

การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณ
กรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์



นายปวัน ภิรมย์ทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

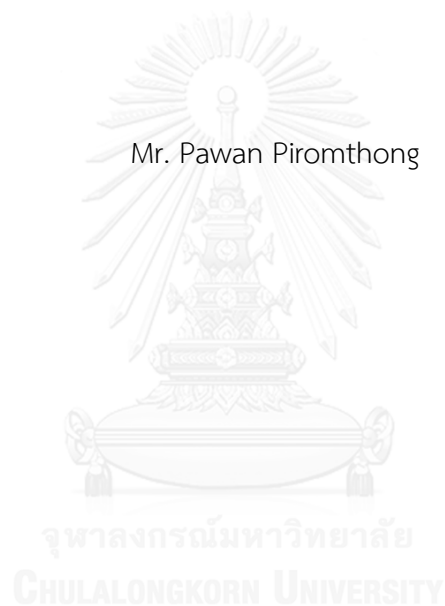
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Detection of 1996-2000 rates and trend of land subsidence in Greater Bangkok by
InSAR time-series analysis

Mr. Pawan Piromthong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

ปวัน ภิรมย์ทอง : การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (Detection of 1996-2000 rates and trend of land subsidence in Greater Bangkok by InSAR time-series analysis) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์, หน้า.

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ตรวจวัดอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 โดยใช้ข้อมูลเฟสจากภาพดาวเทียมเรดาร์ ERS1 และ ERS2 ทั้งหมด 18 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 10,000 ตร.กม. ได้จำนวนจุดภาพที่สามารถใช้เป็นจุดตรวจสอบกว่า 280,000 จุด เมื่อทดสอบทางสถิติด้วย t-test ระหว่างอัตราการทรุดตัวจากอินซาร์กับอัตราการทรุดตัวของหมุดระดับในโครงข่ายระดับตรวจสอบการทรุดตัวจำนวน 20 หมุด พบว่าหมุดระดับ 15 หมุดให้ค่าการทรุดตัวที่สอดคล้องกับอินซาร์ในขณะที่ 5 หมุดที่ไม่สอดคล้องกัน มี 2 หมุดที่อัตราจากงานระดับเร็วกว่าซึ่งน่าจะมาจากสาเหตุของ Phase unwrapping error ของอินซาร์ ส่วนอีก 3 หมุดที่เหลือที่งานระดับตรวจวัดอัตราการทรุดตัวได้ช้ากว่า น่าจะมาจากสาเหตุของ double-bounce ของคลื่นไมโครเวฟ

เมื่อนำอัตราการทรุดตัวจากงานวิจัยนี้ผนวกกับอัตราการทรุดตัวที่เป็นผลจากงานวิจัยก่อนหน้าสองชิ้นในช่วงปี ค.ศ. 2005-2010 และปี ค.ศ. 2009-2012 พบค่าการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012 ที่ค่อนข้างมากในระดับ 40-45 เซนติเมตรที่บริเวณ 1) แขวงสามไหม เขตสามไหม 2) แขวงสีกัน เขตดอนเมือง และ 3) อำเภอเมือง สมุทรปราการ สำหรับแนวโน้มของอัตราการทรุดตัวพบว่าพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่มีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง โดยพื้นที่เขตดอนเมืองและสามไหมที่มีแนวโน้มช้าลงอย่างมาก ในขณะที่เขตยานนาวา, บางรักและสาทร มีอัตราการทรุดตัวที่เกือบคงที่แต่ในทางตรงข้าม พบว่าบริเวณตำบลบางแก้ว อ.บางพลี และตำบลปากน้ำ อำเภอเมืองสมุทรปราการ ที่พบแนวโน้มการทรุดตัวที่เร็วขึ้นอย่างมาก เมื่อผนวกกับสภาพภูมิประเทศของจังหวัดสมุทรปราการที่เป็นพื้นที่ราบต่ำติดทะเล ทำให้ทั้งสองบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงจากน้ำทะเลท่วมในอนาคตและความมีการติดตามการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670482221 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: INSAR; LAND SUBSIDENCE; TREND OF SUBSIDENCE; BANGKOK

PAWAN PIROMTHONG: Detection of 1996-2000 rates and trend of land subsidence in Greater Bangkok by InSAR time-series analysis. ADVISOR: ASSOC. PROF.ITTHI TRISIRISATAYAWONG, Ph.D., pp.

This research applied InSAR time-series analysis for detecting land subsidence rates in Bangkok and its neighborhood areas in 1996-2000 by using phase data from 18 ERS1 and ERS2 images. We found over 280,000 observations in an area of approximately 10,000 km². The result was analyzed using t-test with land subsidence rates from 20 leveling benchmarks. This analysis revealed 15 benchmarks agree with the result from InSAR. While in 5 benchmark that not agree, there are 2 benchmarks that value from InSAR slower than leveling, it could be error from phase unwrapping. And there are 3 benchmarks that value from InSAR faster than leveling, it could be explained by Double-bounce of microwave.

When combining the result with previous InSAR time-series research during 2005-2010 and 2009-2012, the result shows that 1.) Saimai, Saimai 2.) Seekan, Donmueng 3.) Mueng Samut Prakarn districts have high total subsidence value around 35-40 centimeters in 1996-2012. When considering the trend of subsidence, Bangkok area tends to subside decreasingly especially in Saimai and Donmueng areas. While Yannawa, Bangrak and Sathorn districts subside almost constantly. On the other hand, in Bangkaew, Bangphli and Paknam, MuengSamuthprakarn districts which subside rapidly could be flood risk areas in the future since the topography of Samut prakarn area is a flood plain so there is a need to be monitored closely.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่ายด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อธิติ ตรีนิสิธิตยวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างดี พร้อมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา และ ดร.อนุเฒ่า ออบแพทย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้คำแนะนำในการศึกษาวิจัยครั้งนี้และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยโดยสมบูรณ์ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณโครงการ GEO2TECDI-SONG ที่อนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลและข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม ERS1 และ ERS2

ขอขอบคุณ TU Delft : Delft University of Technology สำหรับซอฟต์แวร์ DORIS และข้อมูล Precise Orbit ของดาวเทียม ERS1 และ ERS2 และขอขอบคุณ Prof.Andy Hooper จาก Leed University ประเทศอังกฤษสำหรับซอฟต์แวร์ StaMPS

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย ที่คอยให้การสนับสนุนและมอบกำลังใจ ความรัก ความอบอุ่น ให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ เพื่อน พี่ น้อง ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกคน ที่คอยให้การสนับสนุนและช่วยเหลือข้าพเจ้าทุกครั้งที่มีโอกาส ตลอดจนแนะนำแนวทางการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี พร้อมกันนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.3.13	
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)	11
2.2) ลักษณะทางกายภาพ อุทกธรณีวิทยา และชั้นน้ำบาดาลของพื้นที่การวิจัย.....	24
2.3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการประมวลผล	31
3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการประมวลผล	32
3.2 การประมวลผล time-series InSAR ข้อมูลภาพ ERS1 และ ERS2.....	35
3.3 การคัดเลือกมุมระดับและตรวจสอบผลลัพธ์กับข้อมูลการทรุดตัวจากงานระดับ	39
3.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ร่วมกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)..	47

บทที่ 4 ผลลัพธ์การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์	50
4.1 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดของแผ่นดินของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000.....	50
4.2 ผลการตรวจสอบการสอดคล้องกันของผลลัพธ์ของอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากการประมวลผล InSAR กับข้อมูลที่ได้จากงานระดับชั้นหนึ่งด้วยค่าสถิติ t-test	60
บทที่ 5 การนำข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ในงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา	67
5.1 คุณภาพแผนที่แสดงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012	67
5.2 ผลลัพธ์การนำข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ในงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา	72
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	83
6.1) สรุปผลการศึกษา	83
6.2 ข้อเสนอแนะ	85
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวของบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากข้อมูลดาวเทียม ERS ในช่วงปี 1996-2000.....	92
ภาคผนวก ข ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวภายในบริเวณพื้นที่ศึกษาบทที่ 5 จากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) ในช่วงปี 2005-2010	97
ภาคผนวก ค ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวภายในบริเวณพื้นที่ศึกษาบทที่ 5 จากงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ในช่วงปี 2009-2012.....	98

ภาคผนวก ง ตารางการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่า การทรุดตัวสะสมตามการใช้ค่าข้อมูลจากงานระดับ ในบริเวณพื้นที่ที่มีค่าไม่สอดคล้อง ระหว่างข้อมูลจากการประมวลผล InSAR และค่าจากงานระดับ	99
ภาคผนวก จ ข้อมูลค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและการทรุดตัวสะสมโดย แบ่งตามพื้นที่ แขวง/ตำบล.....	100
ภาคผนวก ช ขั้นตอนการประมวลผล Time-series InSAR	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษาในการศึกษาหาอัตราการทรุดตัว กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS 2 ในวงโคจรขาลง และพื้นที่ศึกษาหาแนวโน้มการทรุดตัวในพื้นที่แรงเงาสีดำ	5
รูปที่ 1.2 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบในช่วงปี 2005 - 2010 โดยการประมวลผล Time-series InSAR ในงานวิจัย Aobpaet et al (2012)	7
รูปที่ 1.3 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบในช่วงปี 2009-2012 โดยการประมวลผล Time-series InSAR ในงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015).....	8
รูปที่ 1.4 ตำแหน่งหตุระดับที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์งานวิจัย	9
รูปที่ 2.1 ลักษณะระบบ InSAR กับค่าเฟสโดยแสดงการบันทึกภาพของสองช่วงเวลาที่มีลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศเกิดขึ้นด้วย	13
รูปที่ 2.2 ลักษณะเรขาคณิตของระบบ InSAR	15
รูปที่ 2.3 การจำลองลักษณะของเฟส (Hooper, 2006)	21
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการจับคู่ภาพ interferogram สำหรับ (a) เทคนิค StaMPS เป็นการจับคู่ภาพไปที่ภาพ master เพียงภาพเดียว (b) เทคนิค Small baseline มีภาพ master ได้หลายภาพ	22
รูปที่ 2.5 ลักษณะชั้นน้ำบาดาลพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล	24
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	31
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างรูปภาพ SAR จาก ERS2 ซึ่งแสดงผลด้วยค่าแอมพลิจูด โดยใช้โปรแกรม NEST4C.....	32
รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการประมวลผลอย่างละเอียด	34
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการแสดงค่าจากข้อมูลจุดผลลัพธ์ในรูปแบบ text file จากการประมวลผล InSAR จากข้อมูลดาวเทียม ERS1/2 ในงานวิจัยนี้.....	37
รูปที่ 3.5 การสะท้อนของคลื่นในบริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัว	37
รูปที่ 3.6 (a) ลักษณะเรขาคณิตของระบบบันทึกภาพเรดาร์ ซึ่งเป็น left-looking ภาพดัดแปลงมาจาก Bamler and Hartl (1998) (b) ลักษณะของมุม look angle ที่เปลี่ยนแปลง.....	38
รูปที่ 3.7 ลักษณะหตุระดับที่มีการฝังไว้บนแท่นคอนกรีตที่พื้น โดยในรูปแบบเป็นหตุ P.1709.....	41

รูปที่ 3.8 ลักษณะหมุดสถานีวัดแผ่นดินทรุด โดยในรูปคือหมุด CI.-4 ของ BM.8 สถานีวัดแผ่นดินทรุดที่ 25.....	41
รูปที่ 3.9 ลักษณะหมุดระดับที่เป็นแบบชนิดแขวนที่ติดอยู่กับสิ่งก่อสร้าง โดยในรูปเป็นหมุด กทม.682 โดยสกัดฝังแขวนไว้กับโคนเสาตอม่อสะพานพระนั่งเกล้าฯ ฝั่งตะวันตก	42
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการแสดงความสูงของหมุดระดับ กทม.514 ซึ่งเป็นหมุดแบบแขวนติดอยู่กับอาคารสำนักงานรักษาความสะอาด เขตบางขุนเทียน ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000	45
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างพื้นที่ที่ได้กราฟที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ในการคำนวณ	49
รูปที่ 4.1 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล	51
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีจุดตรวจสอบหนาแน่น โดยจะเป็นพื้นที่บริเวณเมืองเป็นส่วนใหญ่ โดยในรูปเป็นพื้นที่บริเวณถนนสีลม เขตบางรัก และพื้นที่บริเวณเขตป้อมปราบศัตรูพ่าย	52
รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่มีการ offset ค่า	54
รูปที่ 4.4 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัวของผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000	55
รูปที่ 4.5 จุดตรวจสอบรอบหมุด กทม.140 โดยเป็นพื้นที่บริเวณรอบการไฟฟ้านครหลวง คลองเตย (โดยเป็นภาพในปี ค.ศ. 2004 จากโปรแกรม google earth).....	56
รูปที่ 4.6 อัตราการทรุดตัวของ (a), (b) พื้นที่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาใน กรุงเทพมหานคร (c) พื้นที่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาของในจังหวัดสมุทรปราการ (d) พื้นที่บริเวณหลักสี่และดอนเมือง (e) พื้นที่บริเวณทางทิศตะวันตกของกรุงเทพมหานครและพื้นที่ทางเหนือของจังหวัดสมุทรสาคร	59
รูปที่ 4.7 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่ของอัตราการทรุดตัวในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000	60
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR และ ค่าระดับ	61
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าอัตราการทรุดตัวและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล InSAR และงานระดับ	63

รูปที่ 4.10 พื้นที่รอบบริเวณหมุดและจุดตรวจสอบที่มีค่าการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องโดยใช้การตรวจสอบ t-test โดยมีอัตราการทรุดตัวเร็วกว่างานระดับ โดยเป็นหมุด BM.33, กทม. 640 กทม.682	65
รูปที่ 4.11 พื้นที่รอบบริเวณหมุดและจุดตรวจสอบที่มีค่าการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องโดยใช้การตรวจสอบ t-test โดยมีอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่าจากงานระดับ โดยเป็นหมุด BM.10 และ กทม.320	66
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 1996-2000	69
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 2005-2010 จากงานวิจัย Aobpaet et al (2012).....	70
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 2009-2012 จากงานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015)	72
รูปที่ 5.4 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2012 ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรปราการ.....	74
รูปที่ 5.5 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว	75
รูปที่ 5.6 ค่าการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012 ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรปราการ.....	76
รูปที่ 5.7 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่ของการทรุดตัวสะสม	77
รูปที่ 5.8 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม โดยเป็นพื้นที่บริเวณ เขตดอนเมือง, เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร และ อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี.....	78
รูปที่ 5.9 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม โดยเป็นพื้นที่บริเวณ ซอยรามอินทรา 68 แขวงคันนายาว ในเขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร	79
รูปที่ 5.10 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม โดยเป็นพื้นที่บริเวณ วัดคลองปลัดเปรียง ต.บางแก้ว อ.บางพลี จังหวัดสมุทรปราการ	80

- รูปที่ 5.11 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม โดยเป็นพื้นที่บริเวณ ช.พนาสนชิตี ถ.ศรีนครินทร์ ในตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 81
- รูปที่ 5.12 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม โดยเป็นภาพถ่ายดาวเทียมพื้นที่บริเวณ ช.พนาสนชิตี ถ.ศรีนครินทร์ ในตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 82



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 รายการข้อมูลภาพเรดาร์ ที่ใช้ในการประมวลผล.....	6
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการใช้งานของ InSAR, การทำระดับ และ GPS.....	26
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดหมวดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR โดย แสดงค่าอัตราการทรุดตัว (v) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (sd)	43
ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์แสดงความสอดคล้องกันของข้อมูลอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR และงานระดับโดยใช้การทดสอบ t-test	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาแผ่นดินทรุดตัวต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ซึ่งเริ่มมีรายงานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1968 (Cox, 1968) และเริ่มมีการติดตามตรวจสอบอย่างเป็นระบบโดยกรมทรัพยากรธรณี (ปัจจุบันภารกิจส่วนนี้อยู่ภายใต้กรมทรัพยากรน้ำบาดาล) และกรมแผนที่ทหารในปี ค.ศ. 1978 ปัญหาแผ่นดินทรุดตัวนี้ส่งผลกระทบต่อประชากรและประเทศเป็นอย่างมาก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งใหญ่ในปี ค.ศ. 2011 ที่มีน้ำท่วมขังอยู่ถึงเกือบ 1-2 เดือน (Komori et al., 2012) ซึ่งอาจจะเกิดจากระบบการจัดการน้ำที่ยากลำบาก และเนื่องด้วยบริเวณจังหวัดสมุทรปราการเป็นพื้นที่ราบและมีความสูงเฉลี่ยจากระดับทะเลปานกลางประมาณ 0 - 1.5 เมตรเท่านั้น ซึ่งหากเกิดปัญหาแผ่นดินทรุดต่อไปจนมีความสูงต่ำกว่าระดับทะเลปานกลางหรือเกิดพื้นที่รูปแอ่งขึ้น จะทำให้ปัญหาการระบายน้ำนั้นมีความเกิดวิกฤตมากขึ้น และนอกจากนี้ปัญหาแผ่นดินทรุดยังส่งผลกระทบต่ออีกหลายด้าน เช่น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อ ท่อใต้ดิน สิ่งก่อสร้างอาคารต่างๆ เพราะฉะนั้นควรให้ความสำคัญในการศึกษาทำความเข้าใจในเรื่องแผ่นดินทรุดตัวต่อไป

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการประมวลผล Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลเฟสจากภาพเรดาร์ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเฮย์วาร์ด (Hayward fault) ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศอเมริกา (Lanari et al., 2007), การตรวจวัดการทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองที่เหมืองไคหลวนในประเทศจีน (Ge et al., 2008), การทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลซึ่งคล้ายกับสาเหตุของการทรุดตัวในบริเวณกรุงเทพมหานครที่บริเวณทางตอนเหนือของเขตคันโตที่ประเทศญี่ปุ่น (Nakagawa et al., 2000), ที่เมืองเตหะรานในประเทศอิหร่าน (Deghani et al., 2013) เป็นต้น เนื่องจากความละเอียดในการตรวจวัดที่ได้ถึงระดับมิลลิเมตรและจากข้อเด่นในเรื่องการใช้เวลาในการทำงานที่น้อยกว่าการทำงานระดับและสำหรับพื้นที่เขตเมือง InSAR สามารถให้คำรังวัดจำนวนมาก ซึ่งสามารถลดปัญหาในเรื่องความละเอียดในเชิงตำแหน่งที่เกิดกับงานภาคสนามเช่น งานระดับหรืองานรังวัดด้วยสัญญาณ

ดาวเทียมจีพีเอสออกไปได้ ทำให้เทคนิค InSAR เหมาะสมกับการตรวจวัดการทรุดตัวของแผ่นดินเป็นอย่างมาก เนื่องจากการทรุดตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีขนาดแปรเปลี่ยนไปตามทั้งตำแหน่งและเวลาไม่เท่ากัน

อย่างไรก็ตามการประมวลผล InSAR นั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องการไม่สามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่ขาดค่าสหสัมพันธ์หรือหมายถึงพื้นที่ในช่วงเวลาการตรวจวัดนั้นวัตถุนั้นบนพื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงไปมากจนถึงจุดที่ไม่สามารถประมวลผลได้ และยังต้องมีการพิจารณาถึงเรื่องความเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัวแต่เกิดจากปัจจัยอื่นอีกด้วย เช่น ความคลาดเคลื่อนจากสภาพอากาศ ในงานวิจัยนี้จึงใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค Stanford Method for Persistent Scatter (StamPS) และเทคนิค Small Baseline (SB) ร่วมกันเข้ามาช่วยในการประมวลผลหรือที่เรียกว่า InSAR StamPS-MTI SB combine ซึ่งทั้งสองเทคนิคนั้นถูกพัฒนามาเพื่อแก้ข้อจำกัดของเทคนิค InSAR แบบดั้งเดิมออกไป โดยหลักการของทั้งสองเทคนิคนั้นจะใช้การคัดกรองหาเฉพาะจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันทั้งช่วงเวลาของข้อมูลและนำเฉพาะจุดภาพเหล่านี้มาทำเป็นโครงข่ายเพื่อใช้ในการประมวลผล

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Time-series InSAR ในการประมวลผลภาพจากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 เพื่อหาอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นและนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ผลร่วมกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้เทคนิค Time-series InSAR หาการทรุดตัวในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2005-2010 จากงานวิจัยของ Aobpaet et al (2012) และช่วงปี ค.ศ. 2009-2012 จากงานวิจัยของ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ในส่วนบริเวณที่มีข้อมูลซ้อนทับกัน เพื่อแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและการทรุดตัวสะสมในระยะยาวมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1) ตรวจสอบหาค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงเวลา กุมภาพันธ์ 1996 ถึง มกราคม 2000 โดยใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค StaMPS-MTI SB

1.2.2) ตรวจสอบหาความสอดคล้องกันของผลลัพธ์ของอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบกับข้อมูลงานระดับจากโครงการงานระดับตรวจสอบการทรุดตัวของกรมแผนที่ทหาร เพื่อทราบถึงคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จาก InSAR

1.2.3) นำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวสะสมในช่วงปี ค.ศ. 1996-2012

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ขอบเขตการศึกษา

ทำการหาค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา กุมภาพันธ์ 1996 ถึง มกราคม 2000 โดยใช้การประมวลผล Time-series InSAR และนำค่าผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบตรวจสอบกับค่าข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดินที่ตรวจพบจากงานระดับในช่วงเวลาเดียวกัน และนำค่าผลลัพธ์ที่ตรวจสอบแล้วไปวิเคราะห์ผลร่วมกับข้อมูลงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

1.3.2.1) พื้นที่ศึกษาหาอัตราการทรุดตัวมีขนาดประมาณ 10,000 ตร.กม. กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ในวงโคจรขาลง (Descending orbit) ซึ่งพื้นที่จะครอบคลุมส่วนกลางและฝั่งตะวันตกของกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ ปทุมธานี นนทบุรี สมุทรสาคร นครปฐม สมุทรสงคราม ราชบุรี สุพรรณบุรี ดังแสดงในรูปที่ 1.1

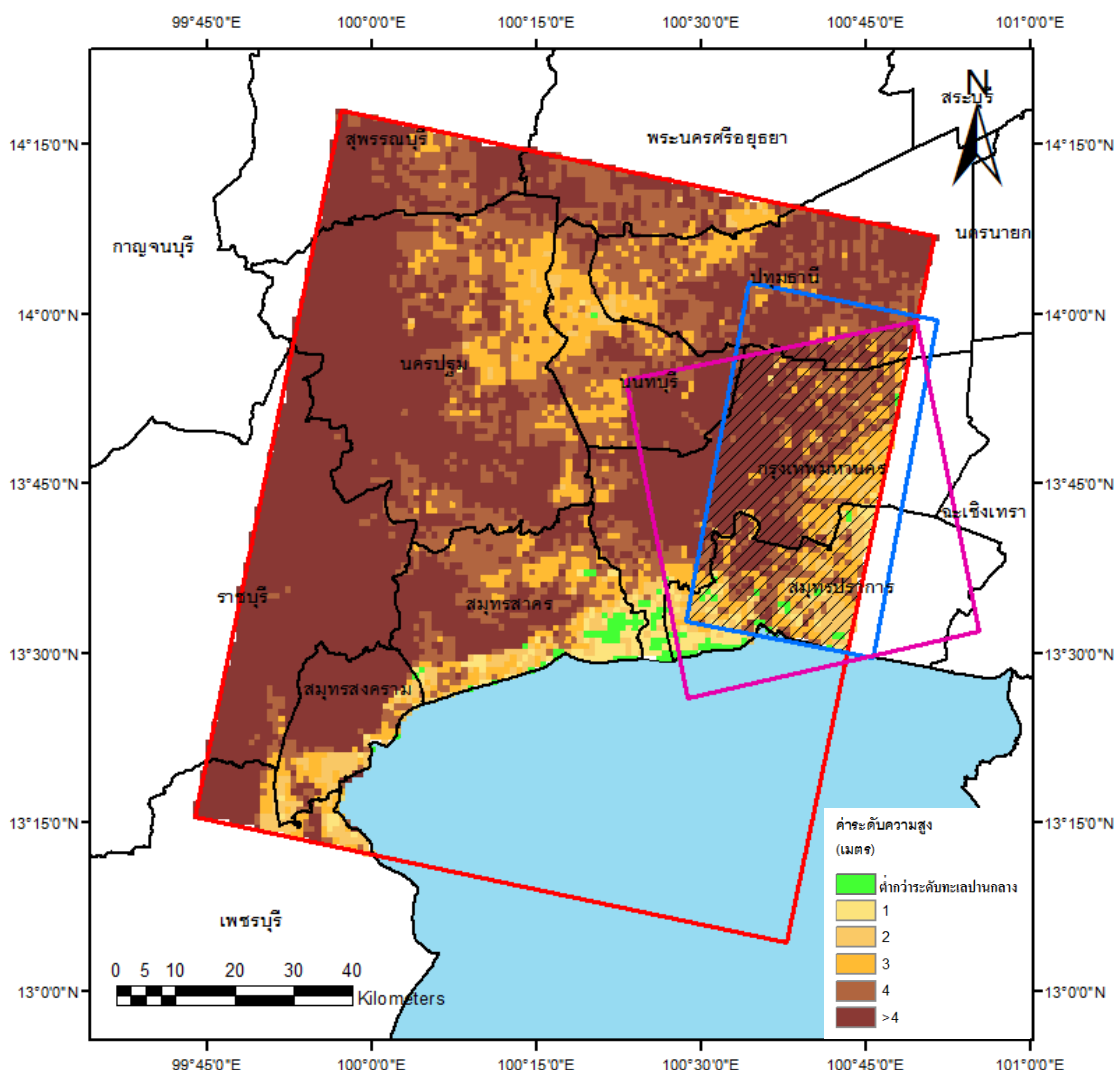
1.3.3.2) การศึกษาวิเคราะห์ผลร่วมกับข้อมูลกับงานวิจัยในอดีตนั้น จะมีพื้นที่ศึกษาบางส่วน ซ้อนทับกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย Aobpaet et al (2012) ซึ่งจะครอบคลุมส่วนกลางและซีกตะวันตกของกรุงเทพมหานคร และบริเวณปริมณฑลที่อยู่ทางฝั่งตะวันตกของกรุงเทพมหานคร ซึ่ง ส่วนของงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) การครอบคลุมพื้นที่จะคล้ายกับ Aobpaet et al (2012) แต่ อาจจะมีพื้นที่ที่ซ้อนทับกันน้อยกว่า โดยพื้นที่ศึกษานั้นจะนำเฉพาะพื้นที่ที่มีส่วนซ้อนทับกันทั้ง 3 งานวิจัยนำมาประมวลผลดังรูปที่ 1.1

1.3.3) ช่วงเวลาของข้อมูลที่ทำการศึกษา

1.3.3.1) ช่วงเวลาการศึกษาวิจัยหาค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ภายในช่วงเวลา 27 มีนาคม 1996 – 26 มกราคม 2000 (27 มีนาคม พ.ศ. 2539 - 26 มกราคม พ.ศ. 2543)

1.3.3.2) ช่วงเวลาการศึกษาหาแนวโน้มการทรุดตัวจากทั้งสามงานวิจัย

- ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ : มีนาคม 1996 - มกราคม 2000
- Aobpaet et al (2012) : ตุลาคม 2005 - มีนาคม 2010
- สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) : กันยายน 2009 - กรกฎาคม 2012



รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษาในการศึกษาหาอัตราการทรุดตัวในงานวิจัยในกรอบสีแดง กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS 2 ในวงโคจรขาลง และพื้นที่ศึกษาหาแนวโน้มการทรุดตัวในพื้นที่แรเงาสีดำ กำหนดโดยส่วนที่ซ้อนทับกันของ footprint ของงานวิจัยนี้กับของ Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

1.3.4) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1) เนื่องจากข้อมูลที่ต้องการใช้นั้นจะต้องเป็นภาพ SAR ที่มีการบันทึกภาพในช่วงเวลาที่ต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วในอดีตและมีการบันทึกภาพในพื้นที่ที่สนใจซึ่งก็คือ กรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยจะต้องมีการบันทึกภาพที่มีความต่อเนื่องพอที่จะสามารถใช้ในการประมวลผลได้ ซึ่งข้อมูลชุดภาพที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ รูปภาพ SAR ในระดับ Single look complex (SLC) ทั้งหมด 18 ภาพ จากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 บันทึกในโหมด StripMap มี Slant range resolution \approx 8 เมตร และ Azimuth resolution \approx 4 เมตร ซึ่งภาพถ่ายทั้งหมดนั้น

ถ่ายในช่วงดาวเทียมที่อยู่ในวงจรขาลง (Descending) ทั้งหมดและในการประมวลผลได้มีการโหลดค่า Precise orbit มาจาก Delft Institute for Earth-Oriented Space Research เพื่อนำมาแก้ค่า Orbit ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นอีกด้วย โดยมีรายละเอียดภาพเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ข้อมูล Digital Elevation Model จาก Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM DEM) ข้อมูลค่าระดับเชิงเลขที่มีความละเอียด (resolution) 3 พิลิปดา หรือประมาณ 90 เมตร และมีค่าความคลื่อนทางตั้งไม่เกิน 16 เมตร

ข้อมูล precise orbit ของดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ข้อมูลตำแหน่งการโคจรของดาวเทียม ERS ที่มีค่าความแม่นยำ (precision) สูง โดยสามารถทำการดาวนโหลดได้จาก (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/orbits/>) ซึ่งจัดทำและดูแลโดย Delft Institute for Earth-Oriented Space Research โดยมีค่าความแม่นยำ (precision) ทางตำแหน่ง อยู่ที่ 5-6 เซ็นติเมตร

ตารางที่ 1.1 รายการข้อมูลภาพเรดาร์ ที่ใช้ในการประมวลผล

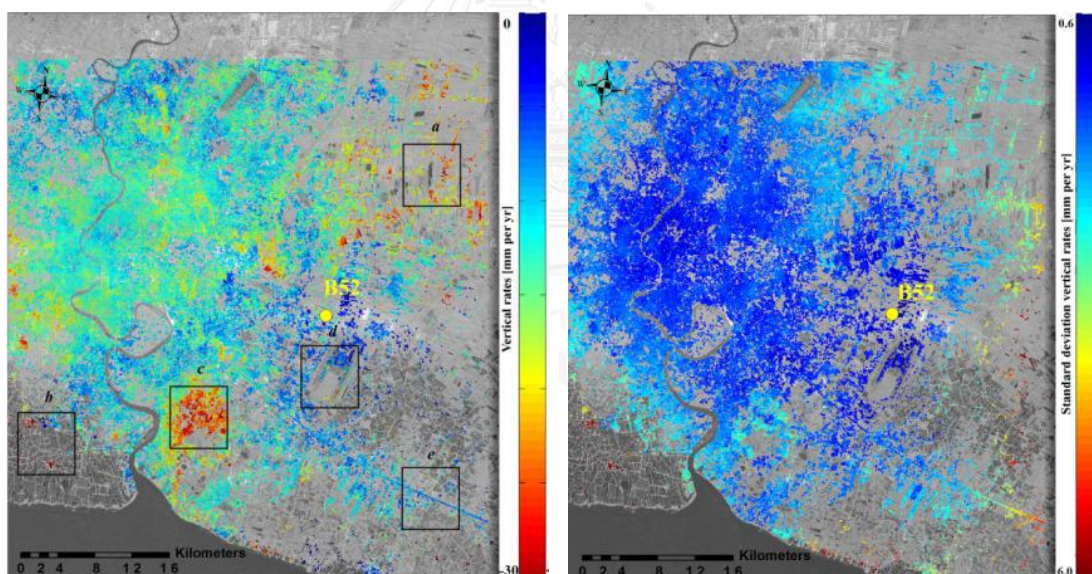
ภาพที่	Date	ดาวเทียม	Arclist(Precise Orbit)
1	20 Februrary 1996	ERS1	481
2	26 March 1996	ERS1	491
3	27 March 1996	ERS2	98
4	1 May 1996	ERS2	108
5	5 June 1996	ERS2	118
6	10 July 1996	ERS2	128
7	14 August 1996	ERS2	138
8	18 September 1996	ERS2	148
9	23 October 1996	ERS2	158
10	21 May 1997	ERS2	218
11	12 November 1997	ERS2	268
12	17 December 1997	ERS2	278
13	21 January 1998	ERS2	288
14	1 Apirl 1998	ERS2	308
15	6 May 1998	ERS2	318
16	10 June 1998	ERS2	328
17	22 December 1999	ERS2	488
18	26 January 2000	ERS2	498

2) ข้อมูลผลลัพธ์จากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

- งานวิจัย Aobpaet et al (2012) ได้มีการใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค InSAR StamPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของช่วงเวลา ตั้งแต่ ตุลาคม 2005 ถึง มีนาคม 2010 โดยใช้ภาพจากดาวเทียม RADARSAT-1 ทั้งหมด 19 ภาพโดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2500 ตร.กม. ซึ่งภาพส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่กรุงเทพฝั่งตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับ PS pixel ได้เกือบ 300,000 จุดภาพ หรือมีจำนวนค่ารังวัดเฉลี่ยประมาณ 120 จุด/ตร.กม. และได้มากถึง 150 จุด/ตร.กม. ในพื้นที่เมือง ซึ่งได้ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวดังรูปที่ 1.2 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างมากจากที่ค่า Standard deviation ในภาพส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างต่ำและในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ร่วมกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับอีกด้วย ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้จากการประมวลผล Time-series InSAR มีค่าสอดคล้องกับค่าระดับสูงถึง 80% โดยใช้ t-test ที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% โดยมีจุดตรวจสอบทั้งหมด 70 จุด

a.)

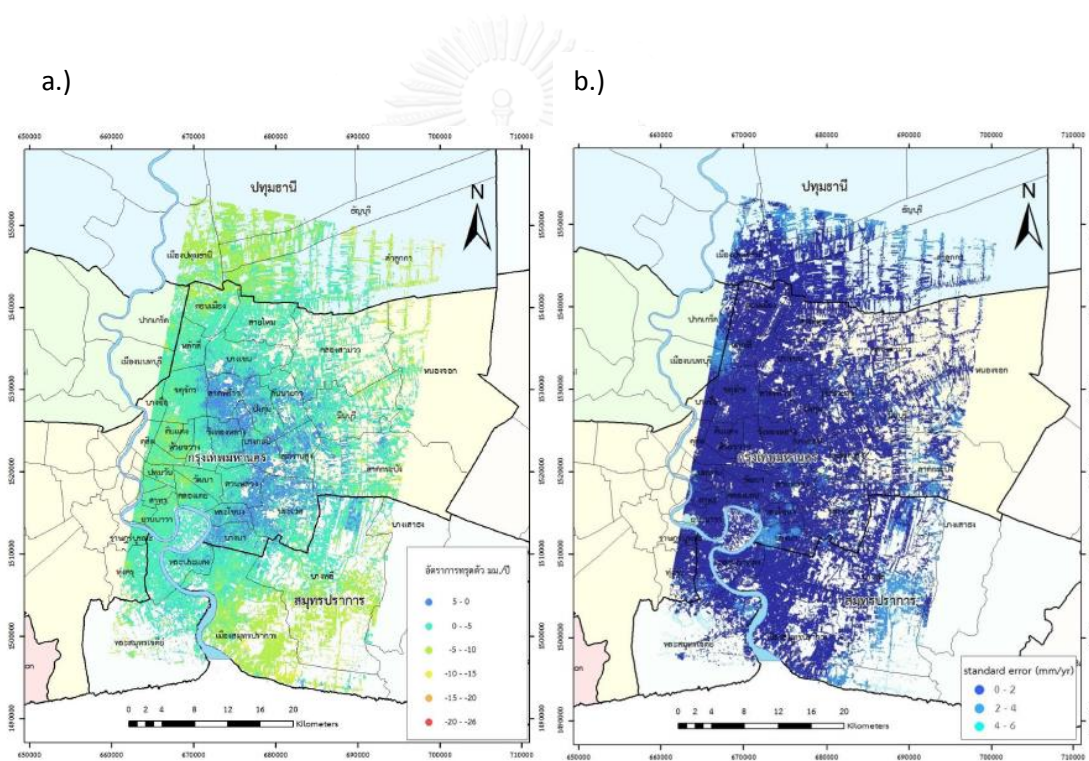
b.)



รูปที่ 1.2 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบในช่วงปี 2005 - 2010 โดยการประมวลผล Time-series InSAR ในงานวิจัย Aobpaet et al (2012) (a) อัตราการทรุดตัวในแนวตั้ง (mm/yr) (b) ค่า standard deviation ของอัตราเร็วเฉลี่ย

- งานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ได้มีการใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค InSAR StamPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของช่วงเวลา ตั้งแต่ กันยายน 2009 ถึง สิงหาคม 2012 โดยใช้ภาพจากดาวเทียม TerraSAR - X ทั้งหมด 26 ภาพโดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1600 ตร.กม. ซึ่งภาพ

ส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 1.1 เนื่องด้วยมาจากปริมาณพื้นที่ที่ครอบคลุมเล็กกว่างานวิจัยของ Aobpaet et al (2012) ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับ PS pixel ได้เกือบ 4,000,000 จุดภาพ หรือมีจำนวนค่ารังวัดเฉลี่ยประมาณ 2500 จุด/ตร.กม. ซึ่งได้ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวดังรูปที่ 1.3 ผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างมากจากที่ค่า Standard deviation มีค่าค่อนข้างต่ำ และในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ร่วมกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับ ซึ่งค่าส่วนใหญ่ที่มีความสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่างกันของอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล Time-series InSAR กับ งานระดับเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5 มม./ปี และ มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.4 มม./ปี โดยใช้จุดตรวจสอบทั้งหมด 58 จุด

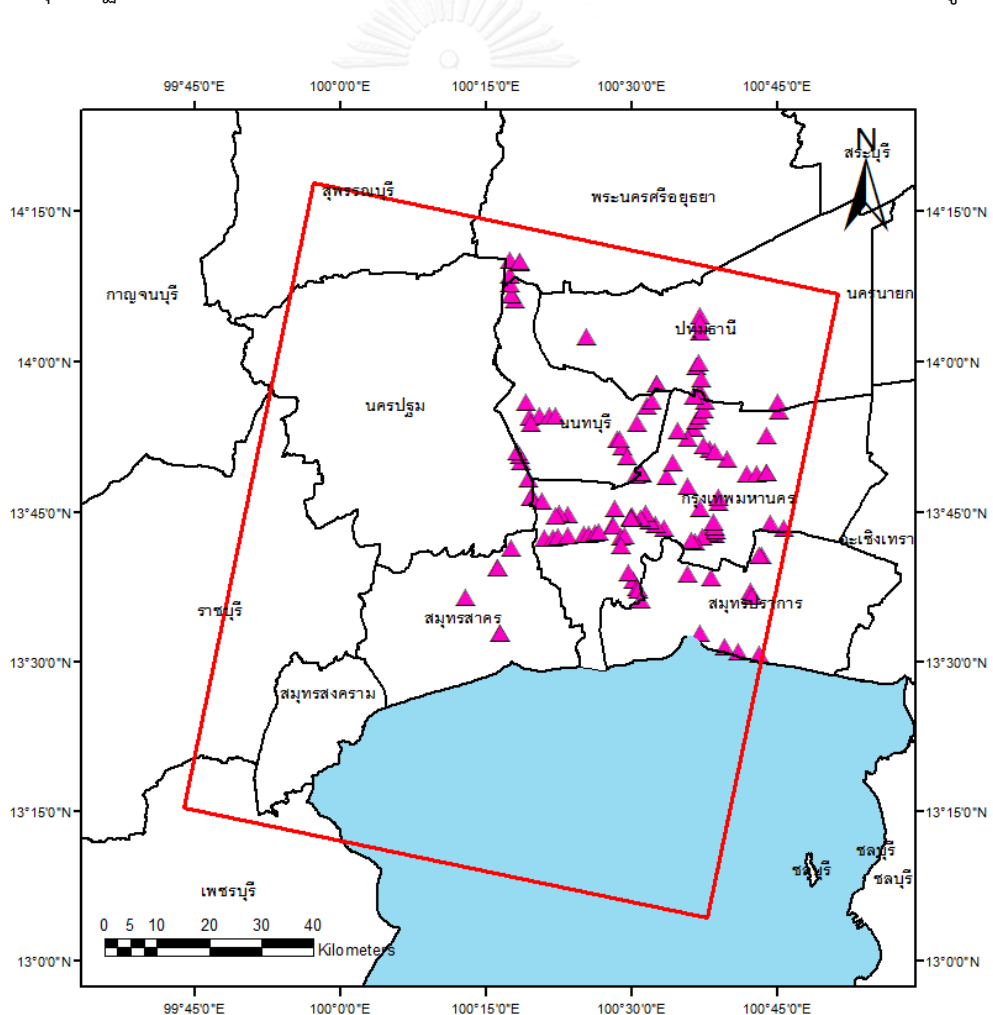


รูปที่ 1.3 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบในช่วงปี 2009-2012 โดยการประมวลผล Time-series InSAR ในงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) (a) อัตราการทรุดตัวในแนวตั้ง (mm/yr) (b) ค่า standard deviation ของอัตราเร็วเฉลี่ย

3) ข้อมูลค่าระดับของหมุดหลักฐานจากกรมแผนที่ทหารซึ่งใช้การสำรวจระดับชั้นที่ 1 โดยปฏิบัติงานสำรวจตาม "ระเบียบกองยี่อเดซีและยี่อฟิสิกส์ กรมแผนที่ทหาร ว่าด้วยการสำรวจหมุดหลักฐานทางราบและทางตั้ง พ.ศ. 2539" ซึ่งหมุดระดับที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบนั้นจะต้องเป็นหมุดที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่การวิจัยซึ่งกำหนดโดย footprint ของ ERS2 และเนื่องจากการอัตรา

การทรุดตัวในแต่ละช่วงเวลานั้นมีขนาดไม่เท่ากันจึงต้องเป็นหมุดที่มีข้อมูลค่าระดับครอบคลุมช่วงเวลาปี ค.ศ. 1996-2000 โดยมีหมุดที่เข้าเกณฑ์ข้อจำกัดทั้งสองอยู่ทั้งหมด 124 หมุด โดยมีตำแหน่งและการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 1.4

อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง InSAR กับงานระดับจำเป็นจะต้องพิจารณาข้อเท็จจริงที่ว่าผลลัพธ์จาก InSAR นั้นข้อมูลจุดเกือบทั้งหมดคาดว่าจะมาจากตัวอาคาร เพราะฉะนั้นอัตราการทรุดตัวที่ได้จึงเป็นอัตราการทรุดตัวของอาคาร ซึ่งโดยทั่วไปในพื้นที่ศึกษามีเสาเข็มอยู่ที่ชั้นทราย (ระดับความลึกประมาณ 15-20 เมตร) ในขณะที่หมุดระดับมีหลายกลุ่มตามความลึกของฐานราก ตั้งแต่หมุดที่ฝังตื้นๆเพียงประมาณ 1 เมตรบนพื้น หมุดที่อยู่บนเสาเข็มสั้นระดับ 5-8 เมตร หมุดที่มีฐานรากเป็นเสาเข็มบนชั้นทรายและหมุดที่มีเสาเข็มลึกกว่านั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกเฉพาะหมุดที่มีฐานรากเป็นเสาเข็มบนชั้นทรายสำหรับนำมาใช้ในขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลต่อไป



รูปที่ 1.4 ตำแหน่งหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์งานวิจัยโดยแสดงเป็นสัญลักษณ์สามเหลี่ยม และกรอบสีแดงแสดงพื้นที่ศึกษา กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS2 ในวงโคจรขาลง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1) ศึกษาทฤษฎี, งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, การใช้โปรแกรมและทำการติดตั้งโปรแกรม

1.4.2) รวบรวมข้อมูล ภาพ ERS 1/2, ข้อมูล Precise orbit , ข้อมูลค่ามุมระดับ, ข้อมูลผลลัพธ์จากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

1.4.3) ทำการประมวลผล Time-series InSAR ข้อมูลภาพ ERS 1/2

1.4.4) ตรวจสอบผลลัพธ์กับข้อมูลการทรุดตัวจากงานระดับ

1.4.5) วิเคราะห์ผลลัพธ์ร่วมกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ซึ่งเป็น การทรุดตัวของบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครแต่แตกต่างช่วงเวลา

1.4.6) สรุปผลการศึกษาร่วมข้อเสนอแนะและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1) ได้แผนที่ค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงเวลา กุมภาพันธ์ 1996 ถึง มกราคม 2000 จากการประมวลผล Time-series InSAR

1.5.2) ได้แผนที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัว สะสมเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ในส่วนที่มีพื้นที่ข้อมูลทับซ้อนกัน

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

2.1.1) Synthetic Aperture Radar (SAR)

ภาพเรดาร์ (Radio Detection and Ranging, Radar) คือภาพที่บันทึกคลื่นในช่วงไมโครเวฟโดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตรถึง 1 เมตร โดยคลื่นที่บันทึกนั้นเป็นคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุต่างๆ ซึ่งลักษณะของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามวัตถุที่คลื่นไปมีปฏิสัมพันธ์ด้วย จากการที่ระบบเรดาร์นั้นเป็นระบบแบบ Active System คือตัวระบบเป็นตัวส่งพลังงานคลื่นออกไปและตัวระบบเองที่เป็นตัวรับบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมา จึงทำให้ระบบเรดาร์มีข้อได้เปรียบที่สามารถทำงานบันทึกข้อมูลได้ทุกสภาพอากาศและเวลา โดยที่เทคนิคภาพเรดาร์นี้สามารถนำค่าเวลาในการเดินทางของคลื่นกับค่าแอมพลิจูดของคลื่นมาคำนวณหาระยะทางแบบไม่ละเอียดระหว่างตัวระบบกับวัตถุได้ และยังสามารถนำไปทำภาพแสดงความขรุขระของพื้นที่ได้ด้วย โดยพื้นที่ที่ส่องสว่างในภาพเรดาร์นั้นแสดงถึงพลังงาน (amplitude) ที่สะท้อนกลับมานั้นมีค่าสูง โดยความสูงต่ำของพลังงานที่สะท้อนกลับมานั้นจะขึ้นอยู่กับ 1.ลักษณะความชัน, การวางตัวของพื้นที่ว่ามีความสอดคล้องกับลักษณะการสะท้อนของคลื่นหรือไม่ 2.ความขรุขระของพื้นผิว ยิ่งมีความขรุขระมากการสะท้อนกลับมาของคลื่นก็จะมีโอกาสสูงมากขึ้นด้วย 3.ความสามารถในการนำไฟฟ้า (Dielectric Constant) ของวัตถุที่คลื่นไปมีปฏิสัมพันธ์ด้วย โดยที่ถ้าตัววัตถุมีค่าการนำไฟฟ้ามากการสะท้อนของคลื่นก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย

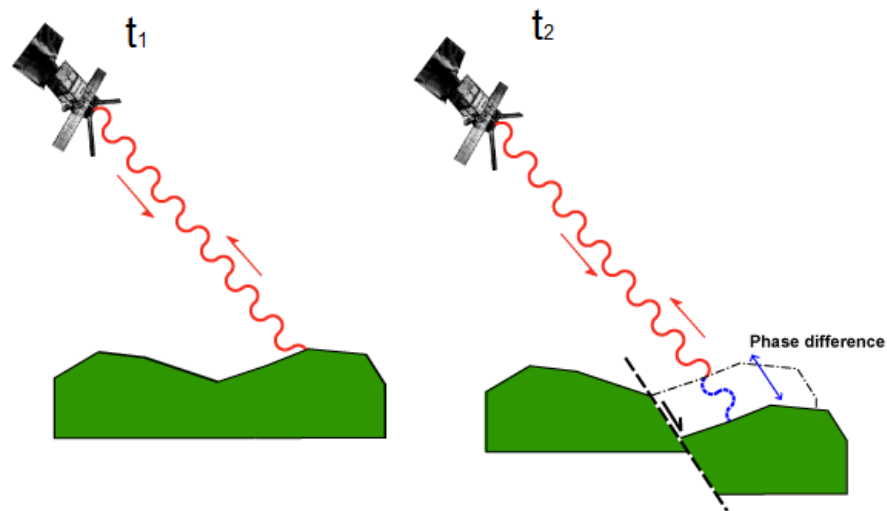
โดยที่ระบบภาพเรดาร์ในช่วงแรกนั้น (Real Aperture Radar, RAR) มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 5-10 กิโลเมตร ซึ่งมาจากข้อจำกัดของตัวอุปกรณ์ในระบบจึงทำให้ในช่วงแรกนั้นมีการใช้งานที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งต่อมาได้มีการนำเทคนิคเรื่องการส่งคลื่นที่มีความถี่ไม่เท่ากันหรือที่เรียกว่าการส่งสัญญาณแบบ Chirp pulse และเทคนิคดอปเปลอร์ (Doppler) เข้ามาช่วยเพื่อให้ภาพเรดาร์นั้นมีความละเอียดที่สูงขึ้นพอที่จะใช้ในการทำงานได้โดยเพิ่มความละเอียดของภาพจนเหลือ 1-100 เมตรได้โดยที่ไม่ได้ลดขอบเขตการครอบคลุมให้น้อยลงซึ่งเรียกเหล่านี้ว่าภาพ Synthetic Aperture Radar (SAR) ซึ่งในแต่ละจุดภาพนั้นจะบันทึกค่าแอมพลิจูดและเฟส โดยค่าทั้งสองนั้นมาจากผลรวมแบบเวกเตอร์ของการกระเจิง (Backscattering) ที่เกิดจากวัตถุ (Scatterers) ต่างๆที่คลื่นไปมีปฏิสัมพันธ์ด้วย

2.1.2) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

การประมวลผล InSAR นั้นเป็นเทคนิคที่พัฒนาเพิ่มเติมโดยใช้ภาพ SAR ในการประมวลผล ซึ่งถ้าหากมีภาพ SAR เพียงภาพเดียวข้อมูลเฟสจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าหากมีการบันทึกภาพที่บริเวณเดียวกัน ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาเดียวกันหรือคนละช่วงเวลากันก็ได้ จะสามารถนำภาพทั้งสองนั้นมาทำการ Interfere กันได้ ซึ่งนั่นก็คือ เทคนิค InSAR นั่นเอง

ซึ่งเป้าหมายหลักในช่วงแรกของเทคนิค InSAR นั่นคือการประมวลผลเพื่อตรวจหาลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศหรือเป็นการสร้างแบบจำลองความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศ (DEM) ในความละเอียดที่ไม่มากแต่มีพื้นที่ผลลัพธ์ครอบคลุมที่ค่อนข้างกว้าง โดยลักษณะการบันทึกภาพนั้นตำแหน่งทั้งสองนั้นจะต้องอยู่คนละตำแหน่งกันไม่ทับกันสนิทพอดีหรือหมายถึงมีค่าระยะห่างระหว่างการบันทึกภาพทั้งสอง (Spatial Baseline) และการบันทึกภาพทั้งสองพยายามให้มีเวลาใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อลดโอกาสไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศปะปนเข้ามาและเมื่อทำการขจัดค่าเฟสส่วนอื่นๆออกจนเหลือค่าเฟสที่เกิดจากภูมิประเทศ จึงทำการประมวลผลหาลักษณะความสูงของประเทศจากค่าเฟสนี้ต่อไปได้

แต่ต่อมากการประมวลผล InSAR นั้นนำมาใช้ในการประมวลผลหาการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศได้ ซึ่งถ้าหากพิจารณาในลักษณะกรณีที่เป็นอุดมคติแล้ว ถ้าหากภาพ SAR ทั้งสองที่นำมาประมวลผลถูกบันทึกภาพจากดาวเทียมที่อยู่ตำแหน่งเดียวกันทับกันสนิท, ช่วงเวลาที่ทำการบันทึกภาพทั้งสองนั้นสภาพอากาศทั้งหมดมีลักษณะเหมือนกันและลักษณะของวัตถุในจุดภาพต่างๆ เหล่านั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นถ้าหากนำภาพ SAR ทั้งสองนั้นมาหาค่าต่างเฟส จะสามารถบอกได้ว่าค่าต่างเฟสที่ตรวจพบในภาพ Interferogram ในแต่ละจุดภาพนั้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาระหว่างการบันทึกภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะระบบ InSAR กับค่าเฟสโดยแสดงการบันทึกภาพของสองช่วงเวลาที่มีลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศเกิดขึ้นด้วย โดยลักษณะของคลื่นที่เดินทางกลับมาโดยทั้งสองคลื่นนั้นมีค่าเฟสที่แตกต่างกัน ($\Delta\phi$) เนื่องจากการสะท้อนของคลื่นมีลักษณะที่แตกต่างกัน

โดยเนื่องจากว่าด้วยระบบ SAR นั้นเป็นระบบ Coherent ซึ่งหมายความว่า การส่งคลื่นออกไปแต่ละครั้งจะมีค่าเฟสและแอมพลิจูดเหมือนกัน ถ้าหากลักษณะการบันทึกภาพเป็นไปตามอุดมคติดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ค่าต่างเฟสที่ตรวจพบนั้นคือการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 \quad [1]$$

โดยในการทำในงานวิจัยนี้นั้นเป็นกรณี Monostatic คือเป็นระบบที่มีงานรับสัญญาณเพียงงานเดียว บนดาวเทียมจึงทำให้ระยะทางทั้งหมดที่คลื่นเดินทางจะต้องเป็นสองเท่าของระยะห่างระหว่างดาวเทียมและวัตถุ เพื่อเป็นระยะทั้งทางไปและกลับ

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

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

$$\Delta\phi = -\left(\frac{4\pi\Delta R}{\lambda}\right) \quad [2]$$

โดย $\Delta\phi$ คือค่าต่างเฟสที่ตรวจสอบพบจากภาพ SAR ทั้งสอง

ΔR คือค่าระยะการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศในทิศทาง line of sight ของดาวเทียม

λ คือค่าความยาวคลื่น

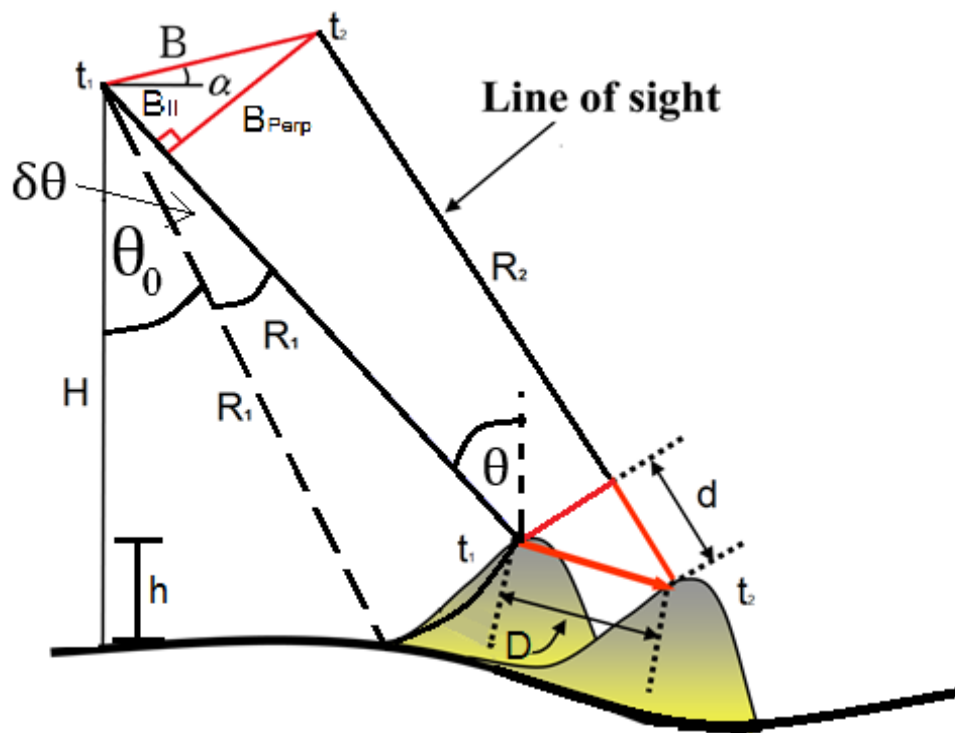
เพราะฉะนั้นเมื่อได้ค่า $\Delta\phi$ แล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาค่า ΔR หรือค่าการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิภาคประเทศในทิศทาง line of sight ของดาวเทียมได้ แต่ $\Delta\phi$ ที่ได้นั้นเป็นค่าที่อยู่ในรูป Wrapped phase ซึ่งเป็นเพียงเศษของลูกคลื่นเท่านั้นคือมีค่าอยู่ในช่วง $-\pi$ ถึง $+\pi$ ซึ่งจะต้องทำการประมวลผล phase Unwrapping เพื่อหาการเคลื่อนตัวที่สมบูรณ์ต่อไป

แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วนั้นมียังหลายปัจจัยที่ปะปนเข้ามากับค่าต่างเฟสที่ตรวจพบไม่เหมือนดังในกรณีอุดมคติ ทั้งด้วยเรื่องที่มีแรงภายนอกต่างๆที่มากกระทำกับดาวเทียม ทำให้ตำแหน่งการบันทึกภาพนั้นไม่ได้ถูกบันทึกที่ตำแหน่งที่ทับกันพอดี ซึ่งจะทำให้เกิดค่า Spatial Baseline ขึ้นหรือหมายถึงระยะห่างระหว่างตำแหน่งการถ่ายภาพทั้งสองนั้นไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการที่ตำแหน่งการบันทึกภาพทั้งสองไม่ทับกันพอดีนี้จึงมีผลทำให้มีค่าเฟสที่เกิดจากการที่ตำแหน่งการบันทึกภาพของดาวเทียมไม่ทับกันสนิท (ϕ_{ref}) เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อการที่มีตำแหน่งที่ไม่ทับกันพอดีนี้เกิดขึ้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณทาง geometry ของตำแหน่งดาวเทียมทั้งสองเพื่อใช้ในการขจัดค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งได้มาจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียม แต่ในข้อมูลวงโคจรดาวเทียมเหล่านั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนปะปนอยู่จึงทำให้มีค่าเฟสจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลวงโคจรของดาวเทียม (ϕ_{orb}) ปะปนเข้ามาและเมื่อตำแหน่งการบันทึกภาพของดาวเทียมไม่ทับกันสนิทจึงทำให้มีค่าต่างเฟสมีผลมาจากเฟสจากลักษณะภูมิประเทศ (ϕ_{Topo}) ปะปนเข้ามาเช่นกัน และในความเป็นจริงปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่ลักษณะของสภาพอากาศที่บันทึกภาพจากช่วงเวลาทั้งสองนั้นจะเหมือนกันทุกประการจึงทำให้มีค่าเฟสจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ (ϕ_{atm}) ปะปนเข้ามา

ซึ่งจากปัจจัยในความเป็นจริงเหล่านี้ทำให้ค่าต่างเฟสที่ตรวจสอบได้ ($\Delta\phi$) นั้นเป็นผลรวมมาจาก ค่าเฟสจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิภาคประเทศ (ϕ_{def}), ค่าเฟสที่เกิดจากการที่ตำแหน่งการบันทึกภาพของดาวเทียมไม่ทับกันสนิท (ϕ_{ref}), ค่าเฟสจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลวงโคจรของดาวเทียม (ϕ_{orb}), เฟสจากลักษณะภูมิประเทศ (ϕ_{Topo}) และเฟสจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ (ϕ_{atm}) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการประมวลผลที่จะต้องทำการแยกค่าเฟสเหล่านี้กับค่าเฟสที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นดินออกจากกัน

$$\Delta\phi = \phi_{def} + \phi_{Topo} + \phi_{orb} + \phi_{ref} + \phi_{atm}$$

และอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ วัตถุบนพื้นดินในจุดภาพส่วนใหญ่ของภาพนั้นในความเป็นจริงจะมีการแปรเปลี่ยนไปตามเวลาและถ้าหากวัตถุนั้นมีลักษณะแปรเปลี่ยนไปมากจนถึงจุดหนึ่งที่ไม่สามารถประมวลผลจุดภาพเหล่านั้นได้ ซึ่งข้อจำกัดนี้เรียกว่า การขาดค่าสหสัมพันธ์ (decorrelation)



รูปที่ 2.2 ลักษณะเรขาคณิตของระบบ InSAR โดย B , B_{Perp} , B_{\parallel} คือ Spatial, perpendicular, parallel Baseline ตามลำดับ, H คือค่าความสูงดาวเทียมจาก reference ellipsoid, θ^0 คือค่ามุม look angle ที่ reference ellipsoid, $\delta\theta$ คือค่ามุม look angle ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความสูงของภูมิประเทศ (h), θ คือค่ามุม look angle โดยเป็นผลรวมจาก $\theta = \theta^0 + \delta\theta$ ซึ่งระหว่างการบันทึกภาพ ณ ที่เวลา t_1 และ t_2 มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศเป็นระยะทาง D

เฟสจากลักษณะภูมิประเทศ (ϕ_{Topo})

ด้วยในกรณีอุดมคติที่มีความต้องการตำแหน่งการบันทึกภาพที่มีตำแหน่งทับกันสนิทหรือให้มีระยะห่างของการบันทึกภาพน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ทว่าในความเป็นจริงแล้วในขั้นตอนการประมวลผลจริงอาจไม่สามารถหาคู่ภาพ SAR ที่มีความยาว Spatial Baseline เป็นศูนย์ไม่ได้สำหรับพื้นที่ที่ต้องการ จึงทำให้เกิดค่า Spatial Baseline เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพที่ใช้ ซึ่งทำให้ค่าเฟสที่ตรวจพบนั้นมีค่าเฟสจากลักษณะของพื้นผิวภูมิประเทศปะปนเข้ามาด้วย ซึ่งลักษณะคือเหมือนกับจุดประสงค์ของการประมวลผล InSAR ในช่วงแรกที่ต้องการการประมวลผล InSAR เพื่อใช้ในการตรวจหาลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศ โดยมีการบันทึกภาพแบบมี Spatial Baseline ในช่วงเวลาการบันทึกภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศปะปนเข้ามา แต่ทว่าในคู่ภาพนี้ที่มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศและมีค่า Spatial Baseline ในการถ่ายภาพนั้น ค่าต่าง

เฟสที่ออกมาจึงมีผลมาจากทั้งเฟสจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ (ϕ_{def}) และเฟสจากลักษณะภูมิประเทศ (ϕ_{Topo}) เมื่อพิจารณาถึงเรื่องความสูงของภูมิประเทศจากรูปที่ 2. ดังนี้

$$H = R_1 \cos \theta^0$$

$$h = \delta H = -R \sin \theta^0 \delta \theta \quad [3]$$

ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฟสและค่าความสูงภูมิประเทศ จากรูปที่ 2. จะได้

$$B_{\text{Perp}} = B \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha\right)$$

$$B_{\text{Perp}} = B \cos(\theta - \alpha) \quad [4]$$

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad [5]$$

ซึ่งด้วยระยะ R_1 และ R_2 นั้นในความเป็นจริงถือว่ามีระยะที่ไกลมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น จึงอาจใช้ Far Field Approximation โดยประมาณว่า R_1 ขนานกับ R_2 ดังนั้นจะถือว่าค่าต่างระยะจะมีค่าประมาณเท่ากับ Parallel Baseline

$$\Delta R \approx B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad [6]$$

$$\delta \Delta R = B \cos(\theta - \alpha) \delta \theta \quad [7]$$

เมื่อสมการที่ [2] แทนใน [7]

$$-\frac{\lambda}{4\pi} \delta \Delta \phi = B \cos(\theta - \alpha) \delta \theta$$

โดยต่อไปนี่เพื่อความสะดวกค่าต่างเฟส หรือ Interferometric phase ($\Delta \phi$) จะเขียนสั้นๆเหลือเพียง ϕ

$$\delta \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) \delta \theta \quad [8]$$

และนำ [2] แทนใน [8]

$$\delta \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) \frac{h}{R_1 \sin \theta}$$

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_{Perp}}{R \sin\theta} h \right) \quad [9]$$

และถ้าหากในช่วงเวลาของการบันทึกภาพทั้งสองนั้นมีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศเกิดขึ้น ค่าต่างเฟสที่คำนวณได้จะมีค่าเฟสจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ (ϕ_{def}) เข้ามาด้วย

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_{Perp}}{R \sin\theta} h \right) - \phi_{def}$$

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_{Perp}}{R \sin\theta} h \right) - \frac{4\pi}{\lambda} d$$

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{B_{Perp}}{R \sin\theta} h + d \right) \quad [10]$$

ซึ่งถ้าหากพิจารณาในสมการที่ [10] จะสามารถเห็นได้ว่าถ้าหากเลือกคู่ภาพ Interferogram ที่มีความยาว Perpendicular Baseline เป็นศูนย์ ค่าต่างเฟสที่พบนั้นจะไม่มีค่าเฟสจากลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศติดเข้ามา แต่อยู่ในความเป็นจริงแล้วนั้นเป็นไปได้ยากมากที่จะหาคู่ภาพที่มีความยาว Perpendicular Baseline เป็นศูนย์เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจึงค่าเฟสเทอมนี้ติดเข้ามาด้วยเสมอ โดยการขจัดค่าเฟสจากลักษณะภูมิประเทศนั้นสามารถขจัดด้วยการใช้เทคนิค DInSAR ซึ่งจะเป็นการนำคู่ภาพ Interferogram (ภาพที่ในแต่ละจุดภาพนั้นบันทึกค่าต่างเฟสจากคู่ภาพ SAR ทั้งสอง) ที่ไม่มีเฟสจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศปะปนอยู่มาใช้สร้างค่าเฟสที่เกิดจากลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่นั้นๆ และนำค่าจากส่วนนี้มาลบออก ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า “3-pass DInSAR” หรืออาจจะใช้วิธีการนำแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (DEM) ของพื้นที่ที่ทำการประมวลผล มาทำการ resample ให้มีค่าความละเอียดที่เท่ากับภาพ Interferogram และใช้ค่าความสูงจาก DEM แปรเปลี่ยนเป็นค่าเฟสและนำมาลบออกโดยวิธีนี้เรียกว่า “2-pass DInSAR” ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกเพราะเนื่องจากว่าพื้นที่เกือบทั้งหมดของโลกนั้นมี DEM จาก SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ครอบคลุม

เฟสจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ (ϕ_{atm})

ข้อจำกัดที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างสำหรับการประมวลผล InSAR นั้นคือการแปรเปลี่ยนไปของเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศ ถึงแม้ว่าการบันทึกภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟหรือระบบเรดาร์นั้นมีข้อได้เปรียบที่สามารถทำงานบันทึกภาพได้ทั้งทุกสภาพอากาศทั้งกลางวันกลางคืน แต่อย่างไรก็ตามการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศนั้นยังมีผลกระทบต่อลักษณะของคลื่นเช่นกัน โดยมีสาเหตุมาจากส่วนประกอบในชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะละอองน้ำและความชื้น ซึ่งจะเป็นตัวดูดซับพลังงานและกระเจิงคลื่นระบบเรดาร์ ซึ่งในความเป็นจริงทั้งสองเวลาที่ทำ

การบันทึกภาพนั้นมีลักษณะรูปแบบของชั้นบรรยากาศที่ไม่เหมือนกันอาจเนื่องมาจากตำแหน่งการบันทึกภาพทั้งสองภาพนั้นไม่ได้อยู่เดียวกันพอดีและถึงแม้ว่าจะมีการบันทึกภาพที่ตำแหน่งที่ทับกันสนิท แต่ถ้าหากเป็นคนละช่วงเวลาสภาพชั้นบรรยากาศก็จะเป็นไปได้ยากที่ทั้งสองเวลาจะมีลักษณะที่เหมือนกัน ซึ่งการแปรเปลี่ยนที่ไม่เท่ากันนี้ทำให้ค่าเฟสที่ตรวจวัดได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นหรือหมายถึงมีค่าเฟสจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ (ϕ_{atm}) ปะปนเข้ามาในค่าต่างเฟสที่ตรวจสอบพบด้วย โดยการขจัดปัญหาหรือลดผลกระทบของค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศนี้สามารถทำได้โดยการใช้จำนวนภาพ Interferogram ที่มากขึ้นหรือก็คือการใช้การประมวลผล Time-series InSAR โดยเป็นการขยายระยะเวลาการบันทึกภาพพื้นที่นั้นๆ โดยการขจัดค่านั้นใช้การปรับแก้ lithoscan ประมาณค่าตัวแปรค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศออกมาและทำการขจัดออก เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องการจำนวนภาพ Interferogram ที่มากขึ้นตามไปด้วย

เฟสที่เกิดจากรยะ R ที่เปลี่ยนแปลงไปของทั้งสองภาพจากการที่ตำแหน่งการบันทึกภาพของดาวเทียมไม่ทับกันสนิท (ϕ_{ref})

เนื่องจากในความเป็นจริงการที่ตำแหน่งของดาวเทียมขณะที่บันทึกภาพนั้นไม่ทับกันสนิท จึงทำให้ระยะระหว่างดาวเทียมและพื้นผิว (R) ในแนว range ของการบันทึกภาพทั้งสองนั้นมีระยะที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงบนพื้นผิวอ้างอิง (Ellipsoid หรือระนาบก็ตาม) ซึ่งถึงแม้ว่าในช่วงเวลาการถ่ายภาพทั้งสองนั้นอาจไม่มีการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศก็ตาม แต่การที่มีการบันทึกภาพที่คนละตำแหน่งกันนี้ก็ทำให้เกิดส่วนของ ΔR และค่าต่างเฟส ϕ_{ref} ปะปนเข้ามาด้วย ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้สามารถขจัดได้ด้วยการคำนวณทาง geometry ของตำแหน่งการบันทึกภาพของดาวเทียมทั้งสองได้

ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากข้อมูลวงโคจรของดาวเทียม (ϕ_{orb})

เนื่องจากในความเป็นจริงตำแหน่งของดาวเทียมในการบันทึกภาพนั้นไม่ทับกันสนิท เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณทาง geometry ของตำแหน่งการถ่ายภาพทั้งสอง ซึ่งได้มาจากข้อมูลวงโคจรของดาวเทียม แต่ในความเป็นจริงข้อมูลวงโคจรดาวเทียมเหล่านั้นอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนปะปนอยู่ซึ่งจะส่งผลต่อให้ค่าเฟสที่ตรวจพบนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนปะปนเข้ามาด้วย ซึ่งการขจัดค่าคลาดเคลื่อนของ ϕ_{orb} นั้นจะอยู่ในขั้นตอนการ coregistration และให้ค่าคลาดเคลื่อนที่เหลืออยู่เป็น Systematic error ในภาพ Interferogram

Phase Unwrapping

เมื่อสามารถทำการหาค่าเฟสอื่นๆที่ปะปนเข้ามาและทำการขจัดค่าเหล่านี้ออก ซึ่งก็คือเป็นการแยกเฉพาะค่าเฟสที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศออกมานั่นเอง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำการคำนวณหาค่าระยะการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศออกมา แต่จากในสมการที่ [2]

นั้นค่าเฟสที่คำนวณออกมาได้นั้นอยู่ในรูป Wrapped phase ซึ่งอยู่ในช่วง $-\pi$ ถึง $+\pi$ ซึ่งจะต้องทำการ Unwrap phase เพื่อให้ได้ค่าการเคลื่อนตัวที่สมบูรณ์ต่อไป

เนื่องจากการวัดค่าต่างเฟสนั้นเป็นการวัดได้เพียงเศษของลูกคลื่นเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกจำนวนเต็มของลูกคลื่นบวกกับเศษของลูกคลื่นทั้งหมดได้เพราะฉะนั้นจุดภาพใดก็ตามที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 1 ลูกคลื่นนั้นจะไม่สามารถตรวจสอบจำนวนเต็มลูกคลื่นได้จะตรวจสอบพบเฉพาะเศษของลูกคลื่นเท่านั้น ซึ่งการ Unwrap phase นั้นคือเป็นวิธีการในการหาจำนวนเต็มของลูกคลื่นที่หายไป โดยกระบวนการ Unwrap phase นั้นจะทำงานโดยจะต้องมีหนึ่งจุดภาพที่รู้หรือไม่มี การเปลี่ยนแปลงที่จุดนั้นและทำการ Unwrap phase เทียบกับจุดนี้ โดยจะทำงานโดยหาค่าต่างเฟสระหว่างจุดภาพที่อยู่ข้างเคียงกัน โดยกระบวนการ Unwrap phase นั้นจะเป็นกระบวนการแบบสัมพัทธ์ (relative) โดยใช้สมมติฐานที่ว่าจุดภาพที่อยู่ข้างเคียงกันจะมีค่าต่างกันของเฟสน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าความยาวคลื่น (λ) ซึ่งถ้าหากพิจารณาในเรื่องนี้จะเห็นได้ว่าจุดประสงค์ในการใช้งานของ InSAR ทั้งการใช้หาลักษณะของพื้นผิวภูมิประเทศและการหาการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ เช่น การทรุดตัว นั้นค่อนข้างตรงกับสมมติฐานนี้เพราะเนื่องจากว่าลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศที่อยู่ใกล้เคียงกันนั้นพื้นผิวน่าจะมีการแปรเปลี่ยนความสูงแบบค่อยเป็นค่อยไป ไม่แปรเปลี่ยนอย่างฉับพลัน เช่นเดียวกันกับการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ เช่น ปรากฏการณ์การทรุดตัว ซึ่งตามธรรมชาติแล้วการทรุดตัวนั้นถึงแม้จะเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นที่แต่ละตำแหน่งมีอัตราการทรุดตัวไม่เท่ากันแต่อัตราการทรุดตัวเหล่านั้นนั้นคาดว่าจะไม่มีการแปรเปลี่ยนไปอย่างฉับพลันหรือหมายถึงการทรุดตัวนั้นจะมีขนาดแปรเปลี่ยนไปอย่างค่อยเป็นค่อยไปในแต่ละตำแหน่งที่ข้างเคียงกัน จึงทำให้การทำการประมวลผล Phase Unwrapping ค่อนข้างจะมีความน่าเชื่อถือแต่ความน่าเชื่อถือนั้นจะอยู่ในรูปแบบสัมพัทธ์ (relative) มากกว่าแบบสมบูรณ์ (absolute)

การขาดค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูล (decorrelation)

เมื่อสามารถทำการประมวลผลหาค่าการเคลื่อนตัวของภูมิประเทศได้แล้ว แต่ทว่าในความเป็นจริงแล้วนั้นก็มีข้อจำกัดที่สำคัญมากอีกหนึ่งเรื่องคือ การขาดค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูล ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากว่าถ้าหากเมื่อเวลาผ่านไป วัตถุบนพื้นที่ในบางจุดภาพ ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นจุดภาพส่วนใหญ่ในภาพ Interferogram วัตถุที่อยู่ในจุดภาพเหล่านั้นมีการแปรเปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นแล้ว วัตถุบนพื้นผิวอาจจะมีการแปรเปลี่ยนไปมาก ดังเช่น การมีพืชหรือต้นไม้ปกคลุมพื้นที่แล้วถูกตัดทิ้งในเวลาต่อมาหรือเปลี่ยนไปเป็นอาคารสิ่งปลูกสร้างหรือกลับกัน จนทำให้ลักษณะการสะท้อนของคลื่นจากภาพ SAR ที่นำมาประมวลผลทั้งสองนั้นแตกต่างกันมากจนส่งผลให้ค่าเวกเตอร์ผลรวมของค่าแอมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนไปมากจนทำให้ไม่สามารถประมวลผลได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การขาดค่าสหสัมพันธ์ (decorrelation) กันของข้อมูลซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญเพราะเนื่องจากว่าไม่ได้เพียงทำให้ค่าที่ได้มานั้นผิดเพี้ยนแต่ทำให้ไม่สามารถประมวลผล InSAR บนพื้นที่นั้นได้เลย

ซึ่งการขาดค่าสหสัมพันธ์ที่มีสาเหตุเกี่ยวเนื่องกับเวลานี้เรียกว่า Temporal decorrelation โดยการแก้ปัญหาในเรื่องข้อจำกัดนี้จำเป็นต้องเลือกใช้คู่ภาพมาทำ Interferogram ที่มี Temporal Baseline ที่ค่อนข้างสั้นหรือหมายถึงคู่ภาพ SAR ที่มีระยะเวลาการบันทึกภาพห่างกันไม่มาก แต่เนื่องจากว่าโดยธรรมชาติของการเกิดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศแล้วนั้น ถ้าหากไม่ใช่การเคลื่อนตัวแบบฉับพลัน เช่น การเกิดแผ่นดินไหวแล้วนั้น ปรากฏการณ์ดังเช่นการทรุดตัวของแผ่นดินนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดแบบค่อยเป็นค่อยไปซึ่งใช้เวลานานในการเกิด จึงทำให้การเลือกการจับคู่ภาพที่มีช่วงเวลาสั้นเช่นนี้นั้นอาจส่งผลให้จุดประสงค์การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของพื้นผิวนั้นตรวจสอบไม่พบก็เป็นได้ แต่ถ้าหากใช้คู่ภาพที่มีระยะเวลาห่างกันเกินไปเพื่อให้ครอบคลุมการเกิดปรากฏการณ์ก็อาจจะทำให้เกิด Temporal decorrelation ขึ้นจนไม่สามารถประมวลผลได้ เพราะฉะนั้นปัญหาที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้คือการใช้การประมวลผล Time-series InSAR โดยเป็นการนำภาพ SAR ของบริเวณพื้นที่นั้นๆหลายๆภาพที่มีการบันทึกที่เวลาต่อเนื่องกันมาทำการประมวลผลร่วมกัน เพื่อให้มีการจับคู่ภาพที่มีระยะเวลาห่างกันไม่มากและเป็นการขยายระยะเวลาการบันทึกภาพพื้นที่นั้นๆให้ครอบคลุมระยะเวลาของการเกิดปรากฏการณ์ด้วย

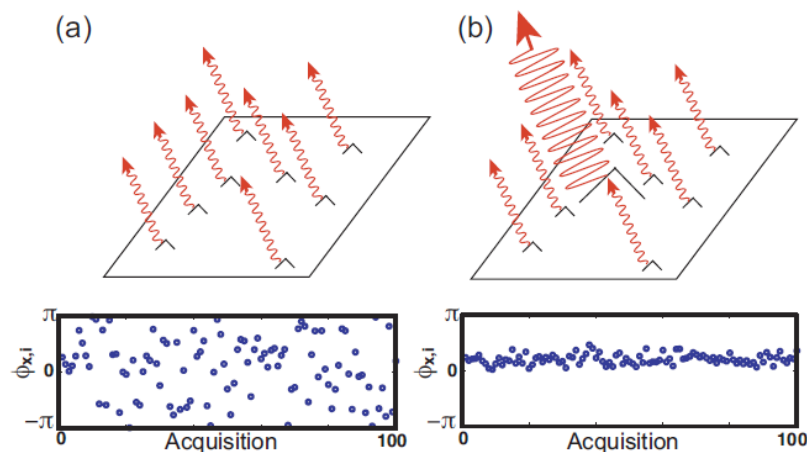
แต่สาเหตุของการขาดค่าสหสัมพันธ์อาจจะไม่ได้เกิดจากสาเหตุที่เกี่ยวเนื่องกับเวลาเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจจะเกิดจากเรขาคณิตของระบบเองก็เป็นได้ เช่น ตำแหน่งการถ่ายภาพของ SAR ทั้งสองอยู่ห่างกันมากหรือหมายถึงคู่ภาพ Interferogram มี perpendicular baseline กว้างทำให้ค่ามุมตกกระทบต่างกันมากตามไปด้วย จึงส่งผลให้ลักษณะการสะท้อนของคลื่นแตกต่างกันมากจนเกิดการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลเกิดขึ้น ซึ่งเรียกการเกิดการขาดค่าสหสัมพันธ์โดยเกี่ยวเนื่องจากเรขาคณิตของการบันทึกภาพว่า Spatial decorrelation ซึ่งการแก้ปัญหาในส่วนนี้นั้น ในขั้นตอนการจับคู่ภาพ Interferogram นั้นควรเลือกใช้คู่ภาพที่มีค่า perpendicular baseline น้อยที่สุด

2.1.3) Stanford Method of Persistent Scatterers (StaMPS) technique

Persistent Scatter InSAR (Ferretti et al., 2001) เป็นส่วนเทคนิคหนึ่งทีพัฒนาเพิ่มเติมจากเทคนิค InSAR แบบดั้งเดิม โดยเป็นเทคนิคที่ใช้การประมวลผลแบบ Time-series InSAR เพื่อขจัดปัญหาเรื่องการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลและช่วยแก้ปัญหาในเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศด้วย ในแต่ละจุดภาพนั้นระดับค่าสหสัมพันธ์นั้นจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาจากพื้นดิน ซึ่งจุดภาพส่วนใหญ่ๆนั้นจะมีการกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาที่ค่อนข้างสุ่ม (random) แต่ถ้าหากในบางจุดภาพที่มีส่วนที่สะท้อนกลับมาถูก dominate โดยตัว Scatter ตัวหนึ่งแล้ว (รูปที่ 2.3(b)) จุดภาพเหล่านี้จะมีค่าเฟส

ที่คงที่มากกว่า ซึ่งส่วนที่สุ่ม (Random) อาจจะไม่ค่อยมากจนทำให้ สามารถแยกสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศออกมาได้ ยิ่งจุดภาพที่ค่าความคงที่ของเฟสยิ่งมากจุดภาพนั้นก็จะมีโอกาสที่จะมีค่าสหสัมพันธ์มากตามไปด้วย ซึ่งเรียกจุดภาพเหล่านี้ว่า PS pixel เพราะฉะนั้นแล้วในส่วนหลักของเทคนิค Persistent Scatterers แล้วก็คือการหา PS pixel เหล่านี้ และนำเฉพาะค่าของจุดภาพที่ได้ผ่านการคัดกรองแล้วเท่านั้นมาใช้ในการประมวลผลหาค่าการเคลื่อนตัวต่อไป

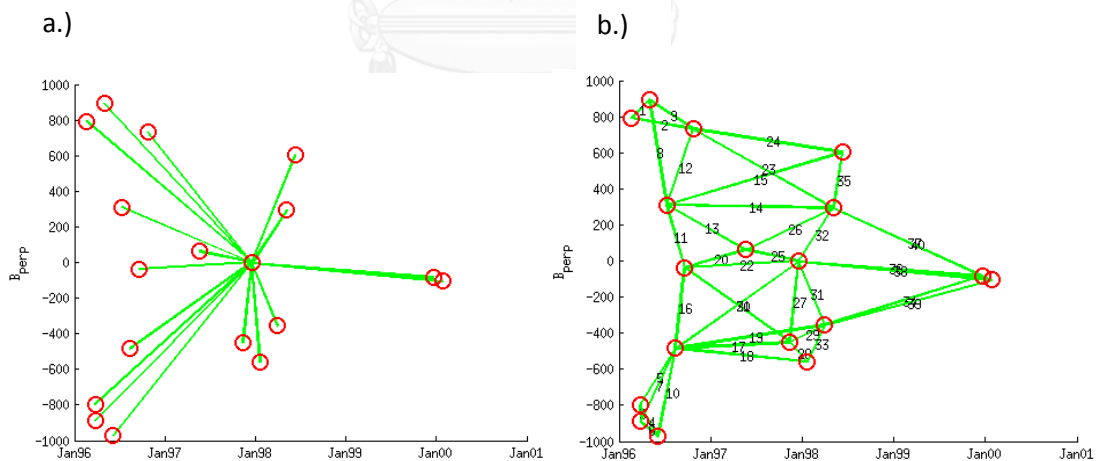
โดยเทคนิค PS ในช่วงแรกนั้นจะใช้ค่าแอมพลิจูดเป็นสำคัญในการคัดกรองซึ่งทำให้ถูกจำกัดอยู่ว่าพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นต้องมี bright scatterer เช่น พื้นที่ที่ต้องมีสิ่งก่อสร้างที่ค่อนข้างเยอะ กับอีกหนึ่งข้อจำกัดคือจำเป็นที่จะต้องทราบค่าแบบจำลองการเคลื่อนตัวของพื้นผิวไว้ก่อนหน้าหรือมีการเคลื่อนตัวที่คงที่จึงจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพได้ แต่ว่าในเทคนิค StaMPS (Hooper, 2007) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ทั้งค่าแอมพลิจูดและหลักความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของค่าเฟสมาใช้ในการคัดกรอง PS pixel ซึ่งจะทำให้เทคนิค StaMPS นี้สามารถหา PS pixel ได้ในทุกประเภทพื้นที่ แม้ในภูมิประเทศที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่น้อยก็ตามและในเทคนิคนี้ยังสามารถทำงานในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวแบบไม่คงที่หรือไม่จำเป็นที่จะต้องทราบอัตราการเคลื่อนตัวของพื้นผิวมาก่อนล่วงหน้าก็สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.3 การจำลองลักษณะของเฟส (Hooper, 2006) ของ (a) จุดภาพที่ไม่มีการ dominate โดยตัวสะท้อนตัวใดตัวหนึ่ง (b) Persistent Scatter pixel เป็นลักษณะของจุดภาพที่มีการ dominate โดยตัวสะท้อนตัวใดตัวหนึ่ง

2.1.4) Small Baseline (SB) technique

เทคนิค Small Baseline ถูกริเริ่มโดย Berardino et.al (2002) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Small Baseline ที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติมโดย Hooper et al (2008) โดยวิธีการหลักของเทคนิค Small Baseline (SB) นั้นคล้ายกับเทคนิค StaMPS คือในตอนท้ายสุดแล้วต้องการคัดกรองหาจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันตลอดทั้งช่วงของชุดข้อมูล ซึ่งจุดภาพเหล่านั้นบางที่อาจไม่สามารถตรวจสอบพบได้จาก StaMPS ซึ่งจุดภาพเหล่านี้จะสามารถตรวจสอบพบได้ง่ายขึ้นถ้าหากทำการควบคุมการจับคู่ภาพ Interferogram ให้มีความยาวของทั้ง Temporal Baseline และ Spatial Baseline ให้น้อยที่สุด หรือหมายถึงการจับคู่ภาพที่มีช่วงเวลาและตำแหน่งการบันทึกภาพห่างกันน้อยที่สุด เพื่อลดค่า noise จากการที่ไม่มีค่าสหสัมพันธ์ลง เพราะเนื่องจากว่าเทคนิค StaMPS นั้นใช้การจับคู่ภาพไปที่ภาพเดียว (ภาพ Master) เพราะฉะนั้นถึงแม้จะมีการคัดเลือกจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันทั้งชุดข้อมูลเหมือนกัน แต่ชุดของจุดภาพที่ได้เอากมานั้นจะไม่เหมือนกัน ซึ่งบางจุดตรวจสอบนั้นอาจจะตรวจสอบพบเจอได้เฉพาะจาก StaMPS หรือ Small Baseline เพียงเทคนิคเดียวหรืออาจจะตรวจสอบพบเจอจากทั้งสองเทคนิคก็เป็นได้ โดยสามารถดูลักษณะการจับคู่ภาพที่แตกต่างกันของทั้งสองเทคนิค ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.4 แต่ถึงแม้ว่าเทคนิค Small Baseline จะใช้การจับคู่ภาพที่แตกต่างออกไปแต่ทุกภาพที่สร้างนั้นก็จะ Co-registration ไปที่ภาพ Master เดียวกับเทคนิค StaMPS เพื่อที่จะสามารถทำงานร่วมกันได้ในเทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB Combine ที่จะอธิบายต่อไปในหัวข้อด้านล่าง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการจับคู่ภาพ interferogram สำหรับ (a) เทคนิค StaMPS เป็นการจับคู่ภาพไปที่ภาพ master เพียงภาพเดียว (b) เทคนิค Small baseline มีภาพ master ได้หลายภาพ

2.1.5) InSAR StaMPS-MTI SB combine technique

ในเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค StaMPS และ Small baseline ร่วมกัน (Hooper, 2008) เพื่อให้ได้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของทั้งสองเทคนิค โดยการเพิ่มจำนวนจุดภาพจากการตัดกรองมาจากทั้งสองวิธี ทำให้มีค่ารังวัดที่เพิ่มขึ้น เพราะเนื่องมาจากสาเหตุที่สำคัญของกระบวนการ Unwrap phase ที่มีสมมติฐานว่าจุดภาพที่อยู่ข้างเคียงกันนั้น จะมีค่าต่างเฟสต่างกันไม่เกินครึ่งหนึ่งของความยาวลูกคลื่น (λ) ซึ่งเหมาะสมกับสมมติฐานในงานวิจัยที่ว่าค่าอัตราการทรุดตัวจะแปรเปลี่ยนไปอย่างค่อยเป็นค่อยไปในพื้นที่ใกล้เคียงกัน แต่ทว่าถ้าหากในบางพื้นที่ที่มีจำนวนจุดตรวจสอบที่เบาบางทำให้ระยะห่างของจุดตรวจสอบหนึ่งกับจุดตรวจสอบข้างเคียงกันนั้นมีระยะห่างกันมาก เพราะฉะนั้นเนื่องจากค่าเฟสที่ตรวจสอบได้นั้นอยู่ในรูป Wrapped phase ด้วยระยะห่างระหว่างจุดตรวจสอบที่ห่างกันนี้ จะทำให้ไม่ทราบได้เลยว่าระหว่างจุดนี้มีการกระโดดไปของค่าเฟสเท่าใด คือเมื่อจุดตรวจสอบที่ห่างกันนี้ในพื้นที่จริงค่าอัตราการทรุดตัวอาจจะเปลี่ยนไปมากหลายจำนวนเต็มลูกคลื่น แต่ในกระบวนการ Unwrap phase นี้ก็จะตรวจสอบพบได้แค่ว่ามีค่าต่างกันเท่าใดในส่วนของเศษของลูกคลื่นเท่านั้นซึ่งทำให้ผลของการ Unwrap phase นั้นผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง เพราะฉะนั้นจุดตรวจสอบที่ห่างกันนี้จึงไปเพิ่มโอกาสการเกิดข้อผิดพลาดนี้ขึ้น ซึ่งข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของการ Unwrap phase นี้เรียกว่า phase Unwrapping Error

แต่ทว่า การใช้เทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ที่เป็นการเพิ่มจำนวนจุดตรวจสอบที่มากขึ้นนั้น จะเป็นการทำให้มีจำนวนจุดตรวจสอบที่ความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งเมื่อมีจำนวนจุดตรวจสอบที่หนาแน่นขึ้นแล้วนั้น จะเป็นประโยชน์ได้ว่าในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของจุดมากจะมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้นว่าค่าต่างเฟสระหว่างจุดข้างเคียงนั้นไม่มีการข้ามลูกคลื่น และในส่วนพื้นที่ที่มีจำนวนจุดตรวจสอบที่เบาบางนั้น การเพิ่มจำนวนจุดตรวจสอบที่มากขึ้นนี้จะเป็นการช่วยลดโอกาสการเกิด Phase Unwrapping Error ในพื้นที่เหล่านั้นให้น้อยลงได้ด้วย และนอกจากจะเป็นการเพิ่มจำนวนจุดตรวจสอบดังที่กล่าวมาแล้วยังเป็นการเพิ่มค่า signal to noise ratio (SNR) ให้กับจุดภาพที่ถูกเลือกมาจากทั้งสองเทคนิคอีกด้วย ซึ่งจุดภาพที่ถูกเลือกโดยทั้งสองเทคนิคนั้นจะมีการใช้ค่าน้ำหนักในการคิดเฟส ซึ่งจะทำการรวมจุดภาพที่ได้จากสองเทคนิคก่อนแล้วจึงทำการ phase unwrapping จุดภาพรวมทั้งหมดที่ถูกคัดเลือกมาจากทั้งสองเทคนิค เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ประมาณ 10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8-10 เมตร แต่อาจจะพบชั้นทรายแทรกอยู่บ้าง ต่อจากนั้นจะพบชั้นทรายหนาประมาณ 5-10 เมตร

โดยกรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาแผ่นดินทรุดตัวต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ซึ่งเริ่มมีรายงานครั้งแรกโดย Cox (1968) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของการทรุดตัวของแผ่นดินนั้นมาจากการสูบน้ำในชั้นน้ำบาดาล ซึ่งการสูบน้ำบาดาลนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการอัดตัวเกิดขึ้น โดยการสูบน้ำบาดาลมีผลทำให้เกิดการลดต่ำลงของแรงดันในชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ซึ่งเป็นดินที่มีสภาพอ่อนตัวหรือเสียรูปได้เนื่องจากดินมีสภาพที่ค่อนข้างเหลวและเมื่อรวมกับปัจจัยอื่น เช่นการมีน้ำหนักกดทับจากอาคารและสิ่งปลูกสร้างเข้ามาด้วย ทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินเกิดขึ้น โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีจำนวนอาคารและสิ่งก่อสร้างอยู่ค่อนข้างมากและตั้งอยู่บนตะกอนทางน้ำ ซึ่งประกอบด้วยดินเหนียว ดินทราย และวัสดุอื่นๆ ซึ่งสามารถยุบตัวได้ โดยเฉพาะบริเวณสันดอนซึ่งแม่น้ำ, ลานตะพักกลุ่มน้ำและที่ราบน้ำท่วมถึง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสูบน้ำในชั้นน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ และลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นสามารถทำให้เกิดกลไกการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาได้

2.3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาแผ่นดินทรุดตัวนั้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับเมืองใหญ่หลายแห่งทั่วโลก ซึ่งกรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นได้มีรายงานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 จากงานวิจัย Cox (1968) ว่ากำลังประสบปัญหาการทรุดตัวนี้เช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของการทรุดตัวไปที่การสูบน้ำในชั้นบาดาลขึ้นมาใช้ โดยจากเล่มรายงานโครงการของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2011) ได้มีการอธิบายลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาและการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งด้วยปัจจัยทั้งสองอย่างนี้สามารถทำให้เกิดกลไกของการทรุดตัวของผิวดินเกิดขึ้นได้และในงานวิจัยนี้ยังมีการรายงานอีกว่าในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นประสบปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินนี้มาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าหากปล่อยไว้ในอนาคตอาจเกิดการเสียหายที่ใหญ่ขึ้นได้ เพราะฉะนั้นจึงควรให้ความสำคัญในการศึกษาเรื่องการทรุดตัวนี้อย่างจริงจัง

โดยข้อมูลที่ให้เป็นหลักในเรื่องการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้น เป็นการนำระดับเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยี Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ได้

มีการยอมรับว่าเป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศได้ถึงระดับมิลลิเมตร ดังเช่นในงานวิจัยการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเฮย์วาร์ด (Hayward fault) ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศอเมริกา (Lanari et al., 2007), การตรวจวัดการทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองที่เหมืองไคหลวนในประเทศจีน (Ge et al., 2008), การทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลซึ่งคล้ายกับสาเหตุของการทรุดตัวในบริเวณกรุงเทพมหานครที่บริเวณทางตอนเหนือของเขตคันโตที่ประเทศญี่ปุ่น (Nakagawa et al., 2000), ที่เมืองเตหะรานในประเทศอิหร่าน (Deghani et al., 2013) เป็นต้น

ซึ่งจากงานวิจัยของ Wegmuller et al (1999) ได้มีการใช้ภาพจากดาวเทียม ERS มาใช้เทคนิค DInSAR (ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.1.2 ในเรื่องค่าเฟสที่เกิดจากลักษณะภูมิประเทศ (Φ_{Topo}) ในการประมวลผลผลการทรุดตัวที่เมืองโบโลญญา (Bologna) ในประเทศอิตาลี ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลไปใช้เช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ มีการนำค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR และค่าจากการทำงานระดับมาทำการเขียนค่า Contour ซึ่งผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลนั้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปตารางเปรียบเทียบการใช้ InSAR, การทำงานระดับ และการรังวัดด้วยระบบดาวเทียม (GPS) ดังในตารางที่ 2.1 โดยชี้ให้เห็นถึงค่าความละเอียดที่ได้จาก InSAR นั้นละเอียดกว่า, ค่าความถูกต้องอยู่ในระดับมิลลิเมตรซึ่งอยู่ในระดับเดียวกันและค่าใช้จ่ายน้อยกว่า แต่ในส่วนของความถี่ในการบันทึกข้อมูลนั้นผู้วิจัยเห็นว่าน่าจะเป็นเรื่องของการเลือกใช้ดาวเทียมมากกว่า ซึ่งด้วยเหตุผลเหล่านี้และงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ยกตัวอย่างไปนี้ ทำให้มองว่าการใช้ InSAR ในการตรวจสอบหาการเคลื่อนตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นเป็นเครื่องมือที่น่าสนใจนำมาใช้งาน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการใช้งานของ InSAR, การทำระดับ และ GPS

	ERS SAR	Levelling	GPS
Spatial resolution	50 m	> 250 m	~10 km
Spatial characteristics	urban areas	levelling lines	few significant points
Temporal frequency	> 1 year	1983 / 1987 / 1992 / 1999	2-3 years
Accuracy	< 1 cm	1 mm for 1 km of line	1-2 cm
Cost	not yet assessed	~ 400.000 Lit per km	~1.000.000 Lit per point

แต่การใช้งาน InSAR นั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ดังเช่นในงานวิจัย Wegmuller et al (1999) ได้มีการรายงานว่ามีค่าที่มีการสอดคล้องกันระหว่างค่า InSAR กับค่าจากงานระดับนั้น มีความสอดคล้องกันเฉพาะในบริเวณเมืองเท่านั้นและมีรายงานอีกด้วยว่าค่าที่คลาดเคลื่อนจากในงานนี้นั้นมีสาเหตุมาจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งคล้ายกับงานวิจัย Chatterjee et al (2006) ซึ่งใช้ DInSAR ในการตรวจสอบการทรุดตัวของเมืองโกลกาทา ประเทศอินเดีย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลเช่นกัน ได้มีการรายงานว่ามีค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลของคู่ภาพ Interferogram (lack of temporal correlation) และในงานวิจัยได้มีการรายงานด้วยว่าถ้าต้องการผลที่ดีขึ้นจะต้องเพิ่มคู่ภาพมากขึ้น และลดค่า temporal Baseline ลง

ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิค เพื่อใช้ในการแก้ข้อจำกัดของการประมวลผล InSAR จาก Ferritti et al (2001) โดยเน้นไปที่เรื่องการขาดค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลและความเคลื่อนไหวอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นงานวิจัยริเริ่มเทคนิค Persistent Scatterer (PS) โดยเป็นการประมวลผลแบบ Time-series InSAR คือเป็นการเพิ่มจำนวนการจับคู่ภาพ Interferogram ซึ่งมีหลักการเน้นไปที่การหาจุดภาพที่มีลักษณะการสะท้อนของคลื่น dominant จากตัว Scatterer ตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งจุดภาพเหล่านี้จะถูกคาดว่ามีค่าสหสัมพันธ์กันทั้งช่วงข้อมูลและตัวเทคนิคจะนำเฉพาะจุดเหล่านี้มาทำการประมวลผล ซึ่งได้มีหลายงานวิจัยที่นำเทคนิคนี้ไปใช้แล้วประสบความสำเร็จ เช่น งานวิจัย Long and Ding (2010) ที่นำไปใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของบริเวณเมืองนิวยอร์กลิน ในมลรัฐลุยเซียนาประเทศอเมริกา หรือในงานวิจัย Hay-Man et al (2012) ที่นำไปใช้ในการตรวจวัดอัตราการทรุดตัวของบริเวณเมืองจาร์ต้าในประเทศอินโดนีเซียซึ่งได้มีรายงานในงานวิจัยครั้งนี้ด้วยว่า มีงานวิจัยที่เคยใช้เทคนิค DInSAR ตรวจสอบหาค่าในพื้นที่นี้แล้วแต่พบปัญหาจากชั้นบรรยากาศค่อนข้างมาก หรือแม้แต่ในบริเวณกรุงเทพมหานครก็เคยมีการใช้ เทคนิค PS นี้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของแผ่นดินเช่นกันจากงานวิจัย Worawattanamateekul (2006) แต่ทว่าจากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมานั้นเทคนิค PS นี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ผู้ประมวลผลจะต้องทราบแบบจำลองของการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไว้ล่วงหน้า ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ค่อยสะดวกนักเพราะเนื่องจากว่าค่าการทรุดตัวนั่นเองเป็นสิ่งที่เราต้องการทราบและถ้าหากแบบจำลองนี้มีความคลาดเคลื่อนอยู่หรืออัตราการทรุดเคลื่อนตัวนั้นไม่ได้อยู่ในอัตราการที่คงที่แล้วนั้นค่าผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

ซึ่งต่อมา Hooper (2007) ได้มีการพัฒนาเทคนิค Stanford Method of Persistent Scatterers (StaMPS) ขึ้น โดยเป็นเทคนิคที่พัฒนาเพิ่มเติมมาจาก PS โดยชี้ไปที่เรื่องว่า เทคนิค PS นั้นจะสามารถทำงานได้เฉพาะในพื้นที่ที่เป็นบริเวณเมืองเท่านั้น ดังเช่นในงานวิจัย Worawattanamatekul (2006) ที่ใช้การตรวจสอบการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครนั้นได้จุดตรวจสอบที่ค่อนข้างน้อยเพราะเนื่องจากการทำงาน PS นั้นใช้ค่าแอมพลิจูดเป็นสำคัญในการคัดกรองจุดภาพ คือพื้นที่ที่ใช้ในงานวิจัยนั้นจะต้องเป็นพื้นที่ที่มี bright Scatter เช่นบริเวณสิ่งก่อสร้างค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อหากพิจารณาในส่วนของพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นจะเห็นได้ว่าเป็นเมืองและมีสิ่งก่อสร้างอยู่หนาแน่น แต่ว่าถ้าหากกรอบนอกของเมืองนั้นก็จะมีอาคารสิ่งก่อสร้างที่เบาบางเรื่อยๆจนถึงไม่มี ซึ่งอาจไม่เหมาะกับเทคนิคนี้เพราะจะสามารถทำงานได้เฉพาะในบริเวณเมืองเท่านั้น แต่ว่าเทคนิค StaMPS ของ Hooper (2007) นั้นใช้ทั้งค่าแอมพลิจูดและหลักความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของค่าเฟสมาใช้ในการคัดกรองจุดภาพ ซึ่งทำให้สามารถทำงานได้ในทุกสภาพพื้นที่ ดังเช่น งานวิจัย Becker and Sultan (2009) ซึ่งใช้ภาพจาก ERS1/2 มาทำการประมวลผลใช้เทคนิค StaMPS ในการตรวจสอบการทรุดตัวบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนล์ในประเทศอียิปต์ ซึ่งได้มีรายงานว่าประสบความสำเร็จในการทำงานถึงแม้ในพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมก็ตาม และในงานวิจัย Tung and Hu (2012) ที่ทำการตรวจสอบการทรุดตัวบริเวณเมืองยูนลिन (Yunlin) ที่ประเทศไต้หวัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีรายงานว่าเทคนิคนี้ได้ขจัดเรื่องการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กัน (decorrelation) ของข้อมูลได้ และด้วยเทคนิคนี้ที่ใช้หลักความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของค่าเฟสมาใช้ในการประมวลผลนั้นทำให้ไม่ต้องการทราบแบบจำลองการเคลื่อนตัวของพื้นผิวมาก่อนหน้าอีกด้วย ผู้วิจัยจึงมองว่าเทคนิค StaMPS นั้นเป็นเทคนิคที่น่าสนใจนำมาใช้งานในการประมวลผล

แต่นอกจากเทคนิค PS และ StaMPS แล้วยังมีหลายงานวิจัยที่ใช้การประมวลผลด้วยเทคนิคอื่นซึ่งมีชื่อว่า Small Baseline ซึ่งถูกคิดริเริ่มจาก Berardino et al (2002) โดยเป็นเทคนิคที่ใช้การผสมกันของการจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีลักษณะ Baseline ที่สั้น เนื่องจากว่าในบางจุดภาพนั้นอาจไม่มีการ dominant ของตัว Scatterer เนื่องจากการแปรเปลี่ยนของเฟสจากการไม่มีค่าสหสัมพันธ์ (decorrelation) อาจไปบดบังสัญญาณได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากมีการจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีช่วงเวลาห่างกันสั้นและมุมบันทึกที่ต่างกันน้อยอาจช่วยลดการเกิดการไม่มีค่าสหสัมพันธ์ (decorrelation) กันของข้อมูลได้ ซึ่งในบางจุดภาพนั้นอาจจะถูกลดลงจนสามารถตรวจจับ

ผ่านการคัดกรองจุดภาพได้ ซึ่งในงานวิจัยของ Beradino et al (2002) นั้นใช้เทคนิค Small Baseline ในการหาการเคลื่อนตัวของพื้นผิวในบริเวณลอสแอนเจลิส ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ซึ่งใช้ภาพจาก ERS ทั้งหมด 44 ภาพ จับคู่ภาพ Interferogram ได้ 70 ภาพ ซึ่งได้มีการตรวจสอบกับค่าจากการรังวัดจากดาวเทียม (GPS) ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน หรือในงานวิจัยของ Canova et al (2011) ซึ่งใช้ในการตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวของบริเวณริมชายฝั่งทางตะวันออกเฉียงใต้ของเกาะซิซิลีประเทศอิตาลี ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ภาพ ERS1/2 ที่มีค่าการ revisit 35 วัน ในช่วงปีค.ศ. 1992-2000 หรือในงานวิจัย Hu et al (2014) ซึ่งใช้ในการตรวจหาการทรุดตัวในเมืองปักกิ่งประเทศจีน ซึ่งมีสาเหตุจากการทรุดตัวมาจากการสูบน้ำบาดาลและเป็นเมืองใหญ่ที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่นคล้ายพื้นที่ศึกษาที่สนใจ แต่ว่าในเทคนิคนี้เมื่อเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเพิ่มเติมจาก Hooper et al (2008) ซึ่งด้วยเทคนิคโดยหลักแล้วยังคล้ายของ Beradino et al (2002) แต่ว่าในช่วงขั้นตอนของการประมวลผลหาจุดภาพนั้นใช้การประมวลผลด้วยหลักความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของค่าเฟสเหมือนกับขั้นตอนการประมวลผลในการคัดกรองหาจุดภาพใน StaMPS (Hooper, 2006) จึงส่งผลให้มีความแตกต่างกันตรงส่วนที่ว่าการศึกษาการเคลื่อนตัวของพื้นผิวนั้นไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองการเคลื่อนตัวของพื้นผิวมาก่อนเหมือนกับ StaMPS และอีกข้อแตกต่างก็คือเทคนิค Small Baseline (Beradina et al., 2002) นั้นใช้การประมวลผลภาพที่ Multi-look แต่ใน Small Baseline (Hooper, 2008) จะทำงานที่ Single look และซึ่งเมื่อมีการทำงานที่ Full resolution นั้นจะจะได้ประโยชน์จากเป็นการเพิ่มโอกาสในการเพิ่มขึ้นของจุดตรวจสอบ ซึ่งจะมีความสำคัญอย่างมากในขั้นตอนการ Unwrap phase ซึ่งผู้วิจัยเล็งเห็นว่า เทคนิค Small Baseline (Hooper, 2008) นั้นมีความสนใจเพราะเนื่องจากว่า Hooper นั้นได้มีการพัฒนาเทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ขึ้นมาเพิ่มเติม เพราะฉะนั้นเพื่อให้มีความสอดคล้องกันของข้อมูลเพื่อที่จะต่อยอดไปใช้ในเทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ต่อไปได้ เพราะในงานวิจัยนี้นั้นมีข้อดีที่ว่าในเรื่องจะสามารถเห็นได้ว่าจำนวนภาพที่นำมาใช้ในการประมวลผลนั้นมีจำนวนน้อยกว่างานวิจัยที่ยกตัวอย่างการทำ Small Baseline (Beradina et al., 2002) มาก่อนข้างมาก เพราะฉะนั้นจึงอาจจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติมนี้ในการทำงานวิจัย

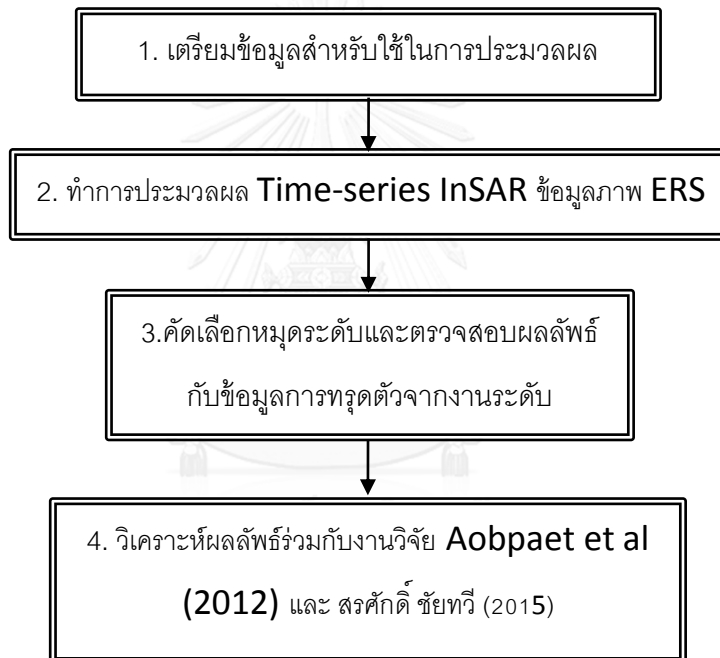
โดยในงานวิจัย Hooper (2008) นั้นได้มีการคิดค้นเทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ขึ้น ซึ่งเป็นการรวมกันของเทคนิค StaMPS (Hooper, 2007) และ Small Baseline

(Hooper, 2008) โดยเป็นการเพิ่มจำนวนจุดภาพเพราะเนื่องจากการรวมกันของจุดภาพจากการ คัดกรองจากทั้งสองวิธี เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในกระบวนการ Unwrap phase และเป็นการเพิ่มค่า Signal to noise ratio (SNR) ให้กับจุดภาพที่ถูกคัดเลือกมา จากทั้งสองวิธีด้วย ดังในงานวิจัย Hooper (2008) ได้มีการใช้ภาพจาก ERS1/2 ทั้งหมด 27 ภาพมา ใช้เทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบหาการเคลื่อนตัวของธารน้ำแข็งเอ ยายาตราบาเยอคุตส์ (Eyjafjallajokull volcano) ในประเทศไอซ์แลนด์ ซึ่งในงานวิจัยได้พิสูจน์ให้เห็น ว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมา นั้นประสบความสำเร็จมีจำนวนจุดตรวจสอบมากกว่าจำนวนจุดจากการ ประมวลผลด้วยเทคนิคใดเทคนิคหนึ่ง ซึ่งพื้นที่ในงานวิจัยนั้นไม่ใช่พื้นที่ที่มีลักษณะบริเวณเมืองอีกด้วย และยังมีงานวิจัยจาก Phodee et al (2015) ซึ่งประสบความสำเร็จในการใช้เทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine เช่นกันในการหาการเคลื่อนตัวหลังการเกิดแผ่นดินไหว (postseismic motion) ของรอยเลื่อน Nam Ma อันเนื่องมาจากการเกิดแผ่นดินไหวที่ Tarlay ปี 2011 ที่ประเทศ พม่า ซึ่งพื้นที่นั้นไม่ได้เป็นลักษณะบริเวณเมืองเช่น และอีกงานวิจัยที่สำคัญ คือ งานวิจัย Anuphao et al (2008) ซึ่งใช้ภาพจากดาวเทียม RADARSAT-1 ทั้งหมด 19 ภาพโดยทำการประมวลผลด้วย เทคนิค InSAR StaMPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวของ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่เดียวกันกับพื้นที่ในงานวิจัยนี้ ได้จำนวนค่ารังวัดเฉลี่ยทั้ง พื้นที่ถึงประมาณ 120 จุด/ตร.กม. และในงานวิจัยได้มีการเปรียบเทียบค่าอัตราการทรุดตัวจากงาน ระดับซึ่งให้ค่าผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างการรังวัดทั้งสองวิธี

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานและการประมวลผล

วัตถุประสงค์หลักของการประมวลผล Time-series InSAR ในงานวิจัยนี้เพื่อตรวจหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปีค.ศ. 1996-2000 และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ในพื้นที่ที่มีข้อมูลซ้อนทับกันซึ่งประมวลผลด้วยวิธีเดียวกันแต่แตกต่างกันช่วงเวลาเพื่อแสดงถึงแนวโน้มการทรุดตัวและการทรุดตัวสะสมของแต่ละพื้นที่ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



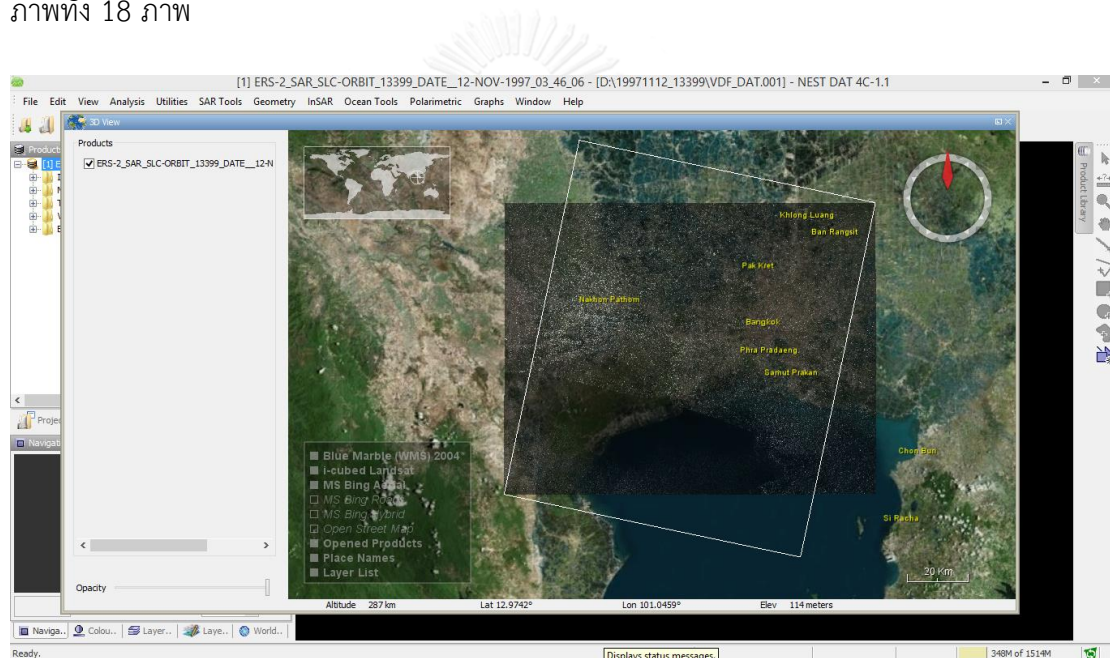
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในบทนี้จะอธิบายถึงหัวข้อ 3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ในการประมวลผล หัวข้อ 3.2 การประมวลผล Time-series InSAR ข้อมูลภาพ ERS 1/2 หัวข้อ 3.3 การคัดเลือกหมุดระดับและตรวจสอบผลลัพธ์กับข้อมูลการทรุดตัวจากงานระดับ และหัวข้อ 3.4 วิเคราะห์ผลลัพธ์ร่วมกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ซึ่งในรูปที่ 3.3 จะแสดงถึงลำดับขั้นตอนการประมวลผลอย่างละเอียดโดยจะครอบคลุมเนื้อหาขั้นตอนการดำเนินงานของหัวข้อที่ 3.2 – 3.4

3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการประมวลผล

ในหัวข้อนี้จะเป็นขั้นตอนการรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลเพื่อให้ความพร้อมใช้ในการประมวลผล โดยรวมถึงการตรวจสอบและคัดกรองข้อมูลในเบื้องต้นด้วย

3.1.1 ข้อมูลภาพ SAR ในระดับ Single look complex (SLC) ทั้งหมด 18 ภาพ จากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 บันทึกในโหมด StripMap ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ GEO2TECDI-SONG โดยในขั้นตอนนี้จะทำการทำการตรวจสอบข้อมูลในเบื้องต้นได้โดยตรวจสอบความครบถ้วนเรียบร้อยของไฟล์ภาพ, ตรวจสอบวันที่ถ่ายภาพและการครอบคลุมพื้นที่ของภาพทั้ง 18 ภาพ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างรูปภาพ SAR จาก ERS2 ซึ่งแสดงผลด้วยค่าแอมพลิจูด โดยใช้โปรแกรม NEST4C ในการแสดงผล

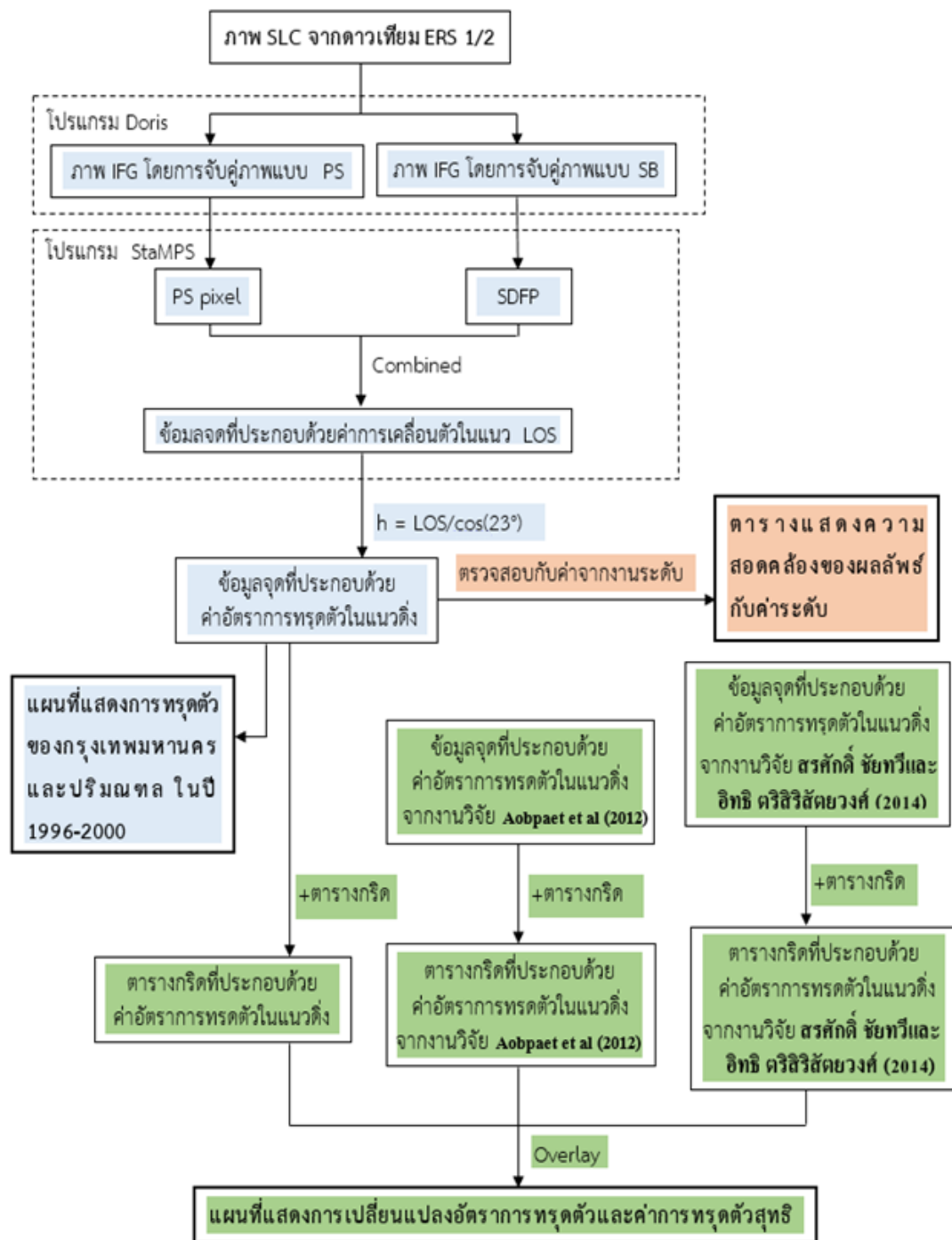
3.1.2 ข้อมูลค่าระดับของหมุดหลักฐานจากกรมแผนที่ทหารซึ่งใช้การสำรวจระดับชั้นที่ 1 โดยปฏิบัติงานสำรวจตาม "ระเบียบกองยี่เอเดซีและยี่เอพีลิกส์ กรมแผนที่ทหาร ว่าด้วยการสำรวจหมุดหลักฐานทางราบและทางตั้ง พ.ศ. 2539" ซึ่งในงานวิจัยนี้จะต้องทำการคัดเลือกหมุดระดับในเบื้องต้นโดยจะใช้หลักเกณฑ์ 2 ข้อในการคัดเลือกคือ

3.1.2.1 หมุดระดับที่มีข้อมูลการทรุดตัวในช่วงปี ค.ศ 1996-2000 เพราะเนื่องจากว่าธรรมชาติของการทรุดตัวนั้นจะแปรเปลี่ยนไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลา เพราะฉะนั้นจะต้อง

เลือกมุมระดับที่มีข้อมูลค่าระดับในช่วงเวลาเดียวกับการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวจากวิธีการประมวลผล Time-series InSAR

3.1.2.2 มุมระดับที่มีตำแหน่งอยู่ในขอบเขตพื้นที่ศึกษา เพราะเนื่องจากว่าธรรมชาติของการทรุดตัวนั้นจะแปรเปลี่ยนไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง เพราะฉะนั้นจะต้องนำมุมระดับที่อยู่ภายในพื้นที่เดียวกันกับการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวจากวิธีการประมวลผล Time-series InSAR โดยในขั้นตอนนี้ใช้ขอบเขตพื้นที่ footprint จากดาวเทียม ERS2 ในการกำหนดขอบเขตพื้นที่ซึ่งจากข้อมูลมุมระดับจากกรมแผนที่ทหารทั้งหมด มีมุมที่เข้าเกณฑ์ข้อจำกัดเบื้องต้นทั้งสองอยู่ทั้งหมด 124 มุม โดยมีตำแหน่งและการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 1.4

3.1.3 ข้อมูล precise orbit ของภาพทั้ง 18 ภาพ จากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ซึ่งดูแลและให้บริการโดย Delft Institute for Earth-Oriented Space Research โดยสามารถทำการดาวน์โหลดข้อมูลได้จาก (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/orbits/>) แต่จะต้องทำการหาข้อมูลว่าภาพ ERS ที่ใช้แต่ละภาพนั้นอยู่ใน Arclist (Precise orbit) ที่เท่าไร โดยสามารถเทียบได้จากข้อมูลวันและเวลาที่ถ่ายภาพ ซึ่งข้อมูลเพิ่มเติมอยู่ในเว็บดาวน์โหลดเดียวกับที่ใช้ดาวน์โหลดไฟล์ Precise orbit ซึ่งข้อมูลภาพ ERS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดลำดับของ Arclist ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 1.1



รูปที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนการประมวลผลอย่างละเอียดโดยครอบคลุมเนื้อหาขั้นตอนการดำเนินงานของหัวข้อที่ 3.2 – 3.4 โดยสีฟ้าคือขั้นตอนหัวข้อ3.2, สีแดงคือขั้นตอนหัวข้อ3.3 และสีเขียวคือขั้นตอนหัวข้อ3.4

3.2 การประมวลผล time-series InSAR ข้อมูลภาพ ERS1 และ ERS2

3.2.1) ในช่วงแรกจะเป็นขั้นตอนการสร้างภาพ Interferogram โดยจะใช้โปรแกรม Doris (Delft object-oriented radar interferometric software) ในการทำงาน (รูปที่ 3.3 ช่วงสีฟ้า) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ linux Ubuntu 12.04LTS โดยเริ่มแรกนั้น จะต้องทำการเลือกภาพ Master ที่เหมาะสม เนื่องจากการประมวลผลด้วยเทคนิค StaMPS จะใช้ภาพ Master เพียงภาพเดียวในการประมวลผล และถึงแม้เทคนิค Small baseline แต่ละคู่ภาพจะมีอิสระต่อกัน แต่ต้องทำการ Coregister มาที่ภาพหลักเพียงภาพเดียวซึ่งภาพ Master หลักนั้นควรจะเป็นภาพเดียวกับที่วิธี StaMPS เลือกใช้เพื่อให้ภาพ Interferogram ทั้งหมดอยู่ในระบบพิกัดเดียวกันในขั้นตอนการ Combine ข้อมูลจากเทคนิคทั้งสอง โดยการเลือกนั้นจะดูจากภาพ Master ที่เลือกนั้น ต้องทำให้ ผลรวมของค่าการไม่มีสหสัมพันธ์กันของข้อมูลน้อยที่สุด โดยพิจารณาจาก 1.temporal baseline 2.spatial perpendicular baseline 3.doppler centroid baseline 4.thermal noise ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนนี้อยู่ใน Hooper et al (2007) โดยในตัวโปรแกรมสามารถเรียกดูค่าได้ว่าภาพใดเหมาะสมที่จะเป็นภาพ Master ตรงตามหลักการมากที่สุด โดยในงานวิจัยนี้เลือกภาพ ERS2 ที่ถูกบันทึกภาพเมื่อ 17 ธันวาคม 1997 เป็นภาพ Master

เมื่อทำการเลือกภาพ Master ที่เหมาะสมแล้ว นำภาพ Single Look Complex (SLC) จากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ทั้งหมด 18 ภาพเข้าโปรแกรม Doris เพื่อทำการ Crop ข้อมูลพื้นที่ที่จะใช้ในการประมวลผลและทำการอ่านและแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ Doris format โดยการ Crop ภาพในงานวิจัยนี้ใช้การกำหนดลำดับของจุดภาพและลำดับของเส้นของภาพในการอ้างอิงการ Crop โดยในงานวิจัยนี้เนื่องจากภาพทั้งหมดมีพื้นที่ทับกันเกือบทั้งภาพเพราะฉะนั้นการกำหนดลำดับจะใช้การกำหนดให้เป็นลำดับที่อยู่ห่างออกมาจากขอบภาพเท่านั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาของข้อมูลตรงส่วนขอบภาพและในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูล precise orbit ซึ่งดูแลและให้บริการโดย [Delft Institute for Earth-Oriented Space Research](#) เข้ามาช่วยในการประมวลผลซึ่งได้ทำการดาวน์โหลดเตรียมข้อมูลไว้แล้วดังหัวข้อที่ 3.1.3) จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการทำภาพ interferogram โดยการจับคู่ภาพ interferogram นั้นจะแบ่งการจับคู่ภาพเป็น 2 ชุดคือ 1.) การจับคู่ภาพแบบเทคนิค StaMPS คือทำการจับคู่ภาพมาที่ภาพ Master เพียงภาพเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.4(a) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือภาพ ERS2 ที่ถูกบันทึกภาพเมื่อ 17 ธันวาคม 1997 โดยในงานวิจัยนี้มีการจับคู่ภาพ interferogram ทั้งหมด 17

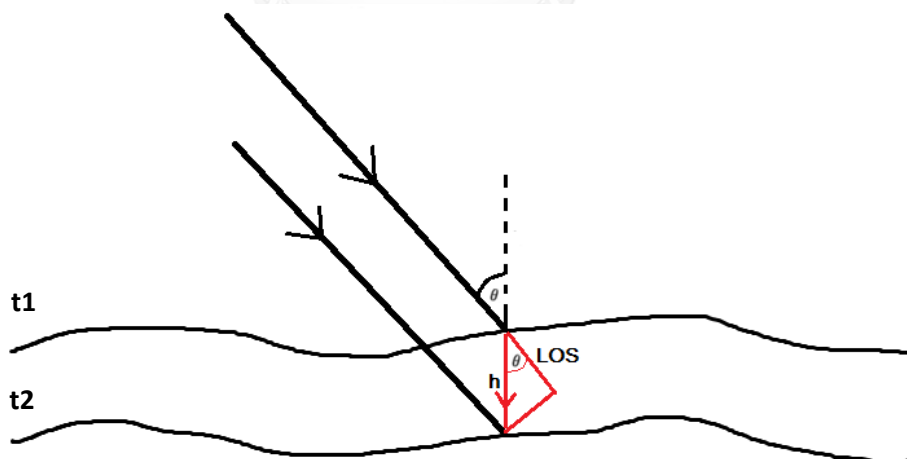
ภาพ 2.) การจับคู่ภาพแบบเทคนิค Small Baselines คือทำการจับคู่ภาพที่ถ่าย ณ วันเวลาที่ใกล้กัน และตำแหน่งการถ่ายใกล้กันโดยไม่จำเป็นต้องจับคู่ภาพไปที่ภาพ Master เพียงภาพเดียวเหมือนการจับคู่ภาพแบบเทคนิค StaMPS โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการจับคู่ภาพแบบเทคนิค Small Baselines ได้ทั้งหมด 39 ภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.4(b) เมื่อทำการจับคู่ภาพ interferogram แล้ว ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูล SRTM DEM ที่มีความละเอียด 90 เมตร ในการลบค่าเฟสที่เกิดจากความสูงต่ำของประเทศ โดยสามารถใช้คำสั่งดาวนโโหลดได้จากในตัวโปรแกรม Doris ได้เลย ในส่วนค่าเฟสที่มาจากค่าความคลาดเคลื่อนอื่นๆตัวโปรแกรมจะกำหนดให้ค่าเหล่านั้นเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและใช้หลักการปรับแก้ (adjustment) ในการขจัดหรือลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนเหล่านั้นให้ลดน้อยลงไป เมื่อได้ภาพ interferogram ทั้งหมดแล้ว จะเป็นขั้นตอนการนำเข้าโปรแกรม StaMPS ต่อไป

3.2.2) เมื่อเข้าโปรแกรม StaMPS ตัวโปรแกรมจะทำการแบ่งพื้นที่ข้อมูลเป็นส่วนๆ ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ซึ่งโปรแกรม StaMPS นั้นเขียนอยู่ในรูปโปรแกรม MATLAB โดยหน้าที่หลักของตัวโปรแกรมคือการประมวลผลหาจุดภาพที่เป็น PS Pixel และ SDFP (Slowly decorrelation filter phase) โดยในช่วงแรกนั้นตัวโปรแกรมจะทำการคัดกรองจุดภาพด้วยลักษณะของค่าแอมพลิจูดของแต่ละจุดภาพเพื่อลดจำนวนจุดภาพในการทำงานเพื่อลดการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์และช่วยประหยัดเวลาได้อีกด้วย ซึ่งในส่วนขั้นตอนต่อมาตัวโปรแกรมจะทำการคัดกรองจุดภาพด้วยความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของเฟส (Spatial correlation of phase measurements) ของแต่ละจุดภาพในการคัดกรอง ซึ่งในงานวิจัยนี้นำภาพ Interferogram ที่เตรียมไว้เข้าไปประมวลผลทีละชุดโดยจะเป็นชุดภาพของ StaMPS และ Small Baselines ตามลำดับ เพื่อให้ได้จุดภาพที่เป็น PS Pixel และ SDFP ออกมา จากนั้นตัวโปรแกรมจะทำการรวมพื้นที่ที่แยกเป็นส่วนไว้กลับเป็นส่วนเดียวและทำการรวมข้อมูลจุดจุดภาพที่ได้จากทั้งสองเทคนิค (PS Pixel และ SDFP) เป็นข้อมูลจุดภาพชุดเดียว จากนั้นจะทำการ phase unwrapping เพื่อให้ได้ค่าเฟสสมบูรณ์ จากนั้นทำการ export ข้อมูลออกมาซึ่งจะได้เป็นข้อมูลในรูปแบบ text file ซึ่งจะมีลักษณะการเรียงลำดับข้อมูลคือเป็น ลองติจูด, ละติจูด, อัตราการทวัดตัวในแนว line of sight (LOS) ของดาวเทียมตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.4

Line	Column 1	Column 2	Column 3
1	9.9740860e+01	1.3235692e+01	6.4929961e+00
2	9.9732552e+01	1.3237651e+01	2.8252769e+00
3	9.9765190e+01	1.3230783e+01	2.5815985e+00
4	9.9710968e+01	1.3242594e+01	6.4786358e-01
5	9.9771217e+01	1.3229612e+01	3.9021364e+00
6	9.9743202e+01	1.3235781e+01	3.4058036e+00
7	9.9771606e+01	1.3229716e+01	2.5229696e+00
8	9.9771423e+01	1.3229774e+01	1.8218539e+00
9	9.9771614e+01	1.3229748e+01	2.4188569e+00
10	9.9740929e+01	1.3236416e+01	4.5922811e+00
11	9.9793648e+01	1.3225056e+01	2.8225945e+00
12	9.9741089e+01	1.3236396e+01	3.7744219e+00
13	9.9794502e+01	1.3224881e+01	4.0483198e+00
14	9.9740929e+01	1.3236438e+01	4.5673586e+00
15	9.9794640e+01	1.3224886e+01	4.2769183e+00
16	9.9793648e+01	1.3225107e+01	1.7634648e+00
17	9.9770302e+01	1.3230170e+01	1.9538242e+00
18	9.9794189e+01	1.3225128e+01	3.4347858e+00
19	9.9770187e+01	1.3230378e+01	2.6884435e+00
20	9.9794205e+01	1.3225199e+01	1.5511845e+00
21	9.9717743e+01	1.3241750e+01	4.4133620e+00

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการแสดงผลค่าจากข้อมูลจุดผลลัพธ์ในรูปแบบ text file จากการประมวลผล InSAR จากข้อมูลดาวเทียม ERS1/2 ในงานวิจัยนี้ โดยมีการเรียงลำดับข้อมูลคอลัมน์เป็น ลองจิจูด, ละติจูด, อัตราการทรุดตัวในแนว line of sight ของดาวเทียม (มม./ปี)

3.2.3) ในงานวิจัยนี้และรวมถึงงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และงานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015) จะใช้สมมติฐานว่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจพบได้นั้นไม่มีผลมาจากค่าจากการเคลื่อนตัวในแนวราบ ซึ่งสามารถแปลงค่าการเคลื่อนตัวในแนว line of sight (LOS) ไปเป็นค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้โดยการใช้หลักตรีโกณมิติโดยการนำค่า LOS หารด้วยโคไซน์ (cosine) ของมุม look angle ของดาวเทียม โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสะท้อนของคลื่นในบริเวณพื้นที่ที่มีการทรุดตัว รูปสามเหลี่ยมสีแดงแสดงความสัมพันธ์ของการทรุดตัวในแนวตั้ง (h) กับการเคลื่อนตัวในแนว LOS ที่ตรวจพบจากการประมวลผล Time-series InSAR

ซึ่งค่ามุม look angle นั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งทาง range ของภาพโดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า look angle ที่กึ่งกลางภาพในการแปลงข้อมูลทั้งภาพเนื่องจาก

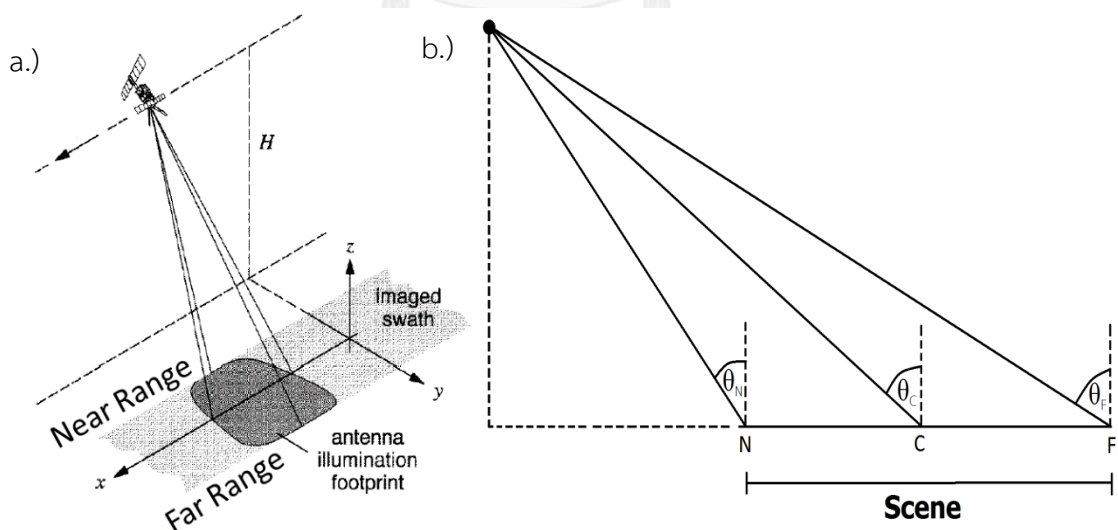
$$\text{จากความสัมพันธ์} \quad h = \frac{LOS}{\cos(\theta)} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ h คือค่าการทรุดตัวในแนวตั้งที่คำนวณมาจากการแปลงค่าการเคลื่อนตัวในแนว LOS

$$\text{ซึ่งจะได้} \quad dh = \frac{\sin \theta}{\cos(\theta)^2} LOS d\theta \quad (2)$$

$$\text{โดย} \frac{(2)}{(1)} \text{ จะได้ว่า} \quad \frac{dh}{h} = \tan(\theta) d\theta \quad (3)$$

ซึ่งถ้าหากกำหนดให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจพบในแนว LOS ที่ตำแหน่ง Near Range , Far Range และที่กึ่งกลางภาพ มีขนาดเท่ากัน ซึ่งที่ตำแหน่ง Near Range, Far Range และกึ่งกลางภาพจากดาวเทียม ERS ดังแสดงลักษณะในรูปที่ 3.6 มีค่าประมาณ look angle ที่ 19.8° , 26.0° และ 23° ตามลำดับเพราะฉะนั้นจะได้



รูปที่ 3.6 (a) ลักษณะเรขาคณิตของระบบบันทึกภาพเรดาร์ ซึ่งเป็น left-looking ภาพตัดแปลงมาจาก Bamler and Hartl (1998) (b) ลักษณะของมุม look angle ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งทาง range โดยตัวอักษร N, C และ F คือ ตำแหน่ง Near Range, กึ่งกลางภาพ และ Far Range ตามลำดับ

$$\frac{dh_N}{h} = \tan(23^\circ)(19.8^\circ - 23^\circ) \frac{\pi}{180} \quad (4)$$

$$\frac{dh_N}{h} = -0.0237 \quad (5)$$

$$\frac{dh_F}{h} = \tan(23^\circ)(23^\circ - 26^\circ) \frac{\pi}{180} \quad (6)$$

$$\frac{dh_F}{h} = 0.0222 \quad (7)$$

จากสมการ (5) และ (7) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของความคลาดเคลื่อนจากการใช้ค่า look angle ที่กึ่งกลางภาพในการแปลงค่าการเคลื่อนตัวในแนว LOS ให้เป็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้งต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 2% กว่าเท่านั้น เพราะเนื่องจากการใช้การคำนวณที่ตำแหน่ง Near range และ Far Range ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขอบภาพ จึงสามารถบอกได้ว่าไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ ซึ่งในงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และงานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015) นั้นจากในรูปที่ 1.1 จะสามารถเห็นได้ว่ามีระยะในแนว Range ของภาพน้อยกว่าในงานวิจัยนี้อยู่ค่อนข้างมาก เพราะฉะนั้นจะสามารถบอกได้ว่าทั้งสองงานวิจัยนั้นมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงไปของ ค่า look angle น้อยกว่าในงานวิจัยนี้ จึงสามารถบอกได้ว่าทั้งสองงานวิจัยมีผลกระทบไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อผลลัพธ์เช่นกัน เมื่อได้ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวในแนวตั้งเรียบร้อยแล้วจะนำค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจพบนี้ไปทำการ Regression analysis กับเวลา เพื่อให้ได้ค่าอัตราการทรุดตัวต่อไป

3.3 การคัดเลือกมุมระดับและตรวจสอบผลลัพธ์กับข้อมูลการทรุดตัวจากงานระดับ

เมื่อได้ค่าผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของพื้นผิวภูมิประเทศแล้ว จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการนำค่าผลลัพธ์ที่ได้ไปตรวจสอบกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากงานระดับที่ได้จากกรมแผนที่ทหาร ซึ่งในขั้นตอนแรกนั้นจะต้องทำการคัดเลือกมุมระดับที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมก่อน โดยมุมระดับที่คัดเลือกมานั้นจะต้อง

3.3.1) เป็นหมวดระดับที่มีข้อมูลจุดการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR อยู่ในระยะใกล้เคียง เพราะเนื่องจากว่าธรรมชาติของการทรุดตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นอัตราการทรุดตัวจะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน การคัดเลือกจึงต้องใช้จุดการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR ที่อยู่ในระยะใกล้หมวดระดับมาตรวจสอบ เพราะถ้าหากอยู่ในระยะห่างมากจะถือว่าอัตราการทรุดตัวนั้นแปรเปลี่ยนไปแล้วจะทำให้ให้นำหมวดระดับนั้นมาใช้ตรวจสอบไม่ได้ แต่ในขั้นตอนการคัดเลือกเบื้องต้นนั้นจะใช้แค่การคัดเลือกหมวดระดับที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่การวิจัยซึ่งกำหนดโดย footprint ของ ERS2

3.3.2) มีข้อมูลค่าระดับความสูงของช่วงเวลา ปี ค.ศ. 1996-2000 เนื่องจากการอัตราการทรุดตัวในแต่ละช่วงเวลานั้นมีขนาดแปรเปลี่ยนไปไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้ถ้าหากหมวดระดับไม่มีข้อมูลความสูงในช่วงเวลาที่ต้องการตรวจสอบ หมวดระดับนี้จะไม่สามารถใช้ช่วงเวลาอื่นมาคำนวณแทนได้ จึงให้นำหมวดระดับนี้มาใช้ในการตรวจสอบไม่ได้

โดยในหัวข้อที่ 3.3.1) - 3.3.2) นี้ได้ทำการคัดกรองไว้ตั้งแต่ในช่วงที่ทำการเตรียมข้อมูลช่วงแรกในหัวข้อที่ 3.1.2) ไว้แล้ว ซึ่งได้หมวดที่ผ่านเกณฑ์เบื้องต้น 124 หมวด

3.3.3) เป็นหมวดระดับชนิดแบบแฉวนอยู่กับตัวอาคารหรือสิ่งก่อสร้างหรือเป็นหมวดที่มีการขุดฝังฐานรากลึกลงไปที่มีความลึกประมาณเดียวกับสิ่งก่อสร้างหรืออาคาร เพราะเนื่องจากว่าในขั้นตอนนี้จะต้องพิจารณาถึงข้อเท็จจริงที่ว่า ด้วยลักษณะเทคนิคที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้มีผลทำให้ผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR นั้นข้อมูลจุดเกือบทั้งหมดคาดว่าจะมาจากการสะท้อนจากตัวอาคารหรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่เพราะฉะนั้นอัตราการทรุดตัวที่ตรวจได้นั้นเป็นอัตราการทรุดตัวของอาคารหรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ซึ่งไม่ใช่การทรุดตัวของผิวดิน โดยสิ่งก่อสร้างเหล่านี้มีการขุดฐานรากลึกไปในชั้นดินไม่เท่ากับหมวดระดับ เพราะเนื่องจากว่าบางหมวดระดับเป็นชนิดแบบที่มีการฝังไว้บนแท่นคอนกรีตที่พื้น, ตามบาทวิถี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในทางกลับกันในบางหมวด เช่น หมวดสถานีวัดแผ่นดินทรุด (CI.-4) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีการขุดฐานรากลงไปลึกมาก ซึ่งมากกว่าความลึกของฐานรากของตัวอาคาร ด้วยการฝังฐานรากลงไปชั้นดินที่ไม่เท่ากันนี้ทำให้การทรุดตัวไม่เท่ากันจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ร่วมกันได้ เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการคัดเลือกหมวดระดับที่เป็นหมวด

ระดับแบบแขวนที่ติดอยู่กับตัวอาคารหรือหมุดที่มีการขุดฝังฐานรากลึกลงไปประมาณเดียวกับ
สิ่งก่อสร้างหรืออาคารมาเปรียบเทียบเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 ลักษณะหมุดระดับที่มีการฝังไว้บนแท่นคอนกรีตที่พื้น โดยในรูปเป็นหมุด P.1709 อยู่ภายในบริเวณ
วัดเพรางาย อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี โดยมีกรมแผนที่ทหารเป็นผู้ดูแล



รูปที่ 3.8 ลักษณะหมุดสถานีวัดแผ่นดินทรุด โดยในรูปคือหมุด CI-4 ของ BM.8 สถานีวัดแผ่นดินทรุดที่ 25 สำนัก
อนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล โดยมีฐานรากฝังลึกลงไป 197 เมตรจากผิวดิน



รูปที่ 3.9 ลักษณะหลุมระดับที่เป็นแบบชนิดแวนที่ติดอยู่กับสิ่งก่อสร้าง โดยในรูปเป็นหลุม กทม.682 โดยสกัดฝังแวนไว้กับคอนกรีตม่อสะพานพระนั่งเกล้าฯ ฝั่งตะวันตก ใกล้กับทางบันไดขึ้นลง

ซึ่งจากการคัดเลือกจากข้อมูลหลุมระดับทั้งนั้นหลุมที่จะนำมาตรวจสอบผลลัพธ์ได้นั้นจะต้องเป็นหลุมระดับที่มีคุณลักษณะเข้าเกณฑ์ตามเงื่อนไขครบทั้ง 3 ข้อด้านบน จึงส่งผลให้เหลือจำนวนหลุมตรวจสอบไม่มากนัก โดยในงานวิจัยนี้ทำการคัดเลือกออกมาได้ทั้งหมด 34 หลุม โดยมีรายชื่อและรายละเอียดของหลุมแสดงดังตารางที่ 3.1

แต่ก่อนที่จะมีการทำการประมวลผลในขั้นตอนต่อไปนั้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำหลุมที่ผ่านคัดเลือกไปตรวจสอบถึงระบบพิกัดทางราบว่าได้มีการสำรวจบนพื้นหลักฐานเดียวกันหรือไม่ เพราะเนื่องจากว่าข้อมูลหลุมระดับที่ได้มานั้นอาจจะได้มาจากกรมแผนที่ทหารที่เดียวแต่หลุมหลายๆหลุมที่ผ่านเกณฑ์มานั้นถูกสร้างขึ้นและดูแลโดยหลายๆองค์กรมิใช่มาจากกรมแผนที่ทหารที่เดียว จึงอาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ โดยทำการลงตรวจสอบภาคสนามด้วยการใช้เครื่องรับสัญญาณจีพีเอสแบบพกพา (Handheld GPS) ในการลงตรวจสอบโดยทำการสุ่มตรวจทั้งหมด 19 หลุม โดยแบ่งเป็น หลุมชนิด BM. 6 หลุม (หลุมที่ 1, 2, 3, 5, 10, 11) และหลุมชนิด กทม. ทั้งหมด 13 หลุม (หลุมที่ 22-34 ดังในตารางที่ 3.1) ซึ่งจะสามารถเห็นได้ว่าได้มีการตรวจสอบชนิด กทม. ทั้งหมดเพราะเนื่องจากว่าต้องการตรวจสอบด้วยว่าหลุม กทม. นั้นเป็นชนิดแบบแวนติดอยู่กับตัวอาคารตามที่ได้รายงานไว้ใน

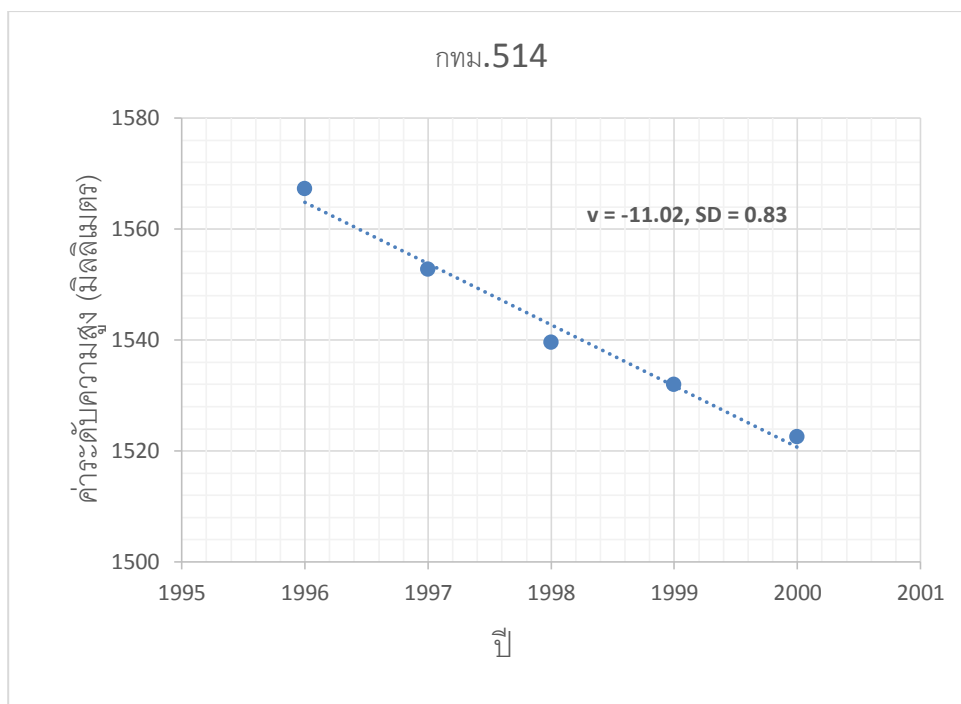
รายละเอียดข้อมูลหมุดระดับที่ได้จากกรมแผนที่ทหารจริงหรือไม่ เพราะหมุดชนิด กทม. นั้นมีการติดตั้งหลายแบบแต่ในส่วนของหมุดชนิด BM. ซึ่งหมุดสถานีวัดแผ่นดินทรุด นั้นจะมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจากการตรวจสอบนั้นพบว่าค่าพิคตันั้นอยู่บนพิคตทางราบเดียวกันทั้งหมดคือ พื้นหลักฐาน WGS84 และชนิดของหมุด กทม. นั้นมีลักษณะเป็นแบบแขวนติดอยู่กับอาคารตรงตามที่รายงานไว้ในรายละเอียดข้อมูลหมุดระดับที่ได้จากกรมแผนที่ทหารทั้งหมด

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดหมุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR โดยแสดงค่าอัตราการทรุดตัว (v) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (sd) ในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี

ลำดับ	หมุด	บริเวณพื้นที่ติดตั้งหมุด	v (มม./ปี)	sd (มม./ปี)
1	BM.1	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางกรวย	-13.98	2.22
2	BM.7	วัดราชบูรณะ (วัดเลียบ)	-12.06	1.20
3	BM.8	คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาฯ	-13.30	1.56
4	BM.10	มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก	-17.55	1.26
5	BM.11	โรงพยาบาลสมเด็จพระปิ่นเกล้า	-8.59	0.85
6	BM.15	บ่อบำบัดน้ำเสียดอนเมือง	-36.00	2.14
7	BM.16	กองบิน สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ถ.รามอินทรา	-21.23	2.28
8	BM.17	กรมชลประทานปากเกร็ด	-2.59	1.38
9	BM.18	คลังพัสดุการเคหะ คลองจั่น ถ.นวมินทร์	-14.77	1.74
10	BM.19	สถานีโทรทัศน์สีช่อง 3	-8.45	1.56
11	BM.25	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (A.I.T.) ถ.พหลโยธิน	-17.38	2.63
12	BM.28	สำนักงานเขตมีนบุรี	-21.55	2.94
13	BM.30	วัดบางพลีใหญ่กลาง	-21.34	3.25
14	BM.32	ประตูทางเข้า อบจ.สมุทรสาคร (หลังศาลากลาง)	-35.05	2.89
15	BM.33	วิทยาลัยมหาดไทย	-3.24	1.40
16	BM.36	ที่ว่าการอำเภอลาดบัวหลวง	1.51	4.01
17	BM.37	พุทธมณฑล จ.นครปฐม	-8.11	1.97
18	BM.39	โรงเรียนเทศบาลศรีบุญยานุสรณ์	-15.62	1.05
19	BM.41	วัดเทียนถวาย	-0.76	1.55
20	BM.48	ที่ว่าการอำเภอลำลูกกา	-12.45	1.34
21	BM.49	วัดสุนทรสถิต	-10.05	2.95
22	กทม.106	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งพระนคร	-8.71	1.16
23	กทม.113	สะพานคลองผดุงกรุงเกษม	-15.25	1.03
24	กทม.140	การไฟฟ้านครหลวงคลองเตย	-15.16	1.76
25	กทม.176	สะพานคลองสำโรง ถ.สุขุมวิท	-7.29	1.75
26	กทม.284	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันออก	-8.38	2.37
27	กทม.313	โรงเรียนพหลโยธิน ถ.วิภาวดีรังสิต	-34.81	3.77
28	กทม.315	ชุมสายโทรศัพท์ดอนเมือง ถ.พหลโยธิน	-27.73	2.95
29	กทม.320	โคนเสาสะพานลอยหน้าโรงพยาบาลภูมิพล	-30.93	2.71
30	กทม.339	โรงเรียนเศรษฐบุตรบำเพ็ญ	-28.23	4.71
31	กทม.502	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งธนบุรี	-6.30	1.20
32	กทม.514	สำนักงาน รักษาความสะอาด เขตบางขุนเทียน	-11.02	0.83
33	กทม.640	โคนเสาสะพานลอยวัดม่วง	-8.74	0.89
34	กทม.682	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันตก	-2.68	2.24

เมื่อทำการคัดเลือกหมวดระดับเรียบร้อยแล้ว ประเด็นสำคัญอีกหนึ่งเรื่องที่ต้องทำการพิจารณาก่อนที่จะทำการประมวลผลหาค่าอัตราการทรุดตัวคือ ค่าหมวดระดับ BMR.8 ที่อยู่ที่บ่อสำรวจน้ำมันปิโตรเรียม บางแวก เขตภาษีเจริญ ซึ่งเป็นทั้งหมดแรกออกของโครงข่าย กทม. และจุดบรรจบของโครงข่ายหมวดหลักฐานทางดิ่งแห่งชาติตอนบนของเกาะหลัก หรือหมายถึงเป็นหมวดอ้างอิงค่าระดับให้กับโครงข่ายมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 นั้น พบว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นประมาณ 13.8 เซ็นติเมตรในปี ค.ศ. 2005 ซึ่งไม่สามารถทราบสาเหตุของการทรุดตัวได้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถทราบได้ว่าลักษณะการทรุดตัวของหมวดนั้นเป็นเช่นไร เช่น ทรุดตัวโดยเฉียบพลันหรือค่อยๆมีการทรุดตัวมาตลอดระยะเวลา 15 ปี ซึ่งระยะเวลาที่หมวด BMR.8 มีการทรุดตัวโดยไม่ทราบลักษณะการทรุดนั้นครอบคลุมระยะเวลาของข้อมูลในงานวิจัยนี้ด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องมีการชดเชยค่าระดับก่อนที่จะทำการประมวลผล แต่เนื่องจากว่าไม่ทราบลักษณะของการทรุดตัวของหมวด BMR.8 ซึ่งแต่ละรูปแบบทำให้วิธีการชดเชยค่าระดับต่างกันและทำให้อัตราการทรุดตัวที่จะคำนวณได้แตกต่างกันไปด้วย โดยสำหรับในงานวิจัยนี้ให้สมมติฐานว่าการทรุดตัวของหมวด BMR.8 นั้น มีการทรุดตัวด้วยอัตราคงที่ โดยจากมีอัตราการทรุดตัวที่ขนาดคงที่ตลอด 15 ปี ด้วยขนาด 13.8 เซ็นติเมตร เพราะฉะนั้นจะต้องทำการชดเชยค่าระดับด้วยขนาด -9.2 เซ็นติเมตรต่อปี

เมื่อทำการชดเชยค่าระดับเรียบร้อยแล้วจากนั้นนำค่าข้อมูลค่าระดับเหล่านี้ทำ linear regression กับเวลา ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.10 ซึ่งค่าความชันของสมการเส้นตรงนั้นคืออัตราการทรุดตัวของหมวดระดับ โดยมีผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละหมวดระดับแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการแสดงค่าความสูงของหมุดระดับ กทม.514 ซึ่งเป็นหมุดแบบแขวนติดอยู่กับอาคารสำนักงานรักษาความสะอาด เขตบางขุนเทียน ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 (แกน x) โดยแสดงค่าระดับความสูง (แกน y) เป็นสัญลักษณ์วงกลมสีน้ำเงิน ซึ่งได้ค่าความชันของสมการเส้นตรงเท่ากับ -11.02 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อนำมา plot ในภาพจะแสดงอยู่ในสัญลักษณ์เส้นประ

เมื่อได้อัตราการทรุดตัวของหมุดระดับแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำค่าไปเปรียบเทียบกับข้อมูลผลลัพธ์การทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ซึ่งวิธีการในการตรวจสอบนั้นจะใช้การเฉลี่ยอัตราการทรุดตัวจากจุดภาพจาก InSAR ที่อยู่โดยรอบหมุดระดับภายในระยะรัศมี 100 เมตร เนื่องจากการ Geo-reference จากระบบดาวเทียม ERS นั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ประกอบกับค่าความละเอียด (ground range resolution) ของ ERS นั้นอยู่ที่ประมาณ 20 เมตร หากกำหนดพื้นที่รอบหมุดระดับน้อยเกินไปดังเช่นในงาน สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ที่กำหนดรัศมีที่ 50 เมตร อาจจะทำให้จำนวนจุดข้อมูลที่สามารถนำมาเฉลี่ยน้อยลงตามไปด้วยและบวกกับเหตุผลที่สามารถคาดได้ว่าการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญในระยะรัศมี 100 เมตรจึงถือว่าในพื้นที่ในระยะรัศมี 100 เมตรนี้มีอัตราการทรุดตัวเดียวกับหมุดระดับ โดยใช้วิธีการบัฟเฟอร์พื้นที่รัศมี 100 เมตร รอบหมุดระดับในโปรแกรม ArcGIS และนำค่า

ข้อมูลการทรุดตัวจากจุดผลลัพธ์การประมวลผล InSAR ที่ตกอยู่ในพื้นที่บัพเฟอร์นั้นมาหาทำการค่า อัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของพื้นที่บริเวณนั้น

โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (SD of the mean) นั้นสามารถหาได้จาก

$$\sigma_{InSAR} = \frac{\sigma_{avg}}{\sqrt{N-1}} \quad (7)$$

โดยเป็นการนำค่า standard deviation ของแต่ละจุดผลลัพธ์ที่อยู่ตกอยู่ในพื้นที่บัพเฟอร์มาทำการหาค่าเฉลี่ย (σ_{avg}) และทำการหารด้วยรากที่สองของจำนวนจุดผลลัพธ์ (N) ที่ตกอยู่ในพื้นที่นั้นลบด้วยหนึ่ง เพื่อให้ได้ค่า sd ของค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย

เมื่อได้ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งจากงานระดับและ InSAR เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตรวจสอบความสอดคล้องของค่าผลลัพธ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบค่าสถิติ t-test ในการทดสอบ โดยสามารถคำนวณค่า t ซึ่งเป็นค่าสถิติทดสอบได้จาก

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

โดยที่ค่า v_{InSAR} คือค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR, v_{level} คือค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับ, σ_{InSAR} คือค่า Standard deviation ของค่าผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR, σ_{level} คือค่า Standard deviation ของค่าผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวจากงานระดับ เมื่อทำการหาค่า t ของทุกหมุดที่นำมาทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก InSAR แล้ว นำค่า t ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่า $t_{threshold}$ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) ที่ 95% และเป็นการตรวจสอบแบบ two-tails hypothesis โดยค่า degree of freedom สามารถคำนวณได้จาก ($dof = n_{level} + n_{InSAR} - 2$) ซึ่ง n_{level} คือจำนวนข้อมูลจากงานระดับและ n_{InSAR} คือจำนวนจุด InSAR ที่ตกอยู่ในบริเวณรัศมีที่กำหนด

3.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ร่วมกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

ขั้นตอนการนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ซึ่งใช้การประมวลผล Time-series InSAR หาค่าอัตราการทรุดตัวในช่วง ตุลาคม 2005 ถึง มีนาคม 2010 และช่วง กันยายน 2009 ถึง สิงหาคม 2012 ตามลำดับ ในงานวิจัยทั้งสองนั้นพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในทางทิศตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา เพราะฉะนั้นจะทำการตัดนำมาศึกษาเฉพาะพื้นที่ที่มีส่วนข้อมูลซ้อนทับกันของข้อมูล โดยจะนำข้อมูลการทรุดตัวจากผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้กับผลลัพธ์จากอีกทั้งสองงานวิจัยมาทำเป็นแผนที่กริดขนาด 200x200 ตร.ม. ซึ่งเหตุผลนั้นคล้ายกับในขั้นตอนการตรวจสอบผลลัพธ์กับค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับที่ด้วยสาเหตุว่าค่าความละเอียดของดาวเทียม ERS นั้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่, ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดจากทั้งสามงานวิจัยที่ได้ไม่แม่นยำพอ, ข้อมูลจุดการทรุดตัวจากทั้งสามงานวิจัยอาจไม่อยู่ตรงตำแหน่งเดียวกันพอดีทั้งหมด และจากสมมติฐานที่ว่าทรุดตัวอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญในระยะรัศมี 100 เมตร ซึ่งถ้าหากเปรียบเป็นพื้นที่แล้วก็จะมีความเป็นพื้นที่ที่มีความยาวประมาณ 200 เมตร ในขั้นตอนนี้จึงทำการสร้างเป็นพื้นที่ตารางกริดขนาด 200x200 ตร.ม. เพื่อเฉลี่ยจุดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

โดยขั้นตอนการทำงานนั้นข้อมูลตำแหน่งและอัตราการทรุดตัวจากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) และสรศักดิ์ ชัยทวี (2015) จะอยู่ในรูป text format โดยจะเป็นการบันทึกข้อมูลในรูปแบบจุด ซึ่งในตัวไฟล์นั้นมีการเรียงลำดับคอลัมน์ เป็น ลองจิจูด, ละติจูด, อัตราการทรุดตัวในแนว line of sight และอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งซึ่งได้จากการนำค่าอัตราการทรุดตัวในแนว line of sight หารด้วย cosine ของมุม look angle ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.2.3 จากนั้นทำการแสดงข้อมูลให้เป็นพีเจอร์แบบจุดโดยอยู่ในรูป shape file โดยใช้โปรแกรม ArcGIS ในการทำงาน

จากนั้นทำการสร้าง template ตารางกริดขนาด 200x200 ตร.ม. ขึ้นมาในพื้นที่ที่ซ้อนทับกันทั้งสามงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยนำข้อมูลการทรุดตัวจากจุดผลลัพธ์การประมวลผล InSAR ที่ตกอยู่ในแต่ละตารางกริดมาหาค่าเฉลี่ยและใส่ค่าลงใน Attribute ของกริดนั้นๆ เมื่อทำครบทั้งสามงานวิจัยแล้วจึงนำทั้งสามตารางกริดมาซ้อนทับกัน โดยขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวสะสมของแต่ละพื้นที่ ซึ่งหลักการจะทำคล้ายกับการหาอัตราการทรุดตัวจากหมุดระดับในหัวข้อที่แล้ว แต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำค่าอัตราการทรุด

ตัวเฉลี่ยของแต่ละช่วงเวลาทำการ linear regression กับเวลาซึ่งค่าความชันของเส้นตรงของกริดแต่ละกริดนั้นคืออัตราเร่งของการทรุดตัว โดยในงานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์สรุปว่า

- ตารางกริดที่มีค่าความชันมากกว่า 0.25 หมายถึงพื้นที่ในกริดนั้นมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น (แย่ลง)
- ตารางกริดที่มีค่าความชันอยู่ในช่วง -0.25 ถึง 0.25 หมายถึงพื้นที่ในกริดนั้นมีอัตราการทรุดตัวที่ทรงตัว
- ตารางกริดที่มีค่าความชันน้อยกว่า -0.25 หมายถึงพื้นที่ในกริดนั้นมีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง (ดีขึ้น)

เนื่องจากถ้าหากข้อมูลอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแต่ละช่วงเวลาจากทั้งสามงานวิจัยนั้นค่าต่างกันไม่เกิน ± 4 มม./ปี จะถือว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ทรงตัว เพราะเนื่องจากว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้ผลลัพธ์ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในไม่เกิน 4 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งระยะเวลาที่ทำการตรวจสอบนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราการทรุดตัวตั้งแต่ปี 1996 จนถึงปี 2012 ซึ่งเป็นระยะเวลาทั้งหมด 16 ปีเพราะฉะนั้นในพื้นที่ใดมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราเร็วของการทรุดตัวที่คงที่มาตลอด 16 ปี จะต้องมามีค่าประมาณอัตราเร่งไม่เกิน 0.25 มม./ปี^2 จึงจะทำให้ค่าอัตราเร็วของการทรุดตัวที่ปี 1996 และปี 2012 มีค่าต่างกันไม่เกิน 4 มม./ปี

ส่วนในขั้นตอนการหาค่าการทรุดตัวสะสมของตั้งแต่ช่วงเวลาปี 1996-2000 ของแต่ละพื้นที่นั้นในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาโดยเป็นผลรวมของค่าอัตราการทรุดตัวในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในช่วงปี 2001-2005 นั้นเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีข้อมูลเพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้สมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการทรุดตัวนั้นเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราเร่งที่คงที่ ค่าการทรุดตัวจึงใช้เป็นค่าเฉลี่ยจากสองช่วงเวลาคูณกับจำนวนปี และในช่วงปี 2009-2010 เป็นช่วงเวลาที่มีข้อมูลจากทั้งสองงานวิจัย งานวิจัย Aobpaet et al (2012) และสรศักดิ์ ชัยทวี และคณะ(2014) ในงานวิจัยนี้จึงใช้การนำค่าเฉลี่ยจากสองช่วงเวลาคูณกับจำนวนปีเช่นกัน

ช่วงปี 1996-2000: (ค่าผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวช่วงปี 1996-2000) * 4

ช่วงปี 2001-2005: $\left(\frac{(\text{ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 1996-2000}) + (\text{ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 2005-2010})}{2} \right) * 5$

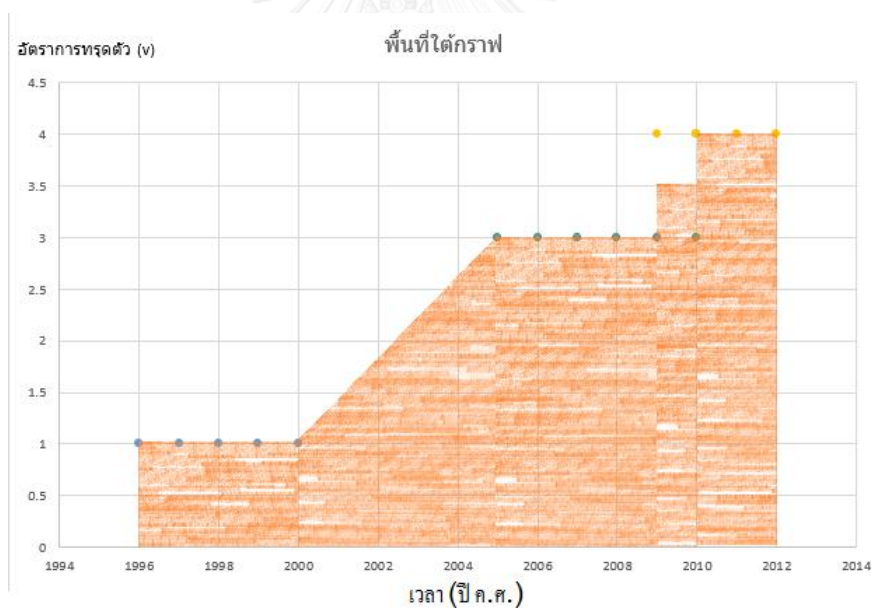
ช่วงปี 2006-2008: (ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 2005-2010) * 3

ช่วงปี 2009-2010: $\left(\frac{(\text{ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 2005-2010}) + (\text{ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 2009-2012})}{2} \right) * 2$

ช่วงปี 2011-2012: (ค่าผลลัพธ์ช่วงปี 2009-2012) * 2

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าอัตราการทรุดตัวสะสมช่วงปี 1996-2012 = (ช่วงปี 1996-2000) + (ช่วงปี 2001-2005) + (ช่วงปี 2006-2008) + (ช่วงปี 2009-2010) + (ช่วงปี 2011-2012)

ซึ่งสามารถอธิบายพื้นที่ใต้กราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างพื้นที่ใต้กราฟเพื่อความสะดวกในการพิจารณาจะกำหนดให้ค่าการทรุดตัวช่วงปี 1996-2000 มีค่าเท่ากับ 1, ช่วงปี 2005-2010 มีค่าเท่ากับ 3 และช่วงปี 2009-2012 มีค่าเท่ากับ 4 โดยพื้นที่ใต้กราฟคือค่าการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2000 ที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ในการคำนวณ

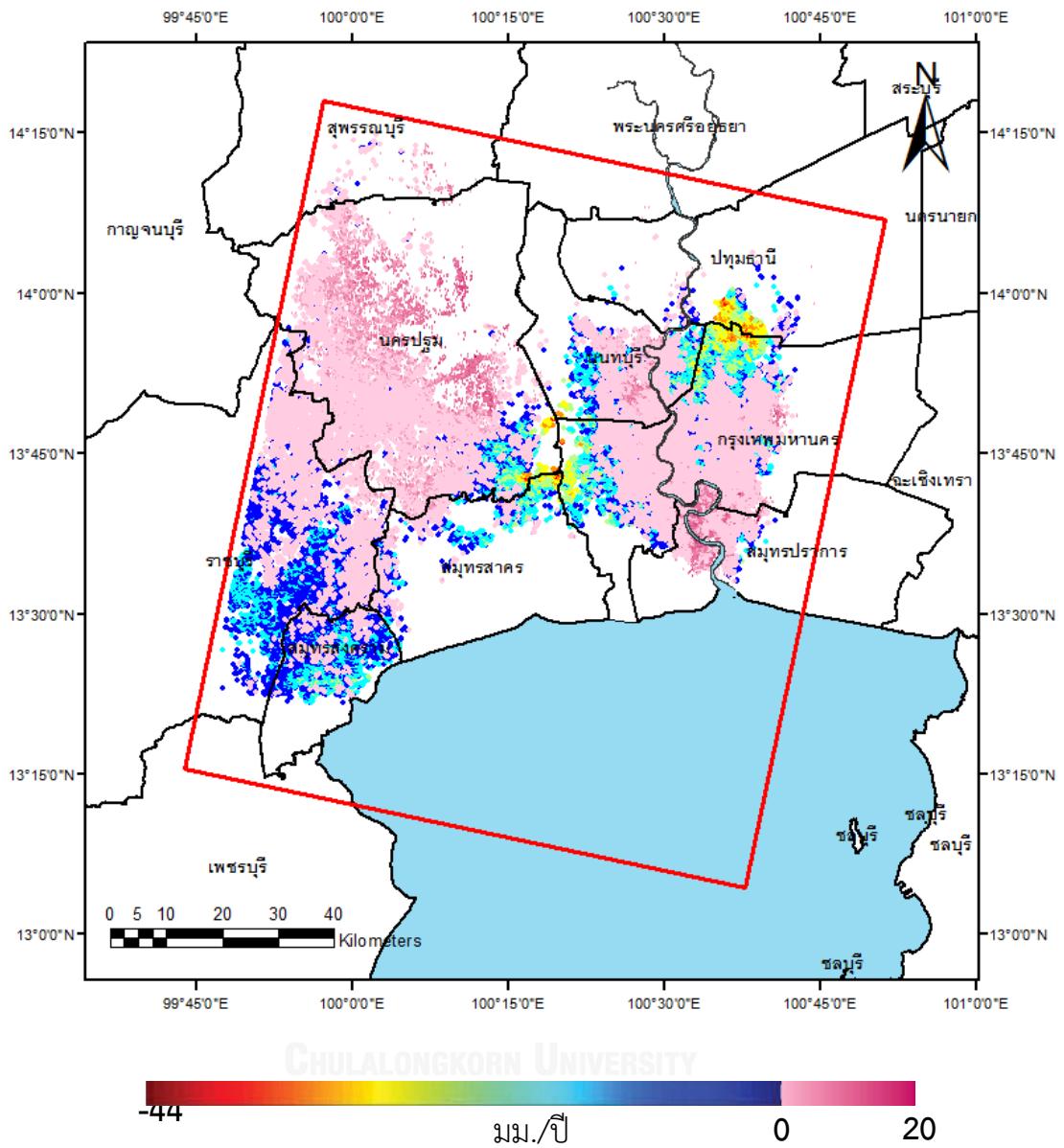
บทที่ 4

ผลลัพธ์การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 ด้วย เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์

4.1 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000

ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจพบจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ได้ทั้งหมด 283,572 จุด โดยในจุดเหล่านี้จะแสดงค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าจุดตรวจสอบจะมีความหนาแน่นมากในพื้นที่บริเวณที่เป็นเมืองและสิ่งก่อสร้าง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นในบางพื้นที่นั้นมีค่าเฉลี่ยสูงถึงกว่า 300 จุด/ตร.กม. ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แต่ในทางกลับกันในส่วนพื้นที่ที่ไม่ใช่บริเวณเมืองนั้นจะมีจำนวนจุดที่ค่อนข้างเบาบางไปจนถึงไม่มีจุดตรวจสอบในพื้นที่เลย ดังเช่น บริเวณทางตอนกลางถึงล่างของจังหวัดสมุทรสาครหรือบริเวณจังหวัดปทุมธานีดังแสดงในรูปที่ 4.1

สาเหตุที่ทำให้ได้ผลลัพธ์จำนวนจุดตรวจสอบที่ค่อนข้างเบาบางจนถึงไม่มีจุดตรวจสอบเลยในบางพื้นที่นั้น อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากพื้นที่ในบริเวณเหล่านั้นในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 อาจมีอาคารหรือสิ่งก่อสร้างอยู่ค่อนข้างน้อย ซึ่งมีลักษณะที่ไม่สอดคล้องตามลักษณะทางเทคนิค StaMPS-MTI SB จึงส่งผลให้จุดภาพของพื้นที่ในบริเวณเหล่านั้นไม่ถูกทำการคัดกรองนำมาประมวลผลด้วยและอีกหนึ่งสาเหตุที่สำคัญอาจเนื่องมาจากว่าตัวระบบของดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ที่จะให้จำนวนจุดตรวจสอบที่น้อยกว่าดาวเทียมเรดาร์ดวงอื่นๆ เนื่องจากว่าค่าความละเอียดของภาพจากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 ที่สูงโดยเฉพาะค่า Ground Range resolution ที่มีค่าสูงถึงกว่า 20 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้ถ้าเปรียบเทียบในขนาดพื้นที่ที่เท่ากันแล้วจำนวนจุดตรวจสอบที่ได้จากดาวเทียม ERS1 และ ERS2 จะมีจำนวนน้อยกว่าดาวเทียมเรดาร์ดวงอื่นๆ และอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลตามมาอีกว่าด้วยขนาดความละเอียดภาพที่ค่อนข้างใหญ่นี้ทำให้โอกาสที่จุดภาพจะถูก dominate โดยตัว Scatterer ตัวใดตัวหนึ่งลดน้อยลงตามไปด้วย จึงทำให้ในบริเวณพื้นที่เหล่านี้มีจำนวนจุดตรวจสอบที่ค่อนข้างเบาบางจนถึงไม่มีเลยและส่งผลตามมาว่าทำให้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถตรวจสอบการทรุดตัวในบริเวณพื้นที่เหล่านั้นได้



รูปที่ 4.1 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 ค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR มม./ปี โดยค่าจุดในเขตสีม่วงเป็นค่าอัตราการทรุดตัวที่เป็นค่าบวก

a.)



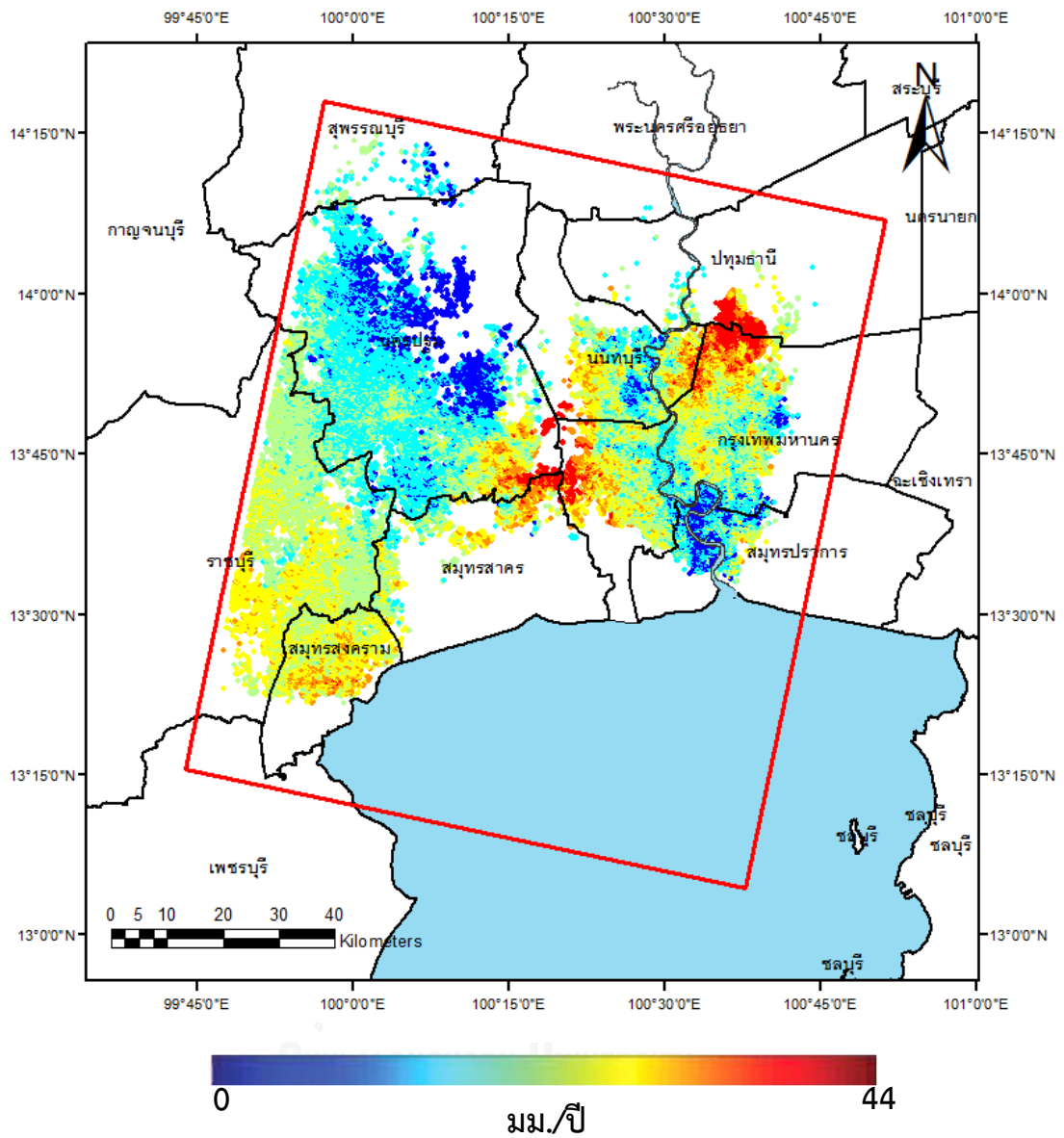
b.)



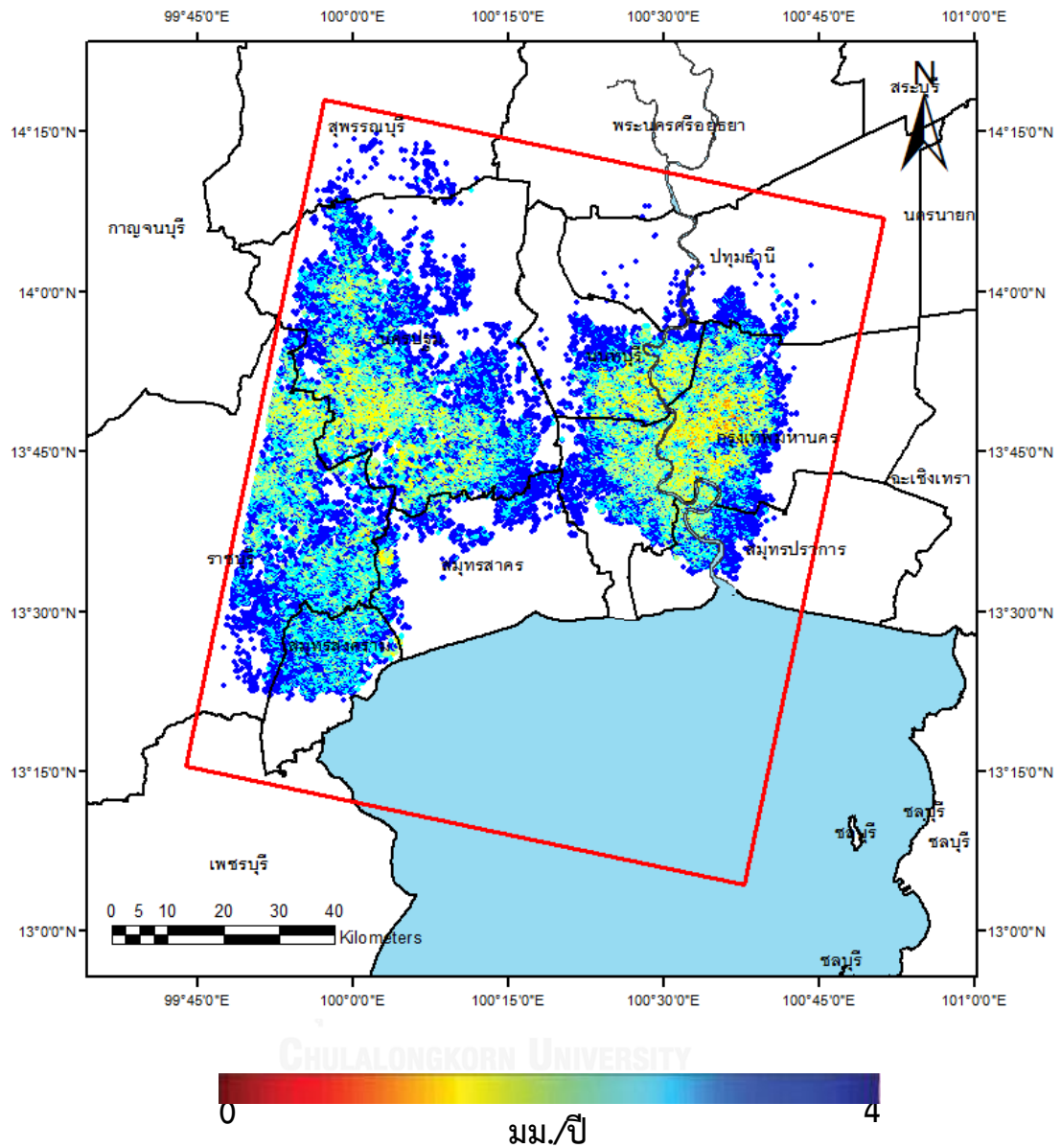
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีจุดตรวจสอบหนาแน่น โดยจะเป็นพื้นที่บริเวณเมืองเป็นส่วนใหญ่ โดยในรูปเป็นพื้นที่บริเวณถนนสีลม เขตบางรัก ซึ่งความหนาแน่นอยู่ 300 จุด/ตร.กม. และพื้นที่บริเวณเขตป้อมปราบศัตรูพ่าย ซึ่งมีความหนาแน่นอยู่ 310 จุด/ตร.กม. โดยแสดงจุดอยู่ในสัญลักษณ์วงกลมสีฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับค่า (Offset) ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวให้สอดคล้องกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากงานระดับอื่นเนื่องจากข้อจำกัดจากลักษณะการทำงานของกระบวนการประมวลผลการ Unwrap phase ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1) จึงส่งผลให้ลักษณะตัวระบบของการประมวลผล InSAR นั้น อัตราการทรุดตัวจะอยู่ในรูปแบบสัมพัทธ์ (relative) กับจุดอ้างอิงที่ใช้ในการทำ Unwrap การหาค่าการทรุดตัวในแบบสัมบูรณ์ (absolute) ในงานศึกษานี้ จะใช้ค่าในการอ้างอิงปรับค่าโดยใช้มุมระดับ กทม.140 โดยเป็นมุมชนิดแบบแวนอยู่กับตัวอาคารในการไฟฟ้านครหลวงคลองเตย ซึ่งเป็นมุมภายใต้การดูแลของกรมแผนที่ทหารซึ่งใช้การสำรวจระดับชั้นที่ 1 ในการปรับค่า มุมระดับนี้เป็นลักษณะแบบแวนอยู่กับตัวอาคารโดยตำแหน่งของมุมแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5 ว่าภายในระยะรัศมี 100 เมตรรอบมุมระดับมีจำนวนจุดตรวจสอบอยู่ 4 จุด และค่อนข้างมีความมั่นใจว่ามุมนี้เป็นมุมที่อยู่ในพื้นที่บริเวณใจกลางเมืองถ้าหากย้อนไปเมื่อปี ค.ศ. 1996-2000

คาดว่าพื้นที่ในบริเวณนี้น่าเป็นบริเวณที่มีอาคารและสิ่งก่อสร้างแล้ว ซึ่งถ้าหากเลือกใช้หมุดที่อยู่ในบริเวณชานเมืองนั้นตอนช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 พื้นที่บริเวณนั้นอาจจะยังไม่มีสิ่งปลูกสร้างหรืออาจมีอาคารแต่อาจจะยังไม่หนาแน่นเท่าปัจจุบันเพราะฉะนั้นถ้าหากพื้นที่มีช่องว่างสลับกับอาคารสิ่งปลูกสร้างก็อาจทำให้ไปเพิ่มโอกาสการเกิดความคลาดเคลื่อนจาก double-bounce ได้ ในงานวิจัยนี้จึงคาดว่าหมุดนี้เป็นหมุดที่เหมาะสมในการนำมาทำการปรับค่า โดยผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้ทำการปรับค่าด้วยการลบค่าอัตราการทรุดตัวด้วย 13 มม./ปี เพราะเนื่องจากพบว่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากการเฉลี่ยค่าจุด InSAR ภายในพื้นที่ระยะรัศมี 100 เมตรรอบหมุดระดับนั้นมีค่าเท่ากับ -2.16 มม./ปี ส่วนอัตราการทรุดตัวที่ได้จากหมุดระดับนั้นมีค่า -15.16 มม./ปี ซึ่งอัตราการทรุดตัวจาก InSAR นั้นช้ากว่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากงานระดับอยู่ 13 มม./ปี ซึ่งเมื่อทำการปรับค่าแล้วค่าผลลัพธ์การทรุดตัวมีค่าอยู่ในช่วง -44 ถึง 0 มม./ปี โดยไม่มีค่าการทรุดตัวที่เป็นบวก เพราะฉะนั้นเพื่อความสะดวกในงานวิจัยในบทต่อไปนี้จะขออธิบายใช้ค่าการทรุดตัวเป็นค่าบวก (คือมีทิศทางลง) โดยผลลัพธ์การทรุดตัวจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 44 มม./ปี ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วง
ปี ค.ศ. 1996-2000 ค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR มม./ปี
โดยเป็นค่าการทรุดตัวที่ทำการ offset ค่าด้วย -13 มม./ปี



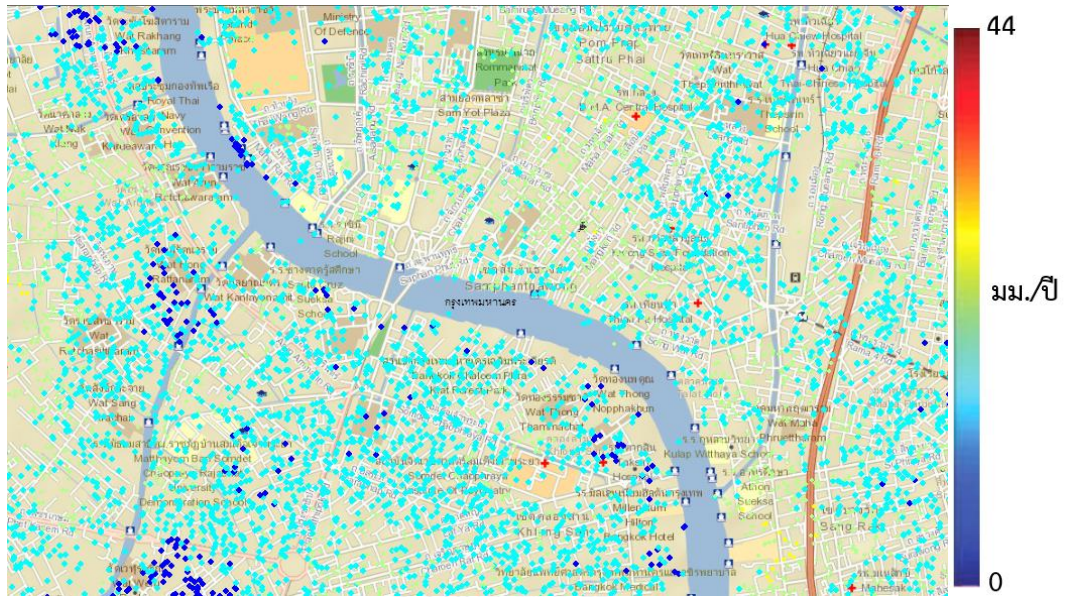
รูปที่ 4.4 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัว (มม./ปี) ของผลลัพธ์การหาค่าอัตราการทรุดตัวของพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000



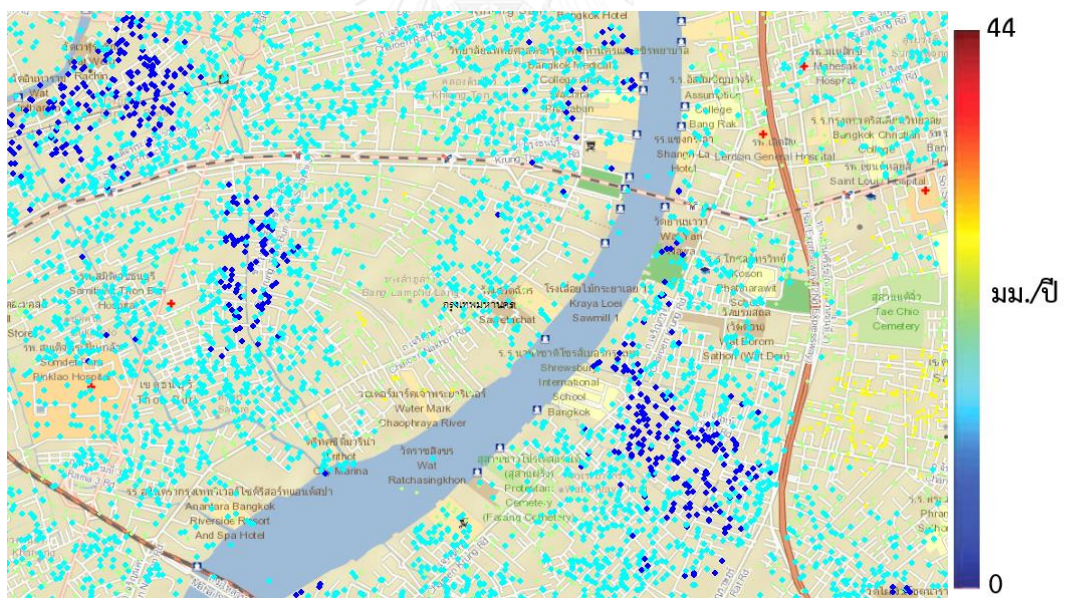
รูปที่ 4.5 จุดตรวจสอบรอบหมุด กทม.140 โดยเป็นพื้นที่บริเวณรอบการไฟฟ้านครหลวงคลองเตย โดยจุดสีเขียวคือจุดตรวจสอบซึ่งมีจุดตรวจสอบตกอยู่ภายในระยะรัศมี 100 เมตรรอบหมุดทั้งหมด 4 หมุด โดยเส้นวงกลมสีแดงคือขอบเขตพื้นที่รัศมี 100 เมตรรอบหมุด (โดยเป็นภาพในปี ค.ศ. 2004 จากโปรแกรม google earth)

ผลลัพธ์การตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงปี 1996-2000 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 44 มม./ปี ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ว่าในบริเวณพื้นที่ เช่น ซีกตะวันออกของจังหวัดนนทบุรีและพื้นที่ริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาของกรุงเทพมหานครมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างน้อยโดยมีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 10 มม./ปี ดังแสดงในภาพรวมรูปที่ 4.3 และแบบละเอียดดังรูปที่ 4.6(a), 4.6(b) โดยเฉพาะพื้นที่ริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาภายในขอบเขตของจังหวัดสมุทรปราการนั้นมีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.6(c) แต่ในทางกลับกันบริเวณพื้นที่ทางทิศเหนือของกรุงเทพมหานคร, ทางทิศตะวันตกของกรุงเทพมหานคร, และพื้นที่ทางเหนือของจังหวัดสมุทรสาครดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีค่าอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างมากโดยมีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 มม./ปี ขึ้นไป โดยในบางพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวมากถึง 35 ถึง 44 มม./ปี ดังเช่นบริเวณเขตสายไหมและดอนเมือง ดังแสดงในรูปที่ 4.6(d), 4.6(e) โดยมีในบางบริเวณอื่นที่เป็นบริเวณส่วนใหญ่ของพื้นที่ศึกษานั้นมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 10 ถึง 16 มม./ปี โดยจุดตรวจสอบทั้งหมดได้มีการแสดงเป็นกราฟฮิสโทแกรมดังในรูปที่ 4.7 โดยจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการทรุดตัวทั้งพื้นที่ศึกษานั้นอยู่ที่ประมาณ 13 มม./ปี

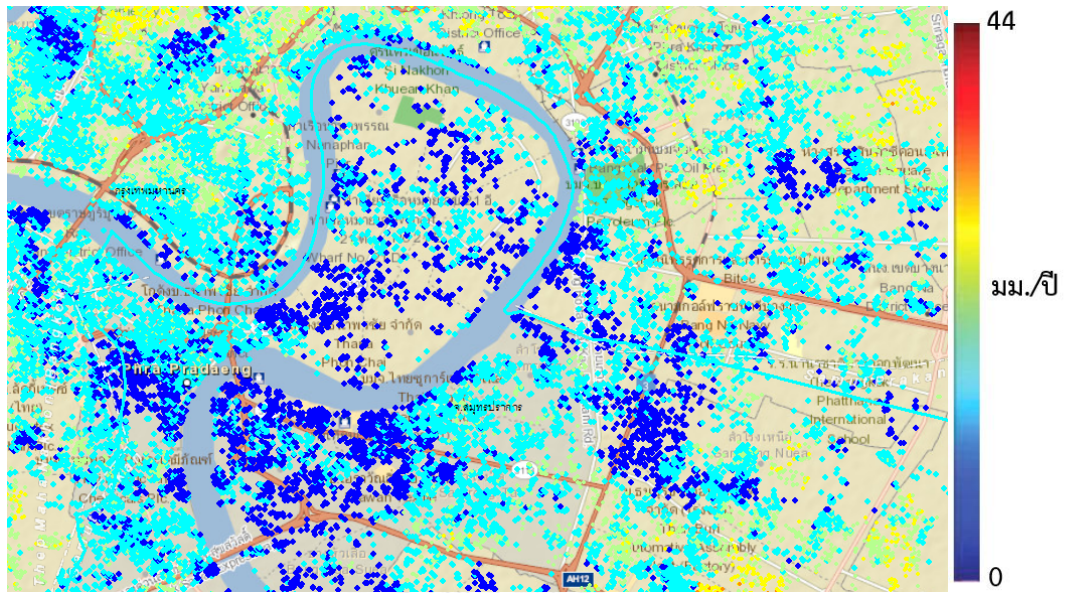
a.)



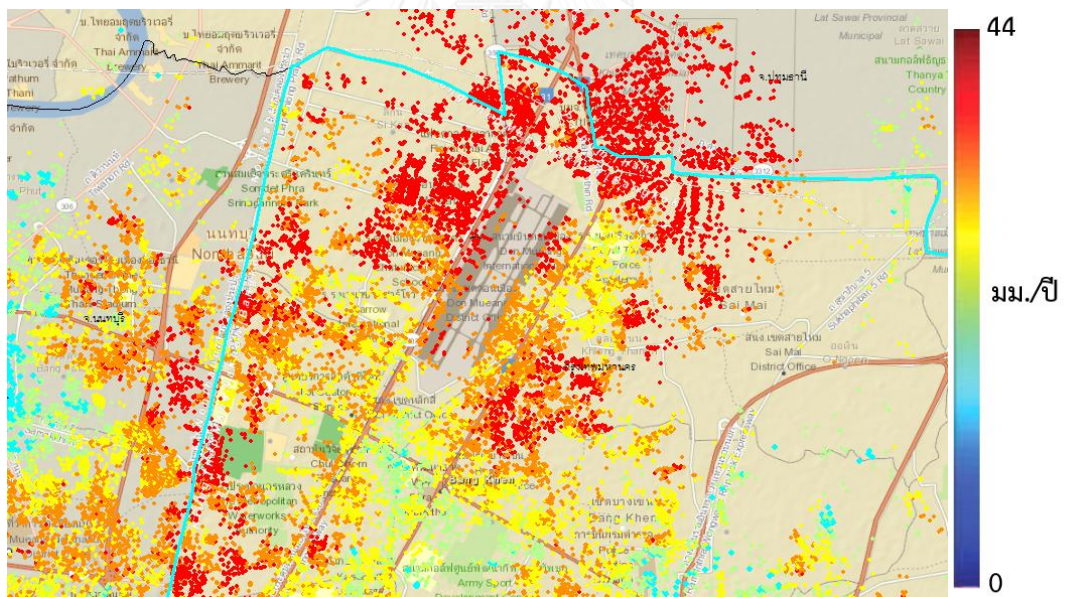
b.)



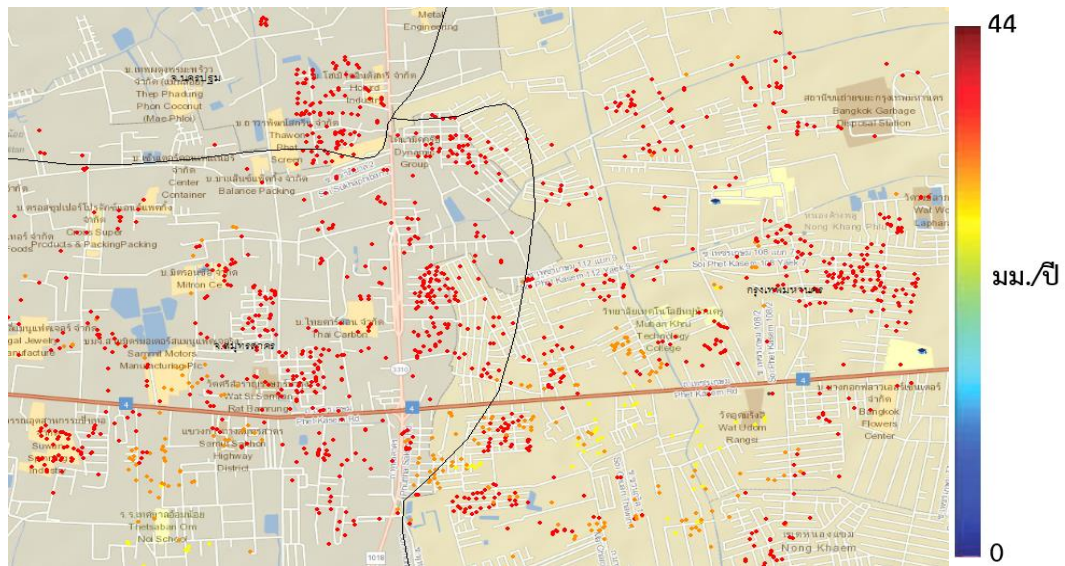
c.)



d.)

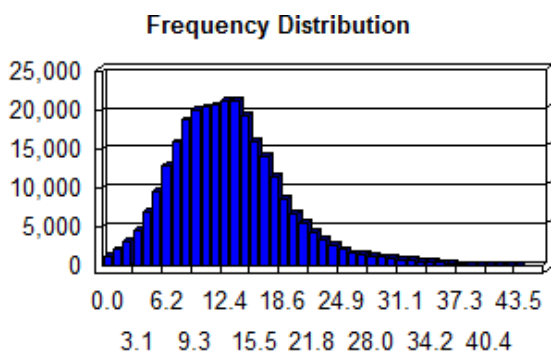


e.)



รูปที่ 4.6 อัตราการทรุดตัวของ (a), (b) พื้นที่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาในกรุงเทพมหานคร (c) พื้นที่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาของในจังหวัดสมุทรปราการ (d) พื้นที่บริเวณหลักสี่และดอนเมือง (e) พื้นที่บริเวณทางทิศตะวันตกของกรุงเทพมหานครและพื้นที่ทางเหนือของจังหวัดสมุทรสาคร

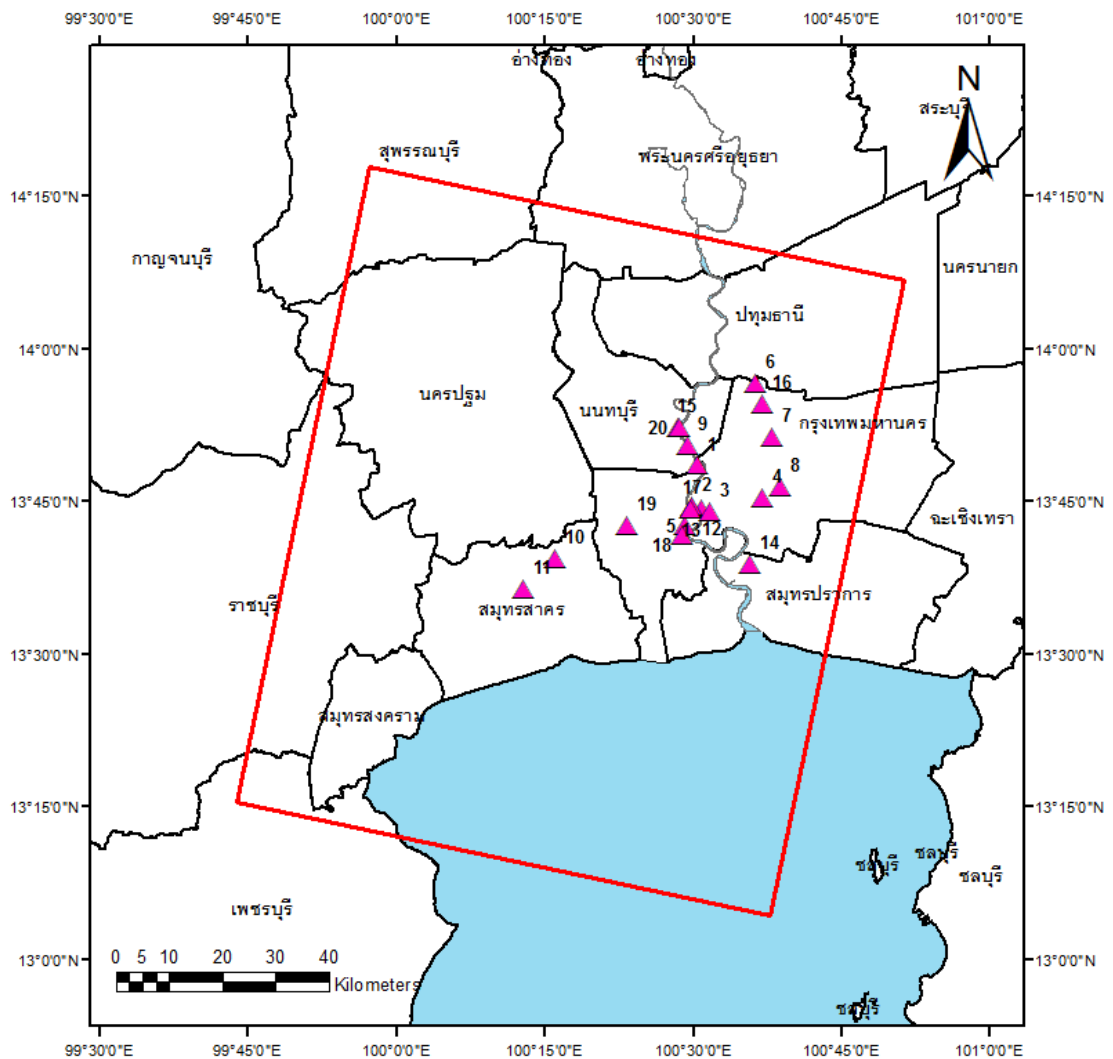
ในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 4 มม./ปี โดยจะสามารถสังเกตได้ว่าในพื้นที่บริเวณเมืองซึ่งมีจำนวนจุดตรวจสอบที่ค่อนข้างหนาแน่นนั้น ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าค่อนข้างน้อยโดยอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2 มม./ปี แต่ในส่วนที่ไม่ใช่บริเวณเมืองหรือพื้นที่ที่มีจำนวนจุดตรวจสอบค่อนข้างเบาบางค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ โดยดังที่แสดงในผลลัพธ์นั้นจะสามารถสังเกตได้ว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในบริเวณเมืองนั้นจะมีค่าน้อยและจะยังมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามลำดับเมื่อมีระยะห่างออกจากเมืองไป



รูปที่ 4.7 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่ของอัตราการทรุดตัวในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 โดยค่าในแกนนอนคือค่าอัตราการทรุดตัว (มม./ปี) และแกนตั้งคือจำนวนจุด โดยแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้นั้นมีอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 13 มม./ปี

4.2 ผลการตรวจสอบการสอดคล้องกันของผลลัพธ์ของอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากการประมวลผล InSAR กับข้อมูลที่ได้จากงานระดับชั้นหนึ่งด้วยค่าสถิติ t-test

การตรวจสอบความสอดคล้องกันของค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากการประมวลผล InSAR และงานระดับชั้นหนึ่งนั้นใช้การตรวจสอบด้วยค่าสถิติ t-test โดยมีหมวดระดับที่ 1.) มีข้อมูลค่าระดับในปี ค.ศ. 1996-2000 2.) มีตำแหน่งอยู่ภายในบริเวณรอบพื้นที่การวิจัย 3.) เป็นหมวดระดับชนิดแบบแขวนอยู่กับตัวอาคารหรือเป็นหมวดที่มีการขุดฝังฐานรากลึกลงไปที่มีความลึกประมาณเดียวกับสิ่งก่อสร้างหรืออาคาร ในการนำมาตรวจสอบทั้งหมด 34 หมวดดังที่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 รายละเอียดหมวดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR แต่ในงานวิจัยนี้จะต้องทำการคัดหมวด BM. 17, BM. 19, BM. 25, BM. 28, BM. 30, BM. 32, BM. 36, BM. 37, BM. 41, BM. 48, กทม. 313, กทม. 315 และ กทม. 339 ออกไม่นำมาทำการตรวจสอบเพราะเนื่องจากว่าหมวดเหล่านี้ไม่มีจุด PS ตกอยู่ภายในระยะรัศมี 100 เมตรรอบหมวดเนื่องจากในเรื่องสมมติฐานที่ว่าธรรมชาติของการทรุดตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่น ทำให้อัตราการทรุดตัวจะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน การคัดเลือกจึงต้องใช้จุดการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR ที่อยู่ในระยะใกล้หมวดระดับมาตรวจสอบ เพราะถ้าหากอยู่ในระยะห่างมากจะถือว่าอัตราการทรุดตัวนั้นแปรเปลี่ยนไปแล้วจะทำให้หน้าหมวดระดับนั้นมาใช้ตรวจสอบไม่ได้ เพราะฉะนั้นจะเหลือหมวดที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบได้ทั้งหมด 21 หมวดโดยแสดงการกระจายตัวดังในรูปที่ 4.2 แต่เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้ได้มีการนำหมวด กทม.140 ไปใช้ในการปรับค่าเพราะฉะนั้นจะเหลือหมวดระดับที่ตรวจสอบได้ 20 หมวดดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 และทำการแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งหมู่ระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR และ ค่าระดับ โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์สามเหลี่ยม และกรอบสีแดงแสดงพื้นที่ศึกษา กำหนดโดย footprint ของภาพจาก ดาวเทียม ERS2 ในวงโคจรขาลง

ค่าผลลัพธ์ในการตรวจสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในตารางจะแสดงถึงค่า t ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (8) และค่า $t_{\text{threshold}}$ ซึ่งถ้าหากค่าสัมบูรณ์ของ t ไม่เกินค่า $t_{\text{threshold}}$ จะหมายความว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน โดยจากผลลัพธ์ในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการหลุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR มีความสอดคล้องกับค่าอัตราการหลุดตัวที่ได้จากงานระดับอยู่ 15 หมู่ จากทั้งหมด 20 หมู่ หรือประมาณ 75% ซึ่งมีค่า t ที่เกิน $t_{\text{threshold}}$ อยู่ทั้งหมด 5 หมู่ โดยเป็นหมู่ที่

- มีค่าอัตราการหลุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่างานระดับ 2 หมู่ (-)
- มีค่าอัตราการหลุดตัวจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่างานระดับ 3 หมู่ (+)

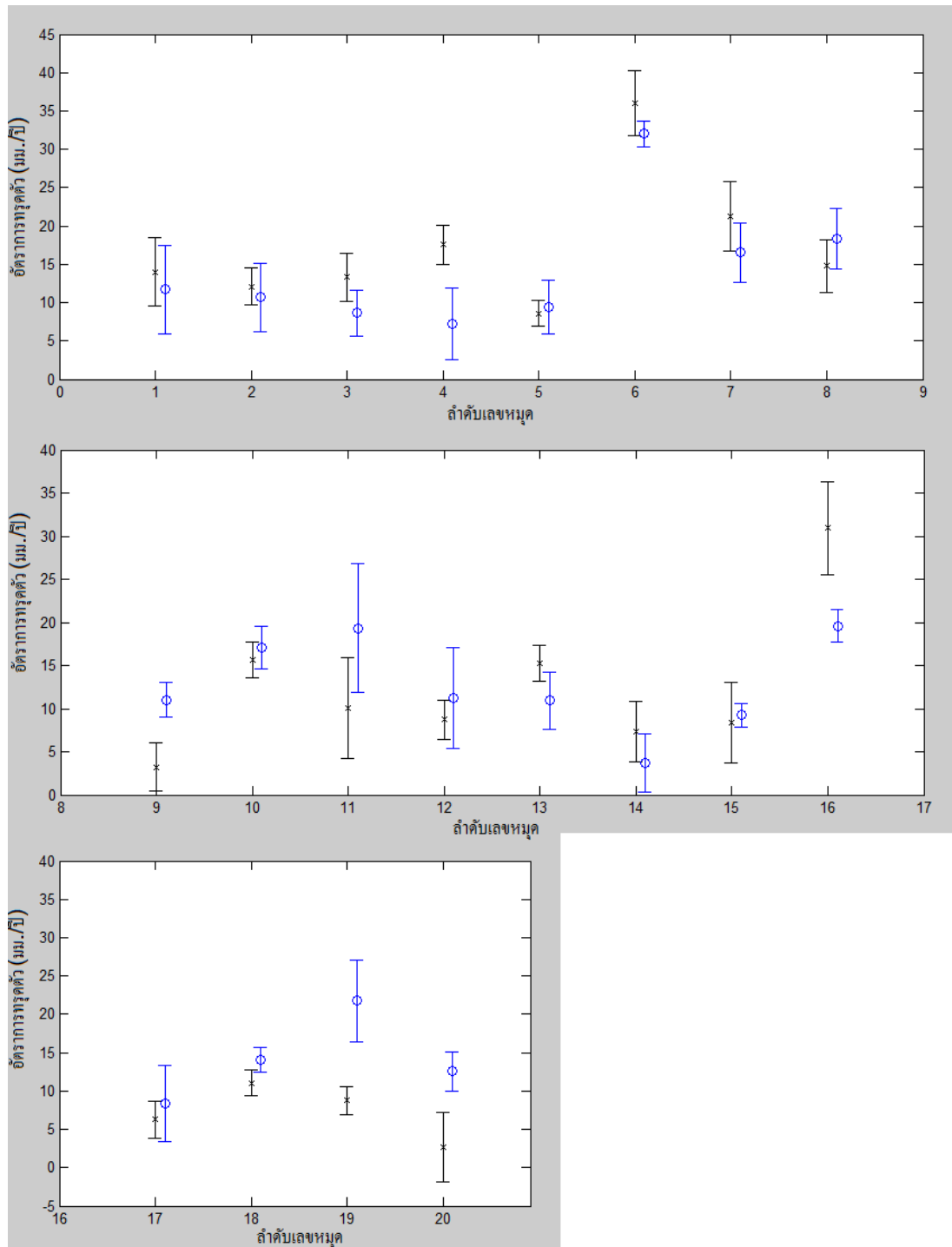
ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์แสดงความสอดคล้องกันของข้อมูลอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR และงานระดับโดยใช้การทดสอบ t-test โดยจะแสดงค่า t , $t_{\text{threshold}}$ และสัญลักษณ์ในคอลัมน์สุดท้ายจะแสดงถึง

รายละเอียดข้อมูลจากงานระดับ (leveling) และข้อมูลจากการประมวลผล InSAR โดย n คือจำนวนข้อมูล, v คือ ค่าอัตราการทรุดตัวโดยมีหน่วยเป็น มม./ปี, sd คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยมีหน่วยเป็น มม./ปี

รายละเอียดข้อมูลจากการตรวจสอบด้วยวิธี t-test โดย dof คือ ค่า degree of freedom, threshold คือ ค่า threshold ของค่า t , ค่า t คือค่า t ที่คำนวณได้จากสมการที่ [8], Check คือ ค่าผลลัพธ์การตรวจสอบความสอดคล้อง โดยที่

- หมุดที่มีความไม่สอดคล้อง โดยอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ช้ากว่างานระดับ
- + หมุดที่มีความไม่สอดคล้อง โดยอัตราการทรุดตัวจาก InSAR เร็วกว่างานระดับ
- 0 หมุดที่มีความสอดคล้อง
- R หมุดที่ใช้ในการ Offset ค่าการทรุดตัว

ลำดับ	หมุด	บริเวณพื้นที่ติดตั้งหมุด	leveling			Time-series InSAR			t-test			
			n	v (mm/yr)	sd	n	v (mm/yr)	sd	dof	threshold	ค่า t	Check
1	BM.1	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางกรวย	5	13.98	2.22	2	11.72	2.89	5	2.571	-0.554	0
2	BM.7	วัดราชบูรณะ (วัดเลียบ)	5	12.06	1.20	3	10.69	2.21	6	2.447	-0.357	0
3	BM.8	คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาฯ	5	13.30	1.56	3	8.62	1.47	6	2.447	-1.837	0
4	BM.10	มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก	4	17.55	1.26	2	7.22	2.33	4	2.776	-3.133	-
5	BM.11	โรงพยาบาลสมเด็จพระปิ่นเกล้า	5	8.59	0.85	3	9.42	1.74	6	2.447	0.274	0
6	BM.15	บ่อบำบัดน้ำเสียดอนเมือง	5	36.00	2.14	11	32.00	0.82	14	2.145	-1.465	0
7	BM.16	กองบิน สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ถ.รามอินทรา	5	21.23	2.28	3	16.53	1.96	6	2.447	-1.387	0
8	BM.18	คลังพัสดุการเคหะ คลองจั่น ถนนวิภาวดี	5	14.77	1.74	3	18.31	1.95	6	2.447	1.048	0
9	BM.33	วิทยาลัยมหาดไทย	5	3.24	1.40	6	11.03	0.99	9	2.262	3.200	+
10	BM.39	โรงเรียนเทศบาลศรีบุญยานุสรณ์	5	15.62	1.05	10	17.10	1.22	13	2.16	0.383	0
11	BM.49	วัดสุนทรสถิต	5	10.05	2.95	2	19.35	3.72	5	2.571	1.769	0
12	กทม.106	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งพระนคร	5	8.71	1.16	2	11.19	2.93	5	2.571	0.599	0
13	กทม.113	สะพานคลองผดุงกรุงเกษม	5	15.25	1.03	3	10.93	1.65	6	2.447	-1.510	0
14	กทม.176	สะพานคลองสำโรง ถ.สุขุมวิท	4	7.29	1.75	5	3.72	1.70	7	2.365	-0.936	0
15	กทม.284	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันออก	5	8.38	2.37	7	9.27	0.68	10	2.228	0.494	0
16	กทม.320	โคนเสาสะพานลอยหน้าโรงพยาบาลภูมิพล	5	30.93	2.71	6	19.57	0.93	9	2.262	-4.970	-
17	กทม.502	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งธนบุรี	5	6.30	1.20	2	8.35	2.46	5	2.571	0.591	0
18	กทม.514	สำนักงาน รักษาความสะอาด เขตบางขุนเทียน	5	11.02	0.83	10	14.06	0.81	13	2.16	1.180	0
19	กทม.640	โคนเสาสะพานลอยวัดม่วง	5	8.74	0.89	3	21.77	2.67	6	2.447	2.814	+
20	กทม.682	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันตก	5	2.68	2.24	3	12.57	1.28	6	2.447	4.445	+
21	กทม.140	การไฟฟ้านครหลวงคลองเตย	5	15.16	1.76	4	15.16	1.41	-	-	-	R



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าอัตราการทรุดตัวและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล InSAR และจากงานระดับ โดยแกน y คือค่าอัตราการทรุดตัว (มม./ปี) และแกน x คือหมุดระดับที่นำมาตรวจสอบทั้ง 20 หมุด โดยในแต่ละหมุดนั้นกราฟสีดำคือค่าผลลัพธ์จากงานระดับ และกราฟสีน้ำเงินคือผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR

โดยหมุด BM.33, กทม.640, กทม.682 เป็นหมุดที่มีอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่าอัตราการทรุดตัวจากค่าระดับ ซึ่งอาจจะสามารถอธิบายได้จากเรื่องลักษณะของการสะท้อน (Scatter) ของคลื่น โดยสาเหตุที่คาดว่าน่าจะมาจากการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Double-bounce Scattering คือปรากฏการณ์ที่คลื่นที่สะท้อนกลับมาที่ตัวเซ็นเซอร์นั้นมีการสะท้อนกับวัตถุ 2 ครั้งแล้วค่อยสะท้อนกลับเข้ามาทิศทางเดิม โดยที่วัตถุหนึ่งอาจอยู่ในแนวราบและอีกวัตถุหนึ่งอาจอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งผลของการเกิด double-bounce scattering นั้นจะทำให้อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือหมายถึงเร็วขึ้นมากกว่าปกติ ซึ่งลักษณะของพื้นที่ของทั้ง 3 หมุดในหัวข้อนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีลักษณะที่ค่อนข้างเอื้ออำนวยต่อกลไกการเกิด Double-bounce Scattering เพราะเนื่องจากจะสังเกตเห็นได้ว่าเป็นพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหรืออาคารอยู่ แต่อยู่ในระดับค่อนข้างเบาบางซึ่งส่งผลให้มีช่องว่างหรือมีลานกว้างสลับอยู่กับอาคาร จึงอาจจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Double-bounce Scattering ขึ้นได้ จึงทำให้ค่าผลลัพธ์ในการตรวจสอบที่ออกมาไม่มีค่าการทรุดตัวเร็วกว่าค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากหมุดระดับ

BM.33



กทม.640



กทม.682



รูปที่ 4.10 พื้นที่รอบบริเวณหมุด (สัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีแดง) และจุดตรวจสอบ (สัญลักษณ์วงกลมสีเขียว) ที่มีค่าการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องโดยใช้การตรวจสอบ t-test โดยมีอัตราการหลุดตัวจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่าจากงานระดับ โดยเป็นหมุด BM.33, กทม.640 และ กทม.682 (เป็นภาพในปี ค.ศ 2002 และ 2004 จากโปรแกรม google earth)

แต่ในทางตรงกันข้ามหมุด BM.10 และ กทม.320 ซึ่งมีอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่าอัตราการทรุดตัวจากค่าระดับนั้น อาจจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการ Unwrap ข้อมูลค่าเฟสที่ได้มีการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2) เพราะเนื่องมาจากว่าพื้นที่ทั้งสองบริเวณมีจำนวนจุดที่ค่อนข้างเบาบาง

BM.10



กทม.320



รูปที่ 4.11 พื้นที่รอบบริเวณหมุด (สัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีแดง) และจุดตรวจสอบ (สัญลักษณ์วงกลมสีเขียว) ที่มีค่าการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องโดยใช้การตรวจสอบ t-test โดยมีอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่าจากงานระดับ โดยเป็นหมุด BM.10 และ กทม.320 (โดยเป็นภาพในปี ค.ศ. 2004 จากโปรแกรม google earth)

บทที่ 5

การนำข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ในงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

การนำข้อมูลผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้มีมาวิเคราะห์ร่วมกับ งานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ซึ่งใช้การประมวลผล Time-series InSAR และเป็นพื้นที่บริเวณ กรุงเทพมหานครเช่นเดียวกัน แต่ตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวคนละช่วงเวลากัน ซึ่งเป็นการ ตรวจสอบการทรุดตัวในช่วงเวลาปี 2005-2010 และ 2009-2012 ตามลำดับ โดยจะเป็นการ ประมวลผลทำแผนที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและแผนที่ค่าการทรุดตัวสะสม ในช่วงปี 1996-2012 ในส่วนพื้นที่ซ้อนทับกันจากทั้งสามงานวิจัย

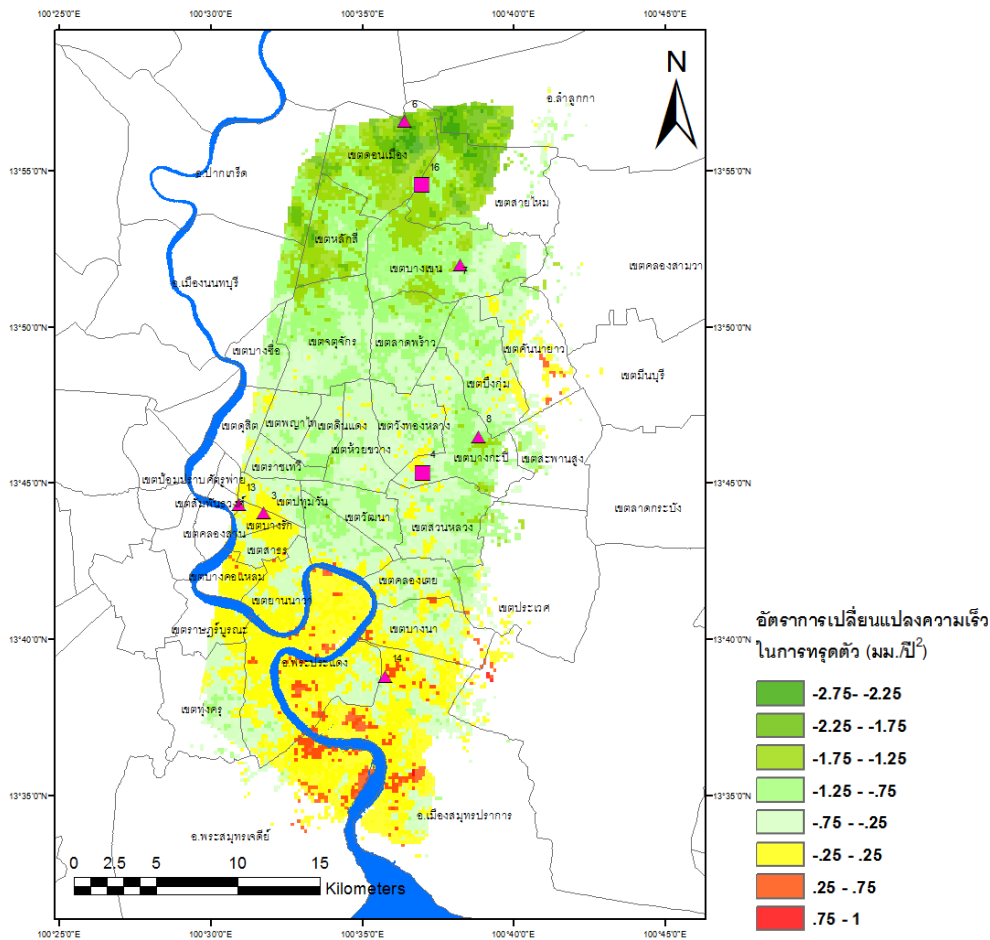
5.1 คุณภาพแผนที่แสดงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวสะสม ในช่วงปี 1996-2012

ความน่าเชื่อถือของแผนที่ผลลัพธ์นั้น เนื่องจากผลลัพธ์ได้มาจากการนำผลลัพธ์จากงานวิจัย ทั้งสามงานมาใช้ในการประมวลผล เพราะฉะนั้นคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จึงมีผลมาจากคุณภาพของ ข้อมูลที่นำเข้ามาใช้ในการประมวลผล ซึ่งคุณภาพของทั้งสามงานวิจัยนั้นใช้วิธีการตรวจสอบแบบ เดียวกันทั้งหมด คือการใช้การตรวจสอบการสอดคล้องกันของผลลัพธ์ของอัตราการทรุดตัวจากการ ประมวลผล InSAR กับข้อมูลอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับชั้นหนึ่งด้วยค่าสถิติ t-test ซึ่งมี รายละเอียดเกี่ยวกับผลลัพธ์ในส่วนนี้ดังนี้

ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ในช่วงปี 1996-2000

มีหมุดตรวจสอบอยู่ในพื้นที่ซ้อนทับทั้งหมด 8 หมุด ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีหมุดที่ค่าอัตรา การทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR มีความสอดคล้องกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงาน ระดับอยู่ทั้งหมด 6 หมุด โดยคิดเป็นร้อยละ 75 โดยหมุดที่มีความไม่สอดคล้องกันทั้ง 2 หมุดนั้นมีค่า อัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่างานระดับทั้งสิ้น โดยในส่วนพื้นที่บริเวณที่ค่า อัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR ไม่สอดคล้องกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงาน ระดับนั้นอาจจะทำให้พื้นที่ในบริเวณนั้นมีค่าผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนไปได้ ซึ่งด้วยที่ในงานวิจัยนี้ใช้

ข้อมูลงานระดับมาใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ถ้าหากในความเป็นจริงพื้นที่บริเวณเหล่านั้นมีค่าการทรุดตัวเป็นไปตามค่าจากงานระดับ ถ้าหากพิจารณาในส่วนของค่าการทรุดตัวสะสมอาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมาในพื้นที่บริเวณนั้นมีลักษณะการประเมินค่าต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimate) เพราะฉะนั้นในความเป็นจริงแล้วพื้นที่บริเวณเหล่านั้นอาจมีการทรุดตัวสะสมที่มากกว่าที่ผลลัพธ์แสดง ซึ่งมีค่าการทรุดตัวสะสมอยู่ที่ประมาณ 18.1 เซ็นติเมตรและ 21.6 เซ็นติเมตรตามลำดับ และในทางตรงกันข้ามผลลัพธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวนั้น ด้วยค่าอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2000 ที่ได้จากการประมวลผล InSAR ที่แสดงผลออกมานั้นอาจมีค่าการทรุดตัวที่ช้ากว่า จึงส่งผลให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวในบริเวณพื้นที่นั้นๆ อาจมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ช้าลง (อัตราหน่วง) มากกว่าที่แสดงในผลผลลัพธ์ได้ซึ่งก็คือผลลัพธ์ที่แสดงออกมาของพื้นที่บริเวณทั้งสองนั้นมีลักษณะการประเมินค่าต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimate) เช่นกันแต่เป็นการประเมินค่าที่ต่ำกว่าในทางที่ดีขึ้น



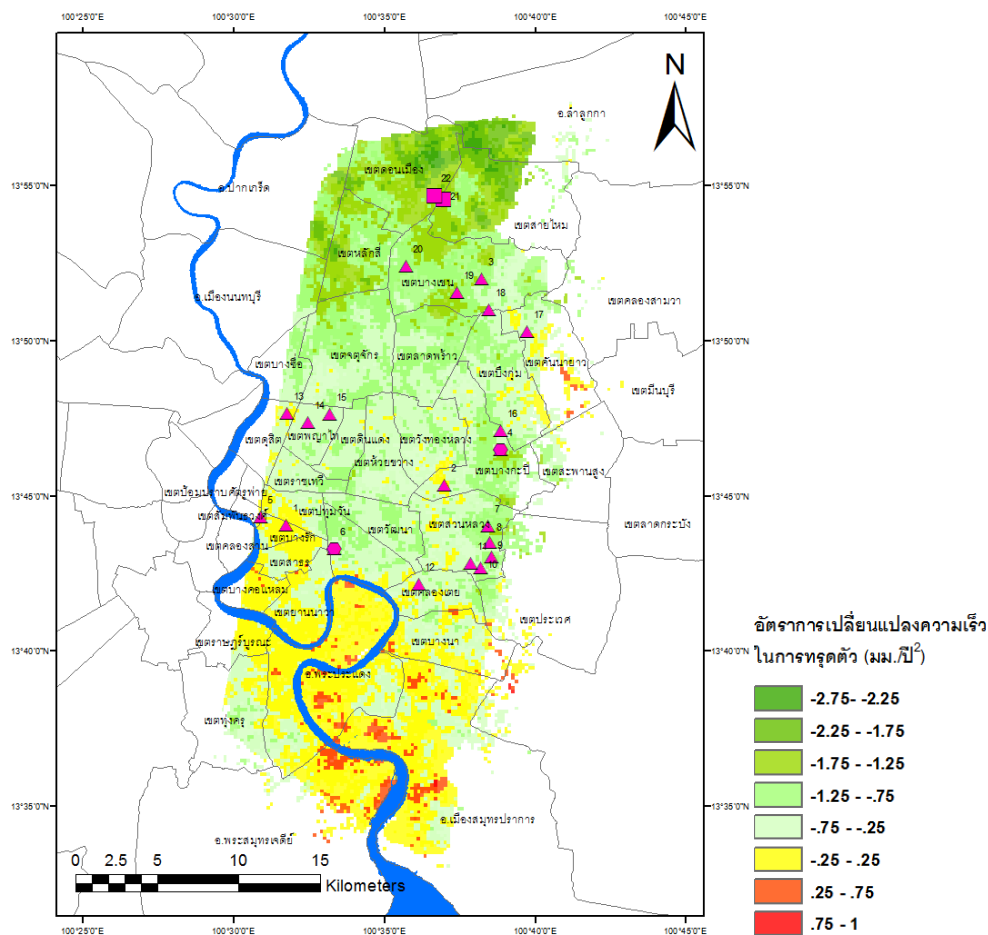
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งหุดระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 1996-2000 โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือหุดที่ค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR มีความสอดคล้องกันกับค่าจากหุดระดับ ส่วนสีเหลี่ยมคือหุดที่ค่าไม่สอดคล้องโดยมีค่าจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่าค่าจากงานระดับ โดยเป็นหมายเลขหุดตามตารางที่ 4.1

ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ในช่วงปี 2005-2010 จากงานวิจัย

Aobpaet et al (2012)

ในหุดตรวจสอบทั้งหมดในงานวิจัย Aobpaet et al (2012) มีหุดตรวจสอบอยู่ในพื้นที่ซ้อนทับทั้งหมด 22 หุด ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าในงานวิจัยนี้มีจำนวนหุดระดับในการตรวจสอบที่มากกว่างานวิจัยที่ใช้ตรวจสอบในช่วงปี 1996-2000 อาจเนื่องมาจากหุดที่เพิ่มขึ้นมาเหล่านี้จะเป็นหุดระดับที่เพิ่งมีการติดตั้งขึ้นใหม่หลังจากช่วงเวลาหลังจากช่วงเวลาปี 2000 หรืออาจเกิดจากช่วงเวลาเหล่านี้จะมีการติดตั้งหุดแล้ว แต่ว่าข้อมูลค่าความสูงในช่วงปีนั้นๆขาดไปไม่มีการบันทึกอย่างเป็นระบบจนทำให้ไม่สามารถนำมาประมวลผลได้ ซึ่งมีหุดที่ค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้

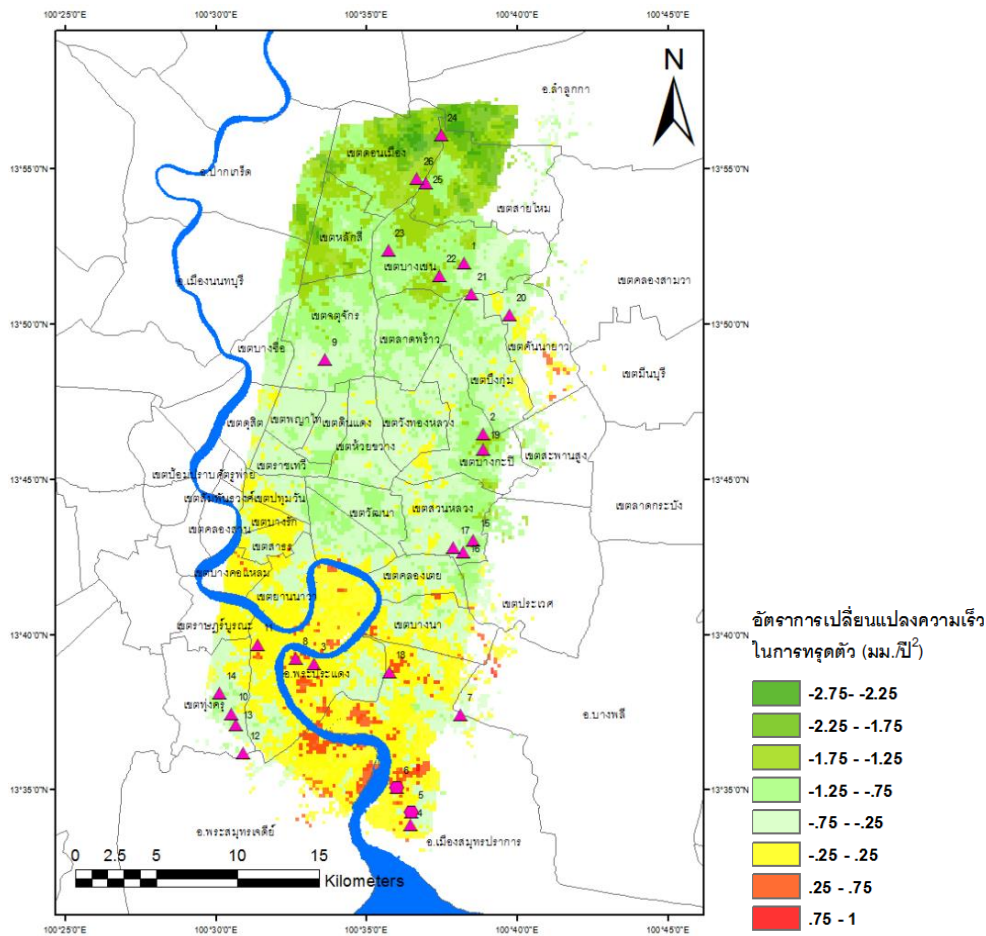
จากการประมวลผล InSAR มีความสอดคล้องกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับอยู่ทั้งหมด 18 หมู่ โดยคิดเป็นร้อยละ 81 โดยหมู่ที่มีความไม่สอดคล้องกันทั้ง 4 หมู่ นั้น เป็นหมู่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่างานระดับ 2 หมู่ และเป็นหมู่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่างานระดับ 2 หมู่ ดังแสดงตำแหน่งด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมและห้าเหลี่ยมในรูปที่ 5.2 ซึ่งด้วยลักษณะที่มีความคลาดเคลื่อนและช่วงเวลาของงานวิจัยนั้นอยู่ตรงส่วนกลางของข้อมูลที่นำมาประมวลผล จึงทำให้การคาดการณ์ผลจากความคลาดเคลื่อนต่อค่าผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวหรือการทรุดตัวสะสมนั้นเป็นไปค่อนข้างยาก



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งหมู่ระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 2005-2010 จากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือหมู่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR มีความสอดคล้องกันกับค่าจากหมู่ระดับ ส่วนสี่เหลี่ยมคือหมู่ที่มีค่าไม่สอดคล้องโดยมีค่าจากการประมวลผล InSAR ช้ากว่าค่าจากหมู่ระดับ ส่วนห้าเหลี่ยมคือหมู่ที่มีค่าไม่สอดคล้องโดยมีค่าจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่าค่าจากงานระดับ

ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR ในช่วงปี 2009-2012 จากงานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015)

มีหมุดตรวจสอบอยู่ในพื้นที่ซ้อนทับทั้งหมด 26 หมุด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งมีหมุดที่ค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการประมวลผล InSAR มีความสอดคล้องกับค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับอยู่ทั้งหมด 24 หมุด โดยคิดเป็นร้อยละ 92 โดยหมุดที่มีความไม่สอดคล้องกันทั้ง 2 หมุดนั้นมีค่าอัตราการทรุดตัวจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่างานระดับ ถ้าหากพิจารณาในส่วนของการทรุดตัวสะสมอาจจะทำให้ค่าที่ออกมาบริเวณนั้นมีลักษณะการประเมินค่าเกินกว่าความเป็นจริง (Overestimate) ที่พื้นที่บริเวณนั้นมีค่าการทรุดตัวสะสมประมาณ 23.8 เซ็นติเมตรและ 22.6 เซ็นติเมตรตามลำดับ และในทางตรงกันข้ามผลลัพธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวนั้นด้วยค่าที่ค่าอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2009-2012 ที่ได้จากการประมวลผล InSAR ที่แสดงผลออกมานั้นอาจมีค่าการทรุดตัวที่เร็วกว่า จึงส่งผลให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวในบริเวณพื้นที่นั้นๆ อาจมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ช้าลง (อัตราหน่วง) มากกว่าที่แสดงในผลลัพธ์ได้ซึ่งเป็นการประเมินค่าที่ต่ำกว่าในทางที่ดีขึ้น



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งหุมุระดับที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ของช่วงปี 2009-2012 จากงานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015) โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์สามเหลี่ยมคือหุมุค้ำค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR มีความสอดคล้องกันกับค่าจากหุมุระดับ ส่วนห้าเหลี่ยมคือหุมุค้ำค่าไม่สอดคล้องโดยมีค่าจากการประมวลผล InSAR เร็วกว่าค่าจากงานระดับ

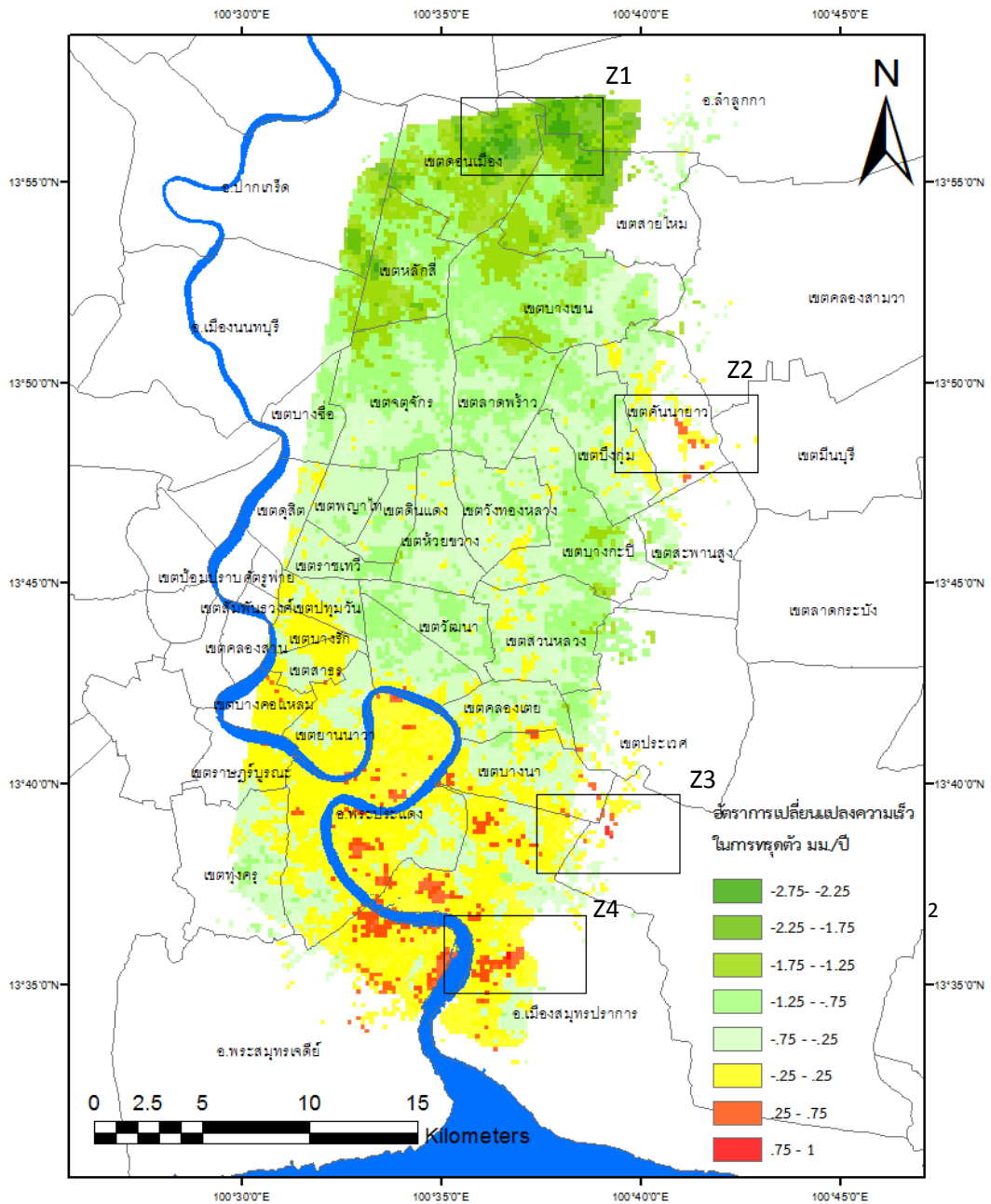
5.2 ผลลัพธ์การนำข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผล InSAR ในงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลจากการนำข้อมูลผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้มาวิเคราะห์ร่วมกับ งานวิจัย Aobpaet et al (2012) และ สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ซึ่งใช้การประมวลผล Time-series InSAR และเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครเช่นเดียวกัน แต่ตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวคนละช่วงเวลากัน ซึ่งเป็นการตรวจสอบการทรุดตัวในช่วงเวลาปี 2005-2010 และ 2009-2012 ตามลำดับ จะสามารถสังเกตได้ว่า มีขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างน้อยถ้าหากเปรียบเทียบกับขอบเขตข้อมูลผลลัพธ์หาการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2000 เพราะเนื่องจากว่าสามารถทำการประมวลผลได้เฉพาะในพื้นที่ที่มี

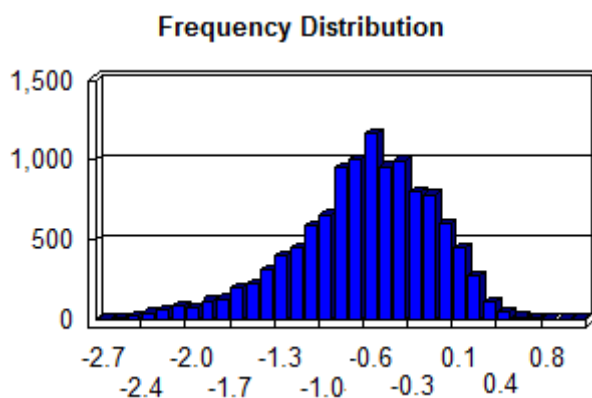
ส่วนซ้อนทับกันของทั้งสามงานวิจัยเท่านั้น ซึ่งภาพจากข้อมูลทั้งสามงานวิจัยนั้นมาจากคนละดาวเทียมกัน จึงมีระบบในการบันทึกภาพพื้นที่ที่ไม่สอดคล้องกันจึงทำให้มีส่วนที่ซ้อนทับกันของข้อมูลค่อนข้างน้อยดังแสดงในรูปที่ 1.1 และเนื่องจากในพื้นที่ที่มีส่วนทับกันของรูปภาพทั้งสามดาวเทียมนี้ในส่วนทางซีกตะวันออกของพื้นที่ที่ซ้อนทับกันนั้นเป็นพื้นที่ที่ข้อมูลผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้ (ดาวเทียม ERS1/2) มีข้อมูลจุดตรวจสอบค่อนข้างเบาบางจนถึงไม่มีเลยจึงทำให้ไม่สามารถประมวลผลในบริเวณพื้นที่เหล่านี้ได้ด้วย แต่ในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้มานั้นก็มีความครอบคลุมในส่วนพื้นที่สำคัญหลายส่วน ทั้งตอนกลางทั้งหมดของกรุงเทพมหานครจนถึงจังหวัดสมุทรปราการบางส่วน โดยมีขนาดพื้นที่ศึกษาประมาณ 460 ตารางกิโลเมตร

แผนที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2012

จากผลลัพธ์ที่ทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2012 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งใช้ข้อมูลจากทั้งสามงานวิจัยมาทำการประมวลผล linear regression พบว่าในพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นพบพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการทรุดตัวทั้งที่เร็วขึ้น ทรงตัว และช้าลง โดยมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวอยู่ในช่วง -2.7 ถึง 1 มม./ปี² โดยค่าลบนั้นหมายถึงพื้นที่นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ช้าลง (อัตราหน่วง) ส่วนค่าบวกนั้นหมายถึงพื้นที่นั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่เร็วขึ้น (อัตราเร่ง) โดยในงานวิจัยนี้ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวในช่วง -0.25 ถึง 0.25 มม./ปี² เป็นแนวโน้มการทรุดตัวที่ทรงตัว ซึ่งจากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่ศึกษานั้นมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ช้าลง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ว่าจะอยู่ในขอบเขตจังหวัดกรุงเทพมหานครเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ทรงตัวหรือหมายถึงพื้นที่ที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงค่าการทรุดตัวนั้นจะอยู่ในบริเวณจังหวัดสมุทรปราการและบริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาในกรุงเทพมหานครเป็นส่วนใหญ่ ส่วนพื้นที่ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่เร็วขึ้นนั้นมีย่านค่อนข้างน้อยโดยมีพื้นที่ประมาณเพียงร้อยละ 4 ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมดโดยแสดงการกระจายตัวของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวของทั้งพื้นที่งานวิจัยดังในรูปกราฟฮิสโทแกรมในรูปที่ 5.5 โดยจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวของทั้งพื้นที่ศึกษานั้นอยู่ที่ประมาณ -0.6 มม./ปี²



รูปที่ 5.4 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลในตัวในช่วงปี 1996-2012 โดยพื้นที่ที่มีค่าน้อยกว่า -0.25 คือพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลในตัวที่ช้าลง (อัตราหน่วง) พื้นที่ที่มีค่าภายใน -0.25 ถึง 0.25 คือพื้นที่ที่มีค่าความเร็วในการไหลในตัวที่ทรงตัว และพื้นที่ที่มีค่ามากกว่า 0.25 คือพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลในตัวที่เร็วขึ้น (อัตราเร่ง) ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรปราการ

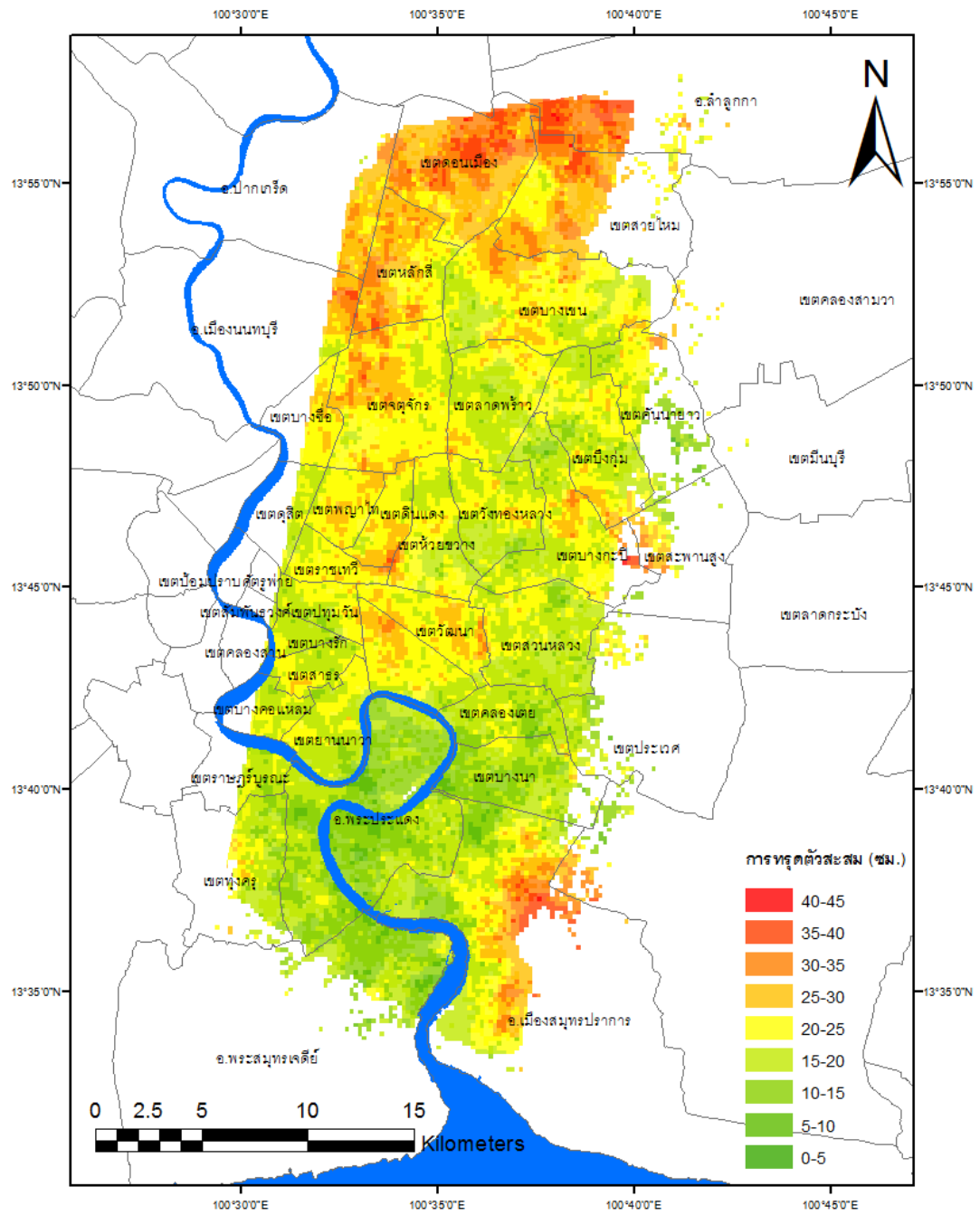


รูปที่ 5.5 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่โดยค่าในแกนนอนคือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหลุดตัว (มม./ปี²) และแกนตั้งคือจำนวนพื้นที่ โดยแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหลุดตัวอยู่ที่ประมาณ -0.6 มม./ปี²

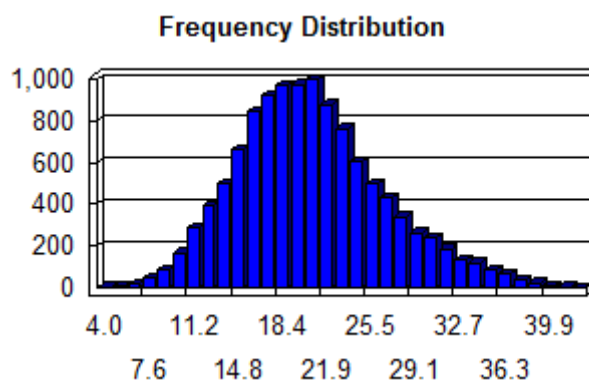
แผนที่แสดงการหลุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012

ผลลัพธ์ของการหลุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2000 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งใช้ข้อมูลจากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหลุดตัวมาใช้ในการประมวลผล พบว่าในพื้นที่การศึกษานั้นมีการหลุดตัวสะสมอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 42.3 เซ็นติเมตร โดยมีการแสดงการกระจายตัวของค่าการหลุดตัวสะสมในรูปกราฟฮิสโทแกรมในรูปที่ 5.7 โดยเห็นว่าค่าเฉลี่ยของค่าการหลุดตัวสะสมเฉลี่ยของทั้งพื้นที่ศึกษาอยู่ที่ประมาณ 21.1 เซ็นติเมตร โดยพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าการหลุดตัวสะสมอยู่ในช่วง 15.0-27.0 เซ็นติเมตรเกือบร้อยละ 80 ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด โดยในบริเวณเขตจังหวัดสมุทรปราการนั้นมีค่าการหลุดตัวสะสมที่ค่อนข้างน้อยกว่าพื้นที่อื่นๆในพื้นที่ศึกษาอาจเพราะเนื่องจากว่าในช่วงปี 1996-2000 บริเวณจังหวัดสมุทรปราการมีค่าอัตราการหลุดตัวที่ค่อนข้างน้อยจึงทำให้การหลุดตัวสะสมมานั้นมีค่าค่อนข้างน้อยตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันบริเวณทางเขตดอนเมืองและเขตสายไหมของกรุงเทพมหานครนั้นผลลัพธ์แสดงว่ามีค่าการหลุดตัวสะสมที่ค่อนข้างสูง โดยเป็นบริเวณพื้นที่ที่มีการหลุดตัวสะสมสูงที่สุดในพื้นที่ศึกษา อาจเพราะเนื่องจากว่าในช่วงปี 1996-2000 นั้นตรวจพบการอัตราการหลุดตัวที่ค่อนข้างสูงมากในพื้นที่สองบริเวณนี้จึงทำให้มีการหลุดตัวสะสมที่ค่อนข้างมาก

โดยจากผลลัพธ์รูปที่ 5.4 และ 5.6 ได้มีการแสดงตารางแสดงรายละเอียดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหลุดตัวและค่าการหลุดตัวสะสมโดยแบ่งตามพื้นที่เขตการปกครอง (ตำบล) ดังแสดงในภาคผนวก จ

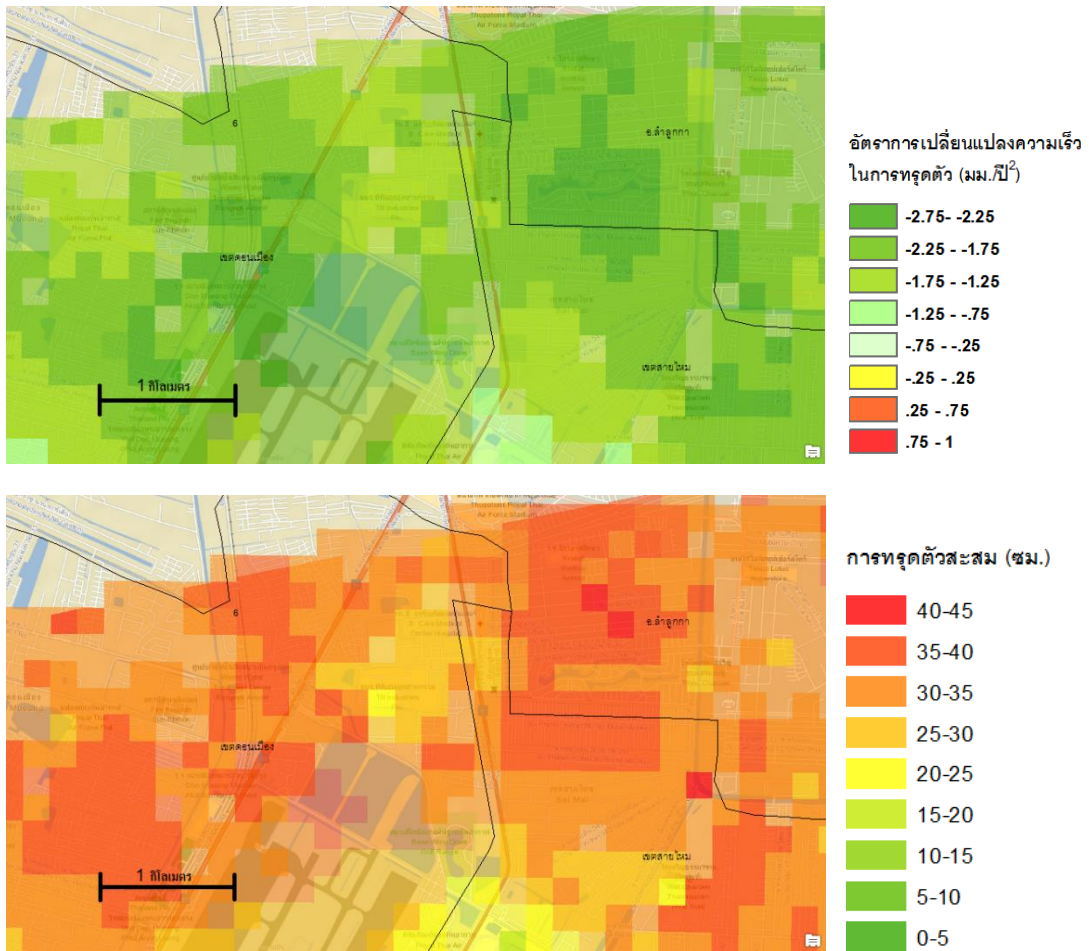


รูปที่ 5.6 ค่าการหาค่าเฉลี่ย (เซ็นติเมตร) ในช่วงปี 1996-2012 ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรปราการ



รูปที่ 5.7 กราฟฮิสโทแกรมแสดงความถี่ของการทรุดตัวสะสมโดยค่าในแกนนอนคือค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) และแกนตั้งคือจำนวนพื้นที่ โดยแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของผลลัพธ์ในงานวิจัยนั้นๆ มีการทรุดตัวสะสมอยู่ที่ประมาณ 21 เซนติเมตร

พื้นที่กรุงเทพมหานครนั้นจากผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวดังรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ช้าลงเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งรวมไปถึงพื้นที่บริเวณเขตสายไหมและดอนเมืองที่ตรวจพบว่ามีค่าอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างมากในช่วงปี 1996-2000 โดยมีค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 35 ถึง 44 มม./ปี โดยมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวเฉลี่ยทั่วทั้งเขตที่ช้าลง (อัตราหวน) ในระดับ -1.5 มม./ปี² ทั้งสองพื้นที่ โดยมีบางพื้นที่ของบริเวณแขวงสีกัน เขตดอนเมือง, แขวงสายไหม เขตสามไหม นั้นมีแนวโน้มทรุดตัวช้าลงมากถึงระดับ -2.7 ถึง -2.4 มม./ปี² ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่มากที่สุดในพื้นที่ศึกษา แต่ทั้งนี้พื้นที่บริเวณเขตดอนเมือง และเขตสายไหมบางส่วนนั้นเป็นพื้นที่ที่ควรให้การติดตามอย่างใกล้ชิดต่อไป เพราะถึงแม้จะมีแนวโน้มการทรุดตัวที่ช้าลงด้วยค่าที่ค่อนข้างสูงหรือหมายถึงเป็นบริเวณที่มีปัญหาการทรุดตัวน้อยลงกว่าในอดีตด้วยแนวโน้มที่ค่อนข้างมาก แต่ถ้าหากพิจารณาในส่วนของผลลัพธ์การทรุดตัวสะสมนั้นพื้นที่ทั้งสามเขตนี้นั้นมีการทรุดตัวสะสมตั้งแต่ปี 1996 ที่ค่อนข้างสูงถ้าหากเทียบภายในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดโดยในส่วนในพื้นที่เขตสายไหมและเขตดอนเมืองมีการทรุดตัวสะสมเฉลี่ยทั้งเขตอยู่ที่ 30.2 และ 27.9 เซนติเมตร โดยเฉพาะในพื้นที่แขวงสายไหม ในเขตสายไหมมีการทรุดตัวสะสมถึง 41.1 เซนติเมตร และพื้นที่แขวงสีกัน ในเขตดอนเมืองมีการทรุดตัวสะสมถึง 40.3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012 มากที่สุดในพื้นที่ศึกษาเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 5.8

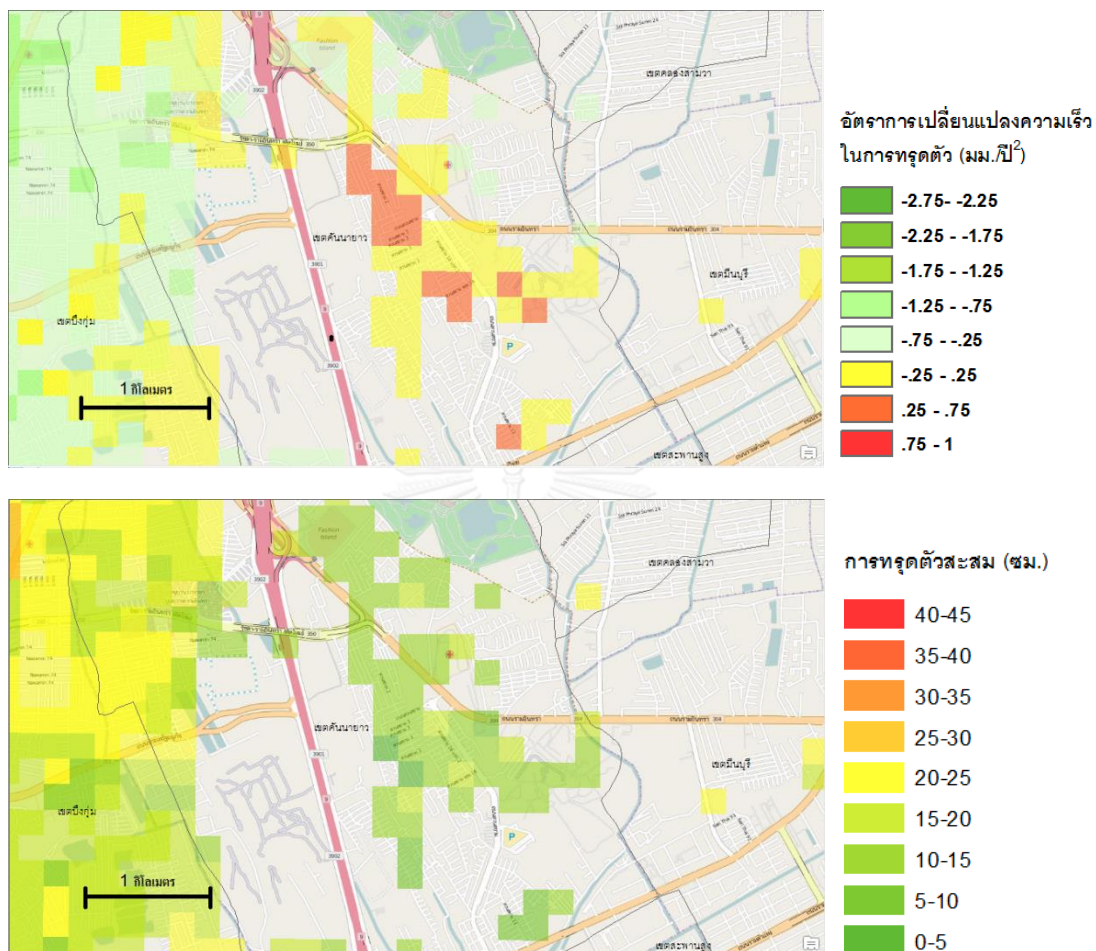


รูปที่ 5.8 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี²) ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) ของช่วงปี 1996-2012 โดยเป็นพื้นที่บริเวณ เขตดอนเมือง, เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร และ อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี โดยเป็นภาพขยายจากในกรอบ Z1 ในรูปที่ 5.4

ซึ่งในบริเวณกรุงเทพมหานครนั้นมีเขตนานาวา, เขตบางรักและเขตสาทร ที่ผลลัพธ์แสดงว่ามีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ค่อนข้างทรงตัวนับตั้งแต่ในปี 1996 เป็นต้นมาโดยมีค่าการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 10 มม./ปี ซึ่งส่งผลให้มีค่าการทรุดตัวสะสมเฉลี่ยในพื้นที่ของเขตเหล่านี้ที่ 18.4, 17.8 และ 19.4 เซนติเมตรตามลำดับ โดยเป็นค่าการทรุดตัวสะสมที่อยู่ในระดับปานกลางในพื้นที่ศึกษา

โดยในบริเวณกรุงเทพมหานครที่มีพื้นที่บริเวณ ซอยรามอินทรา 68 แขวงคันนายาว ในเขตคันนายาวที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่เร็วขึ้นค่อนข้างมาก โดยมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวมากถึงระดับ 0.6 มม./ปี² ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวเร็วขึ้นมากที่สุดในกรุงเทพมหานคร แต่ในพื้นที่บริเวณนั้นๆยังมีการทรุดตัวสะสมที่อยู่ในเกณฑ์

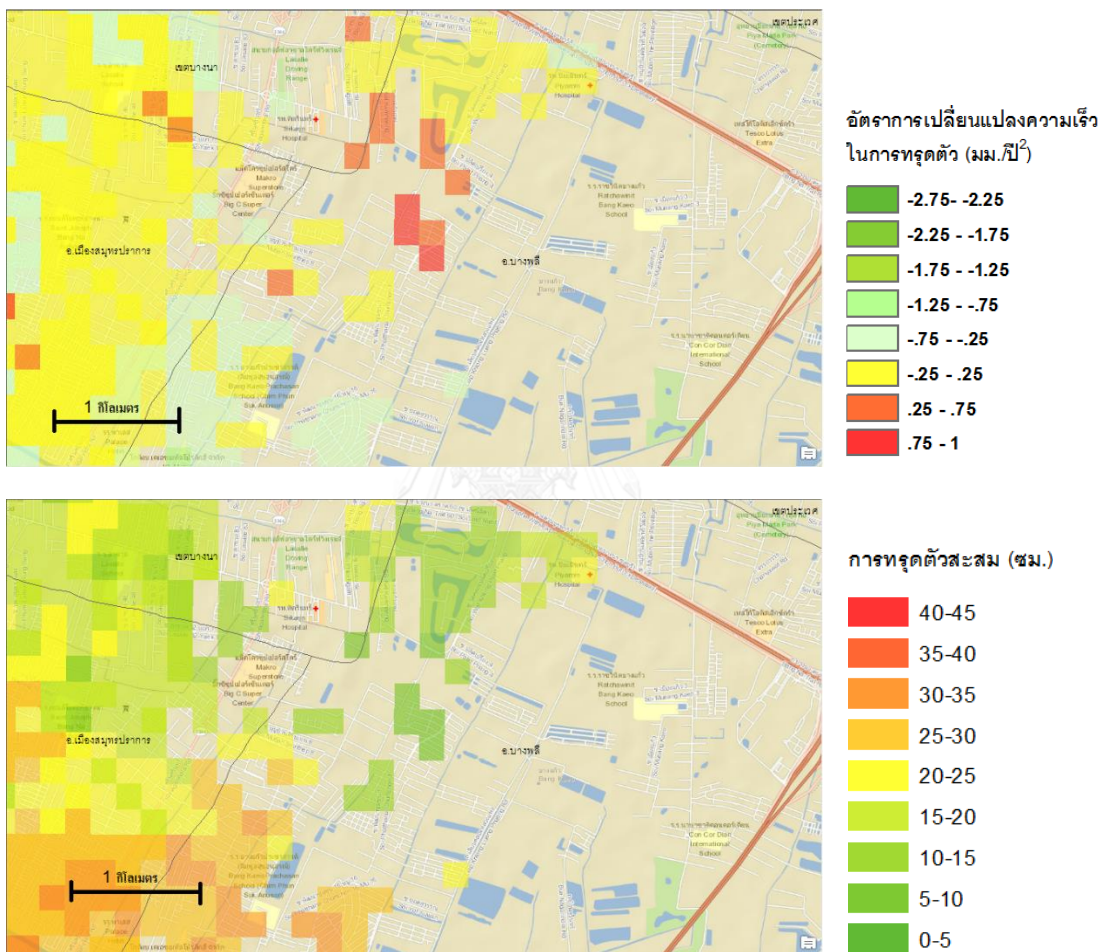
ค่อนข้างน้อยถ้าหากเทียบกับพื้นที่อื่นๆในพื้นที่ศึกษาโดยอยู่ค่าประมาณ 13.8 เซ็นติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี²) ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) ของช่วงปี 1996-2012 โดยเป็นพื้นที่บริเวณ ซอยรามอินทรา 68 แขวงคันนายาว ในเขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร โดยเป็นภาพถ่ายจากในกรอบ Z2 ในรูปที่ 5.4

ส่วนในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการนั้นจะประกอบไปด้วยทั้งพื้นที่ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวทั้งช้าลง ทรงตัว และเร็วขึ้นปะปนกันไป แต่ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่จะมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่ทรงตัวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการนั้นมีค่าการทรุดตัวสะสมที่น้อยกว่าพื้นที่ในกรุงเทพมหานครอาจเพราะเนื่องจากว่าในช่วงปี 1996-2000 บริเวณจังหวัดสมุทรปราการมีค่าอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างน้อยโดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 10 มม./ปี จึงทำให้การทรุดตัวสะสมมานั้นมีค่าค่อนข้างน้อยตามไปด้วย โดยพื้นที่ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่เร็วขึ้นส่วนใหญ่ของพื้นที่ศึกษานั้นอยู่ในเขตพื้นที่จังหวัด

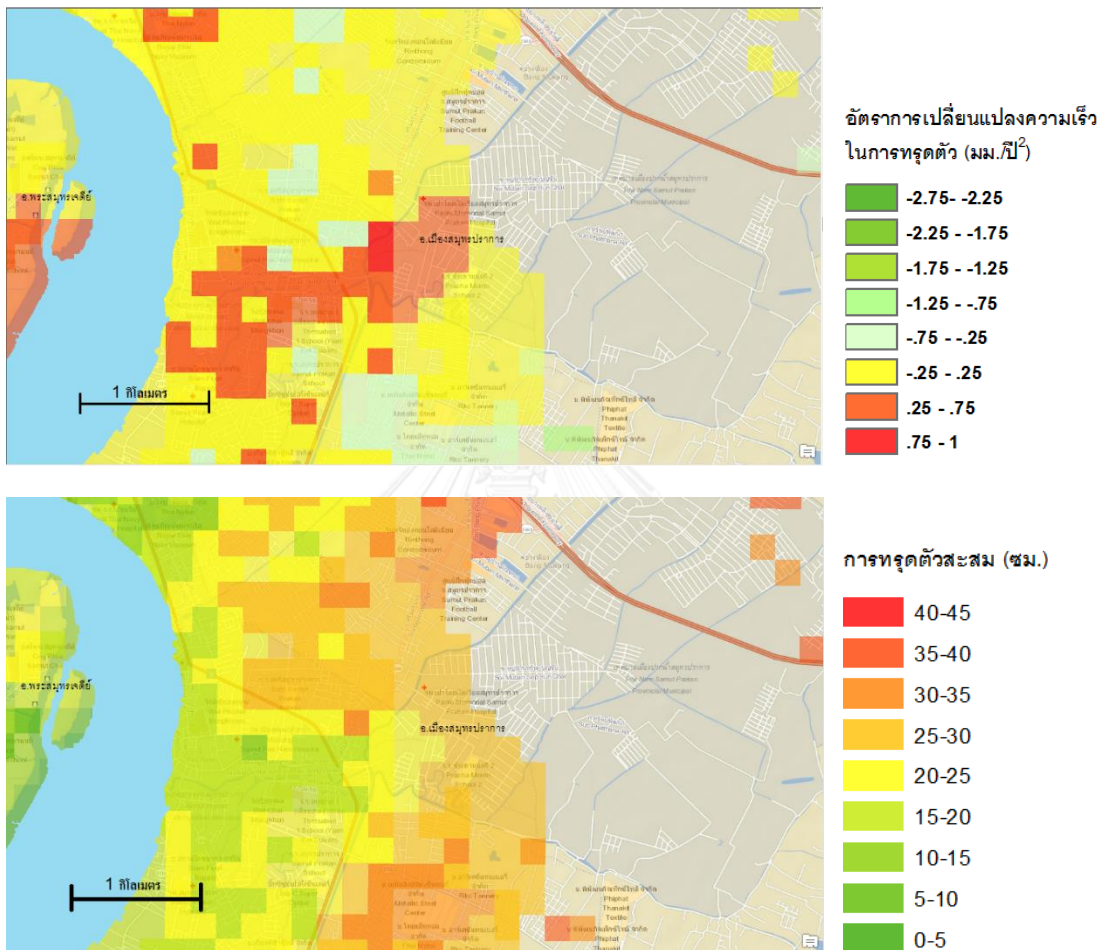
สมุทรปราการ โดยเฉพาะบริเวณวัดคลองปลัดเปรียง ต.บางแก้ว อ.บางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (อัตราเร่ง) ถึง 1 มม./ปี^2 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่มากที่สุดในพื้นที่ศึกษาแต่ค่าการทรุดตัวสะสมของบริเวณนี้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่น้อยกว่าพื้นที่อื่นในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าการทรุดตัวสะสมที่ประมาณ 5.6 เซนติเมตร



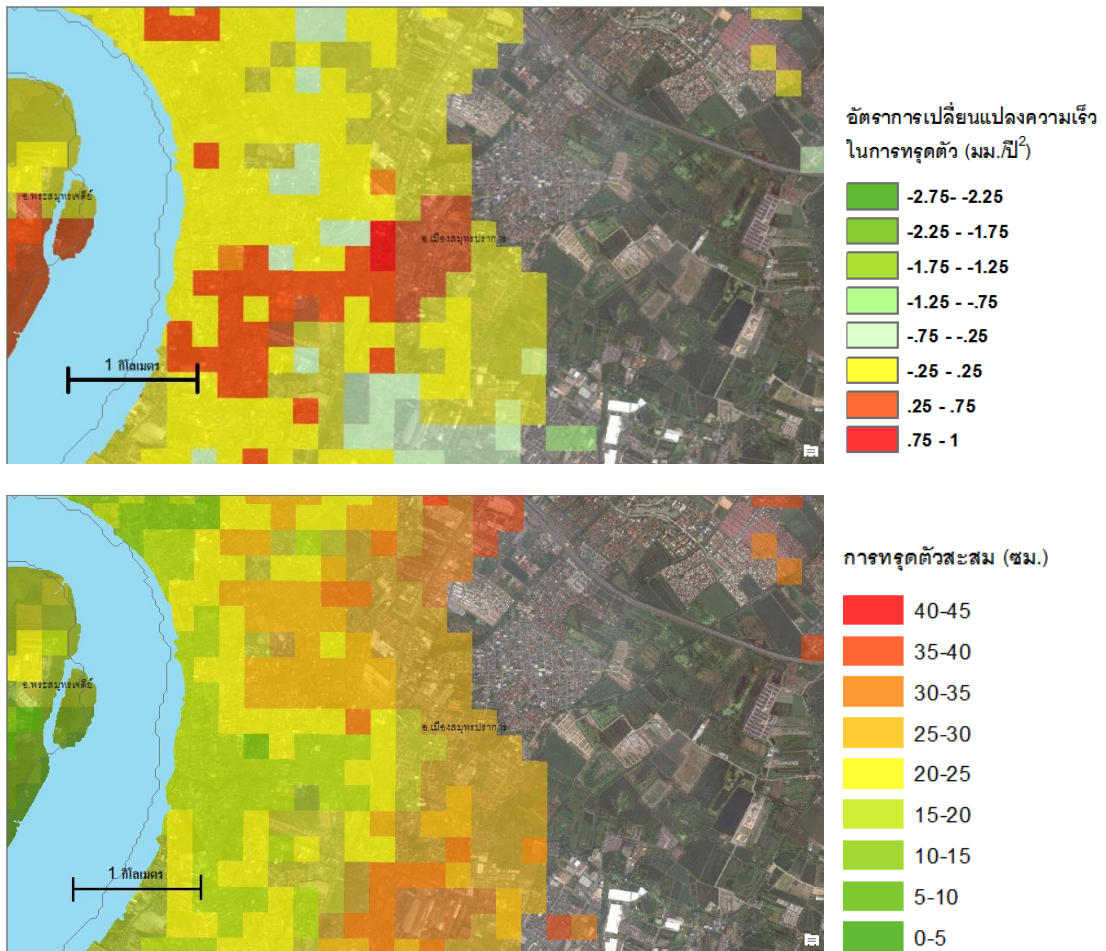
รูปที่ 5.10 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี²) ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) ของช่วงปี 1996-2012 โดยเป็นพื้นที่บริเวณ วัดคลองปลัดเปรียง ต.บางแก้ว อ.บางพลี จังหวัดสมุทรปราการ โดยเป็นภาพขยายจากในกรอบ Z3 ในรูปที่ 5.4

พื้นที่ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่มากอีกพื้นที่คือบริเวณ ช.พนาสนชิตี ถ.ศรีนครินทร์ ในตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวประมาณ 0.8 มม./ปี^2 ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งพื้นที่บริเวณนี้ควรเป็นพื้นที่ที่น่าเฝ้าระวังที่สุดเพราะเนื่องจากว่าพื้นที่อื่นๆอาจมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่มากแต่ส่วนใหญ่จะมีค่าการทรุด

ตัวสะสมกลับกันคือมีค่าค่อนข้างน้อย แต่ในพื้นที่บริเวณนี้มีค่าการทรุดตัวสะสมอยู่ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางถ้าหากเทียบกับพื้นที่อื่นๆในพื้นที่ศึกษาและมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวที่อยู่ในเกณฑ์ที่สูงด้วย ซึ่งพื้นที่บริเวณนี้อาจไม่ใกล้สถานที่ที่สำคัญใดแต่ถ้าหากดูในภาพถ่ายดาวเทียมดังแสดงในรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าพื้นที่นี้เป็นพื้นที่ที่มีบ้านพักอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น



รูปที่ 5.11 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี²) ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) ของช่วงปี 1996-2012 โดยเป็นพื้นที่บริเวณ ช.พนาสนชิตี ถ.ศรีนครินทร์ ในตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ โดยเป็นภาพขยายจากในกรอบ Z4 ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.12 บน.) ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี²) ล่าง.) ค่าการทรุดตัวสะสม (ซม.) ของช่วงปี 1996-2012 โดยเป็นภาพถ่ายดาวเทียมพื้นที่บริเวณ ช.พนมสาธิต อ.ศรีนครินทร์ ในตำบลปากน้ำเทศบาลอำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ โดยเป็นภาพขยายจากในกรอบ Z4 ในรูปที่ 5.4

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1) สรุปผลการศึกษา

การตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 โดยใช้เทคนิค InSAR time-series analysis ในการประมวลผล ได้จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด 283,572 จุด โดยในพื้นที่ที่เป็นบริเวณเมืองนั้นมีความหนาแน่นของจุดค่อนข้างมากโดยสามารถตรวจพบจุดตรวจสอบได้ถึงกว่า 300 จุด/ตร.กม. ในบริเวณเหล่านั้น ซึ่งจำนวนจุดที่หนาแน่นเหล่านี้สามารถจัดปัญหาในเรื่องความละเอียดเชิงตำแหน่งที่เกิดกับงานระดับหรืองานรังวัดด้วยดาวเทียมไปได้อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่ไม่ใช่บริเวณเมืองพบว่ามีจุดตรวจสอบอยู่ค่อนข้างน้อยจนถึงไม่มีจุดตรวจสอบ

ผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบนั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 44 มม./ปี โดยในพื้นที่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาในกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรปราการพบอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างน้อยโดยอยู่ในช่วงเพียง 0 ถึง 10 มม./ปี ในทางกลับกันพื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากที่สุดในกรุงเทพมหานครนั้นเป็นพื้นที่บริเวณเขตดอนเมืองและสายไหมโดยมีการทรุดตัวมากถึง 35 ถึง 44 มม./ปี ส่วนในค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดีโดยอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 4 มม./ปี ซึ่งจะสามารถสังเกตจากรูปที่ 4.4 ได้ว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในบริเวณเมืองหรือตรงพื้นที่ที่มีจำนวนจุดที่ค่อนข้างหนาแน่นนั้นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะค่อนข้างต่ำและจะค่อยๆสูงขึ้นเมื่อห่างออกจากบริเวณเมืองไปหรือหมายถึงพื้นที่ที่มีจำนวนจุดตรวจสอบที่ค่อนข้างเบาบาง

สำหรับการเปรียบเทียบผลลัพธ์ข้อมูลเข้ากับค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับโดยใช้การตรวจสอบทางสถิติ t-test นั้น ได้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องอยู่ที่ 15 หมู่ จากทั้งหมด 20 หมู่ หรือคิดเป็นร้อยละ 75 ซึ่งเหตุผลที่อาจจะทำให้เกิดไม่สอดคล้องกันนั้นอาจมีสาเหตุได้จาก หมู่ BMR.8 ที่ใช้ในการอ้างอิงหมู่ระดับทั้งโครงข่ายนั้นมาถูกตรวจสอบพบภายหลังว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นโดยไม่ทราบสาเหตุและลักษณะการเกิดการทรุดตัว เพราะฉะนั้นการชดเชยค่าที่ทำในงานวิจัยนี้ก็อาจจะไม่ถูกต้องตามลักษณะที่การทรุดตัวของหมู่ BMR.8 ที่เกิดขึ้นจริงก็เป็นได้ หรือความคลาดเคลื่อนนั้นอาจเกิดมาจากในขั้นตอนการประมวลผล InSAR โดยหมู่ที่มีค่าไม่สอดคล้องกับค่าจากงานระดับนั้นมี

3 หมดมีค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR เร็วกว่างานระดับโดยอาจจะสามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ double-bounce scattering และมี 2 หมดมีค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ช้ากว่างานระดับโดยอาจจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการ Unwrap ข้อมูลค่าเฟส

ผลลัพธ์การสร้างแผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวและการทรุดตัวสะสมในช่วงปี 1996-2012 นั้นในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ในการตรวจสอบประมาณ 460 ตารางกิโลเมตร ในส่วนพื้นที่ที่ตรวจสอบนั้นได้ครอบคลุมพื้นที่ส่วนที่สำคัญหลายส่วนทั้งตอนกลางทั้งหมดของกรุงเทพมหานครจนถึงจังหวัดสมุทรปราการบางส่วน โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าจากพื้นที่การศึกษาทั้งหมดนั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวอยู่ในช่วง -2.7 ถึง 1 มม./ปี² (ค่าบวกคือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวไปในทิศทางที่เร็วขึ้น) โดยมีพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวที่ช้าลงเป็นส่วนใหญ่โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในกรุงเทพมหานครซึ่งรวมถึงพื้นที่บริเวณเขตดอนเมืองและเขตสายไหมด้วยที่ตรวจพบที่มีการทรุดตัวที่ค่อนข้างมากในปี ค.ศ. 1996-2000 โดยในพื้นที่ศึกษามีพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่เร็วขึ้นเพียงร้อยละ 4 ของพื้นที่การศึกษาทั้งหมด

ส่วนผลการศึกษาการทรุดตัวสะสมของพื้นที่ศึกษานั้นมีการทรุดตัวสะสมอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 42.3 เซนติเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยการทรุดตัวสะสมของทั้งพื้นที่อยู่ที่ 21.1 เซนติเมตร โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครมีการทรุดตัวสะสมปานกลางจนถึงมากปะปนกันไป ถ้าหากทำการเทียบกับพื้นที่อื่นๆในพื้นที่ศึกษา แต่ในส่วนของจังหวัดสมุทรปราการนั้นพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าการทรุดตัวสะสมที่ค่อนข้างน้อย โดยกลับกันจากค่าการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ช้าลงแต่ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลับมีค่าการทรุดตัวสะสมที่มาก แต่ในบริเวณจังหวัดสมุทรปราการซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ทรงตัวและเร็วขึ้นปะปนกันทั่วทั้งพื้นที่แต่กลับมีค่าการทรุดตัวสะสมที่ค่อนข้างน้อยกว่าถ้าหากเปรียบเทียบกับพื้นที่กรุงเทพมหานคร

โดยถ้าหากพิจารณาในส่วนของผลลัพธ์ค่าการทรุดตัวสะสม ในบริเวณเขตดอนเมืองและเขตสายไหมซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ามีค่าทรุดตัวสะสมสูงที่สุดในพื้นที่ศึกษาโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร และมีบางพื้นที่สูงถึงกว่า 40 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.8 แต่จากผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวนั้นแสดงให้เห็นว่า พื้นที่บริเวณนี้มีลักษณะการทรุดตัวที่มากในช่วงแรกแต่ต่อมานั้นมีความเร็วในการทรุดตัวที่ช้าลง โดยช้าลงด้วยอัตราหน่วงที่มากด้วยประมาณ -1.5 ถึง -2.7 มม./ปี² แต่ในบริเวณพื้นที่ ตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ มีค่าการทรุดตัวสะสมที่สูงเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.11 แต่ถ้าหากพิจารณาในส่วนผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่บริเวณนี้มีค่าการ

ทรุดตัวที่มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร่งที่สูงด้วยเช่นกันโดยอยู่ที่ประมาณ 0.6 ถึง 0.9 ซึ่งพื้นที่บริเวณนี้เป็นพื้นที่ที่ควรเฝ้าระวังมากที่สุดในบริเวณพื้นที่ศึกษาทั้งหมด

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1) เนื่องจากในงานวิจัยนี้ (ผลลัพธ์บทที่ 4) ที่ทำการหาค่าอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 1996-2000, งานวิจัย Aobpaet et al (2012), งานวิจัยสรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าสามารถนำประมวลผล InSAR มาใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวกับพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้จริง เพราะฉะนั้นน่าจะเป็นการคุ้มค่าและเชื่อถือได้ที่จะใช้การประมวลผล InSAR มาเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการช่วยตรวจสอบการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เพราะฉะนั้นการทำงานควรที่จะต้องเป็นไปอย่างมีระบบและควรจะได้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พบสิ่งที่น่าสนใจในหลายส่วน

- จากในงานวิจัยนี้สามารถสังเกตได้ว่า ข้อมูลภาพ SAR จากในตารางที่ 1.1 ข้อมูลภาพ SAR มีช่องว่างระหว่างเวลาค่อนข้างกว้าง โดยในช่วง กรกฎาคม 1998 ถึง มกราคม 2000 มีภาพถ่าย SAR ทั้งหมดเพียง 3 ภาพเท่านั้นภายในระยะเวลาปีครึ่ง ซึ่งถึงแม้ในงานวิจัยนี้จะพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าสามารถนำมาใช้งานได้ แต่จากหลักการที่ใช้ linear regression ในการหาค่าอัตราการทรุดตัวในโปรแกรม StaMPS นั้น เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงความจริงที่สุดก็ควรที่จะมีค่าจำนวนข้อมูลมากขึ้นและควรจะเป็นข้อมูลที่มีความต่อเนื่องอย่างไม่มีช่องว่างของช่วงเวลาที่กว้างๆ เพราะฉะนั้นถ้าหากจะมีการใช้การประมวลผล InSAR ในการตรวจสอบอย่างเป็นระบบก็ควรจะมีการวางแผนเพื่อให้มีการบันทึกภาพ SAR อย่างต่อเนื่องโดยอาจเว้นช่วงเวลาให้เหมาะสม เช่น ประมาณทุกๆเดือนหรือทุกๆสองเดือน

- จากการสังเกตงานวิจัยที่ผ่านมาถ้าหากเป็นไปได้ควรใช้การบันทึกภาพด้วยดาวเทียมที่มีความละเอียดสูง ดังเช่นที่สามารถเห็นได้จากในงานวิจัยนี้ ภาพจากดาวเทียม ERS มีค่าความละเอียดที่ประมาณ 20 เมตร, ภาพจากงานวิจัย Aobpaet et al (2012) ที่ใช้ดาวเทียม RADARSAT 1 มีค่าความละเอียดที่ประมาณ 9 เมตร และภาพจากงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ที่ใช้ดาวเทียม TerraSAR-X มีค่าความละเอียดที่ประมาณ 2 เมตร โดยสิ่งแรกที่ได้เห็นได้ชัดคือข้อมูลภาพจาก TerraSAR-X นั้นมีจำนวนจุดตรวจสอบที่หนาแน่นมากโดยมีเกือบทั่วทั้งพื้นที่การศึกษาซึ่งต่างจากผลลัพธ์จาก ERS1/2 และ RADARSAT-1 ซึ่งอาจเนื่องมาจากว่าหลักการที่นำมาใช้ในการประมวลผล

นั้นการที่ค่าเฟสของจุดภาพใดจะถูก dominate โดยวัตถุใดวัตถุหนึ่งแล้วนั้น ยังมีขนาดของจุดภาพที่ มากก็ยังมีโอกาสยากมากขึ้นที่จะตรวจสอบพบซึ่งจะทำให้พื้นที่เหล่านั้นขาดข้อมูลไป

อีกหนึ่งสาเหตุที่สำคัญคือจะสามารถสังเกตได้ว่าค่าผลลัพธ์จากงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ที่ใช้ภาพจากดาวเทียม TerraSAR-X ในช่วงการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลกับค่า จากงานระดับ ไม่มีหมุดที่ไม่สอดคล้องที่น่าจะมีสาเหตุมาจากการ Unwrap phase ซึ่งจะพบได้ใน งานวิจัยจากภาพดาวเทียม ERS1/2 และ RADARSAT-1 เนื่องมาจากตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.1.5 ว่าถ้าหากมีจุดตรวจสอบที่หนาแน่นต่อเนื่องกันจุดบริเวณนั้นจะมีโอกาสการเกิดความคลาดเคลื่อน จากการ Unwrap phase น้อยลง ส่วนในเรื่องของความคลาดเคลื่อนที่น่าจะเกิดจากการ Double-bounce นั้นอยู่ในส่วนของลักษณะการสะท้อนของคลื่นและลักษณะของวัตถุพื้นผิวซึ่งอาจจะแก้ไข ไม่ได้ในขั้นตอนการบันทึกภาพซึ่งอาจจะอาศัยการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องนี้ต่อไปในอนาคต

- ถ้าหากเป็นไปได้ควรใช้ดาวเทียมที่มีความละเอียดมากดวงเดียวกันในการบันทึกภาพให้ทั่ว ทั้งพื้นที่มากกว่าเพราะนอกจากประโยชน์ที่ได้อธิบายไว้ด้านบนยังอาจยังสามารถช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพให้กับผลลัพธ์แผนที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุด ตัวสะสมในหัวข้อผลลัพธ์ในบทที่ 5 ได้ด้วย เพราะเนื่องจากจะมีพื้นที่ในการประมวลผลเพิ่มมากขึ้น เพราะมีการบันทึกภาพด้วยดาวเทียมดวงเดียวกันอย่างเป็นระบบเพราะฉะนั้นไม่ต้องมีขั้นตอนในการ ตัดพื้นที่บางพื้นที่ที่มีการบันทึกภาพไม่ซ้อนทับกันในแต่ละช่วงเวลา

และเนื่องจากข้อมูลที่ได้นั้นมาจากข้อมูลดาวเทียมดวงเดียวกัน การบันทึกภาพจึงอยู่ในระบบ เดียวกันและเป็นการบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงดังที่ได้เสนอไปในหัวข้อที่แล้ว จึงอาจจะส่งผลให้ สามารถสร้างตารางกริดแผนที่ที่มีความละเอียดได้มากขึ้น เนื่องจากการทรุดตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ ท้องถิ่นค่าการทรุดตัวจะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเมื่อถ้าหากมีค่าความละเอียดของ ตารางกริดยิ่งสูงก็จะยิ่งสะท้อนลักษณะการทรุดตัวได้ตีมากขึ้นเช่นกัน

6.2.2) ควรมีการติดตามเฝ้าระวังพื้นที่ที่ผลลัพธ์การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วใน การทรุดตัวในช่วงปี 1996-2012 แสดงว่ามีค่าการทรุดตัวที่เร็วขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะเนื่องจากใน บริเวณเหล่านี้ถ้าหากปล่อยให้มีการทรุดตัวด้วยความเร่งเท่านี้ต่อไปอาจทำให้เกิดปัญหาการมีค่า ระดับความสูงต่ำกว่าระดับน้ำทะเล, การเกิดเป็นพื้นที่รูปแอ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหาอีก

หลายๆอย่างตามมาได้ โดยเฉพาะในบริเวณ ตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวสะสมที่สูงคล้ายกับบริเวณเขตดอนเมืองและเขตสายไหม แต่ในสองบริเวณหลังนี้ได้มีการแสดงให้เห็นแล้วว่ามีความเร็วในการทรุดตัวที่น้อยลงแล้ว แต่ในบริเวณพื้นที่ ตำบลปากน้ำเทศบาล อำเภอเมืองสมุทรปราการ นั้นยังแสดงให้เห็นว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วไปในทิศทางที่มากขึ้นพร้อมกับพื้นที่บริเวณจังหวัดสมุทรปราการนั้นเป็นพื้นที่ราบต่ำติดทะเลแล้วด้วย เพราะฉะนั้นจึงควรให้ความสำคัญในการติดตามตรวจสอบและป้องกันการทรุดตัวพื้นที่ในบริเวณเหล่านี้อย่างมาก



รายการอ้างอิง

- Aobpaet, A. 2012. InSAR time series analysis for land subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area. In *Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering*. Doctoral dissertation, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn.
- Becker, R. H. and M. Sultan (2009) Land subsidence in the Nile Delta: inferences from radar interferometry. *The Holocene*, 19, 949-954.
- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40, 2375-2383.
- Canova, F., C. Tolomei, S. Salvi, G. Toscani and S. Seno (2012) Land subsidence along the Ionian coast of SE Sicily (Italy), detection and analysis via Small Baseline Subset (SBAS) multitemporal differential SAR interferometry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 273-286.
- Chatterjee, R. S., B. Fruneau, J. P. Rudant, P. S. Roy, P.-L. Frison, R. C. Lakhera, V. K. Dadhwal and R. Saha (2006) Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102, 176-185.
- Daqing, G., W. Yan, H. Qiong, G. Junhai and X. Guo. 2008. Using Small Baseline SAR Interferometry to Investigate Land Subsidence Induced by Underground Coal Mining. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, IV - 1201-IV - 1204.
- Dehghani, M., M. J. Valadan Zoej, A. Hooper, R. F. Hanssen, I. Entezam and S. Saatchi (2013) Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157-170.

- Dong, S., S. Samsonov, H. Yin, S. Ye and Y. Cao (2014) Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental Earth Sciences*, 72, 677-691.
- Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca and A. Rucci (2011) A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49, 3460-3470.
- Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35, L16302.
- Hooper, A., P. Segall and H. Zebker (2007) Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, B07407.
- Hu, B., H.-S. Wang, Y.-L. Sun, J.-G. Hou and J. Liang (2014) Long-Term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China) Using the Small Baseline Subset (SBAS) Technique. *Remote Sensing of Environment*, 6, 3648-3661.
- Jiangping, L. and D. Xiaoli. 2010. Monitoring Ground Subsidence in New Orleans with Persistent Scatterers Interferometry. In *Multimedia Technology (ICMT), 2010 International Conference on*, 1-5.
- Komori, D., S. Nakamura, M. Kiguchi, A. Nishijima, D. Yamazaki, S. Suzuki, A. Kawasaki, K. Oki and T. Oki (2012) Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand. *Hydrological Research Letters*, 6, 41-46.
- Lanari, R., F. Casu, M. Manzo and P. Lundgren (2007) Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. *Remote Sensing of Environment*, 109, 20-28.
- Nakagawa, H., M. Murakami, S. Fujiwara and M. Tobita. 2000. Land subsidence of the northern Kanto plains caused by ground water extraction detected by JERS-1 SAR interferometry. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2233-2235 vol.5.
- Nguten, A. D. 1999. Updating and Analysis of Bangkok Land Subsidence caused by Deep Well Pumping with Emphasis on Shallow Soil Settlement. Bangkok.

- Phodee, P., I. Trisirisatayawong and A. Aobpaet. 2015. *Coseismic and Postseismic Displacement of 2011 Mw 6.8 Tarlay Earthquake, Myanmar using InSAR Techniques and Inversion Analysis*.
- Richard, B. and H. Philipp (1998) Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, R1.
- Tung, H. and J.-C. Hu (2012) Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. *Tectonophysics*, 578, 126-135.
- Wegmuller, U., T. Strozzi and G. Bitelli. 1999. Validation of ERS differential SAR interferometry for land subsidence mapping: the Bologna case study. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1131-1133 vol.2.
- Worawattanamateekul, J. 2006. The application of Advanced Interferometric Radar Analysis for Monitoring Ground Subsidence: A case study in Bangkok. 169. Technical University of Munich Germany.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2009) โครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. รายงานฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- สรศักดิ์, ช. 2015. การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยเทคนิค Time-series InSAR. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบ
ผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวของบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากข้อมูลดาวเทียม ERS
ในช่วงปี 1996-2000

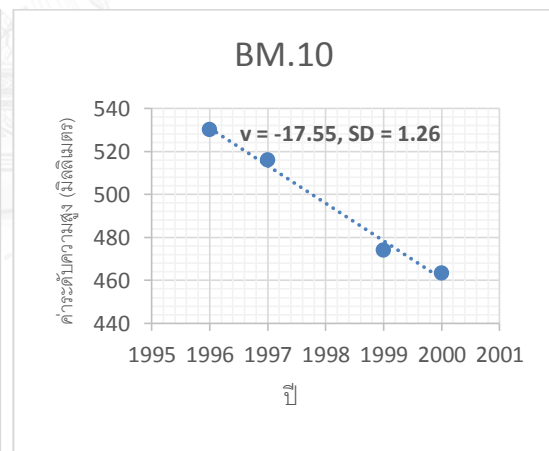
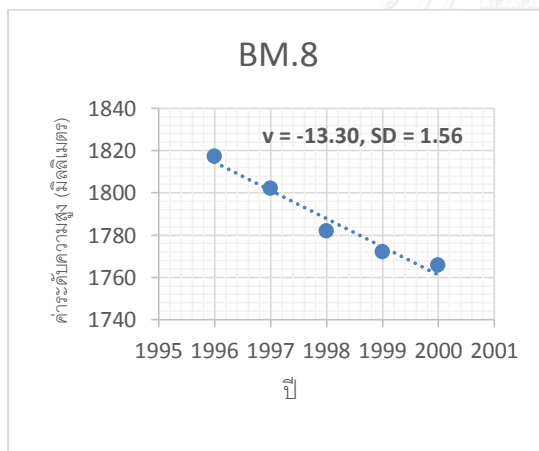
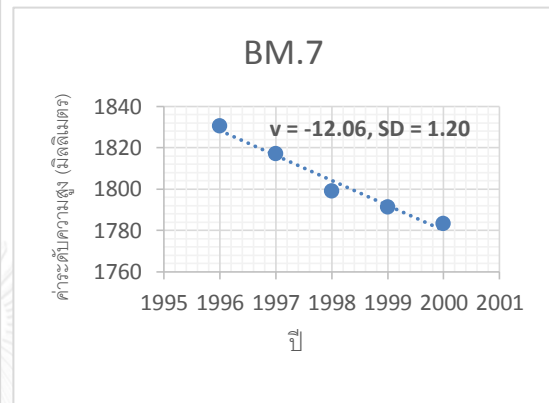
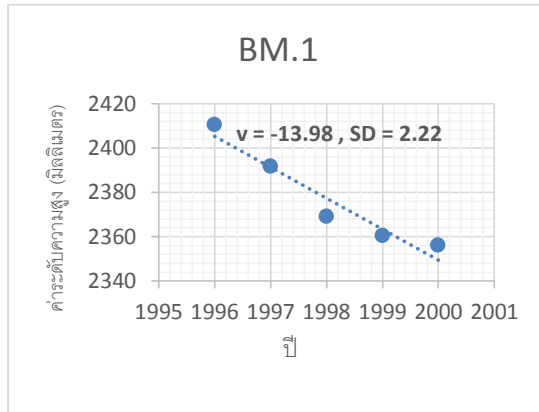
โดย v คือ ค่าอัตราการทรุดตัวของหมุดระดับด้วยวิธีการ linear regression (มิลลิเมตร./ปี)

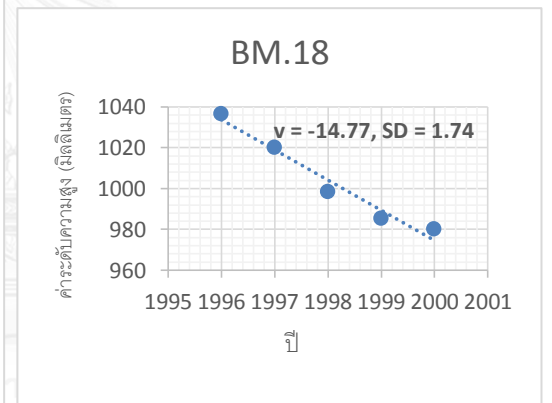
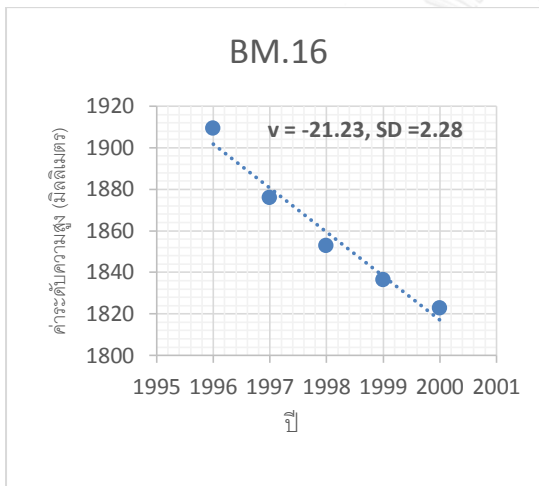
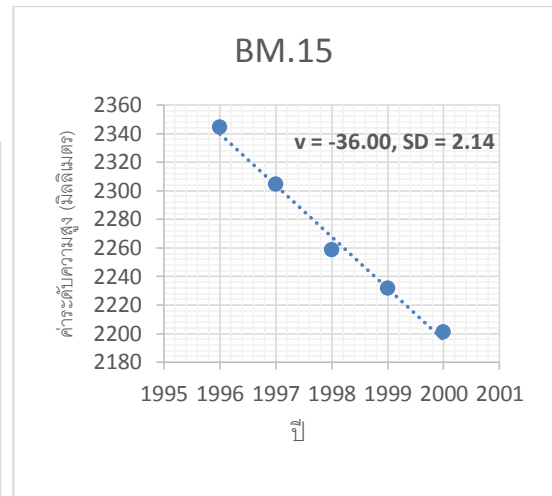
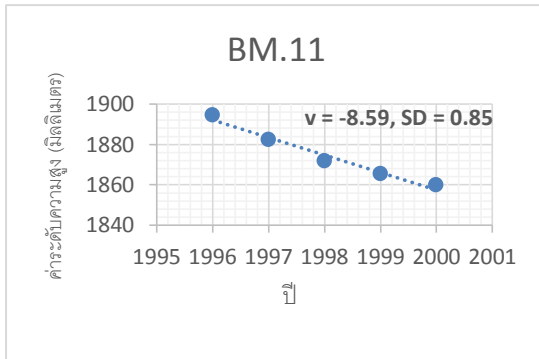
sd คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราการทรุดตัวของหมุดระดับ (มิลลิเมตร./ปี)

N/A คือ ไม่มีข้อมูลค่าระดับ

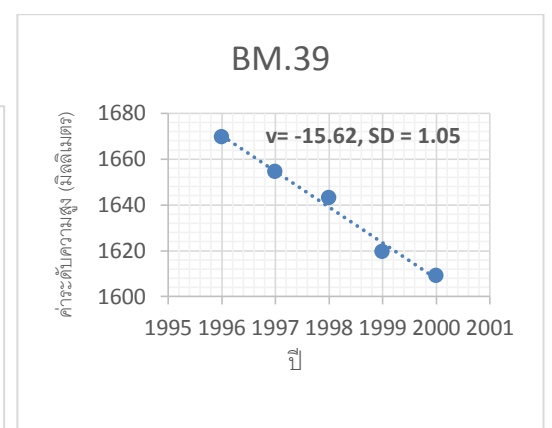
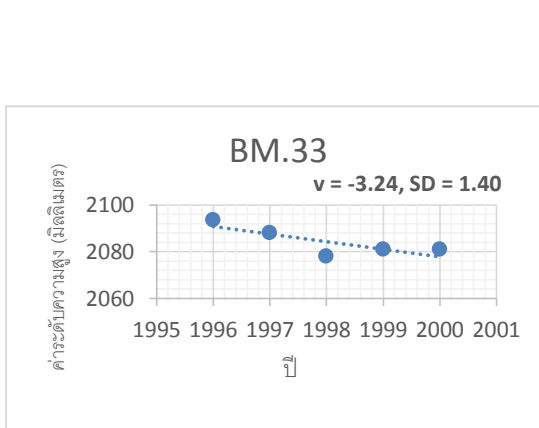
ลำดับ	หมุด	บริเวณพื้นที่ติดตั้งหมุด	ค่าระดับความสูง (เมตร)					v (มม./ปี)	sd (มม./ปี)
			1996	1997	1998	1999	2000		
1	BM.1	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางกรวย	2.4103	2.3915	2.369	2.3603	2.356	-13.98	2.22
2	BM.7	วัดราชบูรณะ (วัดเลียบ)	1.8305	1.817	1.7989	1.7912	1.7831	-12.06	1.2
3	BM.8	คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์	1.8173	1.802	1.7818	1.772	1.7658	-13.3	1.56
4	BM.10	มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก	0.5301	0.5159	N/A	0.474	0.4633	-17.55	1.26
5	BM.11	โรงพยาบาลสมเด็จพระปิ่นเกล้า	1.8944	1.8823	1.8718	1.8654	1.8599	-8.59	0.85
6	BM.15	บ่อน้ำบาดน้ำเสียดอนเมือง	2.3444	2.3044	2.2583	2.2314	2.2009	-36	2.14
7	BM.16	กองบิน สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ธรรมอินตรา	1.9091	1.8758	1.8528	1.8363	1.8227	-21.23	2.28
8	BM.18	คลังพัสดุการเคหะ คลองจั่น ถนนวิภาวดี	1.0366	1.0202	0.9984	0.9853	0.9802	-14.77	1.74
9	BM.33	วิทยาลัยมหาดไทย	2.0936	2.088	2.0779	2.081	2.0809	-3.24	1.4
10	BM.39	โรงเรียนเทศบาลศรีบุญยานุสรณ์	1.6696	1.6543	1.643	1.6195	1.6089	-15.62	1.05
11	BM.49	วัดสุนทรสถิต	1.9366	1.9341	1.9302	1.8992	1.9038	-10.05	2.95
12	กทม.106	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งพระนคร	2.2003	2.1894	2.1752	2.1717	2.1656	-8.71	1.16
13	กทม.113	สะพานคลองผดุงกรุงเกษม	2.6955	2.6807	2.6591	2.6508	2.6342	-15.25	1.03
14	กทม.176	สะพานคลองสำโรง ถ.สุขุมวิท	2.2731	2.2667	2.2508	N/A	2.2451	-7.29	1.75
15	กทม.284	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันออก	2.4945	2.4839	2.463	2.4639	2.4626	-8.38	2.37
16	กทม.320	โคนเสาสะพานลอยหน้าโรงพยาบาลภูมิพล	2.4326	2.4042	2.3564	2.3345	2.3128	-30.93	2.71
17	กทม.502	ตอม่อสะพานพุทธฯ ฝั่งธนบุรี	2.611	2.602	2.5903	2.5896	2.5857	-6.3	1.2
18	กทม.514	สำนักงาน รักษาความสะอาด เขตบางขุนเทียน	1.5672	1.5527	1.5395	1.5319	1.5225	-11.02	0.83
19	กทม.640	โคนเสาสะพานลอยวัดม่วง	2.1792	2.1681	2.1588	2.1481	2.1455	-8.74	0.89
20	กทม.682	สะพานพระนั่งเกล้า ฝั่งตะวันตก	2.4961	2.4918	2.4765	2.4846	2.4863	-2.68	2.24
21	กทม.140	การไฟฟ้านครหลวงคลองเตย	1.5608	1.5384	1.5191	1.509	1.4997	-15.16	1.76

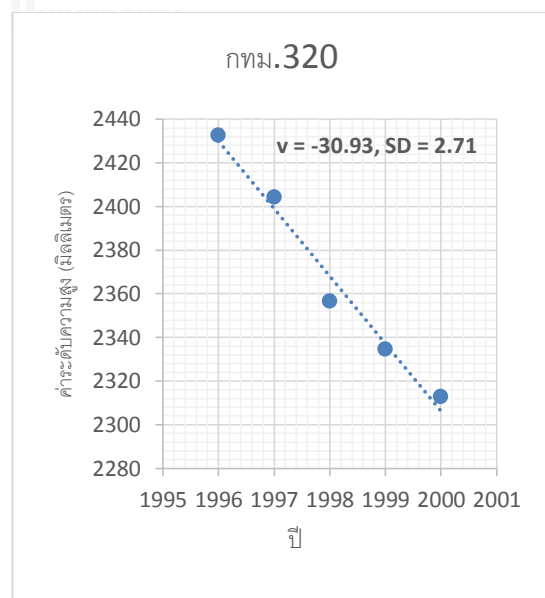
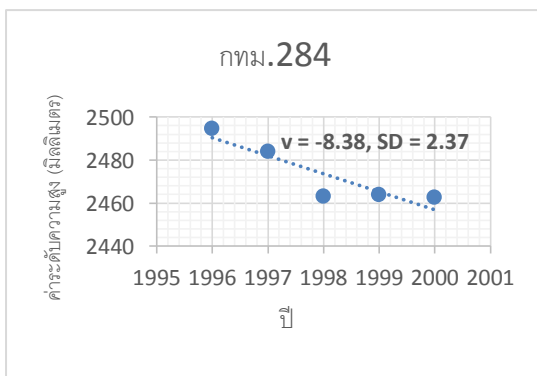
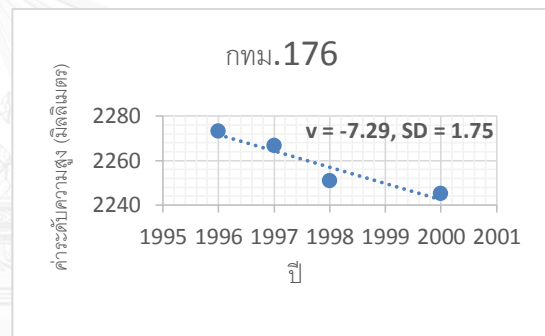
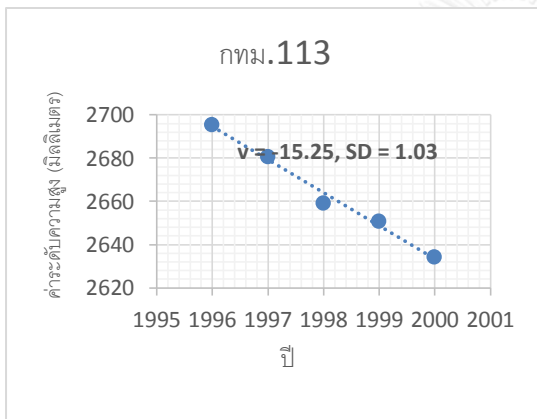
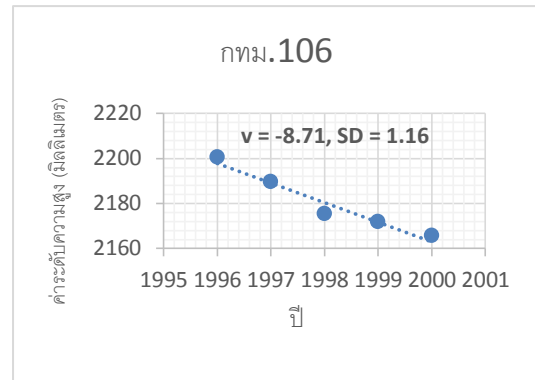
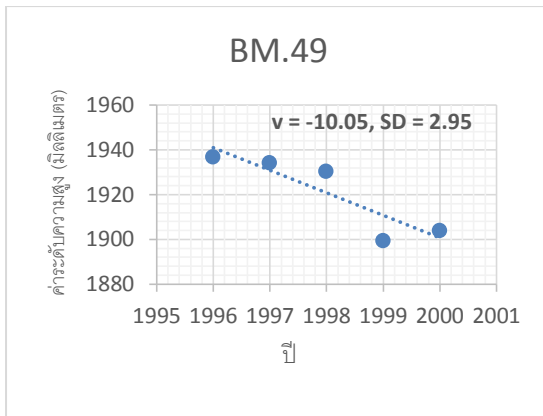
แสดงกราฟข้อมูลค่าระดับความสูงและสมการเส้นตรงจากการทำการประมวลผล linear regression ของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องทั้งหมด 21 หมุด ในช่วงปี 1996-2000

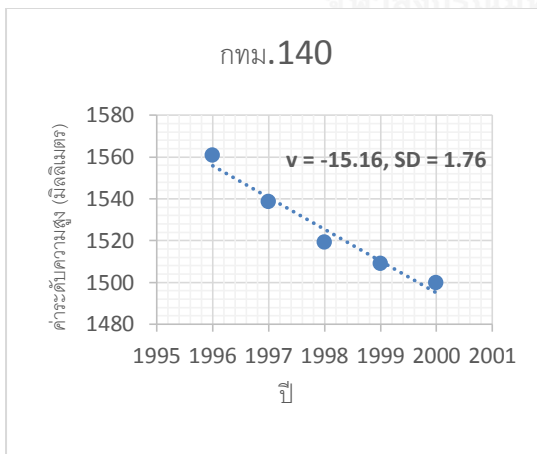
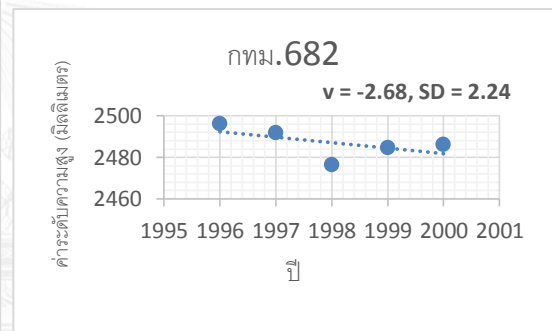
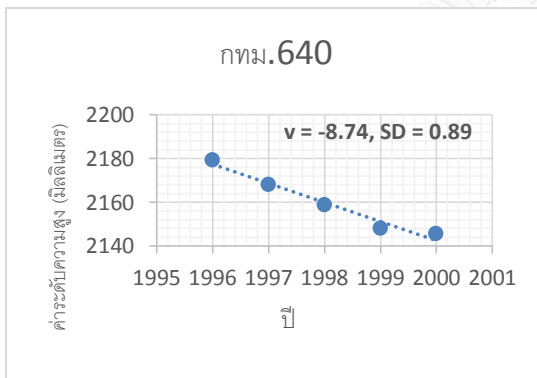
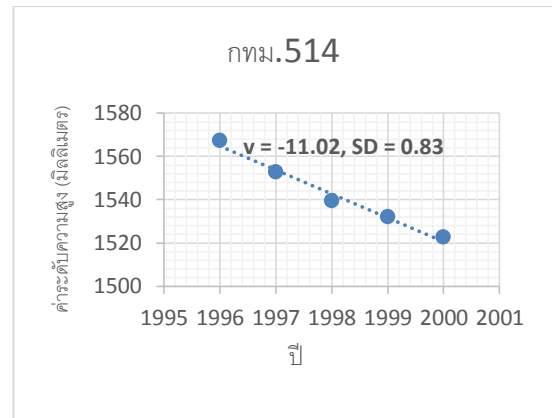
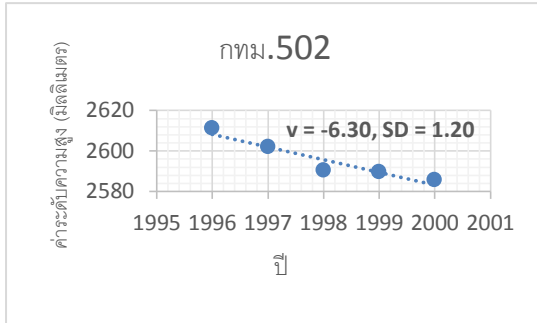




CHULALONGKORN UNIVERSITY







ภาคผนวก ข ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบ
ผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวภายในบริเวณพื้นที่ศึกษาบทที่ 5 จากงานวิจัย Aobpaet et al
(2012) ในช่วงปี 2005-2010

โดย v คือ ค่าอัตราการทรุดตัวของหมุดระดับด้วยวิธีการ linear regression (มิลลิเมตร./ปี)

ลำดับ	หมุด	ค่าระดับความสูง (เมตร)						v (มม./ปี)
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	
1	BM.8	1.790	1.653	1.662	1.658	1.649	1.652	-20.18
2	BM.10	0.480	0.344	0.356	0.355	0.356	0.350	-17.55
3	BM.16	1.841	1.711	1.715	1.721	1.709	1.710	-18.78
4	BM.18	1.005	0.873	0.887	0.893	0.881	0.884	-16.54
5	BMA.113	2.669	2.531	2.548	2.544	2.533	2.540	-18.36
6	BMA.140	1.523	1.382	1.402	1.402	1.397	1.395	-17.04
7	BMA.155	2.666	2.526	2.542	2.548	2.534	2.532	-18.40
8	BMA.156	2.170	2.030	2.043	2.050	2.035	2.033	-18.97
9	BMA.157	1.970	1.833	1.846	1.852	1.837	1.843	-17.57
10	BMA.159	1.956	1.819	1.830	1.835	1.819	1.827	-18.27
11	BMA.160	0.697	0.562	0.572	0.575	0.562	0.566	-18.48
12	BMA.162	1.117	0.977	0.988	0.998	0.984	0.989	-17.29
13	BMA.209	3.276	3.141	3.154	3.160	3.145	3.130	-20.38
14	BMA.210	2.360	2.221	2.236	2.240	2.222	2.223	-19.40
15	BMA.215	2.411	2.271	2.287	2.288	2.273	2.274	-19.41
16	BMA.238	1.931	1.790	1.793	1.790	1.789	1.785	-21.06
17	BMA.241	2.519	2.388	2.395	2.406	2.393	2.380	-19.10
18	BMA.242	1.623	1.492	1.495	1.500	1.485	1.480	-20.74
19	BMA.255	2.397	2.266	2.269	2.274	2.259	2.257	-20.49
20	BMA.257	1.981	1.855	1.854	1.857	1.845	1.842	-20.65
21	BMA.320	2.296	2.168	2.162	2.164	2.152	2.142	-23.36
22	BMA.322	5.006	4.882	4.876	4.880	4.865	4.859	-22.28

ภาคผนวก ค ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าระดับและอัตราการทรุดตัวของหมุดที่ใช้ในการตรวจสอบ
ผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวภายในบริเวณพื้นที่ศึกษาบทที่ 5 จากงานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015)
ในช่วงปี 2009-2012

โดย v คือ ค่าอัตราการทรุดตัวของหมุดระดับด้วยวิธีการ linear regression (มิลลิเมตร./ปี)

ลำดับ	หมุด	ค่าระดับความสูง (เมตร)				v (มม./ปี)
		2009	2010	2011	2012	
1	BM.16	1.709	1.710	1.708	1.705	-1.33
2	BM.18	0.881	0.884	0.882	0.875	-1.90
3	S.6943/47	3.792	3.791	3.791	3.787	-1.50
4	S.7036-1/43	1.339	1.332	1.328	1.328	-3.65
5	S.7037/43	1.508	1.504	1.502	1.499	-3.01
6	S.7039/43	1.637	1.633	1.630	1.629	-2.74
7	S.8289/43	2.287	2.282	2.282	2.277	-2.81
8	S.8306/47	2.273	2.272	2.270	2.265	-2.54
9	S.8319/46	0.794	0.790	0.788	0.783	-3.55
10	S.8392/34	2.111	2.104	2.097	2.110	-1.24
11	S.ws.01/3/47	3.388	3.382	3.368	3.381	-3.52
12	S.กทม.527	2.189	2.182	2.175	2.188	-0.94
13	S.กทม.530/34	2.312	2.304	2.293	2.306	-2.92
14	S.กทม.532/34	2.055	2.047	2.038	2.049	-2.92
15	กทม.157	1.837	1.843	1.844	1.838	0.36
16	กทม.159	1.819	1.827	1.827	1.817	-0.69
17	กทม.160	0.562	0.566	0.567	0.562	-0.20
18	กทม.176	2.150	2.157	2.163	2.156	2.34
19	กทม.236/31	0.891	0.897	0.897	0.889	-0.54
20	กทม.241	2.393	2.394	2.395	2.393	0.09
21	กทม.242	1.485	1.485	1.485	1.485	-0.16
22	กทม.255	2.259	2.257	2.256	2.255	-1.09
23	กทม.257	1.845	1.842	1.842	1.841	-1.23
24	กทม.315	2.334	2.326	2.329	2.326	-2.00
25	กทม.320	2.152	2.142	2.140	2.136	-4.87
26	กทม.322	4.865	4.859	4.858	4.854	-3.48

ภาคผนวก ง ตารางการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวสะสมตามการใช้ค่าข้อมูลจากงานระดับ ในบริเวณพื้นที่ที่มีค่าไม่สอดคล้องระหว่างข้อมูลจากการประมวลผล InSAR และค่าจากงานระดับ

งานวิจัยนี้ช่วงปี 1996-2000

Point	ช่วงเวลาทั้ง 3 งานวิจัย ปี ค.ศ.				ค่าจากแผนที่ผลลัพธ์		ค่าผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนไปใช้ค่าระดับ	
	1996-2000	1996-2000 (งานระดับ)	2005-2010	2009-2012	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)
4	9.81	17.55	15.32	2.00	-0.35	181	-0.99	220
16	19.67	30.93	10.46	2.82	-1.23	217	-2.16	278

งานวิจัย Aobpaet et al (2012) ช่วงปี 2005-2010

Point	ช่วงเวลาทั้ง 3 งานวิจัย ปี ค.ศ.				ค่าจากแผนที่ผลลัพธ์		ค่าผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนไปใช้ค่าระดับ	
	1996-2000	2005-2010	2005-2010 (งานระดับ)	2009-2012	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)
4	14.85	17.40	16.54	1.14	-0.78	229	-0.80	207
6	15.16	18.24	17.04	4.44	-0.58	245	-0.61	223
21	19.67	10.46	23.36	2.82	-1.23	217	-0.94	288
22	21.84	14.31	22.28	3.70	-1.27	261	-1.09	298

งานวิจัย สรศักดิ์ ชัยทวี (2015) ในช่วงปี 2009-2012

Point	ช่วงเวลาทั้ง 3 งานวิจัย ปี ค.ศ.				ค่าจากแผนที่ผลลัพธ์		ค่าผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนไปใช้ค่าระดับ	
	1996-2000	2005-2010	2009-2012	2009-2012 (งานระดับ)	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)	แนวโน้ม การทรุดตัว	ค่าทรุดตัวสุทธิ (มิลลิเมตร)
5	11.84	19.97	6.06	5.65	-0.17	239	-0.20	224
6	6.37	23.36	6.52	6.27	0.38	227	0.37	212

ภาคผนวก จ ข้อมูลค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการทรุดตัวและการทรุดตัวสะสมโดย
แบ่งตามพื้นที่ แขวง/ตำบล

โดย พื้นที่ศึกษา หมายถึงพื้นที่ที่มีข้อมูลในส่วนพื้นที่ตำบลทั้งหมด โดยแสดงค่าเป็น (%) ซึ่ง
เครื่องหมาย (-) หมายถึงมีข้อมูลเต็มทั้งพื้นที่

ลำดับ	จังหวัด	เขต/อำเภอ	แขวง/ตำบล	พื้นที่ ศึกษา (%)	จำนวน กริด	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง			ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)		
						ความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี)	ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)				
						เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด
1	กรุงเทพมหานคร	เขตคลองเตย	แขวงคลองเตย	-	170	-0.6	0.3	-1.3	23.37	33.50	13.81
2			แขวงคลองตัน	-	69	-0.7	-0.3	-1.3	23.99	32.44	18.25
3			แขวงพระโขนง	-	117	-0.5	-0.1	-1.0	19.45	26.33	12.93
4		เขตคลองสาน	แขวงคลองสาน	7	2	0.0	0.2	-0.2	15.20	18.74	11.66
5			แขวงคลองตันเหนือ	14	6	0.1	0.3	0.0	15.02	17.76	11.66
6			แขวงบางลำภูล่าง	5	3	0.0	0.0	-0.1	15.28	16.56	14.30
7		เขตคลองสามวา	แขวงสามวาตะวันตก	2	17	-0.8	-0.1	-1.3	23.98	27.51	21.37
8			แขวงบางชัน	5	26	-0.9	0.2	-1.5	25.19	33.54	15.50
9		เขตคันนายาว	แขวงคันนายาว	55	316	-0.4	0.6	-1.4	18.17	34.07	4.03
10		เขตจตุจักร	แขวงลาดยาว	-	789	-0.8	-0.1	-1.7	23.71	35.88	14.09
11		เขตดอนเมือง	แขวงสีกัน	85	528	-1.5	-0.8	-2.7	29.81	40.30	17.24
12		เขตดินแดง	แขวงดินแดง	-	242	-0.7	0.0	-1.3	23.94	35.96	14.44
13		เขตดุสิต	แขวงถนนนครไชยศรี	62	86	-0.3	0.0	-0.5	19.47	22.90	15.85
14			แขวงดุสิต	2	1	-0.4	-0.4	-0.4	19.14	19.14	19.14
15			แขวงสวนจิตรลดา	75	33	-0.3	0.1	-0.5	18.08	21.58	13.26
16			แขวงสี่แยกมหานาค	-	11	-0.3	-0.1	-0.4	18.44	22.81	14.55
17		เขตทุ่งครุ	แขวงบางมด	55	113	-0.3	0.2	-0.7	18.69	27.30	11.63
18			แขวงทุ่งครุ	35	153	-0.6	0.0	-1.3	18.73	29.55	10.69
19		เขตบางกะปิ	แขวงคลองจั่น	-	284	-0.8	0.0	-1.5	20.53	32.82	9.90
20	แขวงหัวหมาก		83	262	-0.7	0.1	-1.8	20.22	42.02	11.54	

โดย พื้นที่ศึกษา หมายถึงพื้นที่ที่มีข้อมูลในส่วนพื้นที่ตำบลทั้งหมด โดยแสดงค่าเป็น (%) ซึ่ง เครื่องหมาย (-) หมายถึงมีข้อมูลเต็มทั้งพื้นที่

ลำดับ	จังหวัด	เขต/อำเภอ	แขวง/ตำบล	พื้นที่ศึกษา (%)	จำนวนกริด	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง			ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)		
						ความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี)	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยที่สุด
21	กรุงเทพมหานคร	เขตบางเขน	แขวงอนุสาวรีย์	-	389	-1.2	-0.5	-1.9	23.30	34.62	11.78
22			แขวงท่าแร้ง	86	348	-0.9	-0.1	-1.7	21.34	31.28	14.42
23		เขตบางคอแหลม	แขวงวัดพระยาไกร	-	37	0.0	0.3	-0.3	17.82	21.91	14.35
24			แขวงบางคอแหลม	7	4	-0.1	-0.1	-0.2	19.24	20.52	18.03
25			แขวงบางโคล่	-	115	-0.1	0.3	-0.6	19.59	24.31	15.30
26		เขตบางซื่อ	แขวงบางซื่อ	59	192	-0.7	-0.2	-1.2	22.92	29.76	16.39
27		เขตบางนา	แขวงบางนา	83	347	-0.2	0.4	-1.1	14.84	25.31	5.62
28		เขตบางรัก	แขวงมหาพฤฒาราม	-	27	-0.1	0.1	-0.3	17.38	20.40	13.93
29			แขวงสี่พระยา	-	32	-0.2	0.1	-0.6	18.03	24.59	15.36
30			แขวงบางรัก	-	17	-0.3	0.1	-0.6	21.58	24.59	19.41
31			แขวงสุรวงศ์	-	33	-0.2	0.1	-0.5	18.41	24.13	14.69
32			แขวงสีลม	-	63	-0.1	0.2	-0.5	18.61	25.09	12.49
33		เขตบึงกุ่ม	แขวงคลองกุ่ม	-	507	-0.6	0.2	-1.5	20.32	32.12	11.43
34		เขตปทุมวัน	แขวงรองเมือง	-	46	-0.2	0.0	-0.4	18.33	22.81	13.93
35			แขวงปทุมวัน	-	61	-0.2	0.2	-0.6	18.08	23.16	12.52
36			แขวงวังใหม่	-	47	-0.2	0.2	-0.5	18.42	23.51	13.67
37			แขวงลุมพินี	-	95	-0.5	0.2	-1.1	21.30	29.45	12.49
38		เขตประเวศ	แขวงประเวศ	13	80	-1.0	-0.3	-1.6	19.82	27.08	11.80
39			แขวงหนองบอน	37	119	-0.5	0.3	-1.3	16.79	24.61	9.71
40		เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย	แขวงคลองมหานาค	34	5	-0.2	-0.1	-0.3	18.09	22.81	14.55
41			แขวงเทพศิรินทร์	55	6	-0.2	0.0	-0.3	17.49	18.08	16.55
42			แขวงป้อมปราบ	66	10	-0.1	0.0	-0.3	18.30	19.66	16.63
43		เขตพญาไท	แขวงสามเสนใน	-	250	-0.6	-0.2	-1.0	23.14	28.41	17.15
44		เขตพระโขนง	แขวงบางจาก	-	325	-0.4	0.5	-1.3	16.52	25.35	7.55

โดย พื้นที่ศึกษา หมายถึงพื้นที่ที่มีข้อมูลในส่วนพื้นที่ตำบลทั้งหมด โดยแสดงค่าเป็น (%) ซึ่ง เครื่องหมาย (-) หมายถึงมีข้อมูลเต็มทั้งพื้นที่

ลำดับ	จังหวัด	เขต/อำเภอ	แขวง/ตำบล	พื้นที่ ศึกษา (%)	จำนวน กริด	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง			ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)		
						ความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี)	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยที่สุด
45	กรุงเทพมหานคร	เขตมีนบุรี	แขวงมีนบุรี	1	5	-0.1	0.1	-0.4	17.28	21.40	13.25
46		เขตยานนาวา	แขวงช่องนนทรี	-	189	-0.3	0.2	-0.7	18.93	25.93	12.84
47			แขวงบางโพงพาง	-	116	-0.1	0.5	-0.6	18.02	22.70	11.11
48		เขตราชเทวี	แขวงทุ่งพญาไท	-	78	-0.5	-0.1	-0.8	20.95	25.58	16.63
49			แขวงถนนพญาไท	-	47	-0.6	-0.3	-0.9	22.86	26.69	19.84
50			แขวงมักกะสัน	-	75	-0.7	-0.4	-1.2	23.72	28.55	19.67
51			แขวงเพชรบุรี	-	45	-0.4	-0.1	-0.8	21.42	24.76	16.13
52		เขตราชบุรีบูรณะ	แขวงบางปะกอก	11	21	-0.2	0.2	-0.6	19.05	23.03	12.12
53			แขวงราชบุรีบูรณะ	-	137	-0.2	0.5	-0.7	17.82	23.73	11.16
54		เขตลาดพร้าว	แขวงจรัญเขี้ยว	-	145	-0.9	-0.4	-1.5	20.23	27.76	12.90
55			แขวงลาดพร้าว	-	338	-0.8	-0.1	-1.4	19.89	30.65	14.04
56		เขตวังทองหลาง	แขวงวังทองหลาง	-	401	-0.6	0.1	-1.1	19.43	28.64	11.58
57		เขตวัฒนา	แขวงคลองเตยเหนือ	-	77	-0.7	-0.4	-1.1	23.88	32.44	17.90
58			แขวงคลองตันเหนือ	-	224	-0.6	-0.2	-1.2	23.75	32.44	16.65
59			แขวงพระโขนงเหนือ	-	108	-0.7	-0.2	-1.2	22.19	31.25	16.74
60		เขตสวนหลวง	แขวงสวนหลวง	-	494	-0.6	0.1	-1.5	18.22	27.47	8.10
61		เขตสะพานสูง	แขวงสะพานสูง	20	100	-0.7	-0.1	-1.4	23.37	39.41	10.47
62		เขตสัมพันธวงศ์	แขวงสัมพันธวงศ์	16	2	-0.2	0.0	-0.3	19.81	20.57	19.05
63			แขวงตลาดน้อย	-	15	-0.2	0.0	-0.5	19.51	21.15	16.63
64		เขตสาทร	แขวงทุ่งมหาเมฆ	-	93	-0.2	0.3	-0.7	18.79	23.91	14.50
65			แขวงยานนาวา	-	60	-0.2	0.3	-0.6	19.32	23.56	14.25
66			แขวงทุ่งวัดดอน	-	87	-0.2	0.3	-0.8	20.27	27.04	14.06
67		เขตสายไหม	แขวงสายไหม	65	188	-1.7	-0.2	-2.4	29.60	41.13	16.75
68			แขวงคลองถนน	91	266	-1.4	-0.8	-2.2	26.75	34.93	16.16
69	แขวงออเงิน		6	21	-0.9	-0.2	-1.5	21.66	26.87	16.75	

โดย พื้นที่ศึกษา หมายถึงพื้นที่ที่มีข้อมูลในส่วนพื้นที่ตำบลทั้งหมด โดยแสดงค่าเป็น (%) ซึ่ง เครื่องหมาย (-) หมายถึงมีข้อมูลเต็มทั้งพื้นที่

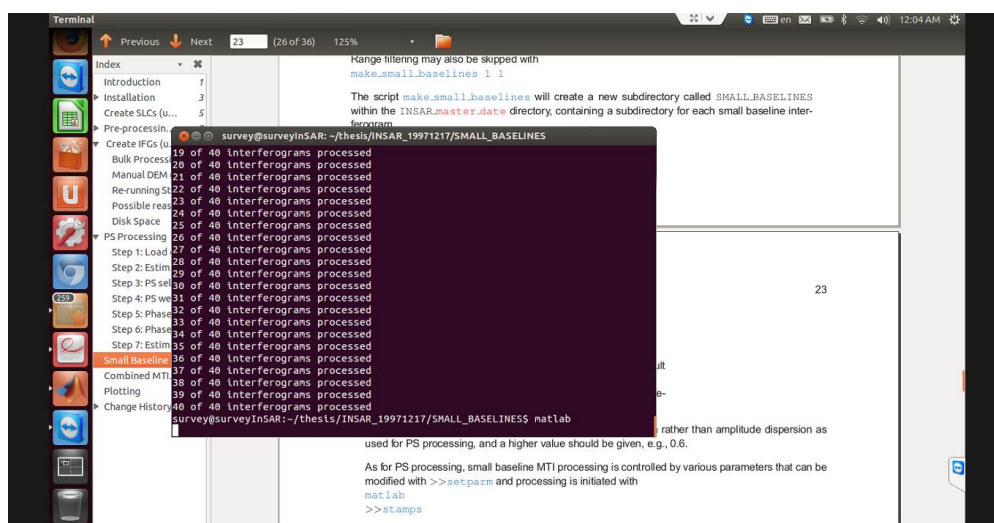
ลำดับ	จังหวัด	เขต/อำเภอ	แขวง/ตำบล	พื้นที่ศึกษา (%)	จำนวนกริด	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง			ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)			
						ความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี)	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด
70	กรุงเทพมหานคร	เขตหลักสี่	แขวงทุ่งสองห้อง	-	378	-1.3	-0.6	-2.3	28.12	39.92	19.16	
71			แขวงตลาดบางเขน	-	169	-1.1	-0.7	-2.0	22.45	32.27	15.28	
72		เขตห้วยขวาง	แขวงสามเสนนอก	-	159	-0.5	-0.2	-1.0	19.88	27.08	11.62	
73			แขวงห้วยขวาง	-	93	-0.6	-0.2	-1.3	21.55	34.85	14.39	
74			แขวงบางกะปิ	-	116	-0.6	-0.1	-1.1	21.50	28.50	14.45	
75	จ.สมุทรปราการ	อ.บางพลี	ตำบลบางแก้ว	21	131	-0.2	1.0	-0.8	23.03	39.07	5.60	
76		อ.พระประแดง	ตำบลบางกะเจ้า	-	21	0.1	0.5	-0.3	14.52	18.09	11.50	
77			ตำบลบางกอบัว	-	35	0.0	0.4	-0.3	14.67	20.00	10.74	
78			ตำบลบางยอ	-	51	0.1	0.5	-0.4	12.59	18.68	7.53	
79			ตำบลบางน้ำผึ้ง	-	31	0.0	0.3	-0.2	14.31	17.42	10.49	
80			ตำบลบางครุ	-	124	-0.1	0.3	-0.5	15.10	21.02	7.87	
81			ตำบลบางกระสอบ	-	26	0.2	0.3	-0.2	11.82	17.88	7.80	
82			ตำบลทรงคนอง	-	55	0.0	0.3	-0.2	14.61	20.33	7.80	
83			ตำบลสำโรง	-	69	-0.1	0.3	-0.6	16.05	20.94	9.04	
84			ตำบลเทศบาลตลาด	-	31	0.0	0.3	-0.3	14.93	20.33	10.54	
85			ตำบลบางหญ้าแพรก	-	114	0.1	0.5	-0.3	11.28	15.92	6.12	
86			ตำบลสำโรงกลาง	-	81	-0.3	0.2	-0.9	15.53	20.94	8.99	
87			ตำบลสำโรงใต้	-	136	-0.2	0.2	-0.7	14.29	22.79	6.96	
88			ตำบลบางครุ	-	105	-0.2	0.2	-0.7	14.89	20.54	10.69	
89			ตำบลบางหัวเสือ	65	68	0.1	0.7	-0.4	13.56	21.10	8.70	
90			ตำบลบางจาก	-	169	-0.3	0.4	-0.9	14.89	24.08	5.99	
91			อ.พระสมุทรเจดีย์	ตำบลปากคลองบางปลากด	-	111	0.2	0.6	-0.5	12.78	22.91	5.99
92				ตำบลในคลองบางปลากด	62	220	0.0	0.7	-0.8	14.40	23.94	7.27
93				ตำบลบ้านคลองสวน	2	27	-0.4	0.1	-0.8	16.41	21.01	12.74
94		ตำบลแหลมฟ้าผ่า		5	47	0.1	0.6	-0.3	13.69	18.75	9.65	

โดย พื้นที่ศึกษา หมายถึงพื้นที่ที่มีข้อมูลในส่วนพื้นที่ตำบลทั้งหมด โดยแสดงค่าเป็น (%) ซึ่ง เครื่องหมาย (-) หมายถึงมีข้อมูลเต็มทั้งพื้นที่

ลำดับ	จังหวัด	เขต/อำเภอ	แขวง/ตำบล	พื้นที่ศึกษา (%)	จำนวนกริด	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง			ค่าการทรุดตัวสุทธิ (ซม.)		
						ความเร็วในการทรุดตัว (มม./ปี)	เฉลี่ย	น้อยที่สุด	มากที่สุด	เฉลี่ย	น้อยที่สุด
95	จ.สมุทรปราการ	อ.เมืองสมุทรปราการ	ตำบลสำโรงเหนือ	-	260	-0.1	0.5	-0.6	18.13	31.70	5.94
96			ตำบลเทพารักษ์	71	182	-0.3	0.7	-0.9	24.82	42.34	7.70
97			ตำบลบางเมืองใหม่	-	141	-0.1	0.4	-0.8	21.97	35.69	11.76
98			ตำบลบางโปรง	-	64	0.1	0.7	-0.6	16.61	24.63	8.70
99			ตำบลบางค้อ	-	41	0.2	0.6	-0.5	14.69	19.34	8.77
100			ตำบลปากน้ำเทศบาล	-	169	0.1	0.9	-0.6	19.88	30.45	11.24
101			ตำบลบางเมือง	44	63	-0.2	0.3	-0.8	27.27	39.74	19.82
102			ตำบลท้ายบ้าน	46	49	0.0	0.5	-0.7	19.52	27.99	12.40
103			ตำบลแพรกษาใหม่	1	2	-0.3	-0.2	-0.5	35.18	36.12	34.23
104			ตำบลท้ายบ้านใหม่	45	76	-0.2	0.9	-0.9	26.77	36.27	13.95
105			จ.ปทุมธานี	อ.ลำลูกกา	ตำบลลาดสวาย	7	48	-0.6	-0.2	-1.4	22.87
106	ตำบลคูคต	28			160	-2.0	-1.1	-2.5	34.07	41.13	27.65
107		อ.เมืองปทุมธานี	ตำบลหลักหก	1	2	-2.0	-1.8	-2.1	36.56	37.74	35.38
108	จ.นนทบุรี	อ.ปากเกร็ด	ตำบลบ้านใหม่สุขาภิบาล	9	41	-1.3	-0.6	-2.0	25.40	31.15	17.68
109			ตำบลคลองเกลือ	59	41	-1.3	-0.8	-2.1	27.33	34.65	20.89
110			ตำบลบางตลาดสุขภิบาล	14	59	-1.6	-0.9	-2.1	28.60	33.86	22.78
111	อ.เมืองนนทบุรี		ตำบลท่าทราย	13	42	-1.2	-1.0	-1.9	30.40	39.92	24.92
112			ตำบลบางกระสอ	1	3	-1.0	-0.9	-1.1	26.88	27.62	26.20
113			ตำบลไทรมา	40	75	-1.0	-0.5	-1.6	25.59	34.63	15.25

ภาคผนวก ข ขั้นตอนการประมวลผล Time-series InSAR

การทำงานนั้นจะแบ่งเป็น 2 โปรแกรม โดยจะเป็นการใช้โปรแกรม Doris ซึ่งจะรันอยู่บน Terminal เป็นหลักซึ่งถ้าเป็นการรันคำสั่งบน Terminal นี้จะขึ้นด้วยสัญลักษณ์ (-) และโปรแกรม StampS ซึ่งจะรันอยู่บนโปรแกรม Matlab ซึ่งถ้าเป็นการรันคำสั่งในโปรแกรม Matlab นี้จะขึ้นด้วยสัญลักษณ์ (>>) โดยจะใช้การทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการ linux Ubuntu 12.04LTS ซึ่งการทำงานทั้งหมดนั้นจะอยู่ในรูปแบบ Command line ทั้งสิ้น ดังรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 ตัวอย่างหน้าจอการประมวลผลบนระบบปฏิบัติการ linux Ubuntu 12.04LTS

โปรแกรม Doris (Delft object-oriented radar interferometric software) จะใช้การรันคำสั่งบน Terminal เป็นหลัก โดยมีขั้นตอนรันคำสั่งดังนี้

- link_slcs data_path

เพื่อเป็นการสร้างโฟลเดอร์ที่ใช้ในการประมวลผล โดยที่ data_path คือ path ของโฟลเดอร์ของข้อมูลรูปภาพ SAR เมื่อทำการรันคำสั่งแล้วจะได้โฟลเดอร์ชื่อว่า SLC ขึ้นโดยจะบรรจุโฟลเดอร์ย่อยของรูปภาพทั้งหมดไว้

- cd master_date

โดยที่ master_date นั้นจะหมายถึงชื่อรูปภาพที่จะไว้ใช้เป็นภาพ Master สำหรับการประมวลผล StaMPS และไว้ใช้เป็นภาพอ้างอิงระบบทางภูมิศาสตร์ให้การประมวลผล Small Baseline ด้วย โดย master_date นั้นจะเป็นการอ้างอิงถึงชื่อภาพ Master ตลอดทั้งขั้นตอนการประมวลผลนี้

- step_read_whole_XXX โดยที่ XXX คือชื่อดาวเทียมของภาพดังเช่น “ERS”, “Envisat”, “RSAT”, “RAST2”, “TSX”, หรือ “CSK”

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการ crop ภาพมาทำการประมวลผล โดยที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การ Crop ภาพจากการกำหนดลำดับของจุดภาพและลำดับของเส้นของภาพในการอ้างอิงการ Crop แต่เนื่องจากภาพทั้งหมดที่มีนั้นมีพื้นที่ทับกันเกือบทั้งภาพเพราะฉะนั้นการกำหนดลำดับจะใช้การกำหนดให้เป็นลำดับที่อยู่ห่างออกมาจากขอบภาพเท่านั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาของข้อมูลตรงส่วนขอบภาพ

- Cp \$MY_SCR/master_crop.in . โดยจะเป็นการสร้างไฟล์ text ชื่อ master_crop ขึ้น โดยทำการใส่เลขลำดับแรกและลำดับสุดท้าย ของเส้นและพิกเซลตามลำดับ (first_l, last_l, first_p, last_p)

- Step_master_read

- cd..

- make_read

นำข้อมูล DEM ไว้ที่ Folder INSAR_master_date

- cd INSAR_master_date

หาไฟล์ที่ชื่อว่า master_date.slc.rsc โดยในไฟล์จะบรรจุค่า Heading ของภาพ master ทำการตรวจสอบและปรับแก้ค่าให้ถูกต้อง

HEADING

- step_master_orbit_ODR (พินค้ำสั่งนี้ก็ต่อเมื่อมีการใช้ข้อมูล precise orbit)

ทำการแก้ค่า ในไฟล์ที่ชื่อ timing.dorisin โดยให้ใส่ค่าตามลักษณะของไฟล์ DEM ที่ใช้โดยสามารถดูรายละเอียดได้ดังไฟล์ input.doris_DEM_Bangkok ในโฟลเดอร์ DEM โดยทำการแก้ค่าที่หัวข้อเหล่านี้ SAM_IN_FORMAT, SAM_IN_DEM, SAM_IN_SIZE, SAM_IN_DELTA, SAM_IN_UL, SAM_INNODATA

- step_master_timing

- make_orbits

- make_coarse

- make_coreg

- make_dems

- make_resample

- make_ifgs โดยจะเป็นคำสั่งในการสร้าง Interferogram ของคู่ภาพหลักกับภาพ

ทั้งหมด

- cd slave_date

โดยที่ slave_date คือชื่อภาพ slave (วันที่ทำการบันทึกภาพ) ภาพใดก็ได้เพียงภาพเดียวเท่านั้น

- step_geo

เมื่อได้ภาพ Interferogram เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประมวลผลคัดกรองจุดภาพ

- cd ..

- mt_prep 0.4 5 5 50 200

โดย 0.4 คือค่า amplitude dispersion

3 คือค่าจำนวน patch ในทิศทาง range

2 คือค่าจำนวน patch ในทิศทาง azimuth

50 คือค่าจำนวนพิกเซลที่ overlap กันระหว่าง patch ในทิศทาง range

200 คือค่าจำนวนพิกเซลที่ overlap กันระหว่าง patch ในทิศทาง azimuth

ทำการเปิดโปรแกรม matlab โดยในขั้นตอนต่อไปนี่ที่ทำการรันอยู่ในโปรแกรม matlab ทั้งหมดนั้น คืออยู่ในช่วงขั้นตอนของโปรแกรม StaMPS โดยถ้าหากคำสั่งใดขึ้นต้นด้วย >> หมายถึงคำสั่งนั้นรัน บนโปรแกรม Matlab

```
>>getparm
```

โดยเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในค่า default และทำการ ตั้งค่าพารามิเตอร์โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องทำการปรับค่าก่อนการประมวลผลคือ

```
>>setparm('scla_deramp', 'y')
```

และมีค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสำหรับจำนวนจุดที่อาจจะมีค่ารับกวนมากเกินไป โดยมี 2 พารามิเตอร์ที่สามารถปรับแก้คือ 'weed_max_noise' และ 'weed_standard_dev' และเริ่มทำการประมวลผล

```
>>stamps
```

เมื่อทำการประมวลผล StaMPS เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประมวลผลแบบ Small Baseline

ทำการเปิดโปรแกรม matlab

```
>>plot_sb_baselines
```

โดยจะเป็นการเปิดภาพกราฟการจับคู่ของภาพ Interferogram

โดยสามารถทำการปรับแก้การจับคู่ภาพได้โดยทำการปรับแก้ไฟล์ small_baseline.list เมื่อได้การ จับคู่ภาพที่ต้องการแล้ว

- make_small_baselines

ซึ่งเป็นคำสั่งในการสร้างโฟลเดอร์ SMALL_BASELINES ขึ้น

- cd SMALL_BASELINES

- mt_prep 0.6 5 5 50 200

โดย 0.6 คือค่า amplitude dispersion

3 คือค่าจำนวน patch ในทิศทาง range

2 คือค่าจำนวน patch ในทิศทาง azimuth

50 คือค่าจำนวนพิกเซลที่ overlap กันระหว่าง patch ในทิศทาง range

200 คือค่าจำนวนพิกเซลที่ overlap กันระหว่าง patch ในทิศทาง azimuth

โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ได้เหมือนกับในขั้นตอนการประมวลผล StaMPS

>>stamps

เมื่อทำการประมวลผล Small Baselines เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประมวลผลเทคนิค InSAR StamPS-MTI SB combine โดยจะเป็นการรวมทั้งสองการประมวลผลข้างต้นเข้าด้วยกัน

- cd INSAR_master_date

- ps_sb_merge จากนั้นตัวโปรแกรมจะสร้างโฟลเดอร์ MERGED ขึ้นมา

- cd MERGED

และทำการเปิดโปรแกรม matlab

>>stamps(6,8)

โดยเป็นคำสั่งคล้ายการประมวลผล stamps แต่เพียงประมวลผลในขั้นที่ 6-8 เท่านั้น

>>ps_output เป็นการสั่งให้โปรแกรมสร้างไฟล์ที่เป็นผลลัพธ์ขึ้นโดยจะมีชื่อไฟล์ว่า data.xy

ซึ่งในตัวไฟล์จะบันทึกข้อมูลจุดพิกัดและค่าอัตราการทวัดตัวเป็นรูปแบบไฟล์ ASCII โดยมีลำดับ
คอลัมน์คือ ค่าลองจิจูด, ละติจูด, ค่าการทวัดตัวในแนว LOS ของดาวเทียม



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปวัน ภิรมย์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาในระดับประถมและมัธยมในปี พ.ศ. 2552 จากโรงเรียนอัสสัมชัญและในระดับปริญญาตรีเมื่อปี พ.ศ. 2555 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิศวกรรมสำรวจ โดยมีผลงานทางวิชาการ เข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 เมื่อปี พ.ศ. 2558

ปวัน ภิรมย์ทองและอิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์. การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 .2015.

