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kml
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.png
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity_cbar.png
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kml

```

รูปที่ ข.25 ขั้นตอน Output to Google Earth format

5.17 Save to HDF-EOS5 format

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep hdfEOS5
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

aoom@LAPTOP-UNGDDORO: x + v
writing /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity_cbar.png
writing /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kml
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kml
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.png
remove /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity_cbar.png
merged all files to /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/velocity.kmz
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 5.5 secs

(mintpy) aoom@LAPTOP-UNGDDORO: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy$ smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt --dostep hdfes5
MintPy version v1.3.3, date 2022-04-14
--RUN-at-2022-08-08 16:11:57.497456--
Current directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
Run routine processing with smallbaselineApp.py on steps: ['hdfes5']
Remaining steps: []
-----
Project name: Asc_DOS
Go to work directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy
read custom template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/Asc_DOS.txt
update default template based on input custom template
No new option value found, skip updating /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg
copy smallbaselineApp.cfg to inputs directory for backup.
copy smallbaselineApp.cfg to pic directory for backup.
read default template file: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy/smallbaselineApp.cfg

***** step - hdfes5 *****
save time-series to HDF-EOS5 format is OFF.
Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/BKK_ASC_1421/mintpy

#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 00 mins 0.0 secs

```

รูปที่ ข.26 ขั้นตอน Save to HDF-EOS5 format

นอกจากนี้ ถ้าหากผู้ใช้ไม่ต้องการพิมพ์คำสั่งทุกขั้นตอนสามารถใช้การพิมพ์คำสั่งเพียงครั้งเดียวให้ซอฟต์แวร์ประมวลได้ เพื่อเป็นการลดข้อผิดพลาดหรือข้ามบางขั้นตอนไปเนื่องจากทุกขั้นตอนมีความสำคัญมาก ขาดขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งไปก็อาจได้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดเช่นกัน

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

smallbaselineApp.py Asc_DOS.txt

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

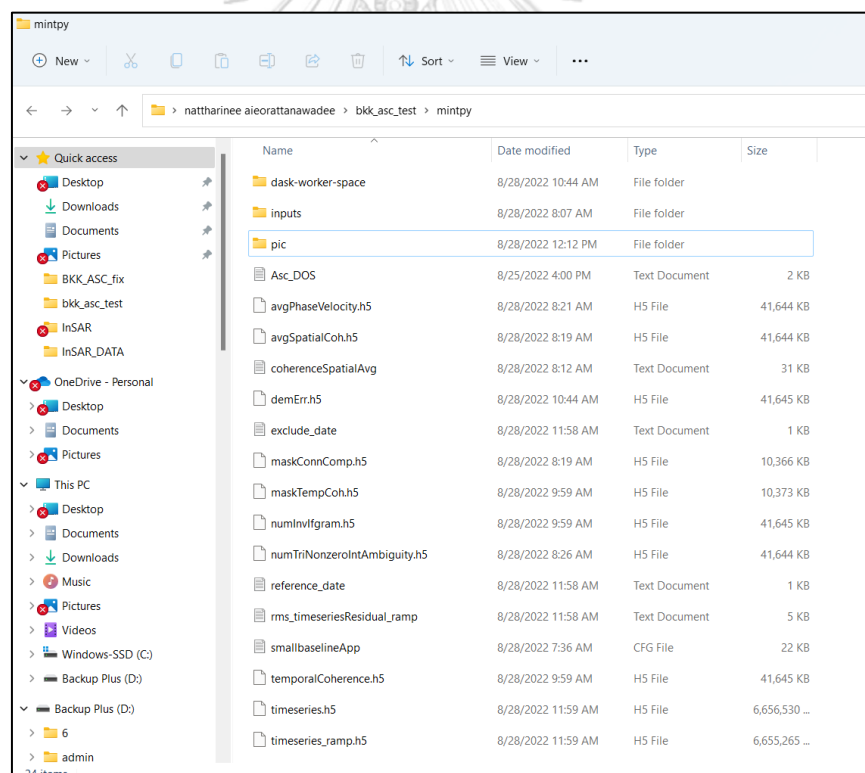
***** plot & save to pic *****
Input data seems to be geocoded. Lookup file not needed.
parallel processing using 2 cores ...
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 temporalCoherence.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 velocity.h5 --dem inputs/geometryGeo.h5 --mask maskTempCoh.h5 -u cm
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 maskTempCoh.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/geometryGeo.h5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 unwrapPhase- --zero-mask --wrap -c cm
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 unwrapPhase- --zero-mask
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 inputs/ifgramStack.h5 coherence- --mask no -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 avgPhaseVelocity.h5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 avgSpatialCoh.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 maskConnComp.h5 -c gray -v 0 1
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries_ramp.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 timeseries_ramp_demErr.h5 --noaxis -u cm --wrap --wrap-range -5 5
view.py --dpi 150 --noverbose --nodisplay --update --memory 4.0 numInvIfgram.h5 --mask no
copy *.txt files into ./pic directory.
move *.png/pdf/kmz files to ./pic directory.
time used: 11 mins 19.4 secs.
Explore more info & visualization options with the following scripts:
Info.py #check HDF5 file structure and metadata
view.py #2D map view
tsview.py #1D point time-series (interactive)
transect.py #1D profile (interactive)
plot_coherence_matrix.py #plot coherence matrix for one pixel (interactive)
plot_network.py #plot network configuration of the dataset
plot_transection.py #plot 1D profile along a line of a 2D matrix (interactive)
save_kmz.py #generate Google Earth KMZ file in raster image
save_kmz_timeseries.py #generate Google Earth KMZ file in points for time-series (interactive)

Go back to directory: /mnt/c/Users/natth/bkk_asc_test/mintpy

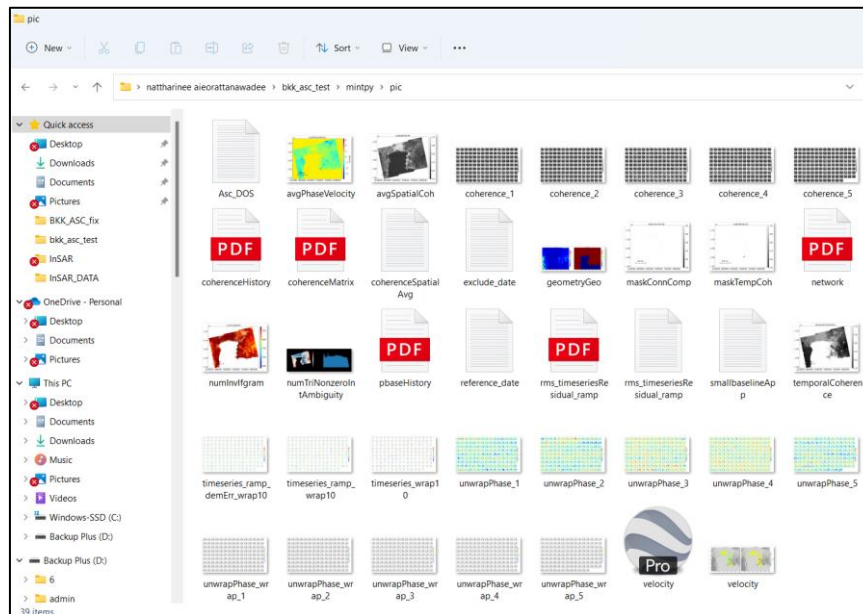
#####
Normal end of smallbaselineApp processing!
#####
Time used: 275 mins 50.3 secs

```

รูปที่ ข.27 หน้าจอการประมวลผลใน Terminal เมื่อเสร็จสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล



รูปที่ ข.28 โฟลเดอร์ mintpy เก็บไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล



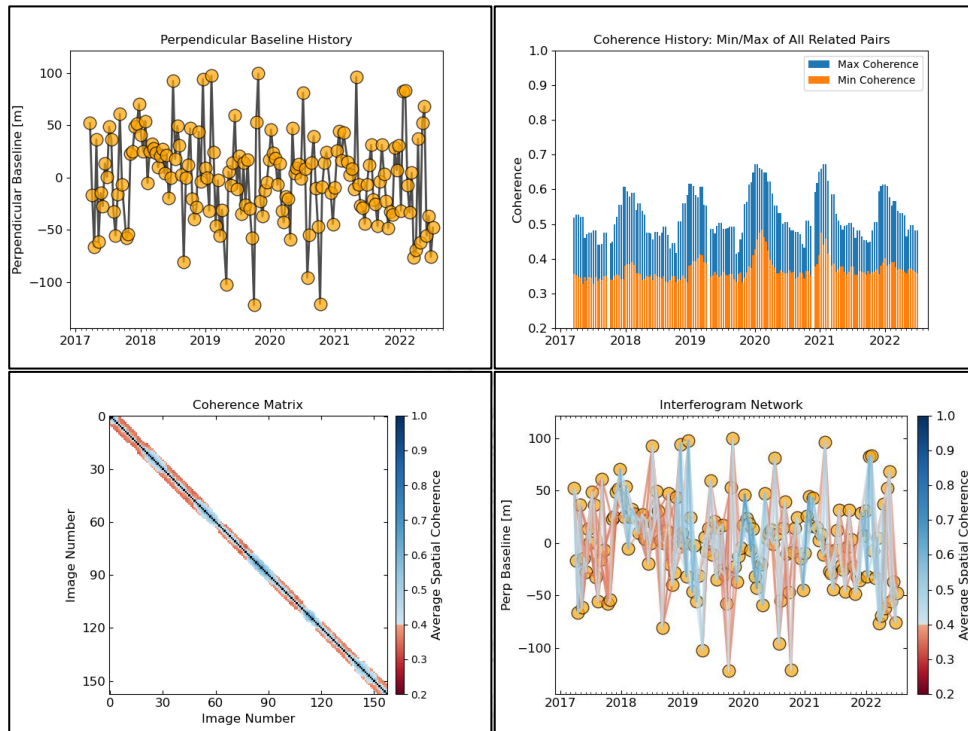
รูปที่ ข.29 โฟลเดอร์ pic เก็บรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 6 : การเปิดภาพตัวอย่างผลลัพธ์

หลังจากขั้นตอนการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ในแต่ละขั้นตอนจะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบที่หลากหลาย ในที่นี้ผู้ใช้สามารถเลือก plot ข้อมูลจากไฟล์ .h5 ได้ด้วยการใช้คำสั่งผ่าน python ในขั้นตอนนี้จำเป็นจะต้องดำเนินการติดตั้ง GWSL ก่อนเพื่อช่วยในการเปิดภาพตัวอย่างผลลัพธ์

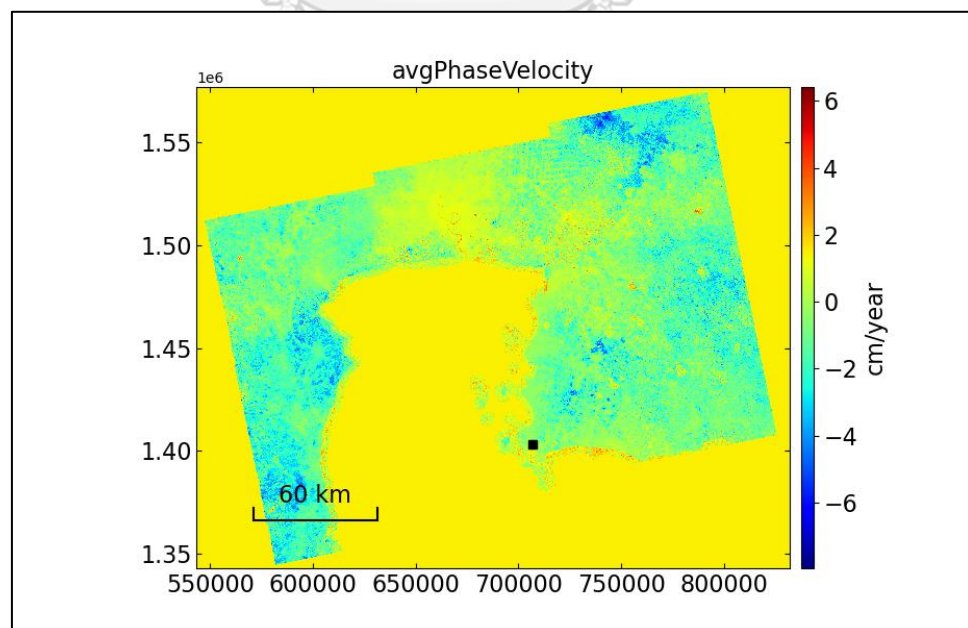
```
import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mintpy.objects import ifgramStack
from mintpy.utils import plot as pp, utils as ut
from mintpy import view, plot_network
from mintpy.unwrap_error_phase_closure import
plot_num_triplet_with_nonzero_integer_ambiguity
```

6.1 คำสั่ง `plot_network.main(['./inputs/ifgramStack.h5'])`



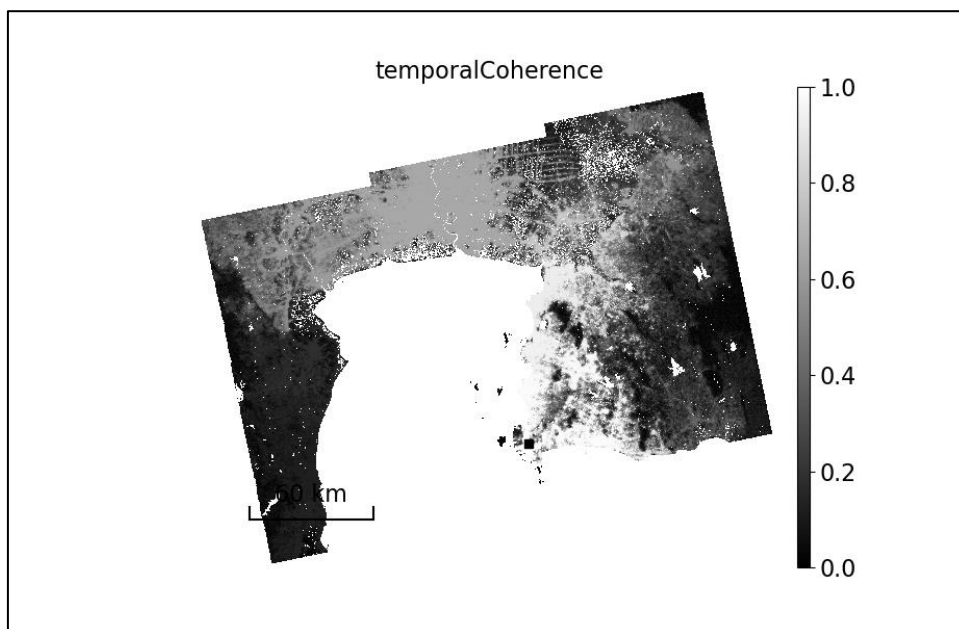
รูปที่ ข.30 โครงข่าย Interferogram ที่ใช้ในงานวิจัย

6.2 คำสั่ง `view.main('avgPhaseVelocity.h5'.split())`

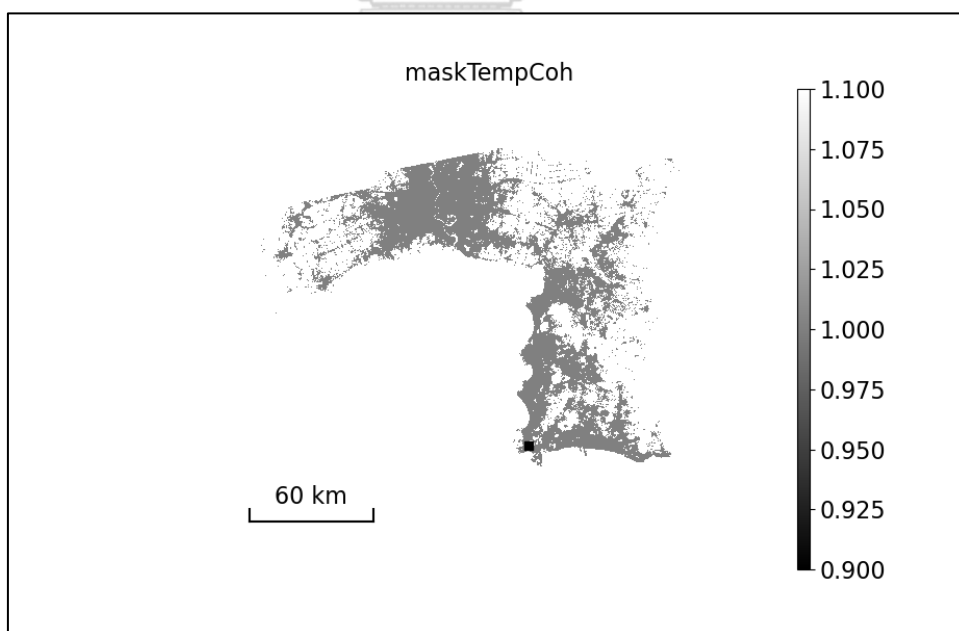


รูปที่ ข.31 ไฟล์ avgPhaseVelocity.h5

6.3 คำสั่ง `view.main('temporalCoherence.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose'.split())` และ คำสั่ง `view.main('maskTempCoh.h5 -c gray --notick --noaxis --noverbose'.split())`

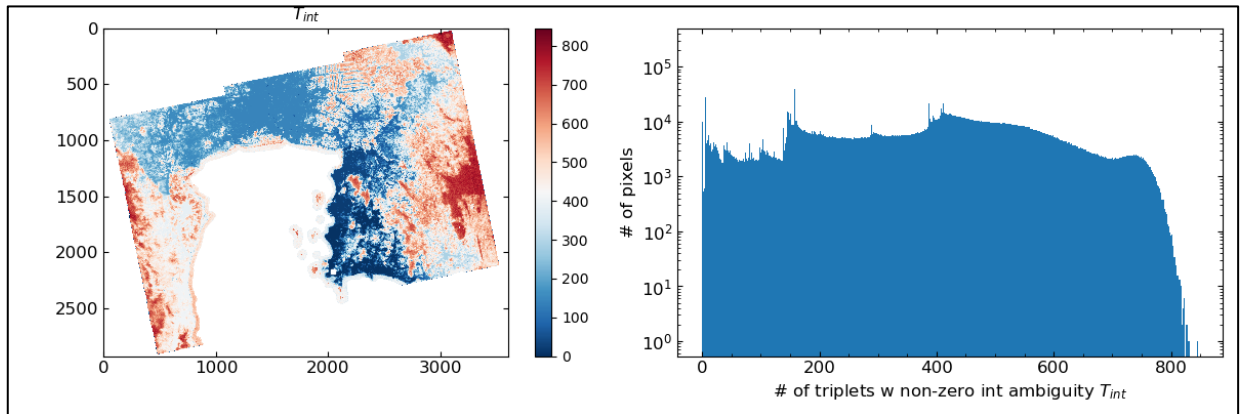


รูปที่ ข.32 ไฟล์ temporalCoherence.h5



รูปที่ ข.33 ไฟล์ maskTempCoh.h5

6.4 คำสั่ง `plot_num_triplet_with_nonzero_integer_ambiguity`
 ('numTriNonzeroIntAmbiguity.h5', display=True, fig_size=[12, 4])



รูปที่ ข.34 ไฟล์ numTriNonzeroIntAmbiguity.h5

ขั้นตอนที่ 7 : การแปลงค่าพิกัด (gdal_translate) สำหรับไฟล์ velocity.h5

ก่อนการแปลงค่าพิกัดจะเริ่มด้วยการกำจัดส่วนที่เป็นพื้นที่น้ำหรือไฟล์ maskTempCoh.h5 ออกก่อนด้วยการกำหนดให้เป็น NaN เนื่องจากเป็นข้อมูลส่วนที่เราไม่ต้องการให้เหลือเพียงแค่ค่าการทวัดตัวของแผ่นดินเท่านั้น ในขั้นตอนนี้จะทำการรัน script ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยจะต้องนำ script ไว้ในโฟลเดอร์เดียวกันกับข้อมูล velocity.h5 และ maskTempCoh.h5

```
clear
vel = h5read('velocity.h5','/velocity');
vel(vel==0) = NaN;
mask = h5read('maskTempCoh.h5','/mask');
vel(strcmp(mask,'FALSE')) = NaN;
h5write('velocity.h5','/velocity',vel)
```

หลังจากการกำจัดข้อมูลที่ไม่ต้องการออกแล้ว เนื่องจากไฟล์ velocity.h5 ที่ไดมานั้นยังไม่ได้กำหนดค่าพิกัดทำให้เมื่อนำภาพไปเปิดจะไม่อยู่บนตำแหน่งที่แท้จริงของภาพ ต้องดำเนินการแปลงค่าพิกัดเสียก่อนด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ OSGeo4W shell ที่มาพร้อมกับโปรแกรม QGIS จากนั้นเข้า path ที่เก็บไฟล์ velocity.h5 แล้วเรียกดูข้อมูลด้วยคำสั่ง

```
gdalinfo velocity.h5
```

ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```
OSGeo4W Shell
PROCESSOR=hyp3
PROJECT_NAME=Asc_DOS
P_BASELINE_BOTTOM_HDR=-68.4822
P_BASELINE_TOP_HDR=-68.4822
RANGE_PIXEL_SIZE=46.0
REF_DATE=20210101
REF_LAT=1403320.0
REF_LON=707000.0
REF_X=2043
REF_Y=2170
RLOOKS=20
STARTING_RANGE=799002.2677
START_DATE=20170323
UNIT=m/year
UTM_ZONE=47N
velocityStd_UNIT=m/year
velocity_UNIT=m/year
WAVELENGTH=0.055465764662349676
WIDTH=3605
X_FIRST=543520.0
X_STEP=80.0
X_UNIT=meters
Y_FIRST=1576960.0
Y_STEP=-80.0
Y_UNIT=meters
Subdatasets:
SUBDATASET_1_NAME=HDF5:"velocity.h5"://velocity
SUBDATASET_1_DESC=[2925x3605] //velocity (32-bit floating-point)
SUBDATASET_2_NAME=HDF5:"velocity.h5"://velocityStd
SUBDATASET_2_DESC=[2925x3605] //velocityStd (32-bit floating-point)
Corner Coordinates:
Upper Left ( 0.0, 0.0)
Lower Left ( 0.0, 512.0)
Upper Right ( 512.0, 0.0)
Lower Right ( 512.0, 512.0)
Center ( 256.0, 256.0)
C:\Users\natth\bkk_asc_test\mintpy>
```

รูปที่ ข.35 ข้อมูลของไฟล์ velocity.h5

โปรแกรมจะแสดงรายละเอียดข้อมูลของไฟล์ทั้งหมด โดยข้อมูลสิ่งที่ต้องใช้จะอยู่บริเวณด้านล่าง ได้แก่ X_FIRST , Y_FIRST , SUBDATASET_1 , X_STEP , Y_STEP เนื่องจากภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพ subset และไม่ได้รีจค่าพิกัดไว้ทำให้จะต้องมีการคำนวณก่อน โดยมีรูปแบบการคำนวณและใช้คำสั่งการแปลงค่าพิกัด ดังนี้

```
gdal_translate -a_srs EPSG:32647 "HDF5:"velocity.h5"://velocity" -of GTiff
-a_ullr [X_FIRST] [Y_FIRST] [((SUBDATASET_1_X) * (X_STEP)) + X_FIRST]
[ ((SUBDATASET_1_Y) * (-Y_STEP)) + Y_FIRST] [ชื่อไฟล์]
```

คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

```
gdal_translate -a_srs EPSG:32647 "HDF5:"velocity.h5"://velocity" -of GTiff
-a_ullr 543520 1576960 831920 1342960 velocity_bkk_asc_1722.h5
```


ผลลัพธ์หลังจากประมวลผลคำสั่ง

```

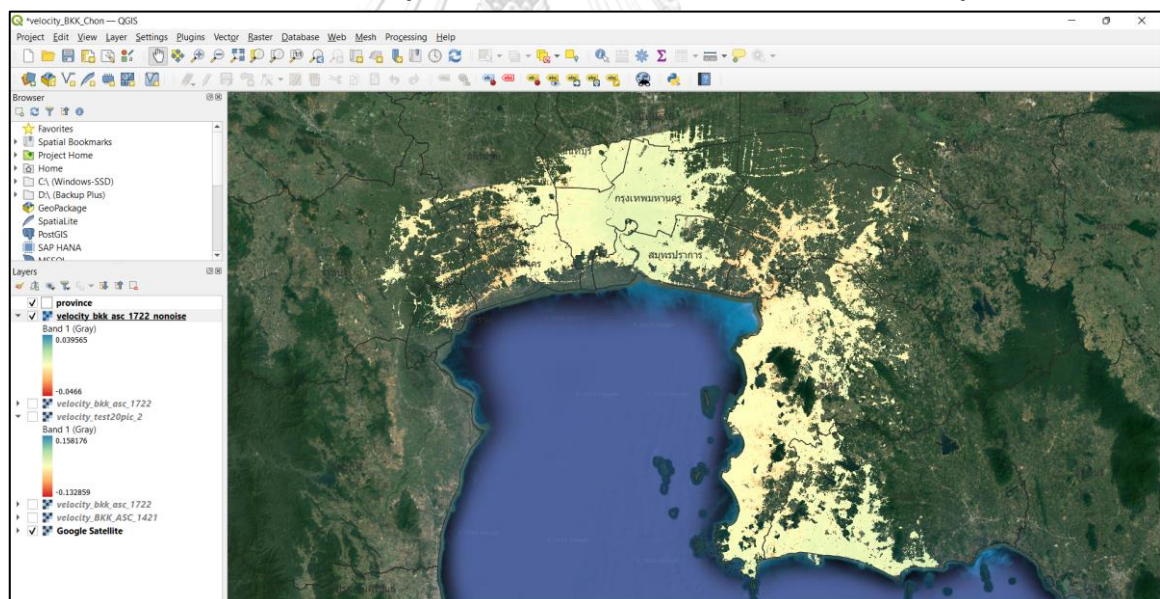
OSGeo4W Shell
RANGE_PIXEL_SIZE=46.0
REF_DATE=20210101
REF_LAT=1403320.0
REF_LON=707000.0
REF_X=2043
REF_Y=2170
RLOOKS=20
STARTING_RANGE=799002.2677
START_DATE=20170323
UNIT=m/year
UTM_ZONE=47N
velocityStd.UNIT=m/year
velocity.UNIT=m/year
WAVELENGTH=0.055465764662349676
WIDTH=3605
X_FIRST=543520.0
X_STEP=80.0
X_UNIT=meters
Y_FIRST=1576960.0
Y_STEP=-80.0
Y_UNIT=meters
Subdatasets:
  SUBDATASET_1_NAME=HDF5:"velocity.h5":://velocity
  SUBDATASET_1_DESC=[2925x3605] //velocity (32-bit floating-point)
  SUBDATASET_2_NAME=HDF5:"velocity.h5":://velocityStd
  SUBDATASET_2_DESC=[2925x3605] //velocityStd (32-bit floating-point)
Corner Coordinates:
Upper Left ( 0.0, 0.0)
Lower Left ( 0.0, 512.0)
Upper Right ( 512.0, 0.0)
Lower Right ( 512.0, 512.0)
Center ( 256.0, 256.0)

C:\Users\natth\bkk_asc_test\mintpy\gdal_translate -a_srs EPSG:32647 "HDF5:"velocity.h5":://velocity" -of GTiff -a_ullr 543520 1576960 831920 1342960 velocity_bkk_asc_1722.h5
Input file size is 3605, 2925
0...10...20...30...40...50...60...70...80...90...100 - done.
C:\Users\natth\bkk_asc_test\mintpy>

```

รูปที่ ข.36 การใช้คำสั่งในการแปลงค่าพิกัดของไฟล์ velocity.h5

หลังจากแปลงค่าพิกัดแล้ว ผู้ใช้สามารถเปิดผลลัพธ์ผ่านโปรแกรม QGIS ได้ ดังรูป



รูปที่ ข.37 ผลลัพธ์ค่าการเคลื่อนตัวแบบอนุกรมเวลาที่ได้จากการแปลงค่าพิกัด เปิดด้วยโปรแกรม

QGIS

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐริณีย์ เอี้ยวรัตนวดี
วัน เดือน ปี เกิด	20/11/1998
สถานที่เกิด	สมุทรปราการ
วุฒิการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมสำรวจและสารสนเทศภูมิศาสตร์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	89/45 ซอยไร่เชิง 26 หมู่ที่ 7 ตำบลไร่เชิง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม 73210
ผลงานตีพิมพ์	วิจิตรนสาร แ., เอี้ยวรัตนวดี ณ. และ อบแพทย์ อ. 2021. การพัฒนา นวัตกรรมในการวัดและจัดทำแผนที่ความชื้นผิวดินจากดาวเทียม SMAP. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 27, 2 (ก.ค. 2021), 10.