

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดย
เทคนิค Time-Series InSAR



นายสรศักดิ์ ชัยทวี

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

INSAR TIME SERIES ANALYSIS FOR LAND SUBSIDENCE MONITORING IN EASTERN
GREATER BANGKOK

Mr. Sorasak Chaithavee



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออก ของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time- Series InSAR
โดย	นายสรศักดิ์ ชัยทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พละการ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์)

.....กรรมการ
(ดร.ชัยโชค ไวกาษา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุเฒ่า ออบแพทย์)

สรศักดิ์ ชัยทวี : การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของ กรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series InSAR (INSAR TIME SERIES ANALYSIS FOR LAND SUBSIDENCE MONITORING IN EASTERN GREATER BANGKOK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการวัดอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1600 ตารางกิโลเมตร ด้วยเทคนิค time-series InSAR โดยประมวลผลภาพดาวเทียม TerraSAR-X จำนวน 26 ภาพ ในช่วงเดือนกันยายน ปี 2009 ถึงเดือนสิงหาคม ปี 2012 สามารถให้จุดตรวจสอบการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษาประมาณ 3.7 ล้านจุดเฉลี่ยประมาณ 2300 จุดต่อตารางกิโลเมตร ตรวจพบการทรุดตัวในอัตราเร็ว 10 – 20 มิลลิเมตรต่อปี ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ และอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ส่วนในเขต กรุงเทพมหานครพื้นที่ส่วนใหญ่มีการทรุดตัวที่ช้ากว่าอยู่ในช่วง 2 – 7 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อนำข้อมูลจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR เปรียบเทียบทางสถิติกับข้อมูลจากงานระดับ พบว่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิคทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกัน มีเฉพาะพื้นที่บริเวณเทศบาลตำบลปากน้ำ อำเภอเมืองและตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ที่อัตราการทรุดตัวจาก InSAR เร็วกว่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับ และเมื่อตรวจสอบข้อมูลในพื้นที่จริงพบว่า เป็นบริเวณชานเมืองที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างน้อย และมีช่องว่างระหว่างอาคารค่อนข้างกว้าง ทำให้มีโอกาสที่จะมีการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟในแบบ double-bounce จากตึกไปสู่พื้นดิน ทำให้มีการทรุดตัวซึ่งเร็วกว่าจากชั้นผิวดินปะปนเข้าไปกับการทรุดตัวที่เกิดในชั้นก้นน้ำ นอกจากนี้เมื่อนำอัตราการทรุดจาก InSAR ในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ของงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่ทรุดตัวในอัตราที่ช้าลง มีเฉพาะพื้นที่บางส่วนของฝั่งตะวันออกของอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ และฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของเขตลาดกระบังที่พบการทรุดตัวที่เร็วขึ้นในอัตรา 3 – 6 มิลลิเมตรต่อปี ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวเมื่อนำไปทดสอบค่าสหสัมพันธ์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในช่วงเวลาเดียวกัน ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น 0.71 สอดคล้องกับงานศึกษาทางด้านอุทกวิทยาก่อนหน้านี้ที่ได้มีการสรุปไว้ว่าปัจจัยหลักของการทรุดตัวในเขตกรุงเทพมหานครคือการสูบน้ำบาดาลมาใช้

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570566221 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: INSAR / GREATER BANGKOK / TERRASAR-X / LAND SUBSIDENCE

SORASAK CHAITHAVEE: INSAR TIME SERIES ANALYSIS FOR LAND SUBSIDENCE MONITORING IN EASTERN GREATER BANGKOK. ADVISOR: ASSOC. PROF. ITTHI TRISIRISATAYAWONG, Ph.D., 97 pp.

This research determines the subsidence rate of the 1600 sq.km area of Greater Bangkok in the east side of Chaopraya river by time-series InSAR technique. The processing of 26 TerraSAR-X radar images covering the period of September 2009 to August 2012 yields about 3.7 million persistent scatterers, or about 2,300 scatterers/sq.km. Fast subsidence at the velocities between 10 – 20 mm/yr are found in Muang, Samutprakarn and Lamlooga, Pathumthani whereas slower rates of 2 – 7 mm/yr are detected in most of Bangkok. The InSAR subsidence rates and those from leveling are comparable in most areas. Two exceptions are found at Paknam municipality in Muang and tambol Rajateva in Bangpli, Samutprakarn province, that InSAR subsidence rates are faster than those obtained from leveling. Field investigation reveals that both areas are suburban where buildings are less dense and open ground between building may cause the double-bounce of radar wave from building to ground. As a result, faster subsidence of the open ground contaminates into the InSAR rates. The comparison of InSAR rates of this research with the 2005 - 2010 InSAR rates of a previous research shows that most of Bangkok has subsided more slowly, except for the east of Bangpli, Samutprakarn and the south-east of Ladkrabang where faster rates of 3 - 6 mm/yr are found. The comparison result is further tested with the change rate of groundwater of the same period. The 0.71 correlation of subsidence and groundwater change is consistent with the conclusion of a previous study stating that the main cause of Bangkok subsidence is groundwater extraction.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ. ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักของวิทยานิพนธ์ ผู้ที่คอยให้ความรู้ทฤษฎีและการปฏิบัติของเทคนิค Time-series InSAR และคอยให้คำแนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ บทความวิชาการ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านได้แก่ รศ. ดร. บรรเจิด พละการ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา กรรมการสอบ และ ดร.อนุเฒ่า ออบแพทย์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก จากสำนักพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่คอยให้คำแนะนำและแสดงความคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนการให้ความรู้เพิ่มเติมเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น และขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้วิชาความรู้ที่สามารถนำมาปรับใช้กับวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณท่าน ดร.อนุเฒ่า ออบแพทย์ อีกครั้ง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ สอนเทคนิค และการแก้ปัญหาในการประมวลผล Time-series InSAR และเอื้อเพื่อข้อมูลสารสนเทศ ภูมิศาสตร์ที่จำเป็นในการเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณกรมแผนที่ทหาร ที่ให้ความช่วยเหลือข้อมูลการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากเทคนิคงานระดับและขอขอบคุณ ร.อ.ทวิชัย ชูเชิด ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการติดต่อประสานงานในการขอข้อมูล

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล Time-series InSAR ครั้งนี้ ขอขอบคุณ TU Delft : Delft University of Technology สำหรับซอฟต์แวร์ DORIS, Andy Hooper สำหรับซอฟต์แวร์ StaMPS และขอบคุณโครงการ GEO2TECDI-SONG ที่อนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม TerraSAR-X

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	6
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การศึกษาการทรุดตัวในประเทศไทย.....	9
2.2 สภาพธรณีสัณฐานและธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา.....	11
2.3 หมุดหลักฐานทางดิ่งที่ใช้ติดตามการทรุดตัว	13
2.4 หลักการของ Time- Series InSAR	14
2.5 Persistent Scatterers (PS) method	16
2.6 Small Baselines (SB) method	16
2.7 Combined Persistent Scatterers and Small Baselines.....	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	23
3.1 การเตรียมข้อมูล.....	23

3.2 การประมวลผล Time-series InSAR.....	26
3.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษา.....	30
บทที่ 4 ผลการประมวลผล InSAR และการเปรียบเทียบกับงานระดับ.....	33
4.1 ผลของการประมวลผลด้วยเทคนิค Time-series InSAR	33
4.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับเทคนิคงานระดับ	37
บทที่ 5 ผลการเปรียบเทียบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานวิจัยที่ผ่านมาและผลการ เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล	46
5.1 ผลการเปรียบเทียบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR.....	46
5.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ บาดาล.....	48
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา.....	53
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	53
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง	57
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก การประมวลผล Time-series InSAR.....	62
ภาคผนวก ข ข้อมูลการติดตามการทรุดตัวโดยเทคนิคงานระดับ.....	73
ภาคผนวก ค กราฟการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ดาวเทียมในระบบเรดาร์ที่ได้ใช้งานในอดีตและในปัจจุบัน โดยจำแนกตามความยาวคลื่นทั้ง 3 ประเภทคือ ความยาวคลื่น X-band, C-band และ L-band.....	15
ตารางที่ 3-1 รายการภาพดาวเทียม TerraSAR-X ที่ใช้ในการประมวลผลทั้งหมด 26 ภาพ	25
ตารางที่ 3-2 เปรียบเทียบการแปลงค่าอัตราการเคลื่อนตัวในแนว (LOS) เป็นอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งของตำแหน่ง center, near range และ far range ของภาพ TerraSAR-X	29
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบทางสถิติของอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานระดับ.....	39
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าต่างของอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับค่าต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ของช่วงปี 2005 – 2010 กับ ปี 2009 - 2012.....	51



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1-1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา สีนํ้าเงินเส้นทึบเป็นพื้นที่ศึกษางานวิจัยนี้ สีแดงเส้นประเป็นพื้นที่ศึกษางานวิจัย Aobpaet et al. (2013).....	7
รูปที่ 2-1 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1978-2007 รูปจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2012).....	11
รูปที่ 2-2 ชั้นนํ้าบาดาลในพื้นที่ศึกษา รูปจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2009)	13
รูปที่ 2-3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของของเฟสตามเวลา ภาพ a การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเฟสภายในจุดภาพทั่วไป ภาพ b แสดงเฟสค่อนข้างคงที่ในจุดภาพที่มี Persistent scatterers รูปจาก Hooper et al. (2012).....	17
รูปที่ 3-1 แสดงการกระจายตัวของหุมุระดับ (จุดสีนํ้าเงินเข้ม) ที่ใช้ทดสอบความสอดคล้องอัตราการทรุดตัวกับเทคนิค InSAR ในพื้นที่ศึกษา (กรอบสีแดง).....	24
รูปที่ 3-2 แผนผังสรุปการประมวล Time-series InSAR รูปดัดแปลงมาจาก Aobpaet (2012).....	28
รูปที่ 3-3 แสดงการทรุดตัวในแนวตั้ง (ลูกศรเส้นทึบ) และการทรุดตัวในแนว LOS (ลูกศรเส้นประ) ที่ตรวจวัดได้จาก InSAR โดย θ คือค่า Incidence angle.....	29
รูปที่ 3-4 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการศึกษา	32
รูปที่ 4-1 แสดงอัตราการทรุดตัวของพื้นที่ศึกษาในช่วงปี 2009 – 2012 จากเทคนิค InSAR กรอบ B คือพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวที่น่าสนใจ จุดกลม.241 คือจุดอ้างอิงค่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิคงานระดับ	35
รูปที่ 4-2 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษาในช่วงปี 2009 – 2012 จากเทคนิค InSAR.....	36
รูปที่ 4-3 การเฉลี่ยจุดจากเทคนิค InSAR รอบหุมุระดับ (จุดสีนํ้าเงินตรงกลาง) ในรัศมี 50 เมตร ในพื้นที่ฐานสะพานลอย ใกล้แยกลาดพร้าว เขตจตุจักร (ภาพดาวเทียมจาก Google Earth)	38

รูปที่ 4-4 ภาพซ้ายคือการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟแบบ Single bounce และ double bounce ในช่วงเวลา T1 ภาพขวาคือการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟในเวลา T2 หลังจากเกิดการทรุดตัว d1 คือระยะการทรุดตัวของอาคาร d2 คือระยะการทรุดตัวของพื้นรอบอาคาร การสะท้อนแบบ double bounce ในช่วงเวลา T2 คือการทรุดตัวในระยะ d1+d2 ทำให้อัตราการทรุดตัวเร็วกว่าแบบ Single bounce ภาพดัดแปลงมาจาก (Aobpaet 2012).....	41
รูปที่ 4-5 จุดสีแดงคือตำแหน่งหมุดระดับที่มีผลทดสอบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR เร็วกว่างานระดับ	43
รูปที่ 4-6 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณวัดกิ่งแก้ว จุดที่ตั้งหมุด BM.29.....	44
รูปที่ 4-7 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณสะพานคลองชลประทาน ซอยเทศบาลบางปู 47 จุดที่ตั้งหมุด S.7037/43 (ภาพจาก Google Street View).....	44
รูปที่ 4-8 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณสะพานลอยหน้าโรงเรียนเทศบาลปากน้ำ จุดที่ตั้งหมุด S.7039/43	45
รูปที่ 5-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2009-2012 เทียบกับอัตราในปี 2005 - 2010 โดยค่าที่เป็นบวกหมายถึงพื้นที่นั้นมีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง และค่าที่เป็นลบหมายถึงพื้นที่นั้นมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น กรอบ C คือพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวที่น่าสนใจ.....	47
รูปที่ 5-2 แสดงการกระจายตัวของบ่อน้ำบาดาล (จุดสีม่วงเข้ม) ที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี 2005 – 2012 ในพื้นที่ศึกษา (กรอบสีน้ำเงิน).....	50
รูปที่ 5-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตรา การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทรุดตัวของแผ่นดินเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาอย่างยาวนาน ที่ส่งผลกระทบต่อและอาจนำไปสู่ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคารบ้านเรือน สะพาน ถนน ระบบการส่งก๊าซและน้ำในบริเวณใต้ดิน ระบบโทรคมนาคมสายเคเบิลใต้ดิน ระบบการระบายน้ำ ระบบน้ำบาดาล ระบบขนส่งที่ใช้ท่อลำเลียง การเกิดรอยแยกบนพื้นแผ่นดิน การเพิ่มความเสี่ยงในการถูกรุกน้ำท่วมและการถูกรุกน้ำท่วมในพื้นที่ชายฝั่ง จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจและการใช้ชีวิตของประชาชน (Ng et al. 2015, Ng et al. 2012) มีหลายประเทศทั่วโลกที่กำลังประสบกับปัญหาการเกิดการทรุดตัวของแผ่นดินเช่นในทวีปอเมริกามีประเทศสหรัฐอเมริกา (Kim et al. 2015, Qu et al. 2015) และเม็กซิโก (Chaussard et al. 2014, Cigna et al. 2012) ทวีปยุโรปมี ประเทศฝรั่งเศส ประเทศเยอรมัน (Samsonov et al. 2013) ประเทศโปรตุเกส (Heleno et al. 2011) และประเทศอิตาลี (Tesaro et al. 2000) ในทวีปเอเชียมีประเทศจีน (Dang et al. 2011, Liu et al. 2014, Luo et al. 2014, Yang et al. 2014) ประเทศไต้หวัน (Tung and Hu 2012) ประเทศอิหร่าน (Dehghani et al. 2013) ประเทศอินโดนีเซีย (Ge et al. 2014, Ng et al. 2012) และประเทศไทย (Aobpaet et al. 2013, Phien-wej et al. 2006) สาเหตุการเกิดการทรุดตัวของแผ่นดินมาจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไป (Chaussard et al. 2014, Dang et al. 2011, Dehghani et al. 2013, Phien-wej et al. 2006, Qu et al. 2015) และการขุดทำเหมืองเอาทรัพยากรในชั้นใต้ดินมาใช้งานเช่น ทอง เหล็ก ถ่านหิน ปิโตรเลียมและก๊าซ เป็นต้น (Liu et al. 2014, Ng et al. 2015, Samsonov et al. 2013)

การติดตามการทรุดตัวเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะสามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงและระดับความสูงของพื้นดินซึ่งเป็นความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต โดยการติดตามการทรุดตัวเป็นงานที่ต้องใช้ความละเอียดและศักยภาพสูง ต้องใช้ชุดข้อมูลที่สังเกตการทรุดตัวเป็นเวลายาวนาน เนื่องจากการทรุดตัวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งในอดีตมีการใช้เทคนิคงานระดับและเทคนิค GPS ในการตรวจสอบการทรุดตัว (Ng et al. 2015) เทคนิคงานระดับและเทคนิค GPS เป็นวิธีการติดตาม

การทรุดตัวที่ให้ความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร (Gumilar et al. 2014) แต่ถึงแม้ว่าจะมีความละเอียดสูงแต่ก็ยังประสบกับปัญหาจำนวนหมุดหรือจำนวนสถานีวัดมีจำนวนที่น้อยเมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัว และไม่สามารถเข้าถึงบางพื้นที่ได้ งานระดับมีความจำเป็นที่จะต้องเดินสายงานระดับตามพื้นที่แนวถนน เป็นการยากที่จะทำระดับในพื้นที่บนดึกหรือที่ราบลุ่มแม่น้ำหรือพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ส่วนเทคนิคงาน GPS ก็ยังมีปัญหาในหลาย ๆ พื้นที่ที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้เช่น บริเวณใกล้ตึกสูงและบริเวณที่เป็นหุบเขา ที่สำคัญทั้ง 2 เทคนิคมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ทั้งกำลังคนและเสียเวลาในการทำงานมาก ในการติดตามการทรุดตัวในพื้นที่มีขนาดใหญ่ ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีจำนวนหมุดระดับที่ใช้ติดตามการทรุดตัว 1,104 หมุดจากการออกสำรวจในปี 2012 (กองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ 2012) ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 12,000 ตารางกิโลเมตร เฉลี่ยจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากงานระดับประมาณ 10 หมุดต่อตารางกิโลเมตรเท่านั้น แต่ในทางเทคนิค Time-series InSAR เป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งช่วยติดตามการทรุดตัวที่ให้ความละเอียดจำนวนจุดตรวจสอบการทรุดตัวในเชิงพื้นที่ได้ดี เมื่อใช้ภาพถ่ายดาวเทียม RADARSAT-1 ในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร สามารถให้จุดตรวจสอบการทรุดตัว 120 จุดต่อตารางกิโลเมตร (Aobpaet et al. 2013) และเมื่อใช้ดาวเทียม TerraSAR-X ประเภท X band มีความละเอียดจุดภาพ 1.8 ตารางเมตร ในการติดตามการทรุดตัวในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล สามารถให้จุดตรวจสอบการทรุดตัวจำนวน 2500 จุดต่อตารางกิโลเมตร (สรศักดิ์ ชัยทวี และคณะ 2014)

InSAR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ผลต่างเฟสของภาพ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไป (Phase Differential) ซึ่งภาพทั้งสองจะถูกบันทึกในตำแหน่งเดียวกันแต่คนละช่วงเวลา ผลต่างเฟสนี้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (DEM) และสามารถศึกษาถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Deformation Pattern) ในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนโลกเช่นการศึกษาติดตามการเคลื่อนตัวจากเทคนิค InSAR สามารถให้ค่าความถูกต้องละเอียดถึงระดับมิลลิเมตร (Kim et al. 2015, Liu et al. 2014) เป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการติดตามการเคลื่อนตัวในพื้นที่ขนาดใหญ่ InSAR สามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน (Wang et al. 2015) การเคลื่อนตัวของธารน้ำแข็ง (Hu et al. 2014) การเคลื่อนตัวบริเวณปากคลองภูเขาไฟ (Di Traglia et al. 2014) และการทรุดตัวของแผ่นดิน เป็นต้น

สำหรับการทรุดตัวในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและกรมแผนที่ทหารดำเนินการมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 ปัญหาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลร้อยละ 69 การกดทับของอาคารสิ่งปลูกสร้างร้อยละ 29 และการทรุดตัวตามธรรมชาติร้อยละ 2 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) ปัญหาการสูบน้ำบาดาลมาใช้งานมากจนเกินไป ทำให้น้ำในชั้นทรายคืบตัวตามธรรมชาติไม่ทัน ทำให้น้ำที่อยู่ในบริเวณของชั้นกั้นน้ำ (Aquitard) หรือชั้นดินเหนียวที่กั้นระหว่างชั้นน้ำของแต่ละชั้น เข้าไปทดแทนน้ำที่เสียไปในชั้นทราย เมื่อชั้นกั้นน้ำที่เป็นดินเหนียวสูญเสีย น้ำไปทำให้ดินเหนียวเกิดการทรุดตัวลง ซึ่งทำให้พื้นที่บริเวณดังกล่าวเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล

กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม ทั้งด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การท่องเที่ยวและจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้น ทำให้ภาครัฐจำเป็นต้องจัดการด้านระบบสาธารณูปโภคให้เพียงพอต่อความต้องการ เช่น ถนน ไฟฟ้า และน้ำประปา เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการน้ำประปาให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ แต่เนื่องจากระบบน้ำประปานั้นดำเนินการได้ยาก เนื่องจากปัจจัยที่สำคัญคือแหล่งน้ำดิบซึ่งบางพื้นที่ไม่สามารถจัดหาได้ตามความต้องการขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ เช่น แหล่งกักเก็บน้ำตามธรรมชาติ ได้แก่ ลำน้ำหนอง คลอง บึง เป็นต้น และการลงทุนค่อนข้างสูงมาก ดังนั้นการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลจึงเป็นทางเลือกที่จำเป็นและสำคัญ เพื่อทดแทนระบบสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องกับน้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภค ถึงแม้ภาครัฐจะพยายามขยายขอบเขตการให้บริการน้ำประปาให้ทั่วถึงก็ตาม แต่ยังมีปัจจัยอย่างอื่นที่ทำให้มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุตสาหกรรมบางประเภทไม่สามารถใช้น้ำประปาเป็นน้ำต้นทุนในการผลิตเพราะมีสารคลอรีน เช่น อุตสาหกรรมฟอก ย้อม อาหารสำเร็จรูป เป็นต้น และพื้นที่ชุมชนบางแห่งระบบประปาไม่สามารถเข้าถึงได้ เพราะต้องใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนมากและไม่คุ้มค่ากับการลงทุน นอกจากนั้นโรงงานอุตสาหกรรมยังไม่มี ความมั่นใจในปริมาณการผลิตน้ำประปา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเหตุผลที่ทำให้อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2012) ดังนั้นการติดตามการทรุดตัวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ถึงแม้ว่าในอดีตที่ผ่านมาจะมีการศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินมาแล้วหลายครั้ง ทั้งในเทคนิคงานระดับและเทคนิค InSAR ก็ตาม

(Aobpaet et al. 2013, Phien-wej et al. 2006, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2012, กองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ 2012, ปวัน ภิรมย์ทอง และคณะ 2015, สรศักดิ์ ชัยทวี และคณะ 2014) แต่การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินก็ยังมีควมจำเป็นจะต้องศึกษาต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวในแต่ละช่วงปีของแต่ละพื้นที่ ยังขาดการศึกษาอย่างเป็นรูปธรรม การเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของแต่ละช่วงปีของแต่ละพื้นที่ที่มีข้อดีคือ ทำให้ทราบอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้นของพื้นที่ต่าง ๆ ผลจากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลหลักหรือข้อมูลประกอบให้แก่หน่วยงานที่รับผิดชอบในการแก้ปัญหาการทรุดตัว ได้แก้ไขได้อย่างทันท่วงที ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 กับงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อแสดงพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัว

เป็นที่ทราบกันว่าในอดีตการติดตามการทรุดตัวในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลใช้วิธีการทำระดับ (กองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ 2012) โดยหน่วยงานกรมแผนที่ทหาร โครงข่ายหมุดระดับที่สร้างขึ้นอยู่ในความรับผิดชอบของหลายหน่วยงาน คือ หมุดหลักฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุดของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หมุดหลักฐานทางดิ่งของกรุงเทพมหานคร หมุดหลักฐานบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และหมุดหลักฐานการแผนที่ของกรมแผนที่ทหาร ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีจำนวนหมุดระดับประมาณ 1100 จุด และยังมี การดำเนินการสำรวจหมุดระดับอย่างต่อเนื่องทุกปีจนถึงปัจจุบันในการติดตามการทรุดตัวโดยใช้เทคนิคงานระดับเป็นงานที่มีความถูกต้องสูง และค่าการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับยังเป็นที่ยอมรับและนำมาอ้างอิงในงานศึกษาที่ผ่านมา (Phien-wej et al. 2006, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2012, กองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ 2012) ในไม่กี่ปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการนำเอาเทคนิค Time-Series Interferometric Synthetic Aperture Radar (Time-series InSAR) มาศึกษาเพื่อติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน ซึ่งสามารถให้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง และเป็นวิธีการหนึ่งที่จะเป็นข้อมูลเสริมจากงานติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินที่มีอยู่แล้ว

การใช้เทคนิค Time-series InSAR ติดตามการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นวิธีการหนึ่งทางด้านการสำรวจระยะไกลที่ได้นำมาใช้ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา ซึ่งเทคนิค Time-series InSAR นั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลเฟสของภาพดาวเทียมเรดาร์ มาวิเคราะห์หาอัตราการ

เคลื่อนตัวในแนวตั้ง เทคนิคนี้สามารถให้จุดตรวจสอบมากกว่าจำนวนจุดตรวจสอบในโครงข่ายระดับ จึงมีความหนาแน่นมากพอที่จะใช้แก้ปัญหาในเรื่องจำนวนจุดตรวจสอบน้อยเกินไป และความลำเอียงทางตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดของการใช้เทคนิคงานระดับในการตรวจสอบการทรุดตัว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นที่มีการแปรเปลี่ยนทางตำแหน่งอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้มีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร (Kim et al. 2015, Liu et al. 2014) ซึ่งสามารถคำนวณจุดตรวจสอบการทรุดตัวกระจายครอบคลุมในพื้นที่ศึกษาได้ดี (Aobpaet et al. 2013, สรศักดิ์ ชัยทวี และคณะ 2014, ปวัน ภิรมย์ทอง และคณะ 2015) เนื่องจากพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีการทรุดตัวที่ไม่มีรูปแบบตายตัว บางครั้งพื้นที่ห่างกันเพียง 500 เมตรอัตราการทรุดตัวมีค่าต่างกันขนาด 10 – 15 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อเทียบกับงานระดับที่มีระยะห่างระหว่างหมุดติดตามการทรุดตัวอยู่ในช่วงกิโลเมตร จึงอาจจะไม่สามารถให้ค่าอัตราการทรุดตัวตามความเป็นจริงของแต่ละพื้นที่ได้ การใช้เทคนิค InSAR จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าว เพื่อช่วยให้ข้อมูลอัตราการทรุดตัวมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ด้วยข้อมูลภาพเรดาร์จากดาวเทียม TerraSAR-X ในช่วงเดือนกันยายนปี 2009 ถึงเดือนสิงหาคม ปี 2012 ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาและสมุทรปราการ เพื่อให้การติดตามการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค Time-series InSAR มีความต่อเนื่องจากการศึกษาก่อนหน้านี้คือช่วงปี 2005 - 2010 (Aobpaet et al. 2013) และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ต่าง ๆ กับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เพื่อหาพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัว ว่าบริเวณใดมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น และมีบริเวณใดมีอัตราการทรุดตัวที่ลดลง เนื่องจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษานั้น มีสาเหตุหลักมาจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มากเกินไป ดังนั้นอัตราการทรุดตัวย่อมแปรผันไปตามระดับของน้ำบาดาล ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลจากสถานีวัดระดับน้ำบาดาลที่กระจายอยู่ทั่วพื้นที่ศึกษา มาทำการตรวจสอบผลเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR อีกครั้ง เพื่อเป็นการยืนยันการศึกษาของ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2009) ที่ได้ศึกษาอัตราการทรุดตัวจากการลดลงของระดับแรงดันน้ำในดินเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลที่มีความสอดคล้องกัน

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1.2.1 ศึกษาหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 เพื่อให้มีข้อมูลการติดตามการทรุดตัวที่ใหม่ขึ้นและต่อเนื่องจากการติดตามการทรุดตัวในอดีตที่ผ่านมา

1.2.2 หาแนวโน้มการทรุดตัวของพื้นที่ศึกษา ในช่วงปี 2005 - 2012 จากการผนวกผลการศึกษา InSAR ในงานวิจัยนี้กับผลงานวิจัยโดยใช้ภาพ RADARSAT-1 ปี 2005 - 2010 ของ Aobpaet et al. (2013)

1.2.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

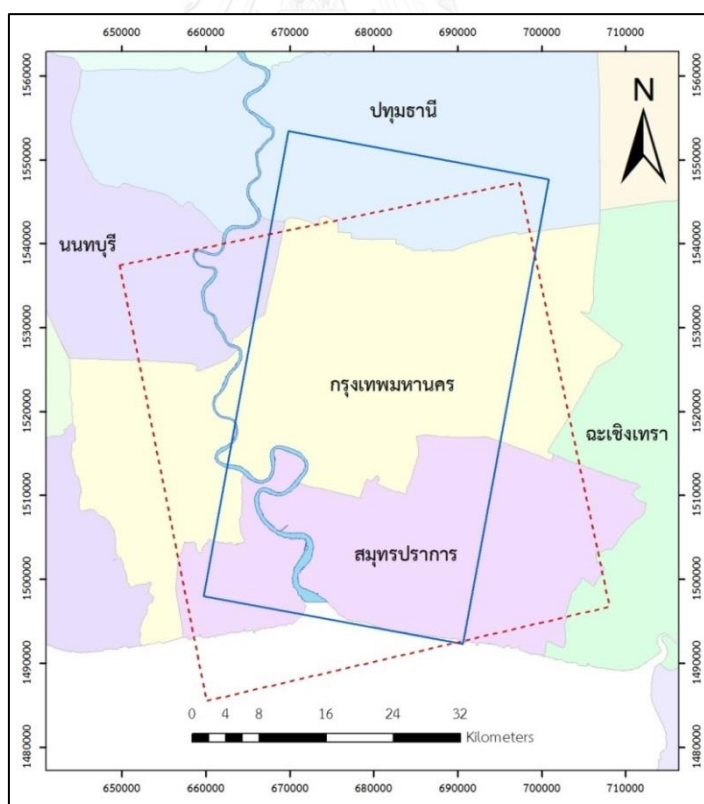
1.3.1 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงเดือนกันยายน 2009 ถึงเดือนสิงหาคม 2012 โดยใช้เทคนิค Time-series InSAR เพื่อหาจุดตรวจสอบอัตราการทรุดตัวที่ใหม่ขึ้นคือในช่วงปี 2009 – 2012 จากนั้นนำอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR มาตรวจสอบกับอัตราการทรุดตัวที่ได้จากหมวดระดับของกรมแผนที่ทหารในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ และจากนั้นนำผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยการติดตามการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิคเดียวกัน (Aobpaet et al. 2013) ในช่วงเดือนตุลาคม ปี 2005 ถึงเดือนมีนาคม ปี 2010 เพื่อวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

เนื่องจากการทรุดตัวมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลประมาณร้อยละ 70 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) การเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินจากทั้ง 2 ช่วงเวลาจึงควรมีความสอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในระหว่าง 2 ช่วงปีดังกล่าวเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จะนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในช่วงเวลาเดียวกัน มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษามีขนาดประมาณ 1600 ตารางกิโลเมตร ถูกกำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม TerraSAR-X บันทึกภาพในโหมด StripMap ในวงโคจรขาลง (Descending orbit) มีความละเอียดภาพในแนว range 1 เมตรและในแนว azimuth 2 เมตร พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่อยู่บริเวณฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา ยกเว้นเขตบางพลัด บางกอกน้อย พระนคร ธนบุรี บางกอกใหญ่ ชุมทอง ตลิ่งชัน ภาษีเจริญ บางขุนเทียน บางบอน บางแค ทวีวัฒนา และหนองแขม และครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดสมุทรปราการยกเว้นอำเภอบางบ่อ ทางตะวันออกของจังหวัดนนทบุรีและทางตอนใต้ของจังหวัดปทุมธานี ดังแสดงในรูปที่ 1-1 พื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่ซ้อนทับกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย (Aobpaet et al. 2013) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ใช้ภาพ RADARSAT-1 Path-row 2-60 ในวงโคจรขาขึ้น (ascending orbit) ในการศึกษาอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2005 - 2010 ซึ่งมีพื้นที่ศึกษาประมาณ 2500 ตารางกิโลเมตร



รูปที่ 1-1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา สีน้ำเงินเส้นทึบเป็นพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ สีแดงเส้นประเป็นพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย Aobpaet et al. (2013)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลลัพธ์การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินจากเทคนิค Time-series InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใหม่ขึ้นและมีความต่อเนื่อง จำนวนจุดตรวจสอบการทรุดตัวจาก InSAR ที่ได้จากดาวเทียม TerraSAR-X มีความละเอียดเชิงพื้นที่ได้ดี

1.4.2 ทราบถึงพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้นและพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง เมื่อนำผลจากการติดตามการทรุดตัวจาก InSAR ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

1.4.3 ทราบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาการทรุดตัวในประเทศไทย

การศึกษาที่ผ่านมาของ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) โดยหน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ทำการรวบรวมการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล จากข้อมูลการติดตามระดับการทรุดตัวของแผ่นดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและกรมแผนที่ทหารที่ได้ดำเนินการมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 ด้วยการสำรวจรังวัดหมุดหลักฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุด โดยเป็นการสำรวจระดับชั้นที่ 1 และมีการออกทำการสำรวจในทุก ๆ ปี อัตราการทรุดตัวของแต่ละปีจะได้อัตราการทรุดตัวจากการคำนวณค่าระดับของหมุดหลักฐานต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าระดับสูงของปีที่ผ่านมาโดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

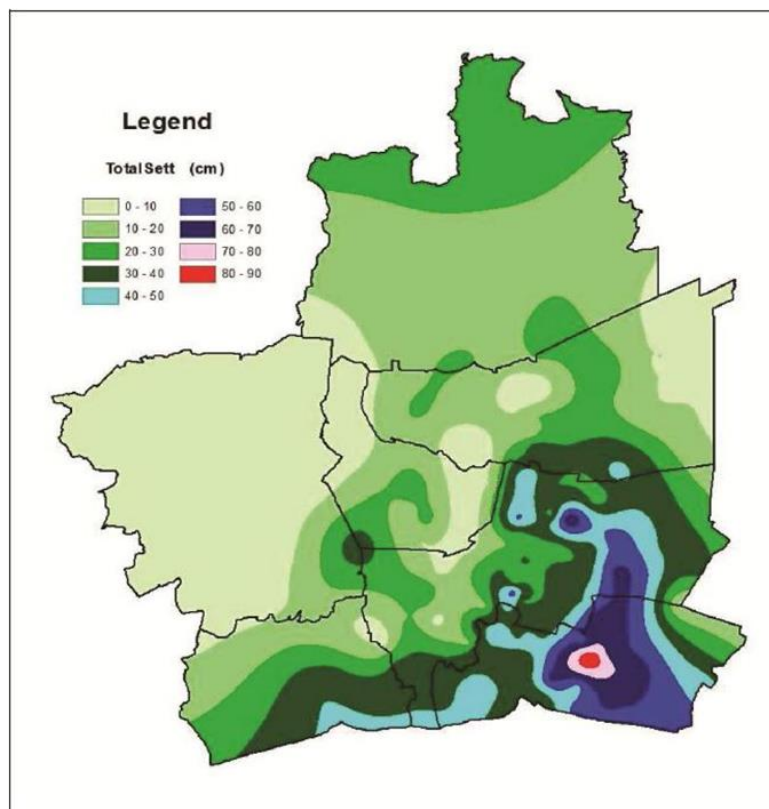
2.1.1 การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1978 - 1997 หลังจากปี ค.ศ. 1978 กรมแผนที่ทหารได้มีการสำรวจระดับพื้นดินเพื่อวัดการทรุดตัวในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอีกครั้งหนึ่งในปี ค.ศ. 1989 พบว่า ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1978 - 1987 พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีปริมาณการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 100 - 400 มิลลิเมตร โดยการทรุดตัวจะเกิดขึ้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพและขยายเพิ่มมากขึ้นไปทางด้านเหนือ ใต้ และตะวันออกของกรุงเทพมหานคร พื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวสูงส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณชานเมืองย่านตะวันออกของกรุงเทพมหานครได้แก่ เขตบางเขน พระโขนง บางกะปิ ห้วยขวาง อำเภอพระประแดงทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา อำเภอเมืองสมุทรปราการ และบริเวณย่านชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ระหว่างเขตมีนบุรีลาดกระบัง บางพลี โดยปริมาณการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับปริมาณการลดลงของระดับน้ำบาดาลตามการเจริญเติบโตของชุมชนเมือง

2.1.2 การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1994 - 1997 พื้นที่การทรุดตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในจังหวัดสมุทรปราการ บริเวณอำเภอบางพลีและบางปู โดยมีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงระยะเวลา 3 ปีเท่ากับ 80 - 200 มิลลิเมตร ส่วนพื้นที่ในกรุงเทพมหานคร บริเวณเขตดอนเมืองมีนบุรีและพื้นที่ในจังหวัดสมุทรสาคร มีปริมาณการทรุดตัวเกิดขึ้นประมาณ 80 - 100 มิลลิเมตร

พื้นที่บริเวณใจกลางกรุงเทพมหานคร ยังคงมีการทรุดตัวเกิดขึ้นด้วยอัตราการทรุดตัวเท่ากับ 10 - 15 มิลลิเมตรต่อปี ผลการทรุดตัวทั้งหมดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 - 1997 จะเห็นว่า ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดได้เพิ่มสูงขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวทั้งหมดในปี ค.ศ. 1987 โดยพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูงสุดจะมี 2 พื้นที่ พื้นที่แรกอยู่บริเวณทางตอนเหนือของกรุงเทพมหานคร ครอบคลุมพื้นที่ในเขตดอนเมือง หลักสี่ บางเขน บางกะปิ และขยายไปทางด้านตะวันออกในพื้นที่เขตพระโขนง บางนา มีนบุรี และลาดกระบัง พื้นที่ที่ 2 ส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่อำเภอบางพลีในจังหวัดสมุทรปราการ โดยมีปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดประมาณ 300 - 700 มิลลิเมตร หรือมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย ประมาณ 15 - 35 มิลลิเมตรต่อปี

2.1.3 การทรุดตัวในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1998 - 2007 การทรุดตัวมีอัตราที่ลดลงเมื่อเทียบกับอัตราการทรุดตัวในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1988 - 1997 โดยมีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อปี พื้นที่ที่มีปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดมากกว่า 100 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรปราการและพื้นที่ทางตอนใต้ของจังหวัดสมุทรสาคร โดยมีปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดสูงสุด 250 มิลลิเมตร ที่บริเวณอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

จากผลการทรุดตัวทั้งหมดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 - 2007 พบว่ามีปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดสูงสุด 880 มิลลิเมตร ที่บริเวณอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ โดยพื้นที่การทรุดตัวส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณเดียวกับพื้นที่ที่มีการทรุดตัวในปี ค.ศ. 1997 เพียงแต่มีค่าการทรุดตัวที่เพิ่มสูงขึ้นและมีพื้นที่การทรุดตัวขยายเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2-1



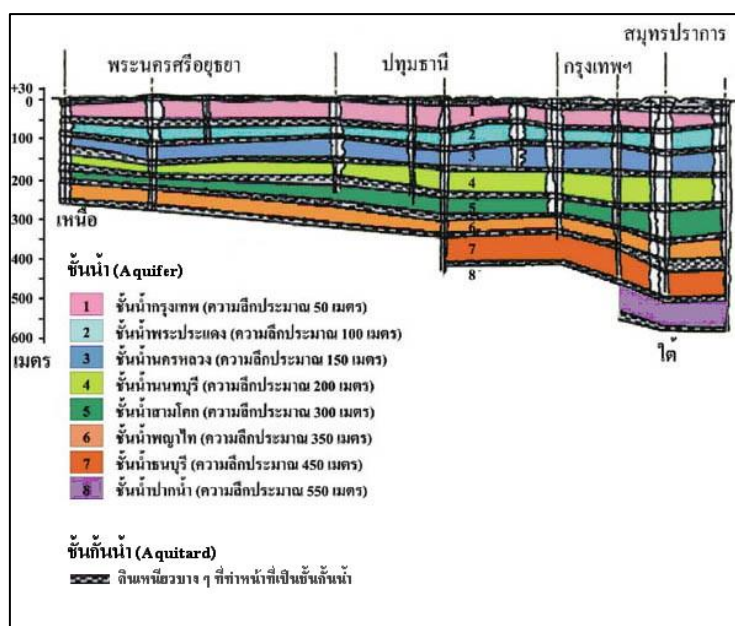
รูปที่ 2-1 ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมดในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1978-2007
รูปจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2012)

2.2 สภาพธรณีฐานและธรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษา

ธรณีฐานของกลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างมีรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยม มียอดของสามเหลี่ยมอยู่ที่จังหวัดชัยนาทแล้วแผ่กว้างลงมาทางใต้ถึงปากอ่าวไทยบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา ในปัจจุบัน มีจังหวัดลพบุรี สระบุรี นครนายก ปราจีนบุรี และฉะเชิงเทรา เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันออกและจังหวัดอุทัยธานี กาญจนบุรี และราชบุรี เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันตก ส่วนที่เป็นฐานและใจกลางของดินดอนสามเหลี่ยมได้แก่ พื้นที่ของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี นครนายก ต่ลงมาทางใต้จนถึงจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานคร สมุทรสาคร และสมุทรปราการ จากการศึกษาของ Takaya (1968) พบหลักฐานการเกิดดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยาในอดีต โดยพบร่องรอยการเคลื่อนที่และการแกว่งตัวของแม่น้ำสายหลักและสาขาในอดีตเช่น แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำน้อย แม่น้ำสุพรรณ แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำนครนายกและแม่น้ำบางปะกง ซึ่งไหลคดเคี้ยวไปมาแล้วบรรจบกับแม่น้ำข้างเคียงจนมีลักษณะเป็นร่างแห

ชั้นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) หนาประมาณ 13 - 15 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง (Medium stiff to stiff clay) หนาประมาณ 8 - 10 เมตร หลังจากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายหนาประมาณ 10 - 15 เมตร โดยชั้นดินของจังหวัดนนทบุรีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12 - 15 เมตร ซึ่งในบางพื้นที่จะพบชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ที่ระดับความลึก 2 - 6 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8 - 10 เมตร ถัดจากนั้นจะเป็นชั้นทรายหนาประมาณ 10 - 15 เมตร สำหรับชั้นดินในจังหวัดปทุมธานีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8 - 10 เมตร แต่อาจจะพบชั้นทรายแทรกอยู่บ้าง ต่อจากนั้นจะพบชั้นทรายหนาประมาณ 5 - 10 เมตร และโครงสร้างชั้นดินของจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีความแปรปรวนค่อนข้างสูงเนื่องจากเคยเป็นชายฝั่งทะเลเก่า โดยพบชั้นดินเหนียวอ่อนบางมากประมาณ 3 - 5 เมตร หรือในบางพื้นที่อาจไม่พบเลย หลังจากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8 - 10 เมตร และถัดมาจะเป็นชั้นทรายหนาประมาณ 5 - 10 เมตร (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009)

ความหนาของชั้นกรวดทรายและดินเหนียวดังกล่าวหนามาก ผลจากการสำรวจปิโตรเลียมทำให้ทราบว่า บริเวณท้องที่อำเภอภาชีเจริญมีชั้นกรวดทรายสลับชั้นดินเหนียวหนาถึง 1830 เมตร สำหรับชั้นน้ำบาดาลตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 600 เมตร แบ่งได้เป็นเป็น 8 ชั้น ที่ระดับลึกกว่า 600 เมตรลงไป ยังมีชั้นน้ำบาดาลอยู่อีกแต่ยังไม่มีการใช้ รายงานการศึกษาของ (JICA 1995) สรุปลักษณะชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล แบ่งเป็น 8 ชั้น โดยชั้นน้ำ (Aquifer) อยู่ในชั้นกรวดทราย ซึ่งถูกคั่นด้วยชั้นดินเหนียวบาง ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นน้ำ (Aquitard) ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา รูปจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2009)

สภาพธรณีฐานและธรณีวิทยาบ่งบอกถึงการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา เนื่องจากการทรุดตัวที่วัดได้จากวิธีการทำระดับเป็นการวัดการทรุดตัวจากชั้นใต้ดินไปจนถึงชั้นทรายต่าง ๆ ประมาณ 1 - 250 เมตร ส่วนการทรุดตัวที่วัดได้จากเทคนิค InSAR เป็นการวัดการทรุดตัวจากพื้นผิวที่ตกกระทบของคลื่นไมโครเวฟรวมไปถึงการทรุดตัวของชั้นทราย ในการศึกษาครั้งนี้พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นอาคารสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่ติดกัน การวัดการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR ส่วนใหญ่จึงเกิดจากการทรุดตัวในชั้นกั้นน้ำที่เป็นดินเหนียวในบริเวณชั้นทรายที่ระดับความลึกของเข็มาอาคาร แต่ก็จะมีบางพื้นที่ที่การวัดอัตราการทรุดตัวจากชั้นผิวดินรวมกับชั้นทรายเช่น บริเวณที่เป็นถนน บริเวณที่เป็นที่โล่ง บริเวณสิ่งปลูกสร้างที่วางอยู่บนชั้นผิวดินและอาคารบ้านเรือนชั้นเดียวหรือสองชั้น

2.3 มาตรฐานทางดิ่งที่ใช้ติดตามการทรุดตัว

มาตรฐานทางดิ่งที่ใช้ติดตามการทรุดตัวในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล เป็นมาตรฐานที่สร้างขึ้นและอยู่ในความรับผิดชอบของหลายหน่วยงาน คือ มาตรฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุดของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มาตรฐานทางดิ่งของกรุงเทพมหานคร มาตรฐานบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และมาตรฐานการแผนที่ของกรมแผนที่ทหาร ในส่วนของมาตรฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุดประกอบด้วย

กลุ่มหมุดหลักฐานต่างชนิดแต่อยู่ใกล้เคียงกัน ได้แก่หมุดหลักฐาน BM. และ CI. การสำรวจจะใช้วิธีการรังวัดมายังหมุดหลักฐาน BM. ก่อนแล้วทำการรังวัดหมุดหลักฐานการระดับแยก (Spur) ไปยังหมุด CI. รวมถึงการรังวัดค่าระดับผิวดินบริเวณสถานีวัดแผ่นดินทรุด ส่วนหมุดหลักฐานของกรุงเทพมหานคร (แบบเข็มเจาะ) และบริเวณบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล จะใช้วิธีการรังวัดแบบแยกเช่นกัน การเลือกหมุดที่ใช้เปรียบเทียบกับเทคนิค InSAR ในงานวิจัยนี้ เลือกจากหมุดที่มีการทำระดับอย่างต่อเนื่องและมีความลึกของหมุดอยู่ในระดับชั้นทรายเท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับการติดตามการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ที่คลื่นไมโครเวฟสะท้อนกับอาคารและตึกที่มีความลึกอยู่ในระดับชั้นทรายเช่นกัน โดยหมุดหลักฐานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ หมุดหลักฐานทางดิ่งของกรุงเทพมหานครเป็นหมุดเข็มเจาะและหมุดแควนที่มีความลึกอยู่ในชั้นทราย หมุดหลักฐานสถานีวัดแผ่นดินทรุดเป็นหมุดประเภท BM มีความลึกอยู่ในชั้นทรายเช่นเดียวกัน

2.4 หลักการของ Time- Series InSAR

ปัจจุบันมีดาวเทียมในระบบ SAR จำนวนมากที่สามารถนำมาประยุกต์กับงานที่อาศัยเทคนิค InSAR ในการวิเคราะห์ โดยประเภทของดาวเทียมในระบบเรดาร์อาศัยช่วงคลื่นย่านไมโครเวฟ หากแบ่งประเภทของดาวเทียมตามความยาวคลื่นที่นิยมนำมาใช้งาน สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามตารางที่ 2-1 ข้อมูลในตารางบอกรายละเอียดเกี่ยวกับระยะเวลาที่ปฏิบัติงานของดาวเทียมแต่ละดวง ระยะเวลาการบันทึกภาพซ้ำ และประเทศที่ทำการส่งดาวเทียม สำหรับการศึกษารังวัดที่ใช้เทคนิค InSAR นั้นควรพิจารณา คือ การวางแผนเลือกภาพถ่ายจากดาวเทียมและความเป็นไปได้ของจำนวนภาพที่นำมาใช้งาน เนื่องจากดาวเทียมในระบบ SAR ส่วนใหญ่จะไม่บันทึกภาพซ้ำในทุกที่ที่โคจรผ่านมา นอกจากมีเหตุการณ์ฉุกเฉินเร่งด่วน เช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการส่งบันทึกภาพล่วงหน้า อีกทั้งการศึกษาด้วยเทคนิค Time-series InSAR จำเป็นต้องอาศัยจำนวนภาพในการประมวลผล ยกตัวอย่างงานวิจัยของ (Hooper et al. 2007) ซึ่งพัฒนาโปรแกรม StaMPS/MTI อาศัยเทคนิค InSAR วิธี Persistent Scatterers โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม ERS-2 จำนวนอย่างน้อย 15 ภาพ จึงจะเห็นการเคลื่อนตัวบริเวณปากปล่องภูเขาไฟ Volcan Alcedo ที่ปกคลุมไปด้วยพีชพรรณได้

InSAR เป็นเทคนิคที่ดีอีกวิธีหนึ่งในการติดตามการทรุดตัว สำหรับงานทางด้าน Remote Sensing หลักการทำงานที่สำคัญของเทคนิค InSAR คืออาศัยการวิเคราะห์ผลต่างเฟสของภาพ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไป (Phase Differential) ซึ่งภาพทั้งสองจะถูกบันทึกในตำแหน่งต่างกันเล็กน้อย และมีการบันทึกภาพ SAR อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานพอสมควร ผลต่างเฟสนี้สามารถศึกษาถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Deformation Pattern) ในลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนโลก เทคนิค InSAR เป็นเครื่องมือในการติดตามการเปลี่ยนแปลงที่ให้ระดับความถูกต้องถึงในระดับมิลลิเมตร สามารถวิเคราะห์พื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง เช่น พื้นที่ภูเขาสูง พื้นที่ที่มีความลาดชัน เป็นต้น ทำให้ได้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องและทั่วถึงพื้นที่ศึกษา ซึ่งการนำเทคนิค InSAR มาใช้ในการศึกษาจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์การทรุดตัวของแผ่นดิน

ตารางที่ 2-1 ดาวเทียมในระบบเรดาร์ที่ได้ใช้งานในอดีตและในปัจจุบัน โดยจำแนกตามความยาวคลื่น ทั้ง 3 ประเภทคือ ความยาวคลื่น X-band, C-band และ L-band

ความยาวคลื่น	ดาวเทียม	ระยะเวลาปฏิบัติการ	ประเทศที่ส่งขึ้นวงโคจร	บันทึกข้อมูลซ้ำ (วัน)
X	TerraSAR-X	2007 - ปัจจุบัน	DLR, เยอรมันนี	11
	Cosmo-Skymed	2007 - ปัจจุบัน	ASI, อิตาลี	16
C	ERS-1	1991 - 2001	ESA, ยุโรป	35
	ERS-2	1995 - 2011	ESA, ยุโรป	35
	Radarsat-1	1995 - 2013	CSA, แคนาดา	24
	Radarsat-2	2007 - ปัจจุบัน	CSA, แคนาดา	24
	Envisat	2007 - ปัจจุบัน	ESA, ยุโรป	35
L	JERS-1	1992 - 1998	NASDA, ญี่ปุ่น	44
	ALOS-PALSAR1	2006 - 2010	JAXA, ญี่ปุ่น	46
	ALOS-PALSAR2	2014 - ปัจจุบัน	JAXA, ญี่ปุ่น	14

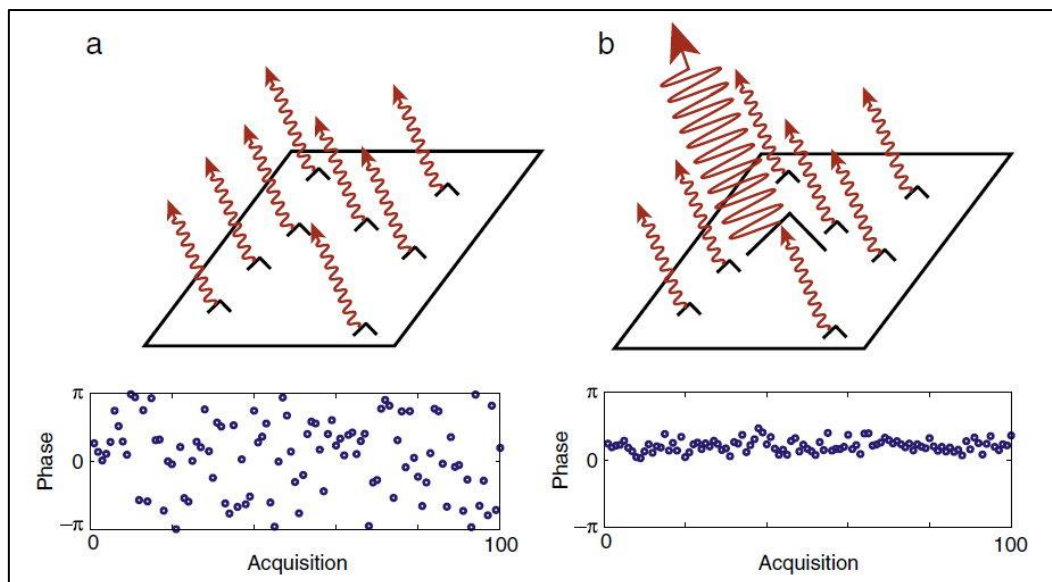
2.5 Persistent Scatterers (PS) method

วิธี Persistent scatterers เป็นการอาศัยค่าสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟที่โดดเด่นและคงที่หรือเรียกว่า Permanent scatterer (PS) คลื่นไมโครเวฟที่ส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเสาอากาศซึ่งวิธีนี้จะใช้ได้ในพื้นที่เขตเมือง ค่าการสะท้อนของแต่ละจุดภาพ (pixel) เป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ที่เกิดจากวัตถุต่าง ๆ ในแต่ละจุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2-3 เมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัตถุเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มจำนวนขึ้นหรือลดลง วัตถุจะมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเล็กลง (เช่นในกรณีของพืช) หรือมีการเปลี่ยนตำแหน่ง ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากสาเหตุใดก็ตามแล้วแต่ทำให้ผลรวมค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม หากภายในจุดภาพนั้นมีวัตถุจำนวนหนึ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุอื่น ๆ และมีการสะท้อนเช่นนี้ตลอดช่วงเวลาที่มีการบันทึกภาพ วัตถุเหล่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัตถุอื่น ๆ ภายในจุดภาพเดียวกันที่เกิดการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีขนาดเล็กกว่า จะไม่ทำให้ผลรวมของค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2-3b ในพื้นที่เขตเมือง การสะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุอื่น ๆ ส่วนใหญ่คือสิ่งปลูกสร้าง อาคารบ้านเรือน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนที่เกิดขึ้นในจุดภาพเหล่านี้ จึงอนุมานได้ว่าเกิดจากการเคลื่อนตัว (จากสาเหตุใดก็ได้แล้วแต่ เช่น แผ่นดินไหว)

2.6 Small Baselines (SB) method

เนื่องจากวิธี Persistent Scatterers นั้นใช้ภาพ master เพียงภาพเดียว ซึ่งอาจจะทำให้มีการสร้างภาพ interferogram ที่มีตำแหน่งการบันทึกภาพ (geometric baseline) และระยะห่างของเวลาการบันทึกภาพ (temporal baseline) มีระยะห่างกันมาก แต่ในวิธี Small Baseline นั้นสามารถกำหนดภาพ master สำหรับสร้าง interferogram ได้หลายภาพ ซึ่งจะใช้การจับคู่ภาพที่มี geometric baseline และ temporal baseline ที่มีระยะสั้นเพื่อทำการลด noise ที่เกิดจากการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กัน โดยทุกภาพที่สร้างขึ้นนั้นจะมี co-registration reference image ตัวเดียวกับวิธี Persistent Scatterers และเพิ่มค่า signal to noise ratio ได้ด้วยการเฉลี่ยค่าสะท้อนคลื่นไมโครเวฟจากจุดภาพรอบข้างหรือที่เรียกว่า Spectral filtering ได้อีกด้วย ซึ่งในวิธี Small Baselines นั้นใช้การคัดเลือกจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันตลอดช่วงของชุดข้อมูล เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลเหมือนกัน โดยการคัดเลือกนั้นจะพิจารณาที่คุณลักษณะของเฟส ซึ่งวิธีการในการ

คัดเลือกนั้นจะเหมือนกับวิธี Persistent Scatterers ทุกอย่างแต่จะต่างกันตรงส่วน ค่าพารามิเตอร์ (Standard) บางอย่างเท่านั้น แต่ถึงแม้ว่าวิธีการในการคัดเลือกนั้นจะเหมือนกัน แต่ชุดของจุดภาพที่ได้ออกมานั้นจะไม่เหมือนกัน เพราะว่าใช้ชุดของคู่ภาพ interferogram ที่ต่างกัน (Hooper 2008)



รูปที่ 2-3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟสตามเวลา ภาพ a การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเฟสภายในจุดภาพทั่วไป ภาพ b แสดงเฟสค่อนข้างคงที่ในจุดภาพที่มี Persistent scatterers

รูปจาก Hooper et al. (2012)

2.7 Combined Persistent Scatterers and Small Baselines

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Persistent Scatterers และ Small Baselines ร่วมกัน เพื่อให้ได้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของทั้งสองเทคนิค โดยการเพิ่มจำนวนจุดภาพจากการคัดกรองมาจากทั้งสองเทคนิค ทำให้มีค่าการวัดที่เพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มค่า signal to noise ratio (SNR) ให้กับจุดภาพที่ถูกเลือกมาจากทั้งสองเทคนิคอีกด้วย ซึ่งจุดภาพที่ถูกเลือกโดยทั้งสองเทคนิคนั้นจะมีการใช้ค่าน้ำหนักในการคำนวณเฟส ซึ่งจะทำการรวมจุดภาพที่ได้จากสองเทคนิคก่อน แล้วค่อยทำการ phase unwrapping จุดภาพทั้งหมดที่ถูกคัดเลือกมาจากทั้งสองเทคนิค เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้มีการดำเนินการอย่างยาวนานโดยหน่วยงานต่าง ๆ เช่น กรมแผนที่ทหาร กรมทรัพยากรน้ำบาดาล สถาบันการศึกษา ในช่วงเริ่มติดตามการทรุดตัวได้ใช้วิธีการทำระดับโดยกรมแผนที่ทหารและในปัจจุบันก็ยังมีการทำงานระดับเพื่อติดตามการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง มีหน่วยงานต่าง ๆ ได้นำข้อมูลที่ได้จากงานระดับไปศึกษาติดตามการทรุดตัว มีงานศึกษาของ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) ร่วมกับทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินพบว่า ข้อมูลการทรุดตัวจากข้อมูลสถานีสังเกตการณ์พบว่า การทรุดตัวของผิวดินส่วนใหญ่ในปี 2009 มีค่าอัตราการทรุดประมาณ 20 มิลลิเมตรต่อปี โดยพื้นที่ที่ยังคงมีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 20 มิลลิเมตรต่อปี อยู่บริเวณสถานีตรวจวัดที่ 22 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 32 (อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร) สถานีตรวจวัดที่ 35 (ศาลากลางจังหวัดปทุมธานี) และมีงานวิจัยโครงการสำรวจ และศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างเป็นระบบ ในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2012) ได้รายงานไว้ในปี ค.ศ. 2009 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาล โดยพิจารณาผลรวมของการยุบตัวของชั้นดินระดับลึก ร่วมกับการยุบตัวของชั้นดินชั้นบน ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวของชั้นดินที่ระดับความลึก 0 - 50 เมตร มีค่าประมาณ 60 - 85 เปอร์เซ็นต์ ของค่าการทรุดตัวทั้งหมด ส่วนชั้นดินที่ระดับความลึกมากกว่า 50 เมตร มีค่าการทรุดตัวประมาณ 15 - 40 เปอร์เซ็นต์ ของค่าการทรุดตัวทั้งหมด นอกจากนี้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยยังได้ศึกษาการทรุดตัวของชั้นดินเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาลรวมกับการทรุดตัวเนื่องจากดินถม ผลการศึกษาพบว่าการทรุดตัวเนื่องจากดินถมของชั้นดินที่ระดับความลึก 0 - 50 เมตร มีค่าประมาณ 17 - 30 เปอร์เซ็นต์ ของค่าการทรุดตัวเนื่องจากการลดระดับของน้ำบาดาล

ต่อมามีการนำเทคโนโลยีทางการสำรวจข้อมูลระยะไกล มาใช้ติดตามการทรุดตัวอีกวิธีการหนึ่งเรียกว่าเทคนิค Time-series InSAR เป็นการนำข้อมูลภาพเรดาร์หลาย ๆ ช่วงเวลา มาวิเคราะห์หาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน มีงานวิจัยจากต่างประเทศและในประเทศไทยมากมายที่ใช้เทคนิค InSAR ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน อย่างเช่นในทวีปอเมริกา ประเทศเม็กซิโก มีงานวิจัยของ Chaussard et al. (2014) ได้ใช้ดาวเทียม ALOS ของประเทศญี่ปุ่นจำนวน 600 ภาพจาก

15 วงโคจรขาขึ้น (ascending orbit) พื้นที่ศึกษาทั้งหมด 200,000 ตารางกิโลเมตร ในการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี 2007 – 2011 ทิวพื้นที่ภาคกลางของประเทศเม็กซิโก โดยใช้เทคนิค Small Baselines พบว่ามี 21 พื้นที่กับ 17 เมือง มีอัตราการทรุดตัวที่สูงกว่า 30 มิลลิเมตรต่อปี รวมถึงเม็กซิโกซิตีด้วย ในส่วนพื้นที่อื่น มีอัตราการทรุดตัวที่ 5 – 10 มิลลิเมตรต่อปีเท่า นั้น และม้งานวิจัยของ Kim et al. (2015) ได้ใช้เทคนิค Time-series InSAR ในวิธี Small Baselines เช่นเดียวกัน เพื่อศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในเมืองทูซอน รัฐแอริโซนา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ภาพดาวเทียมเรดาร์ 2 ชุดคือภาพ C-band มีดาวเทียม ERS1/2 จำนวน 17 ภาพระหว่างวันที่ 22 มิถุนายน 1993 ถึงวันที่ 5 เมษายน 2002 และดาวเทียม ENVISAT จำนวน 24 ภาพระหว่างวันที่ 30 มกราคม 2004 ถึงวันที่ 10 กันยายน 2010 และภาพ L-band คือ ดาวเทียม ALOS จำนวน 8 ภาพระหว่างวันที่ 17 ตุลาคม 2009 ถึงวันที่ 7 มีนาคม 2011 ผลการศึกษาจาก InSAR ในการประมวลผลภาพ C-band พบว่าพื้นที่ตอนกลางของเมืองทูซอน เกิดการทรุดตัวอย่างเห็นได้ชัด ในระหว่างปี 1993 – 2010 เกิดการทรุดตัว 140 – 200 มิลลิเมตร ค่าการทรุดตัวสูงสุดเกิดขึ้นทางตอนเหนือของเมืองทูซอน อัตราการทรุดตัวสูงสุดในภาพ C-band ในช่วงปี 1993 – 2010 อยู่ที่ 16 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งต่างจากภาพชุดที่ 2 ที่ใช้ภาพดาวเทียม ALOS แบบ L-band ในช่วงปี 2009 -2011 มีอัตราการทรุดตัวที่ช้ากว่าอยู่ที่ 6 มิลลิเมตรต่อปี แต่เมื่อนำค่าการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR ไปเปรียบเทียบกับงานติดตามการทรุดตัวโดยใช้ GPS ผลปรากฏว่าข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องกันได้ดี ยกเว้นบางจุดที่เครื่องรับสัญญาณ GPS อยู่ใกล้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณดังกล่าวค่าการทรุดตัวในวิธีการรังวัดด้วย GPS มีอัตราการทรุดตัวที่ช้ากว่าค่าที่ได้จากเทคนิค InSAR

ในทวีปเอเชียมีหลายประเทศที่ได้นำเทคนิค InSAR มาใช้ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน มีงานวิจัยในประเทศไต้หวันที่ใช้วิธี Persistent Scatterers เป็นงานวิจัยของ Tung and Hu (2012) ติดตามการทรุดตัวในพื้นที่บริเวณเมืองหยุนหลิน โดยใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม ERS1/2 จำนวน 33 ภาพในช่วงปี 1996 – 1999 ในเมืองหยุนหลินซึ่งเป็นเมืองเกษตรกรรม มีความจำเป็นที่จะต้องสูบน้ำบาดาลมาใช้งาน ซึ่งเป็นที่มาของการเกิดการทรุดตัวของแผ่นดิน ผลการศึกษาจาก InSAR แสดงให้เห็นว่า มีหลายพื้นที่ที่มีการทรุดตัวในอัตรา 78 มิลลิเมตรต่อปีและเมืองที่อยู่ทางตอนเหนือของหยุนหลินมีอัตราการทรุดตัวที่ 35 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อนำค่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับทั้งหมด 12 จุดผลปรากฏว่า ทั้ง 12 จุดมีค่าต่างกัน

เฉลี่ย 6.7 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งผลมีความสอดคล้องกันในระดับที่ยอมรับได้ ดังนั้นการใช้เทคนิค InSAR ติดตามการทรุดตัวของตัวอาคารใช้แรงงานและค่าใช้จ่ายในการศึกษาติดตามการทรุดตัวในเมือง หยุนหลินได้

ในประเทศจีนมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิค InSAR มากมายทั้งในวิธี Persistent Scatterers และในวิธี Small baselines ตัวอย่างเช่นงานวิจัย Dang et al. (2011) ศึกษาติดตามการทรุดตัวในเมืองเทียนจิน ประเทศจีน ซึ่งพื้นที่มีปัญหาเกิดการทรุดตัวของพื้นดินมายาวนานกว่า 50 ปี เนื่องจากสาเหตุการสูบน้ำบาดาล โดยงานวิจัยได้ใช้ข้อมูลภาพเรดาร์ ENVISAT ASAR ในช่วงปี 2004 – 2007 จำนวน 16 ภาพ ผลลัพธ์จาก InSAR ปรากฏว่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินเกิดค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ 90 มิลลิเมตรต่อปี บริเวณเมืองเทียนจินและชานเมือง ตงลี่ และต่างกุ และเมื่อนำค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR เปรียบเทียบกับงานระดับผลที่ออกมาสอดคล้องกัน ต่อมาได้มีงานศึกษาต่อเนื่องในพื้นที่เดียวกันในงานวิจัยของ Luo et al. (2014) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X จำนวน 36 ภาพ และภาพ Tandem-X อีก 1 ภาพ ในช่วงปี 2009 -2010 ประมวลผล Time-series InSAR ในวิธี Persistent Scatterers ผลการศึกษา ได้จุดตรวจสอบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR จำนวน 940,000 จุด เฉลี่ยประมาณ 522 จุดต่อตารางกิโลเมตร พื้นที่เมืองเทียนจิน มีอัตราการทรุดตัวสูงสุดที่ 60 มิลลิเมตรต่อปี และเมื่อนำค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR ไปเปรียบเทียบกับงานระดับจำนวน 8 จุด ค่าต่างของอัตราการทรุดตัวน้อยสุดอยู่ที่ 0.92 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนค่าต่างมากที่สุดอยู่ที่ 12.33 มิลลิเมตรต่อปี โดยค่า RMSE ของค่าต่างทั้ง 8 จุดเท่ากับ 6.21 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของทั้ง 2 วิธี เมื่อทดสอบเลือกจุดตรวจสอบที่ได้จากเทคนิค InSAR 10 จุดที่อยู่ใกล้เคียงกับจุดของงานระดับแล้ว สรุปว่าค่ามีความใกล้เคียงที่ยอมรับได้ และมีงานวิจัยในประเทศจีนที่ใช้เทคนิค InSAR ในวิธี Small Baselines คืองานวิจัยของ Yang et al. (2014) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม ENVISAT ASAR จำนวน 40 ภาพในช่วงปี 2003 - 2010 ผลจาก InSAR แสดงให้เห็นว่าเกิดการทรุดตัวในพื้นที่เขตโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก จากการเลือกจุดตรวจสอบการทรุดตัว 4 จุดอัตราการทรุดตัว 17, 13, 9 และ 10 มิลลิเมตรต่อปี

ในภูมิภาคอาเซียนพบว่ามียหลายประเทศที่ใช้เทคนิค InSAR ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในประเทศไทยด้วยเช่น ในประเทศอินโดนีเซียประสบปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินในเมืองจาการ์ตา ซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศอินโดนีเซีย มีงานวิจัยติดตามการทรุดตัวโดยเทคนิค InSAR ในเมืองจาการ์ตาของ Ng et al. (2012) โดยใช้วิธี Persistent Scatterers โดยใช้ภาพ ALOS PALSAR 17 ภาพ ในช่วงปี 2007 – 2010 พบว่าอัตราการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 260 มิลลิเมตรต่อปี พบในบริเวณตอนเหนือของเมืองจาการ์ตา และในเมืองเบกาซีมีอัตราการทรุดตัว 115 มิลลิเมตรต่อปี ในพื้นที่การศึกษาด้วยเทคนิค InSAR ได้ให้จุดตรวจสอบการทรุดตัวมากถึง 699,126 จุด และเมื่อนำจุดตรวจสอบการทรุดตัวจาก InSAR เปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบการทรุดตัวที่ได้จาก GPS จำนวน 19 สถานี ผลจากการเปรียบเทียบพบว่ามีความต่างกันอยู่ระหว่าง -29 มิลลิเมตรต่อปีถึง 38 มิลลิเมตรต่อปี ผลเฉลี่ยค่าต่างที่เป็นค่าสัมบูรณ์เท่ากับ 11 มิลลิเมตรต่อปี และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 16 มิลลิเมตรปี ผลการเปรียบเทียบค่าต่างระหว่างทั้ง 2 วิธี ใน 19 จุด ข้อมูลส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกัน แต่มี 2 จุดที่มีค่าต่างกันผิดปกติ แต่เมื่อลบจุด 2 จุดที่มีค่าต่างมากเกินไป ผลเฉลี่ยค่าต่างที่เป็นค่าสัมบูรณ์จะเหลือแค่ 8 มิลลิเมตรต่อปี และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเหลือ 9 มิลลิเมตรปี จากการวิจัย InSAR เป็นข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ตรวจสอบการทรุดตัวได้อีกวิธีการหนึ่ง จากข้อมูลสถานีตรวจสอบการทรุดตัว GPS เดิมที่มีอยู่แล้วในเมืองจาการ์ตา

ส่วนในประเทศไทยได้มีการนำเทคนิค Time-series InSAR มาใช้ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่บริเวณกรุงเทพและปริมณฑลเช่นเดียวกัน งานวิจัย กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2012) ได้นำภาพดาวเทียม ERS-1/2 จำนวน 18 ภาพมาประมวลผลโดยใช้วิธี Persistent Scatterers ในช่วงปี 1996 – 2000 ผลการศึกษาจากชุดภาพ ERS-1/2 มีอัตราการทรุดตัวระหว่าง 0 - 41 มิลลิเมตรต่อปี สามารถหาจุดตรวจสอบการทรุดตัวได้ประมาณ 300,000 จุด โดยมีอัตราการทรุดตัวระหว่าง 33 - 41 มิลลิเมตรต่อปี ที่บริเวณทิศเหนือและตะวันตกของกรุงเทพมหานคร ส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่เขตตอนเมืองและจังหวัดปทุมธานี ส่วนทางทิศตะวันตกที่บริเวณจังหวัดนครปฐมตอนล่างและจังหวัดสมุทรสาคร สำหรับการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับงานระดับจากกรมแผนที่ทหาร เมื่อเลือกจุดเปรียบเทียบที่มีความสอดคล้องทางด้านตำแหน่ง เวลา และความลึกจากผิวดินพบว่าส่วนใหญ่มีอัตราการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเทคนิค InSAR เป็นวิธีการที่สนใจในการใช้ติดตามการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

การใช้เทคนิค Time-series InSAR ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในปี 2012 ได้มีงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) ได้นำเทคนิค Time-series InSAR ในวิธี Persistent Scatterers และวิธี Small baselines ร่วมกัน ประมวลผล กับข้อมูลดาวเทียม RADARSAT-1 จำนวน 19 ภาพในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงปี 2005 – 2010 ผลการศึกษาจาก InSAR แสดงให้เห็นว่าอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการและอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี มีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในอัตรา 20 - 30 มิลลิเมตรต่อปี สำหรับใจกลางกรุงเทพมหานคร ทางด้านตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยามีลักษณะการทรุดค่อนข้างช้ากว่าในอัตรา ประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่บริเวณชานเมืองทางทิศเหนือและทิศตะวันตกพบอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 10 - 20 มิลลิเมตรต่อปี นอกจากนี้ InSAR ยังแสดงให้เห็นการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในเขตสะพานสูงและลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูลจากงานระดับ การทดสอบทางสถิติ (t-test) เพื่อเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวที่ได้จากการสำรวจระดับและ InSAR พบว่า มีอัตราที่สอดคล้องกัน นอกจากนี้ยังมี 10 พื้นที่ที่อัตราการทรุดตัวที่ได้จากข้อมูล InSAR มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งพบในบริเวณชานเมืองที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างน้อย และมีช่องว่างระหว่างอาคารค่อนข้างกว้าง ทำให้มีโอกาสที่จะมีการสะท้อนของเรดาร์ในแบบ double-bounce จากตึกไปสู่พื้นดิน ซึ่งจะ ทำให้ได้อัตราการทรุดตัวที่สูงกว่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

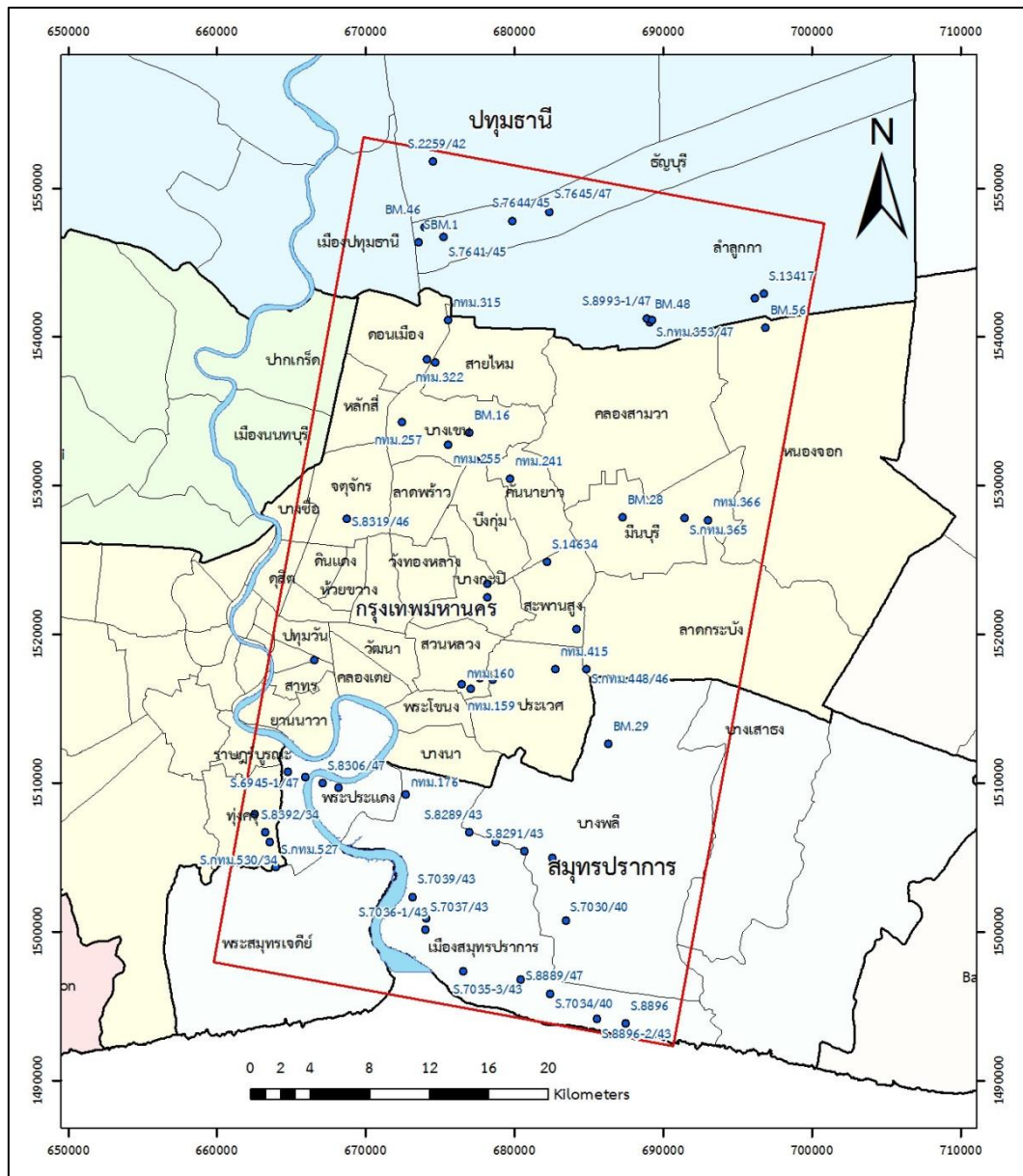
ในการศึกษาการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลโดยเทคนิค Time-series InSAR นั้น มีขั้นตอนการดำเนินงาน 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมข้อมูล การประมวลผลข้อมูล และการวิเคราะห์ผลข้อมูลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

3.1 การเตรียมข้อมูล

การศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินจากเทคนิค Time-series InSAR มีการประมวลผล และการวิเคราะห์ผล ซึ่งต้องมีข้อมูลพื้นฐานในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1.1 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X ที่ใช้ประมวลผล Time-series InSAR สาเหตุที่ไม่ใช้ภาพเรดาร์จากดาวเทียม RADARSAT-1 ต่อเนื่องจากงานวิจัย Aobpaet et al. (2013) นั้น เนื่องจากจำนวนภาพที่บันทึกในช่วงเวลาถัดมาไม่เพียงพอสำหรับการประมวลผล ในส่วนของภาพเรดาร์จากดาวเทียม RADARSAT-2 และดาวเทียมเรดาร์ดวงอื่นนั้น ยังไม่เพียงพอที่จะนำมาประมวลผล Time-Series InSAR ได้ ภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X ที่นำมาใช้งานนั้นครอบคลุมพื้นที่ศึกษาประมาณ 1600 ตารางกิโลเมตร เป็นการบันทึกภาพในโหมด StripMap มีความละเอียดภาพในแนว range 1 เมตรและในแนว azimuth 2 เมตร จำนวนภาพที่ใช้ในการประมวลผลทั้งหมด 26 ภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

3.1.2 ข้อมูลค่าระดับของหมุดระดับติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน ที่ดำเนินการรังวัดโดยกรมแผนที่ทหาร เป็นหมุดที่สร้างขึ้นจากหลายหน่วยงานเช่น หมุดหลักฐานการแผนที่ของกรมแผนที่ทหาร และหมุดหลักฐานทางดิ่งของกรุงเทพมหานคร เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกเฉพาะหมุดที่มีระดับความลึกอยู่ในชั้นทรายเท่านั้น ค่าระดับจะใช้ตรวจสอบค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR เพื่อดูความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลงานระดับที่ใช้เป็นชุดข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันคือปี 2009 - 2012 จำนวน 58 หมุด หมุดระดับทั้งหมดวางตัวกระจายอยู่ในพื้นที่ศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3-1 หมุดระดับเป็นหมุดที่มีความลึกในระดับชั้นทราย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล InSAR ที่ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่เขตเมือง คลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนส่วนใหญ่เกิดจากอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มีความลึกของเข็มอยู่ในระดับชั้นทรายเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3-1 แสดงการกระจายตัวของหมุดระดับ (จุดสีน้ำเงินเข้ม) ที่ใช้ทดสอบความสอดคล้องอัตราการทรุดตัวกับเทคนิค InSAR ในพื้นที่ศึกษา (กรอบสีแดง)

3.1.3 ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขของ (SRTM DEM) ความละเอียด 90 เมตร เป็นข้อมูล DEM ที่สามารถดาวน์โหลดฟรีในเว็บไซต์ srtm.csi.cgiar.org หรือ seamless.usgs.gov ข้อมูล DEM ส่วนนี้นำมาช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผล Time-series InSAR ที่เกิดจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ

3.1.4 ข้อมูลการใช้ น้ำบาดาลจากโครงการจัดทำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการบริหารจัดการน้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เป็นข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำบาดาลจากสถานีตรวจวัดในแต่ละพื้นที่จำนวน 20 สถานี ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ข้อมูลการใช้ น้ำบาดาลเป็นข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันกับงานวิจัยนี้ และงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) คือในช่วงปี 2009 – 2012 กับในช่วงปี 2005 - 2010 ข้อมูลดังกล่าวจะใช้ตรวจสอบผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของทั้งสองงานวิจัย เพื่อดูความสอดคล้องของผลการศึกษาคือ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลมีการลดลงที่เร็วขึ้น อัตราการทรุดตัวในบริเวณนั้น ๆ จะมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษามีสาเหตุหลักมาจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้จำนวนมากเกินไป

ตารางที่ 3-1 รายการภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X ที่ใช้ในการประมวลผลทั้งหมด 26 ภาพ

ภาพที่	วันบันทึกภาพ	ภาพที่	วันบันทึกภาพ
1	5 September 2009	14	22 March 2010
2	16 September 2009	15	2 April 2010
3	8 October 2009	16	13 April 2010
4	19 October 2009	17	24 April 2010
5	30 October 2009	18	16 May 2010
6	10 November 2009	19	27 May 2010
7	2 December 2009	20	18 June 2010
8	24 December 2009	21	29 June 2010
9	15 January 2010	22	19 April 2012
10	6 February 2010	23	2 June 2012
11	17 February 2010	24	5 July 2012
12	28 February 2010	25	27 July 2012
13	11 March 2010	26	7 August 2012

3.2 การประมวลผล Time-series InSAR

การประมวลผลข้อมูล Time-series InSAR ในงานวิจัยนี้ ใช้ 2 ซอฟต์แวร์ประมวลผล ต่อเนื่องกันคือ ซอฟต์แวร์ DORIS (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software) เวอร์ชัน 4.06 b2 ที่ถูกพัฒนาโดย Delft University of Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ และ ซอฟต์แวร์ STaMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers) เวอร์ชัน 3.3 b1 เป็น ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาเพื่อใช้ประมวลผล InSAR ในวิธี Persistent Scatterer (PS) ต่อมาได้มีการ พัฒนาต่อให้มีการประมวลผลวิธี Small Baseline รวมถึงการ combined ทั้ง 2 วิธีเข้าด้วยกันหรือที่ เรียกว่า multi-temporal InSAR ซอฟต์แวร์ STaMPS มีการพัฒนามาหลายครั้ง เริ่มต้นพัฒนาจาก Stanford University ต่อมาได้มีการพัฒนามาเป็น STaMPS/MTI โดย University of Iceland Delft University of Technology และ University of Leeds

3.2.1 การสร้าง interferograms

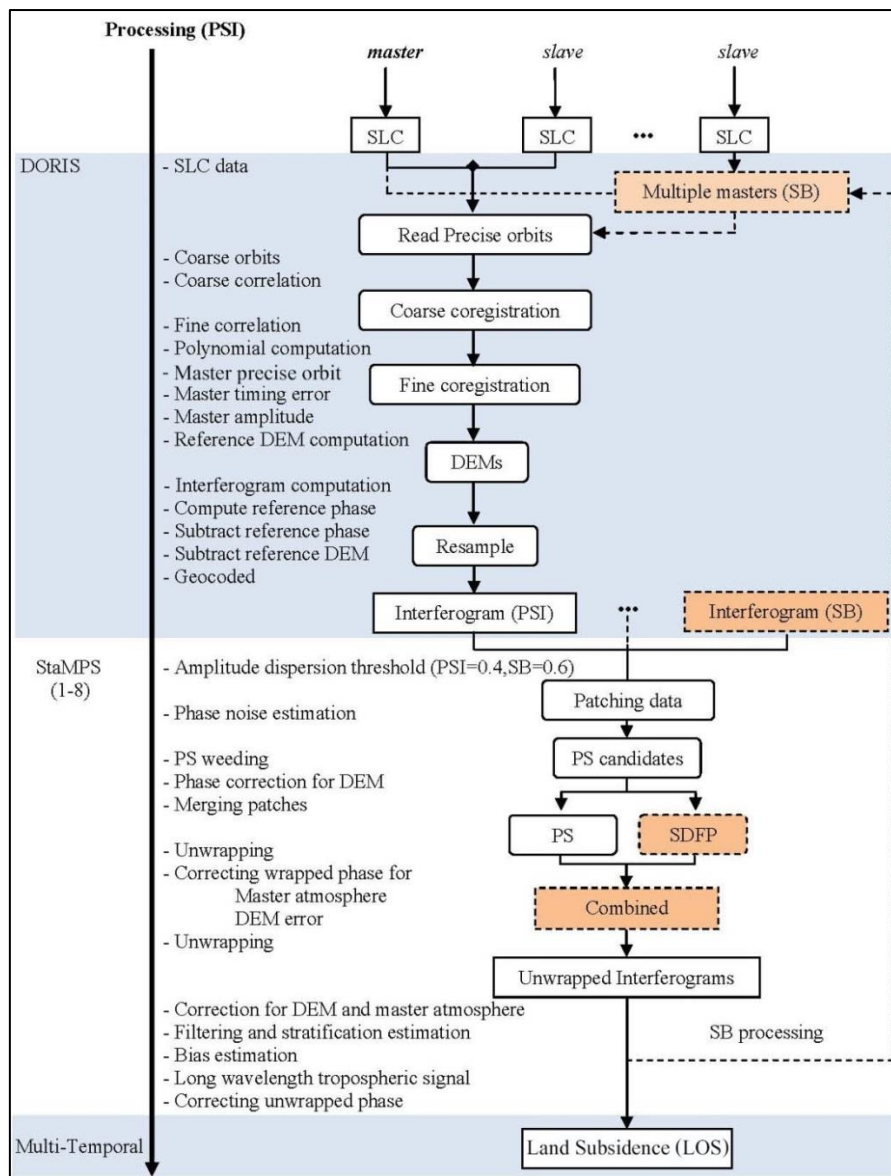
การประมวลผลข้อมูลใช้ซอฟต์แวร์ DORIS v 4.06 b2 การประมวลผลเริ่มจากการ นำภาพเรดาร์จากดาวเทียม TerraSAR-X ในรูปแบบของ Single Look Complex (SLC) จำนวน 26 ภาพ เข้าระบบประมวลผลกับซอฟต์แวร์ DORIS โดยขั้นตอนแรกซอฟต์แวร์จะทำการอ่านข้อมูล และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ DORIS Format เพื่อที่จะประมวลผลในขั้นตอนถัดไป ขั้นตอน ต่อไปเลือกภาพ Master ขึ้นมา 1 ภาพ โดย Master ที่เลือกนั้นต้องทำให้ผลรวมของค่าการไม่ สหสัมพันธ์กันของข้อมูลน้อยที่สุด โดยพิจารณาจาก spatial perpendicular baseline, temporal baseline, doppler centroid baseline และ thermal noise ในทางปฏิบัติซอฟต์แวร์ DORIS มีฟังก์ชันคำสั่งในการเลือก Master ให้อัตโนมัติ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมในส่วนนี้อยู่ใน (Hooper et al. 2007) จากข้อมูลภาพดาวเทียมเรดาร์ TerraSAR-X 26 ภาพ ได้เลือกภาพ 6 February 2010 เป็นภาพ Master แล้วทำ co-registration ให้ภาพ Slave ทุกภาพมีระบบพิกัด เดียวกันกับภาพ Master จากนั้นใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข SRTM DEM ซึ่งมีความละเอียด 90 เมตรในการลบค่าเฟสที่เกิดจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ เนื่องจากดาวเทียมที่ บันทึกรูปภาพมีตำแหน่งที่ต่างกันเล็กน้อย จึงมีขั้นตอนการทำ resample เพื่อให้จุดภาพ Slave ตรงกับ ภาพ Master ก่อนที่จะทำ Differential interferograms

การประมวลผลในวิธี Persistent Scatterers นั้นจะต้องสร้าง Differential interferograms จากการจับคู่ภาพโดยอ้างอิงภาพ Master เพียงภาพเดียว การจับคู่ภาพ Master กับภาพ Slave ทั้งหมดได้ Differential interferograms จำนวน 25 ภาพ ในส่วนของวิธี small baseline การสร้าง Differential interferograms อ้างอิงจากหลาย Master การจับคู่ภาพ Master กับ Slave นั้นอาศัยการเลือกภาพที่มีเส้นฐาน (Baseline) ที่มีระยะสั้น ๆ เพื่อลดการไม่ สหสัมพันธ์ของภาพ

3.2.2 การทำ Phase Unwrapping

ซอฟต์แวร์ STAMPS/MTI ถูกพัฒนาในรูปแบบฟังก์ชันของซอฟต์แวร์ Matlab การทำงานเริ่มจากการแปลงข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลจากซอฟต์แวร์ DORIS เป็นรูปแบบที่ รองรับการประมวล PS ในซอฟต์แวร์ matlab การทำงานของซอฟต์แวร์จะประมวลผลวิธี Persistent Scatterers กับวิธี Small Baseline แยกจากกัน แต่ขั้นตอนการทำงานเหมือนกันทุก ประการ ยกเว้นค่าพารามิเตอร์บางตัวเท่านั้น เนื่องจากการประมวลผลเก็บข้อมูลไว้ในแรม (Ram) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจำเป็นต้องแบ่งข้อมูล Differential interferograms ทั้งหมดเป็นส่วน ๆ ใน 1 ส่วนไม่ควรจะมี Differential interferograms เกิน 5 ล้านจุดภาพ ระบบประมวลผลเลือก จุดภาพที่เป็น PS Pixel (ในวิธี Persistent Scatterers) และเลือกจุดภาพที่เป็น Slowly Decorrelation Filter Phase, SDFP (ในวิธี small baseline) ข้อมูลที่ถูกแบ่งเป็นส่วน ๆ จะถูก นำกลับมารวมกันอีกครั้ง จากนั้นเข้าสู่กระบวนการ Phase Unwrapping ผลลัพธ์ได้ค่าเฟสสัมบูรณ์ ทั้งวิธี Persistent Scatterers และวิธี Small Baseline หลังจากขั้นตอนนี้เข้าสู่กระบวนการ ประมวลผลร่วมกัน (combined) ของทั้ง 2 วิธี เพื่อใช้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของทั้งสองวิธี โดย การเพิ่มจำนวนจุดภาพจากการคัดกรองมาจากทั้ง 2 วิธี ทำให้มีจุดตรวจสอบการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น และยังเป็นการเพิ่มค่า signal to noise ratio (SNR) ให้กับจุดภาพที่ถูกเลือกมาจากทั้ง 2 วิธีอีกด้วย หลังจากการรวมทั้ง 2 วิธีเข้าด้วยกันต้องทำ Phase Unwrapping อีกครั้งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและ ได้ค่าเฟสสัมบูรณ์ของค่าการเคลื่อนตัว ซึ่งขั้นตอนการประมวลผลทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-2

ค่าการเคลื่อนตัวในทิศทางของเรดาร์ line of sight (LOS) สามารถแปลงค่าให้เป็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้โดยหลักการทางตรีโกณมิติดังแสดงในรูปที่ 3-3 คือ นำค่าการเคลื่อนตัวในแนว LOS หารด้วยค่าโคไซน์ (cosine) ของมุม Incidence angle ของแต่ละจุดภาพ เพื่อลดความยุ่งยากในการประมวลผล ในงานศึกษาครั้งนี้ใช้ค่า Incidence angle ของกึ่งกลางภาพเท่านั้นในการแปลงค่าทั้งหมด เนื่องจากพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก มุม Incidence angle บริเวณ near range กับ far range ต่างจากกึ่งกลางภาพประมาณ 1.5 องศาเท่านั้น ค่าการเคลื่อนตัวในงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดที่ 23.2 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อนำค่าการเคลื่อนตัวมาทดสอบจะได้ดังแสดงในตารางที่ 3-2

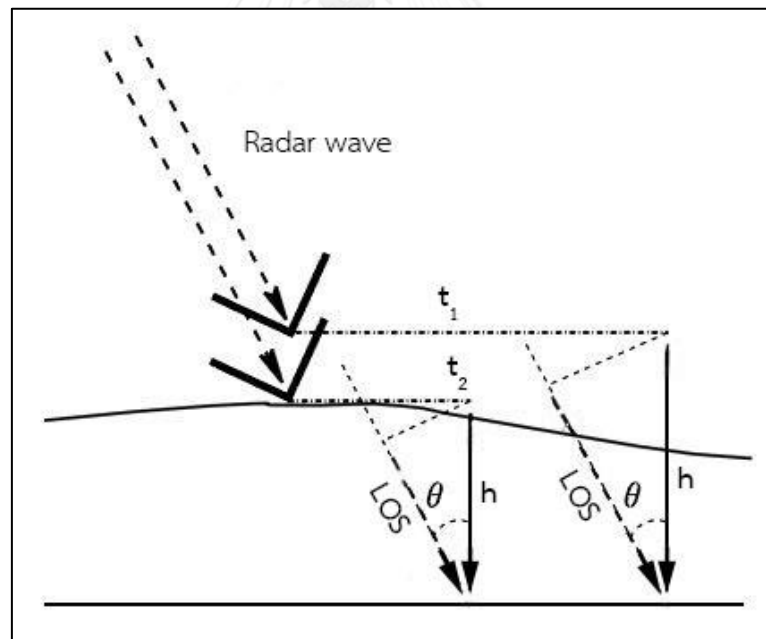


รูปที่ 3-2 แผนผังสรุปการประมวล Time-series InSAR รูปดัดแปลงมาจาก Aobpaet (2012)

ตารางที่ 3-2 เปรียบเทียบการแปลงค่าอัตราการเคลื่อนตัวในแนว (LOS) เป็นอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งของตำแหน่ง center, near range และ far range ของภาพ TerraSAR-X

ตำแหน่งในภาพ SAR	อัตราการเคลื่อนตัว (LOS) มม./ปี	Incidence angle (องศา)	อัตราการทรุดตัว มม./ปี
center	23.3	26.451	25.9
near range	23.3	25.006	25.6
far range	23.3	27.904	26.3

จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวที่แปลงได้นั้นต่างกันแค่เพียงเศษของมิลลิเมตรเท่านั้น การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีการศึกษากันในหลักมิลลิเมตร จึงไม่มีผลกระทบแต่อย่างใด ดังนั้นในงานศึกษานี้ใช้ค่ามุม Incidence angle ที่กลางภาพมีค่าเท่า 26.415 องศาในการแปลงค่าทั้งหมดเพื่อให้ได้ค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง



รูปที่ 3-3 แสดงการทรุดตัวในแนวตั้ง (ลูกศรเส้นทึบ) และการทรุดตัวในแนว LOS (ลูกศรเส้นประ) ที่ตรวจวัดได้จาก InSAR โดย θ คือค่า Incidence angle

3.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษา

การศึกษาค้างนี้หลังจากการประมวลผล Time-series InSAR และแปลงค่าให้เป็นอัตราการทรุดตัว ข้อมูลการทรุดตัวจะนำศึกษาและวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

3.3.1 ศึกษาการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผล Time-series InSAR มาเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ แสดงผลในรูปแบบของแผนที่การทรุดตัว

3.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากจุดตรวจสอบการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR กับหมุดติดตามการทรุดตัวจากเทคนิคงานระดับของกรมแผนที่ทหาร โดยมีขั้นตอนและเงื่อนไขการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

- เลือกหมุดระดับติดตามการทรุดตัวที่มีการรังวัดอย่างต่อเนื่องในช่วงปีเดียวกันกับงานวิจัยนี้ ครอบคลุมและกระจายในพื้นที่ศึกษาจำนวน 58 หมุดและหาค่าอัตราการทรุดตัวต่อปีและค่า standard deviation ของแต่ละหมุด

- เปรียบเทียบค่าอัตราการทรุดตัวและค่า standard deviation จากเทคนิค InSAR ในรัศมี 50 เมตรจากตำแหน่งของหมุดระดับเพื่อนำมาทดสอบ (T-Test) กับหมุดระดับในตำแหน่งนั้น ๆ เนื่องจากการทรุดตัวเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งอย่างรวดเร็ว ระยะห่างระหว่างจุดจาก InSAR กับหมุดระดับจึงต้องมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่สามารถจะหาได้ เหตุผลที่ไม่ใช้รัศมี 100 เมตรเหมือนงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) เนื่องจากจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X มีจุดตรวจสอบที่หนาแน่นกว่างานวิจัย Aobpaet et al. (2013) ที่ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม RADARSAT-1

- รายงานผลการทดสอบ (T-Test) ซึ่งจะได้ผลการทดสอบใน 3 รูปแบบคือ ผลอัตราการทรุดตัวของทั้ง 2 เทคนิคมีความสอดคล้องกันในทางสถิติ ผลการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR มีอัตราที่เร็วกว่าเทคนิคงานระดับ และผลการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR มีอัตราที่ช้ากว่าเทคนิคงานระดับ

3.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีขั้นตอนและเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินจากเทคนิค InSAR ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ใช้เทคนิค Time-series InSAR ติดตามการทรุดตัวในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเหมือนกันและพื้นที่โดยส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เดียวกัน

- การเปรียบเทียบใช้วิธีการเปรียบเทียบเชิงพื้นที่ โดยการสร้างพื้นที่เป็นตารางกริดขนาด 100 ตารางเมตร ครอบคลุมจำนวนจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ทั้ง 2 งานวิจัย

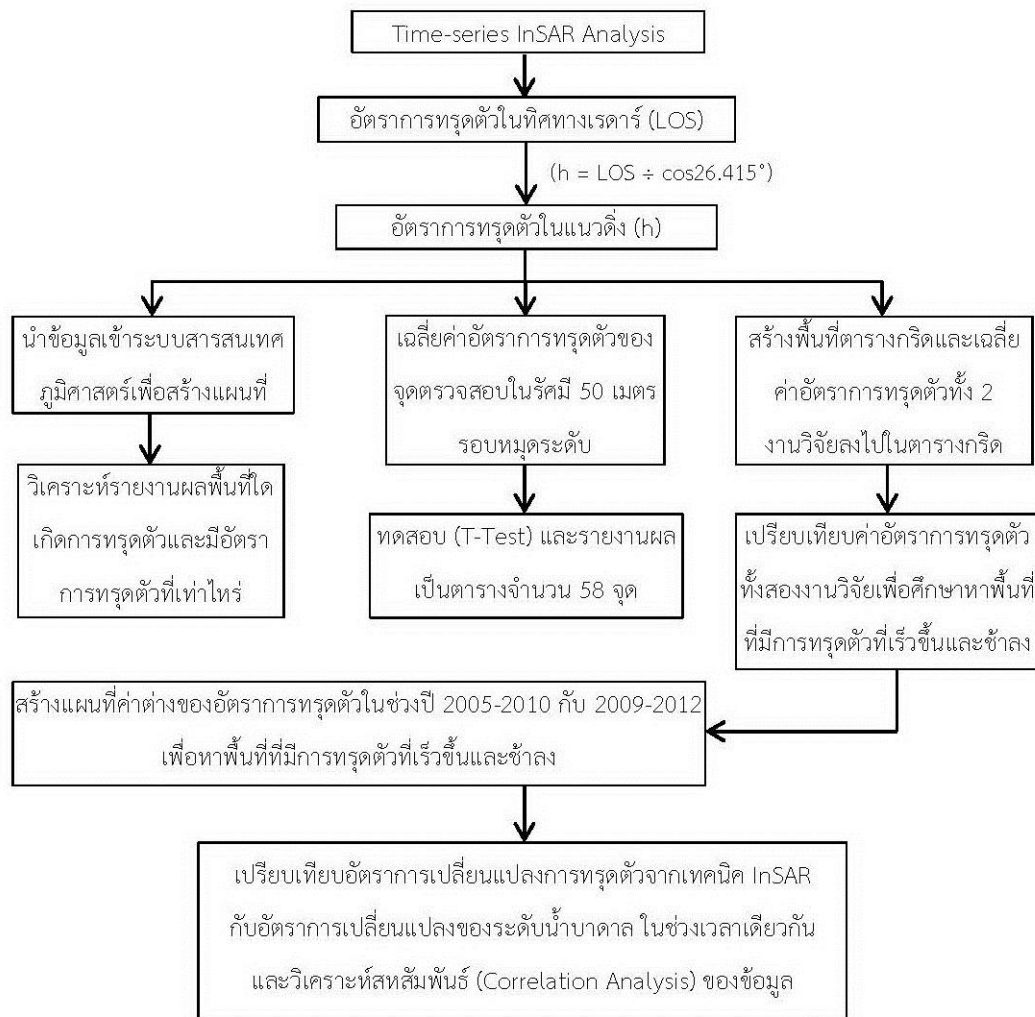
เหตุผลที่ใช้ตารางกริดขนาด 100 ตารางเมตร เนื่องจากจุดตรวจสอบการทรุดตัวในงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) มีจำนวนจุดเฉลี่ยประมาณ 120 จุดต่อตารางกิโลเมตร การกระจายตัวของจุดเหมาะสมที่จะเฉลี่ยค่าในตารางกริดขนาด 100 ตารางเมตร

- เฉลี่ยค่าอัตราการทรุดตัวของจุดตรวจสอบการทรุดตัวทั้ง 2 งานวิจัย ลงในพื้นที่ตารางกริดที่สร้างขึ้น
- นำค่าอัตราการทรุดตัวที่เฉลี่ยแต่ละตารางกริดทั้ง 2 งานวิจัยเปรียบเทียบกัน ในที่นี้เลือกเปรียบเทียบเฉพาะพื้นที่ที่มีค่าเฉลี่ยทั้ง 2 งานวิจัยเท่านั้น ถ้าหากพื้นที่ใดไม่มีค่าเฉลี่ยอัตราการทรุดตัวของงานวิจัยหนึ่ง จะไม่นำพื้นที่นั้นมาวิเคราะห์
- นำค่าการเปรียบเทียบที่ได้แต่ละตารางกริดมาจัดทำแผนที่ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยการ Interpolate เนื่องจากภาพตารางกริดที่เปรียบเทียบมีหลายช่องตารางกริดไม่มีข้อมูลการเปรียบเทียบ ตารางกริดดังกล่าวจะมีค่าว่าง จึงต้อง Interpolate เพื่อให้ได้ค่าออกมาทั่วพื้นที่ศึกษา

3.3.4 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลโดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ใช้ข้อมูลการใช้น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลในช่วงปี 2005 – 2010 และในช่วงปี 2009 - 2012 มาตรวจสอบผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR
- เลือกข้อมูลการตรวจวัดระดับบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 20 สถานี
- เปรียบเทียบโดยใช้ค่าต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลต่อปีของช่วงเวลาคือปี 2005 – 2010 กับ ปี 2009 - 2012 มาตรวจสอบกับค่าต่างของอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ในช่วงปี 2005 – 2010 (Aobpaet et al. 2013) กับช่วงปี 2009 – 2012
- วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่าง 2 ข้อมูล
- แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ และสรุปผลการทดสอบทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลเป็นขั้นตอนถัดไปจากการการประมวลผล Time-series InSAR ที่แสดงในรูปที่ 3-2 และขั้นตอนการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3-4



บทที่ 4

ผลการประมวลผล InSAR และการเปรียบเทียบกับงานระดับ

ผลการดำเนินงานกล่าวถึง ผลของการประมวลผลจากเทคนิค Time-series InSAR การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการตรวจสอบการทรุดตัวของดินจากเทคนิค InSAR กับการตรวจสอบการทรุดตัวของงานระดับ

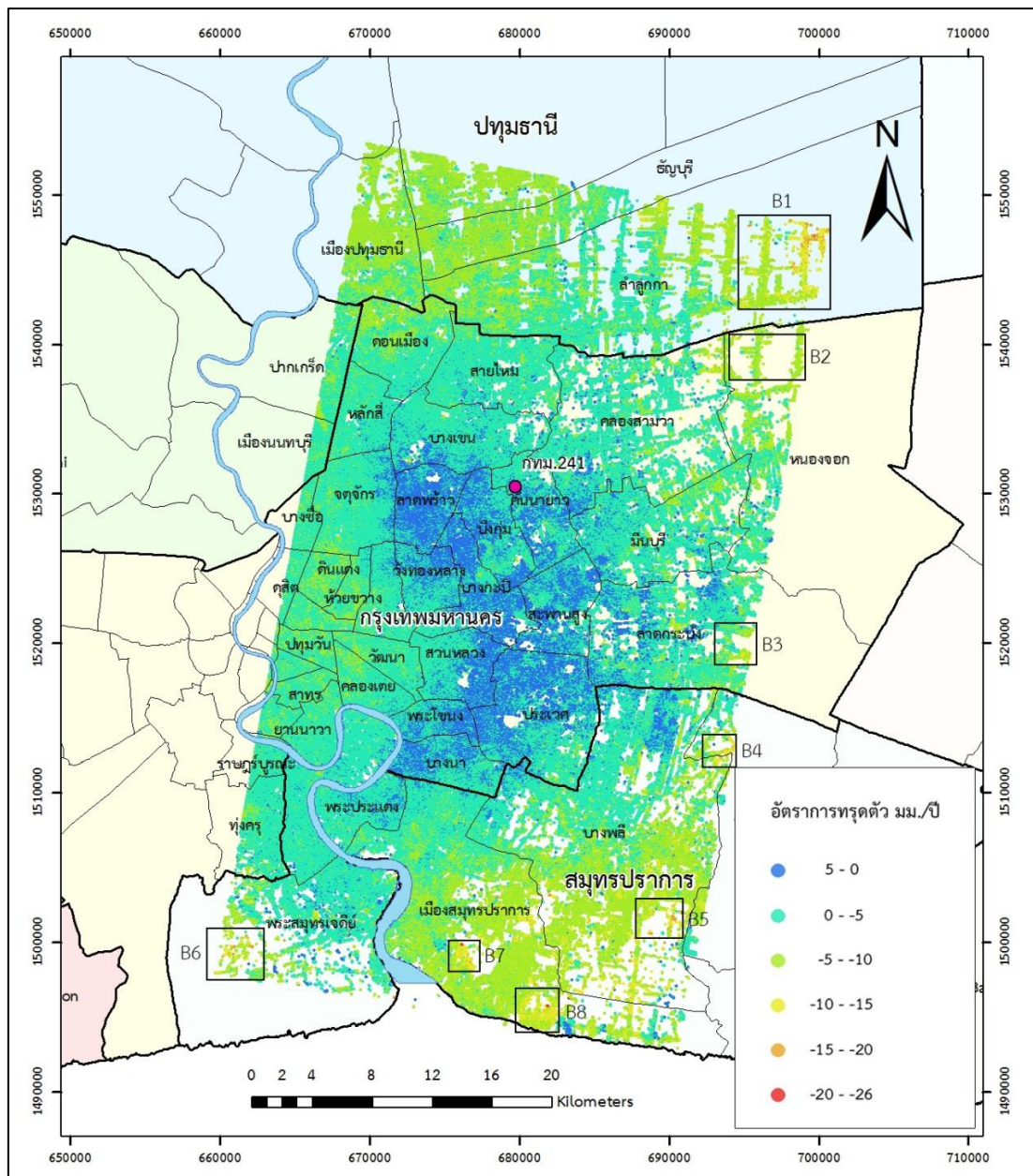
4.1 ผลของการประมวลผลด้วยเทคนิค Time-series InSAR

ในพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาและปริมณฑล มีการทรุดตัวของแผ่นดินเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทรุดตัวครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1600 ตารางกิโลเมตรเมตร จากการประมวลผลภาพถ่ายเทียม TerraSAR-X จำนวน 26 ภาพ สามารถให้จุดตรวจสอบการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษาประมาณ 3.7 ล้านจุด เฉลี่ยประมาณ 2300 จุดต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งจุดมีจำนวนหนาแน่นมากพอเพื่อแก้ปัญหาจุดตรวจสอบน้อยเกินไป จะเห็นได้ว่าจำนวนจุดตรวจสอบที่ได้จาก InSAR มีความหนาแน่นกว่าจำนวนจุดติดตามการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับจากกรมแผนที่ทหาร ซึ่งมีจำนวนประมาณ 1104 จุดทั่วพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ผลที่ได้จาก InSAR แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ศึกษามีอัตราการยกตัวขึ้น 0 - 5 มิลลิเมตรต่อปี และมีอัตราการทรุดตัว 0 - 26 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 4-1 โดยค่าที่ได้มาจากการปรับค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ให้เข้ากับงานระดับโดยอ้างอิงจากหมุดกทม.241 ตั้งอยู่ที่ธนาคารนครหลวงไทย สาขารามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 4-1 ซึ่งเป็นหมุดที่คำนวณอัตราการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ -0.6 มิลลิเมตรต่อปี พื้นที่ดังกล่าวเกือบจะไม่เกิดการทรุดตัว จำนวนจุดตรวจสอบการทรุดตัวจาก InSAR มีความหนาแน่นในบริเวณดังกล่าว และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทั้ง 2 เทคนิคมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาพื้นที่เกิดการทรุดตัวที่เร็วอยู่ในพื้นที่เขตปริมณฑลคือ บางส่วนของพื้นที่ตำบลลำไทรและตำบลบึงทองหลาง อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่เร็วมีอัตราการทรุดตัวประมาณ 15 - 25 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 4-1 B1 ในบางพื้นที่ของตำบลท้ายบ้านใหม่และตำบลบางปูใหม่ อำเภอมะนัง จังหวัดสมุทรปราการ มีการทรุดตัวที่เร็วในอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 10 - 20 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 4-1 B7 และ B8 มีพื้นที่ตำบลบางปลา อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ มีอัตราการทรุดตัว 10 - 15 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงใน

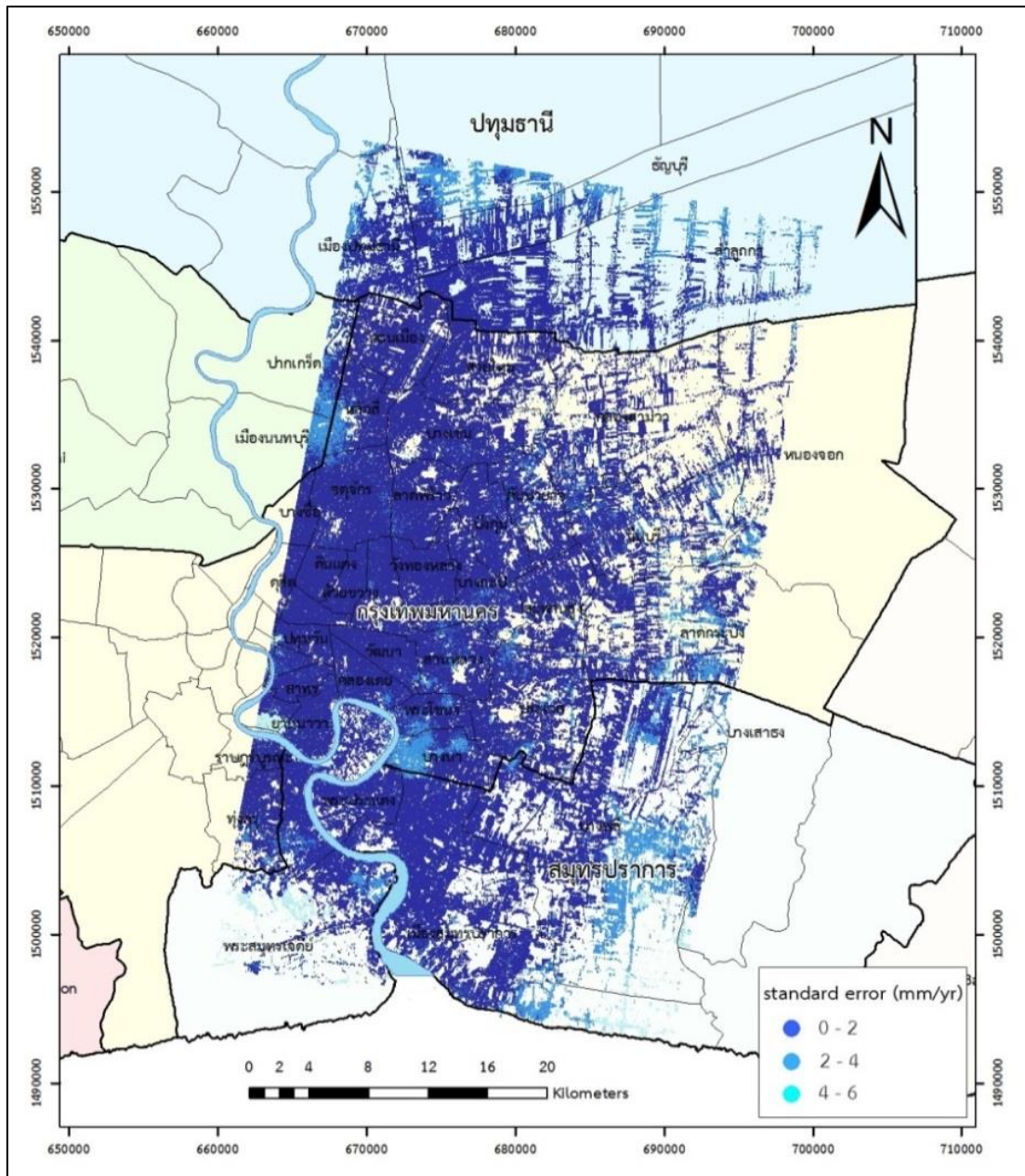
รูปที่ 4-1 B5 และในเขตพื้นที่รอยต่อของตำบลหนองปรือ อำเภอบางพลีกับตำบลศรีษะจรเข้ชั้นน้อย อำเภอบางเสาธง มีอัตราการทรุดตัว 10 – 15 มิลลิเมตรต่อปีเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4-1 B4 ส่วนของพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่มีอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 – 8 มิลลิเมตรต่อปี ยกเว้นพื้นที่บางส่วนของเขตหนองจอกและพื้นที่เขตลาดกระบัง เกิดการทรุดตัวในอัตรา 8 – 14 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเป็นเขตพื้นที่รอยต่อกับเขตปริมณฑลดังแสดงในรูปที่ 4-1 B2 และ B3 และยังมีพื้นที่บางส่วนของฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาในพื้นที่บางส่วนของตำบลบ้านหลังสวน อำเภพระเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ มีอัตราทรุดตัวประมาณ 12 – 20 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 4-1 B6

ผลจากการติดตามการทรุดตัวโดยใช้เทคนิค InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 มีหลายเขตพื้นที่ของกรุงเทพมหานครที่มีการทรุดตัวที่ช้าในอัตรา 1 – 5 มิลลิเมตรต่อปี และพบว่าบางพื้นที่ที่มีการยกตัวสูงขึ้นในอัตรา 1 – 4 มิลลิเมตรต่อปี เช่น เขตลาดพร้าว เขตวังทองหลาง เขตบางกะปิ เขตสะพานสูง เขตสวนหลวง เขตประเวศ เขตพระโขนง เขตบางนา ดังนั้นพื้นที่เกิดการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษามีอัตราที่เร็วในพื้นที่เขตปริมณฑล ส่วนพื้นที่ตอนกลางของกรุงเทพมหานครมีอัตราการทรุดตัวที่ช้ากว่า

อัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ในพื้นที่ศึกษามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 1 – 6 มิลลิเมตรต่อปี โดยพื้นที่กรุงเทพมหานครส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1 – 3 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนพื้นที่ปริมณฑลในจังหวัดสมุทรปราการ ที่ตำบลบางปู อำเภอเมือง ตำบลบางปลา อำเภอบางพลี และตำบลบางเสาธง อำเภอบางเสาธง มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 3 – 6 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 แสดงอัตราการทรุดตัวของพื้นที่ศึกษาในช่วงปี 2009 - 2012 จากเทคนิค InSAR
 กรอบ B คือพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวที่น่าสนใจ จุดกทม.241 คือจุดอ้างอิงค่าอัตราการทรุดตัวจาก
 เทคนิคงานระดับ



รูปที่ 4-2 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ศึกษาในช่วงปี 2009 – 2012 จากเทคนิค InSAR

4.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับเทคนิคงานระดับ

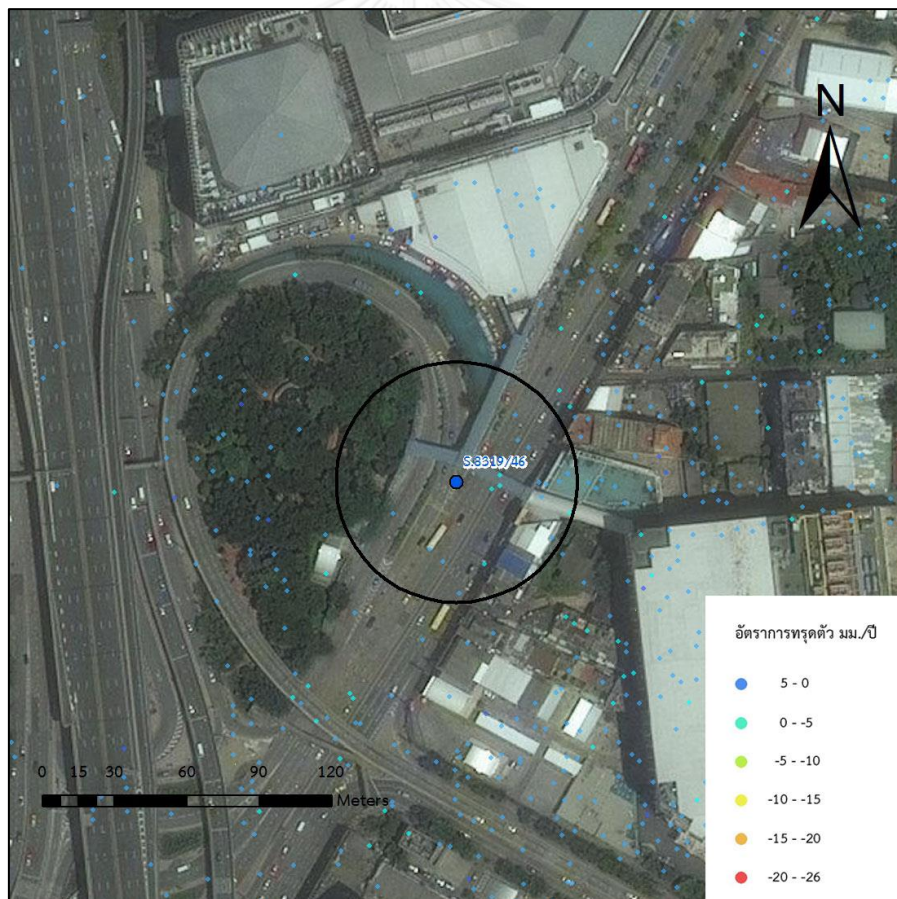
การติดตามการทรุดตัวโดยเทคนิค InSAR ได้นำมาใช้ในประเทศไทยประมาณ 7 – 8 ปี แต่ก่อนจะใช้ InSAR การติดตามการทรุดตัวในประเทศไทยได้ดำเนินการโดยวิธีงานระดับจากกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้ดำเนินการรังวัดมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 1978 ข้อมูลงานระดับเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาติดตามการทรุดตัวในอดีตจนถึงปัจจุบัน การติดตามการทรุดตัวโดยใช้ InSAR ต้องอาศัยข้อมูลจากงานระดับในการตรวจสอบอัตราการทรุดตัว เพื่อให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาครั้งนี้จะนำค่าอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับมาเปรียบเทียบกัน เนื่องจากการเปรียบเทียบไม่สามารถเปรียบเทียบแบบจุดต่อจุดได้โดยตรง เพราะจุดตรวจสอบทั้งสองวิธีไม่ได้อยู่ตำแหน่งเดียวกันโดยตรง การเปรียบเทียบจึงเลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบจุดตรวจสอบการทรุดตัวของงานระดับกับจุดตรวจสอบการทรุดตัวจาก InSAR โดยใช้วิธีการคำนวณหาจากค่าเฉลี่ยของจุดตรวจสอบจาก InSAR ในรัศมี 50 เมตรจากมุมระดับ จากนั้นหาค่าต่างของอัตราการทรุดตัวของทั้ง 2 วิธีโดยวิธีการทดสอบทางสถิติ การศึกษาครั้งนี้จะใช้มุมระดับในการเปรียบเทียบทั้งหมด 58 มุม คัดเลือกเฉพาะมุมที่มีความลึกอยู่ในชั้นทรายเท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับการติดตามการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ที่คลื่นไมโครเวฟสะท้อนกับอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ส่วนใหญ่อยู่บนเสาเข็มมีความลึกระดับชั้นทราย มุมวางตัวกระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษา

การทดสอบผลของอัตราการทรุดตัวทั้ง 2 วิธี ใช้ค่าอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR (v_{InSAR}) ที่ได้จากการเฉลี่ยรอบมุมระดับในรัศมี 50 เมตรดังแสดงในรูปที่ 4-3 กับค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับ (v_{lev}) ที่คำนวณจากค่าการทรุดตัวจำนวน 4 ปีคือ 2009 – 2012 โดยวิธี least squares โดยมี functional model แสดงในสมการ 4.1 และมีค่า standard errors ของทั้งสองวิธี คือค่า standard errors จากงานระดับ (σ_{lev}) และ standard errors จาก InSAR (σ_{InSAR}) ที่ได้จากการประมวลผลและนำค่ามาเฉลี่ยในรัศมี 50 เมตรจากมุมระดับ แล้วหาค่า standard deviation of the mean จากสูตร $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ โดยค่า n คือจำนวนจุดจาก InSAR ที่นำมาเฉลี่ย จากค่าที่ได้ทั้งหมดสามารถทดสอบทางสถิติ t-test (Fisher 1925)

$$\sum_{j=1}^m (ax_j + b - y_j)^2 = Minimum \quad (4.1)$$

การทดสอบตั้งสมมุติฐาน (hypothesis) ให้ค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับเท่ากับอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ($v_{lev} = v_{InSAR}$) ทดสอบที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % โดยเลือกสถิติที่ใช้ทดสอบสมมุติฐานดังแสดงในสมการที่ 4.2 กำหนดขอบเขตค่าวิกฤติจากการเปรียบเทียบค่าจากตาราง t-table ของค่า degree of freedom (df) ที่คำนวณจากสูตร $df = n_1 + n_2 - 2$ จากสูตรค่า n_1 คือจำนวนปีที่รังวัดงานระดับ ส่วน n_2 คือจำนวนจุดจาก InSAR ที่นำมาเฉลี่ย ขอบเขตค่าวิกฤติเป็นการตั้งสมมุติฐานแบบสองทาง (Two-tailed) ค่าวิกฤติที่คำนวณได้ (t) สามารถเปรียบเทียบได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ผลการทดสอบทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4-1

$$t = \frac{v_{InSAR} - v_{lev}}{\sqrt{\sigma^2_{InSAR} + \sigma^2_{lev}}} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4-3 การเฉลี่ยจุดจากเทคนิค InSAR รอบหมุดระดับ (จุดสีน้ำเงินตรงกลาง) ในรัศมี 50 เมตร ในพื้นที่ฐานสะพานลอย ใกล้แยกลาดพร้าว เขตจตุจักร (ภาพถ่ายเทียมจาก Google Earth)

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าค่าอัตราการทรุดตัวจากทั้ง 2 วิธีมีความสอดคล้องกัน จากการเปรียบเทียบ 58 จุด ค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดตรวจสอบจาก InSAR ที่นำมาเปรียบเทียบกับหมุดระดับอยู่ที่ 23 จุดต่อ 1 หมุดระดับ ผลการเปรียบเทียบทั้งหมดสรุปได้ดังนี้ มีจำนวน 55 จุดที่ผลทดสอบยอมรับในสมมุติฐานค่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับเท่ากับอัตราการทรุดตัวจาก InSAR และมี 3 จุดที่ปฏิเสธสมมุติฐานคือ จุดของหมุด BM.29 ตั้งอยู่ที่วัดกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ผลทดสอบปรากฏว่า การทรุดตัวจากเทคนิค InSAR มีอัตราที่เร็วกว่า 5.7 มิลลิเมตรต่อปี หมุด S.7037/43 ตั้งอยู่ที่สะพานคลองชลประทาน ซอยเทศบาลบางปู 47 ตำบลท้ายบ้านใหม่ อำเภอมะนัง จังหวัดสมุทรปราการ มีค่าการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ที่เร็วกว่าในอัตรา 2.6 มิลลิเมตรต่อปี และหมุด S.7039/43 ตั้งอยู่ที่สะพานลอยหน้าโรงเรียนเทศบาลตำบลปากน้ำ อำเภอมะนัง จังหวัดสมุทรปราการ มีค่าการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR เร็วกว่าในอัตรา 3.5 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 58 คัดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการทดสอบเป็น 94.8 %

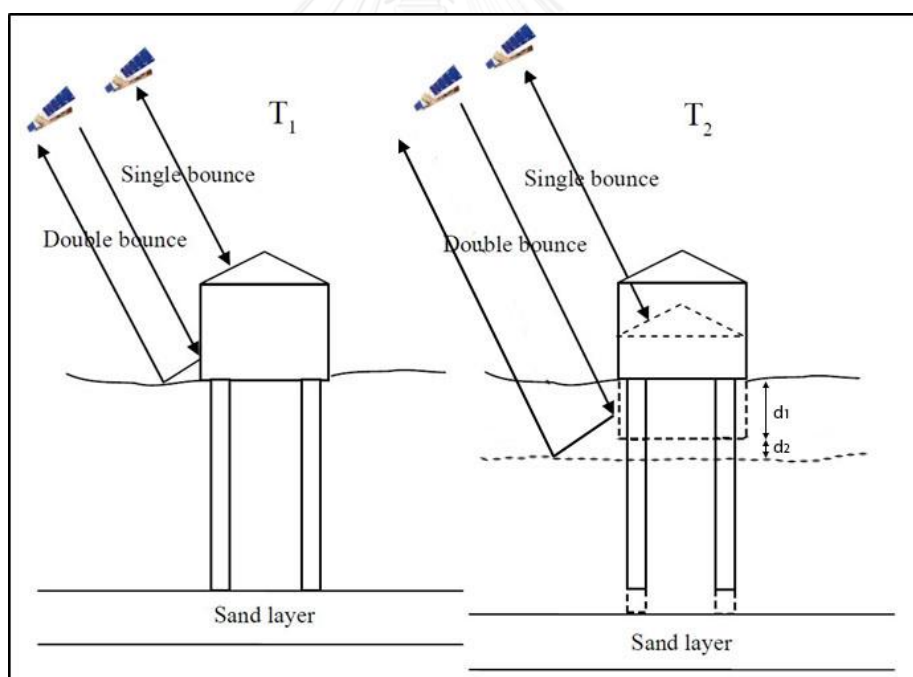
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบทางสถิติของอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานระดับ

No.	BM. ID	InSAR mm/yr		LEV mm/yr		n InSAR	n lev	t	95%
		V_{InSAR}	σ_{InSAR}	V_{lev}	σ_{lev}				
1	BM.16	-0.7	0.6	-1.3	0.5	35	4	0.835	±2.026
2	BM.18	-1.0	1.9	-1.9	1.6	5	4	0.377	±2.365
3	BM.28	-1.0	0.5	-0.9	3.7	37	4	-0.013	±2.023
4	BM.29	-3.0	0.5	2.7	1.8	49	4	-3.062	±2.008
5	BM.46	-5.8	0.6	-2.9	2.3	33	4	-1.233	±2.030
6	BM.48	-4.0	0.9	-0.5	1.7	17	4	-1.866	±2.093
7	BM.56	-7.6	2.0	-8.0	4.5	5	4	0.081	±2.365
8	S.13416-1/43	-8.2	3.8	-7.2	4.9	2	4	-0.175	±2.776
9	S.13417	-8.3	1.8	-7.6	4.0	7	4	-0.148	±2.262
10	S.14632	-0.7	0.9	-1.1	1.0	12	4	0.309	±2.145
11	S.14634	-0.3	0.9	-1.3	1.4	10	4	0.621	±2.179
12	S.2259/42	-6.7	3.4	-4.9	3.6	2	4	-0.354	±2.776
13	S.6943/47	-1.6	0.5	-1.5	0.6	34	4	-0.070	±2.028
14	S.6945-1/47	-2.9	0.4	-2.7	4.7	39	4	-0.048	±2.020
15	S.7030/40	-10.2	1.9	-8.4	1.0	3	4	-0.835	±2.571
16	S.7034/40	-11.2	2.0	-12.2	2.7	9	4	0.310	±2.201
17	S.7035-3/43	-6.8	1.0	-3.2	1.8	9	4	-1.794	±2.201
18	S.7036-1/43	-6.5	1.2	-3.6	1.0	8	4	-1.813	±2.228
19	S.7037/43	-5.7	0.6	-3.0	0.4	37	4	-3.614	±2.023
20	S.7039/43	-6.3	0.6	-2.7	0.5	23	4	-4.405	±2.060

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบทางสถิติของอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานระดับ (ต่อ)

No.	BM. ID	InSAR mm/yr		LEV mm/yr		n InSAR	n lev	t	95%
		V _{InSAR}	σ_{InSAR}	V _{lev}	σ_{lev}				
21	S.7641/45	-5.6	0.6	-2.5	1.8	31	4	-1.650	±2.035
22	S.7644/45	-5.2	0.9	-3.1	1.5	17	4	-1.176	±2.093
23	S.7645/47	-5.2	1.4	-1.6	1.7	12	4	-1.642	±2.145
24	S.8289/43	-2.7	0.7	-2.8	0.6	22	4	0.134	±2.064
25	S.8290/43	-4.8	0.8	-4.1	0.7	29	4	-0.686	±2.040
26	S.8291/43	-4.8	0.6	-5.7	0.6	27	4	1.043	±2.045
27	S.8292/43	-5.4	0.8	-4.2	0.6	13	4	-1.231	±2.131
28	S.8306/47	-3.0	0.4	-2.5	0.7	37	4	-0.491	±2.023
29	S.8319/46	-4.0	0.7	-3.5	0.5	22	4	-0.507	±2.064
30	S.8392/34	-2.4	0.8	-1.2	3.6	18	4	-0.312	±2.086
31	S.8889/47	-6.0	1.4	-4.5	1.5	11	4	-0.735	±2.160
32	S.8896	-5.8	2.3	-7.1	1.2	20	4	0.498	±2.074
33	S.8896-2/43	-0.1	2.7	0.2	2.4	15	4	-0.082	±2.110
34	S.8993-1/47	-4.6	0.8	-7.8	1.8	24	4	1.637	±2.056
35	S.ws.01/3/47	-2.4	0.5	-3.5	4.0	36	4	0.270	±2.024
36	S.กทม.353/47	-5.7	1.6	-7.8	1.8	5	4	0.895	±2.365
37	S.กทม.365	-1.4	0.7	-3.8	1.4	22	4	1.561	±2.064
38	S.กทม.418/37	1.0	2.5	-2.9	0.9	4	4	1.511	±2.447
39	S.กทม.448/46	-2.3	1.6	-3.8	0.7	5	4	0.855	±2.365
40	S.กทม.527	-2.4	1.1	-0.9	3.7	16	4	-0.381	±2.101
41	S.กทม.530/34	-2.0	0.7	-2.9	3.9	41	4	0.223	±2.017
42	S.กทม.532/34	-4.6	1.2	-2.9	3.2	16	4	-0.496	±2.101
43	SBM.1	-5.8	0.5	-3.4	1.8	41	4	-1.290	±2.017
44	กทม.124	-3.7	1.5	-0.5	0.4	6	4	-2.081	±2.306
45	กทม.157	2.0	2.1	0.4	2.0	2	4	0.571	±2.776
46	กทม.159	0.4	0.6	-0.7	2.9	21	4	0.360	±2.069
47	กทม.160	0.4	0.6	-0.2	1.5	49	4	0.349	±2.008
48	กทม.176	-1.8	0.4	2.3	2.3	67	4	-1.800	±1.995
49	กทม.236/31	0.0	0.6	-0.5	2.3	57	4	0.225	±2.001
50	กทม.241	-0.6	0.5	-0.6	0.5	60	4	0.0	±1.999
51	กทม.242	0.5	0.6	-0.2	0.0	30	4	1.246	±2.037
52	กทม.255	-1.3	1.0	-1.1	0.1	18	4	-0.181	±2.086
53	กทม.257	-1.0	1.3	-1.2	0.3	7	4	0.174	±2.262
54	กทม.315	-5.1	0.6	-2.0	1.4	25	4	-1.945	±2.052
55	กทม.320	-2.7	0.7	-4.9	1.2	21	4	1.491	±2.069
56	กทม.322	-2.8	0.5	-3.5	0.6	45	4	0.823	±2.012
57	กทม.366	-2.3	1.5	2.0	3.7	11	4	-1.085	±2.160
58	กทม.415	0.0	0.5	1.4	2.8	50	4	-0.486	±2.007

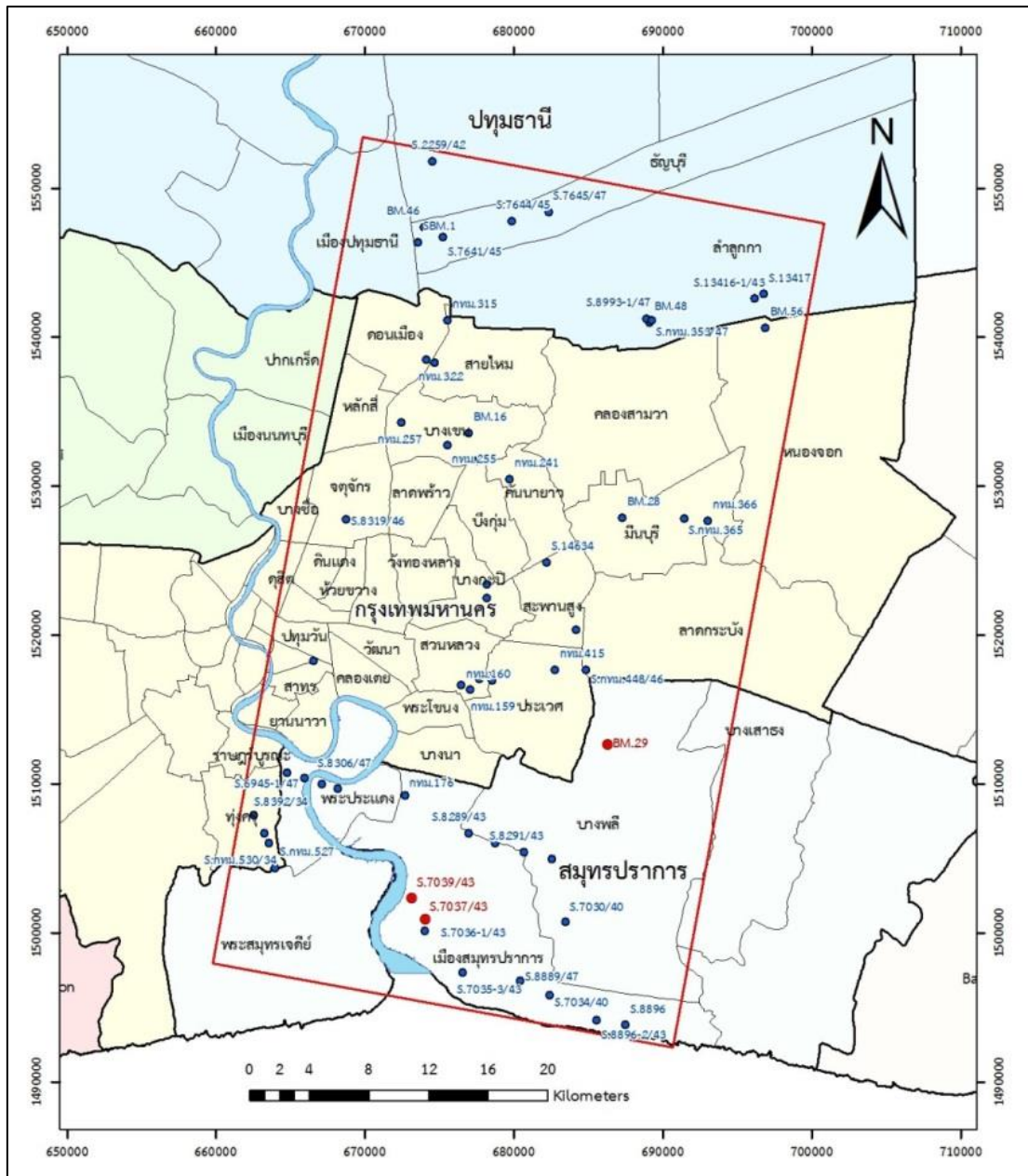
ผลการทดสอบทางสถิติเทคนิค InSAR กับงานระดับจุดที่ไม่ผ่านจากการทดสอบทั้ง 3 จุด ตั้งอยู่ในพื้นที่เขตปริมณฑล จังหวัดสมุทรปราการ จุดตรวจสอบจาก InSAR มีอัตราการทรุดตัวที่เร็วกว่างานระดับ สาเหตุดังกล่าวมีการให้เหตุผลไว้ในงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) ว่า อัตราการทรุดตัวจาก InSAR ในพื้นที่เขตปริมณฑลจะมีอัตราที่เร็วกว่างานระดับ เนื่องจากพื้นที่ปริมณฑลมีสิ่งปลูกสร้างที่มีความหนาแน่นน้อยและมีช่องว่างระหว่างอาคารค่อนข้างมาก ทำให้มีโอกาสที่จะมีคลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนแบบ double-bounce จากตึกสู่พื้นดิน เช่นถ้าในช่วงเวลา T_1 ไป T_2 อาคารมีการทรุดตัวเป็นระยะ d_1 พื้นรอบอาคารซึ่งอยู่เหนือชั้นทรายจะมีการทรุดตัว $d_1 + d_2$ โดยที่ d_2 คือการทรุดตัวจากน้ำหนักของพื้นที่กดทับลงไปบนผิวดินที่เป็นดินถมหรือดินเหนียว การทรุดตัว d_2 คือสิ่งที่ทำให้เกิดสภาพที่ต้องเสริมชั้นบ้นไค หรือเกิดการแยกตัวระหว่างพื้นกับอาคาร ดังที่เห็นทั่วไป และไม่เกี่ยวข้องกับการสูบน้ำบาดาล แต่ทำให้อัตราการทรุดตัวที่ได้จาก double bounce (อาคาร+พื้นรอบอาคาร) สูงกว่า single-bounce จากอาคารดังแสดงในรูปที่ 4-4



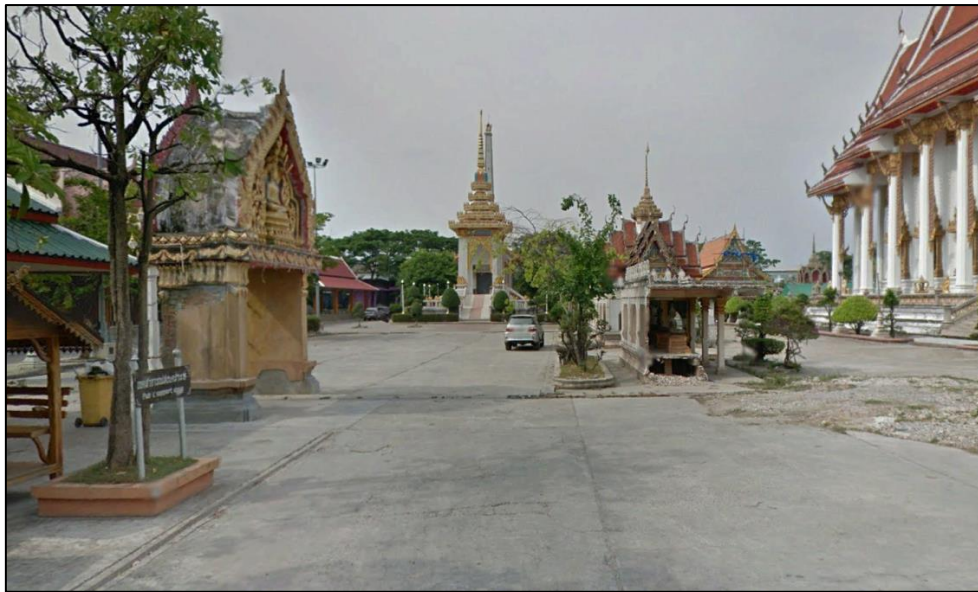
รูปที่ 4-4 ภาพซ้ายคือการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟแบบ Single bounce และ double bounce ในช่วงเวลา T_1 ภาพขวาคือการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟในเวลา T_2 หลังจากเกิดการทรุดตัว d_1 คือระยะการทรุดตัวของอาคาร d_2 คือระยะการทรุดตัวของพื้นรอบอาคาร การสะท้อนแบบ double bounce ในช่วงเวลา T_2 คือการทรุดตัวในระยะ d_1+d_2 ทำให้อัตราการทรุดตัวเร็วกว่าแบบ Single bounce ภาพดัดแปลงมาจาก (Aobpaet 2012)

ในพื้นที่เขตปริมณฑลอาคารส่วนใหญ่มีความสูงประมาณ 2 ชั้น อาคารมีระยะห่างกันพอสมควรโดยเฉพาะพื้นที่ที่เป็นบ้านจัดสรร อาคารเหล่านี้ก่อสร้างโดยพื้นรอบอาคารวางอยู่บนพื้นดินที่มีการถมใหม่ ดังนั้นการวัดอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเกิดจากการทรุดตัวของชั้นผิวดิน ซึ่งเป็นดินถมใหม่จากงานก่อสร้างที่มีการปรับตัวตามระยะเวลา รวมทั้งการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นทรายที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล การทรุดตัวเหล่านี้เป็นค่าที่ InSAR วัดได้ ส่วนของงานระดับ หมุดที่ใช้ตรวจสอบเลือกจากหมุดที่มีฐานของหมุดลึกอยู่ในชั้นทราย ดังนั้นค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากงานระดับมาจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นก้นน้ำหรือชั้นดินเหนียวที่อยู่ในบริเวณชั้นทราย

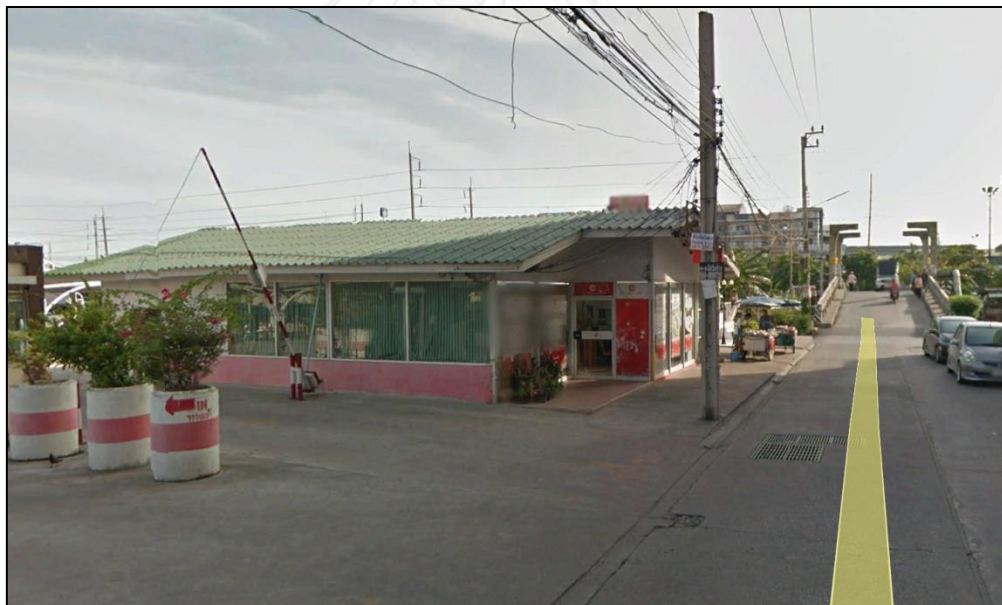
จากผลการตรวจสอบมีจำนวน 3 จุดที่ผลการทดสอบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR มีอัตราที่เร็วกว่างานระดับดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 4-5 เมื่อตรวจสอบพื้นที่ของจุดดังกล่าวทั้ง 3 จุดจากภาพถ่ายในพื้นที่จริงพบว่าพื้นที่ดังกล่าวมีอาคารสิ่งปลูกสร้างไม่ค่อหนาแน่น อาคารสิ่งปลูกสร้างมีความสูงไม่มาก เพราะเป็นพื้นที่ชานเมือง จุด BM.29 ตั้งอยู่ที่วัดกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ พื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่วัด มีอาคารที่ตั้งอยู่มีระยะห่างกันพอสมควร พื้นที่ระหว่างอาคารลาดด้วยพื้นคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4-6 ซึ่งทำให้พื้นที่ดังกล่าวเกิดปรากฏการณ์ double bounce ทำให้การทรุดตัวจาก InSAR มีอัตราที่เร็วกว่างานระดับ ในจุดของหมุด S.7037/43 ตั้งอยู่ที่สะพานคลองชลประทาน ซอยเทศบาลบางปู 47 ตำบลท้ายบ้านใหม่ อำเภอมืองจังหวัดสมุทรปราการ ก็เช่นกันพื้นที่บริเวณโดยรอบยังพบพื้นที่ที่เป็นอาคารชั้นเดียวและมีลานคอนกรีตเอาไว้เป็นที่จอดรถดังแสดงในรูปที่ 4-7 จุดตรวจสอบการทรุดตัวในบริเวณนี้อาจเกิดจากการทรุดตัวสะสมจากชั้นผิวดิน ไปจนถึงชั้นที่มีการสูบน้ำบาดาล เพราะอาคารชั้นเดียวอาจไม่ได้มีความลึกของเสาเข็มอยู่ในระดับชั้นทรายทำให้การทรุดตัวจาก InSAR มีอัตราที่เร็วกว่า ในส่วนของหมุด S.7039/43 ตั้งอยู่ที่สะพานลอยหน้าโรงเรียนเทศบาล ตำบลปากน้ำ อำเภอมือง จังหวัดสมุทรปราการ บริเวณดังกล่าวพบว่าอาคารสิ่งปลูกสร้างค่อนข้างจะอยู่ไกลจากพื้นที่ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4-8 คลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนกับพื้นที่ถนนและทางเท้าเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถนนกับทางเท้านั้นเป็นสิ่งปลูกสร้างที่ไม่ได้มีเข็มลึกไปถึงชั้นทราย ดังนั้นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวเป็นการทรุดตัวสะสมรวมกันระหว่างการทรุดตัวในชั้นผิวดินรวมกับการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลที่เกิดขึ้นในบริเวณชั้นก้นน้ำที่ลึกลงไปในระดับชั้นทราย ทำให้การทรุดตัวที่วัดได้จาก InSAR มีอัตราการทรุดตัวที่เร็วกว่างานระดับ



รูปที่ 4-5 จุดสีแดงคือตำแหน่งมุมระดับที่มีผลทดสอบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR เร็วกว่างานระดับ



รูปที่ 4-6 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณวัดกิ่งแก้ว จุดที่ตั้งหมุด BM.29



รูปที่ 4-7 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณสะพานคลองชลประทาน ซอยเทศบาลบางปู 47
จุดที่ตั้งหมุด S.7037/43 (ภาพจาก Google Street View)



รูปที่ 4-8 ภาพถ่ายพื้นที่จริงบริเวณสะพานลอยหน้าโรงเรียนเทศบาลปากน้ำ จุดที่ตั้งหมุด S.7039/43



บทที่ 5

ผลการเปรียบเทียบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR กับงานวิจัยที่ผ่านมาและผลการเปรียบเทียบ อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล

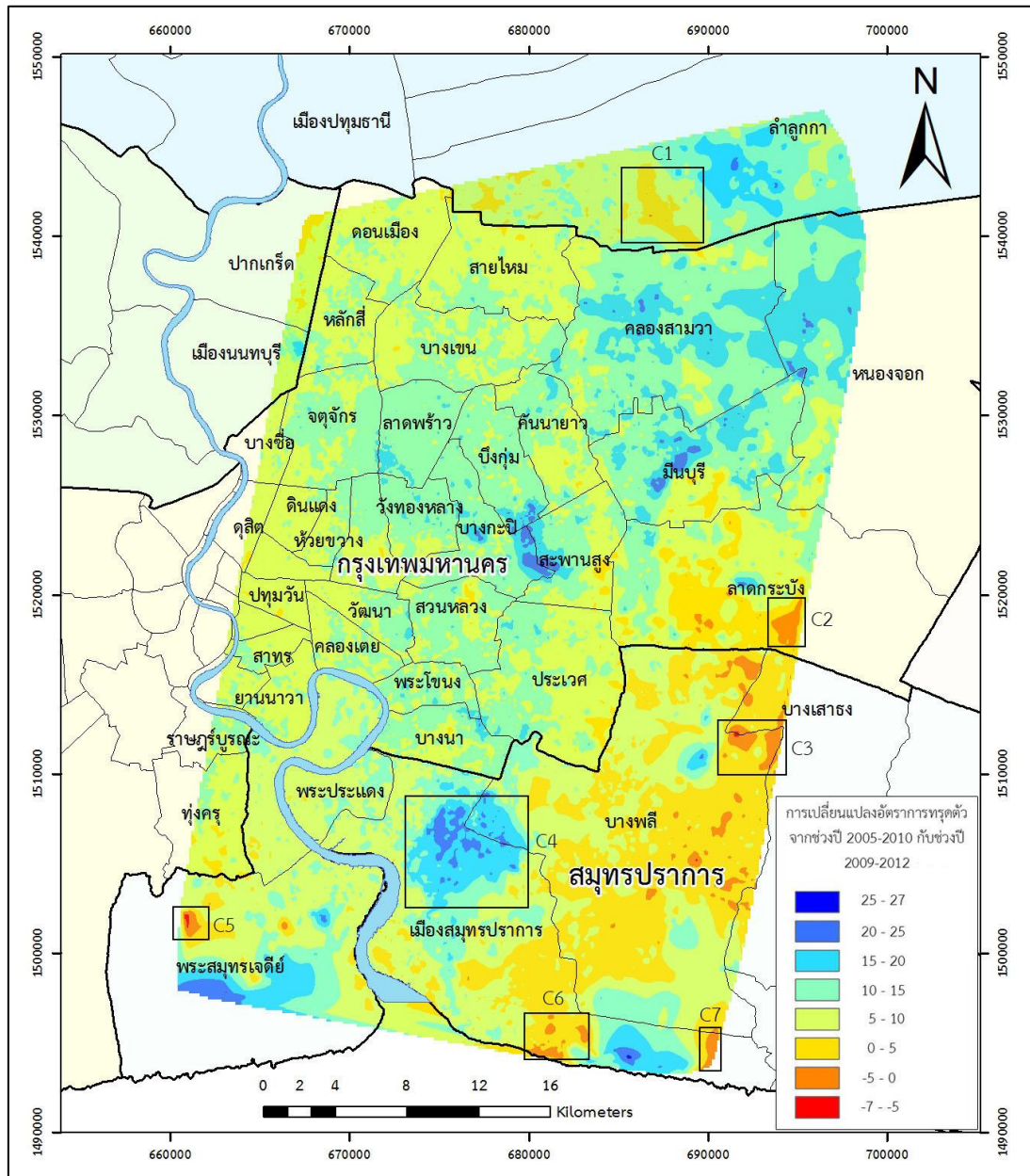
5.1 ผลการเปรียบเทียบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR

การเปรียบเทียบครั้งนี้เป็นการสังเกตค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR ในอดีตที่ผ่านมาคืองานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) กับงานวิจัยนี้ เพื่อวิเคราะห์ดูพื้นที่ต่าง ๆ ว่ามีอัตราการทรุดตัวเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร มีพื้นที่ไหนบ้างที่มีการทรุดตัวช้าลงหรือเร็วขึ้น ในงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ในช่วงปี 2005 – 2010 และงานวิจัยนี้ได้ศึกษาติดตามการทรุดตัวในช่วงปี 2009 – 2012 งานวิจัยทั้ง 2 มีความต่อเนื่องกัน และพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน จึงมีความเหมาะสมที่จะนำผลการศึกษามาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา

ในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Aobpaet et al. (2013) ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ของ RADARSAT-1 จำนวน 19 ภาพ พื้นที่ศึกษา 2500 ตารางกิโลเมตรครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครและพื้นที่บางส่วนของจังหวัดนนทบุรี ปทุมธานีและสมุทรปราการ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่เดียวกันกับงานวิจัยนี้ การประมวลผลก็เช่นเดียวกันจะใช้เทคนิคเดียวกันกับงานวิจัยนี้ โดยการใช้เทคนิคของ InSAR ใน 2 วิธีร่วมกัน ได้แก่ Persistent Scatterer และ small baseline ข้อมูลที่ใช้ศึกษาเริ่มจากเดือนตุลาคมปี 2005 จนถึงเดือนมีนาคมปี 2010 จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา มีความเหมาะสมที่จะนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล เพื่อให้ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการทรุดตัวบริเวณต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา

ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัว แสดงให้เห็นว่าในทีในเขตกรุงเทพมหานครหลายพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ช้าลงมากในอัตรา 10 – 14 มิลลิเมตรต่อปี คือเขตบึงกุ่ม เขตลาดพร้าว เขตวังทองหลาง เขตบางกะปิ เขตคลองสามวาและเขตหนองจอก ส่วนพื้นที่อื่น ๆ ในกรุงเทพมหานครส่วนใหญ่มีการทรุดตัวที่ช้าเช่นเดียวกันคือในอัตรา 6 – 10 มิลลิเมตรต่อปี คือพื้นที่ในเขตจตุจักร เขตสวนหลวง เขตพระโขนง เขตบางเขนและเขตบางนา ดังแสดงในรูปที่ 5-1 ส่วนพื้นที่เขตอื่น ๆ มีการทรุดตัวเร็วขึ้นและช้าลงปะปนกันไปมีอัตราการทรุดตัวเร็วขึ้นประมาณ 2 - 5 มิลลิเมตรต่อปีและมีอัตราการทรุด

ตัวข้างประมาณ 5 – 10 มิลลิเมตรต่อปี ยกเว้นพื้นที่แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง มีการทรุดตัวเร็ว
 ชั้น 2 – 7 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C2 จากผลการศึกษาโดยรวมพื้นที่กรุงเทพมหานคร
 ทั้งหมดมีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2009-2012 เทียบกับอัตราในปี
 2005 - 2010 โดยค่าที่เป็นบวกหมายถึงพื้นที่นั้นม้อัตราการทรุดตัวที่ช้าลง และค่าที่เป็นลบหมายถึง
 พื้นที่นั้นม้อัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น กรอบ C คือพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวที่น่าสนใจ

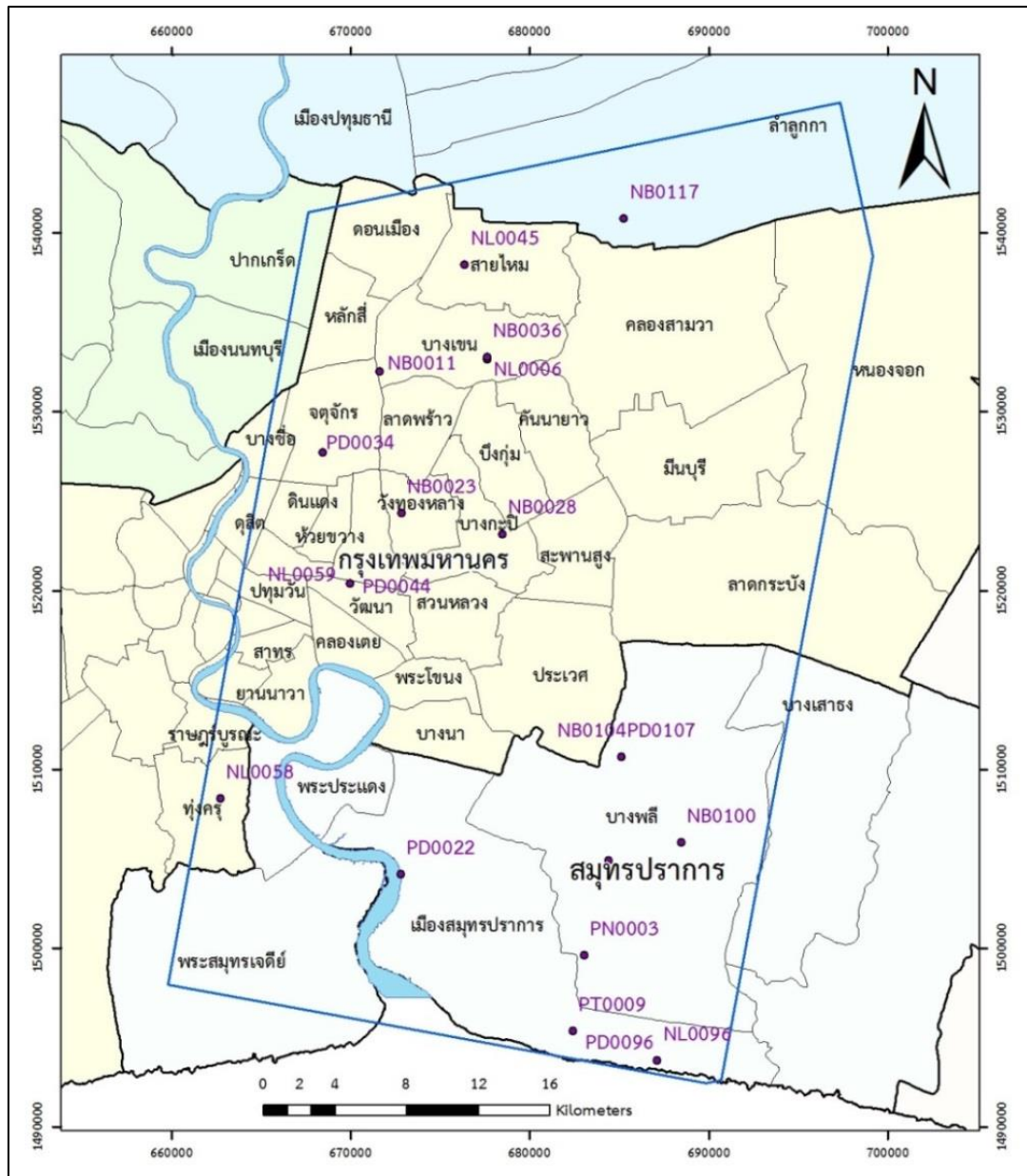
ส่วนในพื้นที่เขตปริมณฑล อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี พื้นที่ที่มีการทรุดตัวข้างล่างดังแสดงในรูปที่ 5-1 แต่มีพื้นที่บางส่วนในตำบลบึงคำพร้อยมีอัตราการทรุดตัวเร็วขึ้นประมาณ 2 - 5 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C1 ในส่วนของพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ก็ยังพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีอัตราการทรุดตัวที่ลดลงโดยเฉพาะพื้นที่ตำบลเทพารักษ์กับตำบลบางเมือง ที่มีอัตราการทรุดตัวลดลงมากในอัตราที่ 20 - 27 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C4 มีบางพื้นที่ซึ่งเป็นส่วนน้อยมีอัตราการทรุดตัวเร็วขึ้นคือ พื้นที่ตอนกลางของตำบลบางปูใหม่และตำบลบางปูมีการทรุดตัวเร็วขึ้นในอัตรา 2 - 6 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C6 และ C7 ส่วนพื้นที่อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ข้างล่างเช่นเดียวกันในอัตรา 2 - 6 มิลลิเมตรต่อปี แต่มีพื้นที่เกิดการทรุดตัวที่เร็วที่ตำบลหนองปรือ อำเภอบางพลีและตำบลศิระชะจรเข้ชั้นน้อย อำเภอ บางเสาธง มีการทรุดตัวเร็วขึ้นในอัตรา 2 - 7 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C3 มีในฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา พื้นที่ตำบลบ้านคลองสวน อำเภอพระสมุทรเจดีย์ เกิดการทรุดตัวเร็วขึ้นในอัตรา 2 - 7 มิลลิเมตรต่อปีดังแสดงในรูปที่ 5-1 C5

5.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล

ผลจากการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR ทำให้ทราบว่าพื้นที่ใดบ้างเกิดการทรุดตัวที่เร็วขึ้นและมีพื้นที่เกิดการทรุดตัวที่ข้างล่าง สาเหตุการเกิดพื้นที่ที่มีการทรุดตัวเร็วขึ้นและข้างล่าง คงให้เหตุผลมาจากการใช้น้ำบาดาลในพื้นที่นั้น ๆ พื้นที่ใดมีการใช้น้ำบาดาลมากขึ้น พื้นที่บริเวณดังกล่าวจะเกิดการทรุดตัวในอัตราที่เพิ่มขึ้น การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีผลมาจากการสูบน้ำบาดาลถึง 69 เปอร์เซ็นต์ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) การทดสอบครั้งนี้เพื่อดูความสัมพันธ์ของข้อมูลการทรุดตัวจาก InSAR กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ระดับของน้ำบาดาล ณ สถานีวัดมีการเก็บค่าอย่างต่อเนื่อง บางปีมีการเก็บค่าทุกเดือน บางปีมีการเก็บค่าในทุก ๆ 3 เดือน ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์การทรุดตัวของแผ่นดินกับการใช้น้ำบาดาล ระดับน้ำบาดาลแต่ละปีมีการเปลี่ยนแปลงค่ากันในระดับเมตร ส่วนอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินมีอัตราการเคลื่อนตัวในระดับมิลลิเมตร ดังนั้นค่าทั้ง 2 นั้นมีความแตกต่างกัน แต่เมื่อสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ศึกษาการจากสาเหตุจากการสูบน้ำบาดาลเป็นหลัก การทรุดตัวย่อมแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล คือ เมื่อระดับน้ำบาดาลมีอัตราการลดลงที่เร็วขึ้นจากอดีต การทรุดตัวก็จะมีการทรุดตัวที่เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน

การทดสอบผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR ใช้ค่าเฉลี่ยอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ตารางกริด 100X100 ตารางเมตร จากงานวิจัยของ Aobpaet et al. (2013) ในช่วงปี 2005 – 2010 และค่าเฉลี่ยอัตราการทรุดตัวของงานวิจัยนี้ช่วงปี 2009 – 2012 นำค่าทั้ง 2 ช่วงเวลาในพื้นที่ตารางกริดเดียวกันหาค่าอัตราการทรุดตัวที่ต่างกันทุก ๆ ตารางกริด ค่าต่างของอัตราการทรุดตัวที่ได้จะบอกถึงพื้นที่นั้นว่ามีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้นหรือช้าลง โดยค่าต่างจากการเปรียบดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับอีกครั้งกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลที่ข้อมูลได้มาจากโครงการจัดทำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการบริหารจัดการน้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลที่มีการเก็บค่าระดับน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำค่าระดับน้ำบาดาลคำนวณหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลโดยวิธี least squares โดยมี functional model แสดงในสมการ 4.1 จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลในช่วงปี 2005 – 2010 (V_{P0510}) กับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลในช่วงปี 2009 – 2012 (V_{P0912}) ดังแสดงในตารางที่ 5-1 เพื่อทดสอบความสอดคล้องและความสัมพันธ์กันของข้อมูล เนื่องจากสาเหตุการทรุดตัวเกิดจากการสูบน้ำบาดาลเป็นหลัก ผลการทดสอบดังกล่าวจะต้องมีความสอดคล้องกันดังที่กล่าวมาข้างต้น

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบค่าต่างของอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ทั้ง 2 ช่วงเวลากับค่าต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลทั้ง 2 ช่วงเวลา การเปรียบเทียบใช้บ่อวัดระดับน้ำบาดาลทั้งหมด 20 จุด อยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10 จุด อยู่ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ 9 จุด และอยู่ในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี 1 จุดดังแสดงในรูปที่ 5-2 โดยข้อมูลมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 5-3 การเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลใช้วิธีการทางสถิติในการหาค่าสหสัมพันธ์ (Coefficient of Correlation) เป็นการหาค่า r จากสูตรสมการที่ 5.1 ค่าที่ได้บอกถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูล โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 โดยที่ค่าที่อยู่ใกล้ -1 หรือ +1 ถือว่ามีความสัมพันธ์กันมากที่สุด ส่วน 0 หมายความว่าข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กันแม้แต่น้อย ส่วนเครื่องหมายบวกหรือเครื่องหมายลบ บ่งบอกถึงความสัมพันธ์นั้นเป็นไปตามกันหรือตรงกันข้าม



รูปที่ 5-2 แสดงการกระจายตัวของบ่อน้ำบาดาล (จุดสีม่วงเข้ม) ที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอัตรา
การทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี 2005 – 2012 ในพื้นที่ศึกษา (กรอบสีน้ำเงิน)

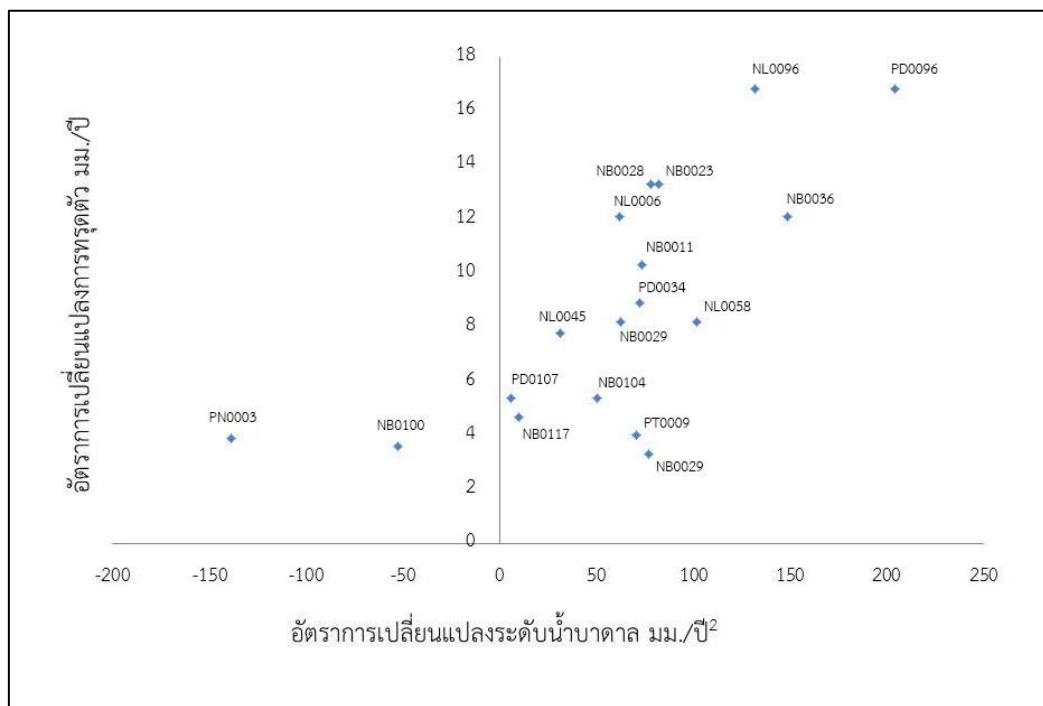
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าต่างของอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับค่าต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ของช่วงปี 2005 – 2010 กับ ปี 2009 - 2012

ที่	ชื่อบ่อน้ำ บาดาล	V_{P0510} (mm/yr)	V_{P0912} (mm/yr)	ΔV_P (mm/yr ²)	ΔV_{InSAR} (mm/yr)
1	PD0034	-1261.7	-724.1	76.8	9.1
2	NL0058	-1299.2	-564.6	104.9	9.3
3	NL0006	-1796.9	-1363.5	61.9	12.1
4	NL0059	-1536.9	-1099.9	62.4	8.2
5	NB0011	-1399.9	-886.9	73.3	10.3
6	NB0028	-1919.9	-1374.8	77.9	13.3
7	NB0023	-1635.1	-1059.8	82.2	13.3
8	NB0036	-2000.4	-959.1	148.8	12.1
9	NL0045	-1892.3	-1673.8	31.2	7.8
10	PD0044	-1319.4	-606.7	101.8	8.2
11	PN0003	-1728.5	-2698.9	-138.6	3.9
12	NB0104	-2193.9	-1842.4	50.2	5.4
13	PD0096	-1460.2	-30.8	204.2	16.8
14	PT0009	-1651.7	-1155.9	70.8	4.0
15	PD0022	-903.9	-397.6	72.3	8.9
16	NL0096	-1746.3	-824.3	131.7	16.8
17	NB0100	-2298.5	-2664.9	-52.3	3.6
18	PD0107	-1420.8	-1381.8	5.6	5.4
19	NB0029	-1930.1	-1389.8	77.2	3.3
20	NB0117	-238.0	-168.3	10.0	4.7

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

ผลการทดสอบ Coefficient of Correlation หรือค่า r เท่ากับ 0.71 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันในระดับหนึ่งและมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และมีความสอดคล้องกับงานศึกษาทางด้านอุทกวิทยาที่ผ่านมา ที่ได้ศึกษาอัตราการทรุดตัวจากการลดลงของระดับแรงดันน้ำในดิน เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 2009) จากข้อมูลการเปรียบเทียบจะเห็นว่ามี 2 จุดที่ข้อมูลมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกันคือตำแหน่งของบ่อน้ำ NB0100 ตั้งอยู่ที่โรงเรียน พูลเจริญ วิทยาคม ตำบลบางไฉลง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ มีอัตราการทรุดตัวข้างลง 3.6

มิลลิเมตรต่อปี แต่ระดับน้ำบาดาลมีการลดลงในอัตราเร่งที่สูงขึ้น 138.6 มิลลิเมตรต่อปีกำลังสอง และที่บ่อน้ำ PN0003 ตั้งอยู่ที่บริเวณ วัดน้อยสุวรรณาราม ตำบลแพรึกษา อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ มีอัตราการการทรุดตัวช้าลง 3.9 มิลลิเมตรต่อปี แต่ระดับน้ำบาดาลมีการลดลงในอัตราเร่งที่สูงขึ้น 52.3 มิลลิเมตรต่อปีกำลังสอง ซึ่งปัญหาที่ข้อมูลทั้งสองไม่สอดคล้องกันอาจเกิดจากพื้นที่ดังกล่าวมีการสูบน้ำบาดาลมาเป็นเวลานาน ทำให้พื้นที่ดังกล่าวเกิดการทรุดตัวในอัตราคงที่



รูปที่ 5-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวจาก InSAR กับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปจากผลการศึกษาทั้งหมดคือ ผลการศึกษาติดตามการทรุดตัวของเทคนิค InSAR โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม TerraSAR-X ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวจาก InSAR กับงานระดับ ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา (Aobpaet et al. 2013) และผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล รวมไปถึงการให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน เป็นการศึกษาที่มีความจำเป็นต้องใช้เวลาในการติดตามอย่างต่อเนื่อง การทรุดตัวที่เกิดขึ้นแต่ละปีมีอัตราการทรุดตัวที่แตกต่างกัน บางพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวช้าลง บางพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น ดังนั้นการติดตามการทรุดตัวย่อมไม่มีผลตายตัว เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่ช้าอาจจะหยุดการทรุดตัวในที่สุดหรือไม่ก็มีการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นอีก ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ณ ช่วงเวลานั้น ๆ ดังนั้นเนื่องจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ผลกระทบต่ออาคารสิ่งปลูกสร้างหรือสาธารณูปโภคแล้ว จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาติดตามการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะรับมือกับผลกระทบที่เกิดขึ้น

เทคนิค InSAR เป็นวิธีทางเลือกวิธีหนึ่งที่สามารถติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินได้ โดยนำเทคโนโลยีทางการสำรวจข้อมูลระยะไกลในระบบเรดาร์ ซึ่งมีข้อดีหลายอย่างคือ เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้บุคลากรในการทำงานมากมาย และผลลัพธ์จุดตรวจสอบการทรุดตัวมีการกระจายที่หนาแน่นพอจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ข้อมูลของภาพถ่ายเรดาร์ RADARSAT-1 (Aobpaet et al. 2013) ข้อมูลจาก InSAR ให้ความหนาแน่นของจุดตรวจสอบประมาณ 120 จุดต่อตารางเมตร และในงานวิจัยนี้ได้ผลลัพธ์ความหนาแน่นของจุดตรวจสอบการทรุดตัวมากถึง 2300 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งถือได้ว่าการใช้ InSAR ติดตามการทรุดตัวได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาติดตามการทรุดตัวได้เป็นอย่างดี

จากการใช้เทคนิค InSAR ประมวลผลภาพดาวเทียมเรดาร์ TerraSAR-X จำนวน 26 ภาพ ในช่วงปี 2009 – 2012 สรุปได้ว่าผลลัพธ์จาก InSAR สามารถให้ข้อมูลจุดตรวจสอบการทรุดตัวมากพอที่จะใช้วิเคราะห์การทรุดตัวแต่ละพื้นที่ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งเทคนิคการทำ Interpolation เพื่อให้ได้ค่าอัตราการทรุดตัวทั่วทุกพื้นที่ โดยสังเกตจากแผนที่จุดตรวจสอบการทรุดตัวจาก InSAR ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-1 นั้นสามารถบอกอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ต่างได้ค่อนข้างละเอียดในระดับหนึ่ง การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วในพื้นที่เขตปริมณฑล ส่วนพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นในมีอัตราการทรุดตัวที่ช้า ในงานวิจัยนี้สามารถให้ค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR ที่เพิ่มขึ้นจากการศึกษาที่ผ่านมา คือในช่วงปี 2009 – 2012

จากผลการศึกษาอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ในช่วงปี 2009 – 2012 กรุงเทพมหานครเริ่มมีบางพื้นที่ยกตัวสูงขึ้นในอัตรา 2 – 4 มิลลิเมตรต่อปี แต่พื้นที่ส่วนใหญ่ยังเกิดการทรุดตัวในอัตรา 5 – 10 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนพื้นที่ปริมณฑลจังหวัดสมุทรปราการและจังหวัดปทุมธานียังพบว่าการทรุดตัวที่เร็วกว่ากรุงเทพมหานครที่อัตรา 10 – 15 มิลลิเมตรต่อปี และยังมีพื้นที่บางส่วนของจังหวัดสมุทรปราการที่มีการทรุดตัวในอัตราที่สูงประมาณ 15 – 20 มิลลิเมตรต่อปี จากการใช้ InSAR ติดตามการทรุดตัวยังพบว่าพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลส่วนใหญ่ยังเกิดการทรุดตัวของแผ่นดิน ในงานศึกษาครั้งนี้ยังศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ต่าง ๆ เพื่อหาพื้นที่เฝ้าระวังที่จะเกิดแนวโน้มเกิดการทรุดตัวที่รุนแรง โดยการเปรียบเทียบผลการติดตามการทรุดตัวจาก InSAR กับงานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินจาก InSAR ในช่วงปี 2005 – 2010 กับปี 2009 – 2012 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลงในพื้นที่ตำบลเทพารักษ์กับตำบลบางเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการเป็นพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยในช่วงปี 2005 – 2010 บริเวณดังกล่าวมีการทรุดตัวที่สูงในอัตรา 25 – 30 มิลลิเมตรต่อปี แต่ในช่วงปี 2009 – 2012 พื้นที่ดังกล่าวมีการทรุดตัวที่ช้าในอัตรา 5 - 10 มิลลิเมตรต่อปี แต่ยังมีพื้นที่ต้องเฝ้าระวังในเขตปริมณฑลอีก 2 – 3 แห่งที่มีอัตราการทรุดตัวเร็วขึ้นคือทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ตอนกลางของตำบลบางปู อำเภอเมืองสมุทรปราการ ตำบลหนองปรือ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ทรุดตัวเร็วขึ้นในอัตรา 2 – 7 มิลลิเมตรต่อปี

ถึงแม้ข้อมูลจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR จากทั้ง 2 งานวิจัยได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับงานระดับแล้วมีผลที่น่าเชื่อถือ แต่ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการทรุดตัวของทั้ง 2 ช่วงเวลาก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อมูลที่เป็นสาเหตุของการทรุดตัวที่เกิดขึ้น คือการใช้น้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้เก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับอัตราการทรุดตัว ในการศึกษาพื้นที่เกิดการทรุดตัวที่เร็วขึ้นหรือช้าลงย่อมมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่นั้น ๆ จากการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวของ InSAR ใน 2 ช่วงปี กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล ผลทดสอบทางสถิติในการหาค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลคือ Coefficient of Correlation มีค่าเท่ากับ 0.71 ข้อมูลทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันในระดับหนึ่ง

จากการศึกษาติดตามการทรุดตัวโดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาในอดีตหรือในงานศึกษานี้ ข้อมูลที่ได้จาก InSAR เป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือเนื่องจากการตรวจสอบกับงานระดับ (Aobpaet et al. 2013, Dang et al. 2011, Luo et al. 2014) และการตรวจสอบจากเทคนิค GPS (Kim et al. 2015, Ng et al. 2012) แล้วว่ามีความสอดคล้องกัน เทคนิค InSAR ยังเป็นวิธีการหนึ่งจากหลาย ๆ วิธีที่มีประโยชน์ในการศึกษาติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน ดังนั้นเทคนิค InSAR จึงเป็นวิธีการที่ต้องมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการนำมาศึกษาในด้านต่าง ๆ ในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในประเทศไทยมีการใช้ InSAR ติดตามการทรุดตัวในพื้นที่กรุงเทพมหานครและบางส่วนของเขตปริมณฑลมาหลายครั้งแล้ว แต่ยังคงขาดการการศึกษาจังหวัดในเขตปริมณฑลที่มีแนวโน้มจะเกิดการทรุดตัวเช่นจังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดนนทบุรี เป็นต้น เนื่องจากผลการศึกษาคครั้งนี้พบว่าพื้นที่บางส่วนของเขตปริมณฑลที่อยู่ในพื้นที่ศึกษาเกิดการทรุดตัว

6.2.2 การติดตามการทรุดตัวในพื้นที่กรุงเทพมหานครจะเห็นได้ว่าพื้นที่เริ่มทรุดตัวน้อยลง แต่ปัญหาการทรุดตัวขนาดใหญ่ยังเกิดขึ้นในพื้นที่เขตปริมณฑล ซึ่งมีปัญหา double-bounce ทำให้ค่าจาก InSAR เร็วกว่าค่าจริง ในอนาคตควรมีการศึกษาหาวิธีการแก้ไขปัญหานี้

6.2.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวจากเทคนิค InSAR มีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาล เมื่อนำ InSAR ติดตามการทรุดตัวในพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีการสูบน้ำบาดาล InSAR สามารถบอกถึงพื้นที่ที่มีการลักลอบสูบน้ำบาดาลได้



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2009) โครงการศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. รายงานฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2012) โครงการสำรวจ และศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างเป็นระบบใน เขตวิฤตการณ์น้ำบาดาล. รายงานฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- กองยื่อเดซีและยื่อฟิสิกส์ (2012) รายงานผลการสำรวจระดับการทรุดตัวของพื้นดินในเขต กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. กรมแผนที่ทหาร. กรุงเทพมหานคร.
- ปวัน ภิมย์ทอง, อธิธิ ตรีสิริสตัยวงค์ และอนุเฒ่า ออบแพทย์ (2015) การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของ แผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและ ปริมณฑลด้วยเทคนิคคอนูกรมเวลาอินซาร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 ชลบุรี.
- สรศักดิ์ ชัยทวี, อธิธิ ตรีสิริสตัยวงค์ และอนุเฒ่า ออบแพทย์ (2014) การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน ในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series InSAR. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาษาอังกฤษ

- Aobpaet, A. (2012) InSAR time series analysis for land subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area. *Doctoral dissertation* Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- Aobpaet, A., M. C. Cuenca, A. Hooper and I. Trisirisatayawong (2013) InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 2969-2982.
- Chaussard, E., S. Wdowinski, E. Cabral-Cano and F. Amelung (2014) Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106.

- Cigna, F., B. Osmanoglu, E. Cabral-Cano, T. H. Dixon, J. A. Ávila-Olivera, V. H. Garduño-Monroy, C. DeMets and S. Wdowinski (2012) Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Dang, Y., H. Gong, X. Li, B. Chen and J. Li (2011) The Analysis of Land Subsidence in Tianjin Basing on Interferometric Synthetic Aperture Radar InSAR Technique. *Multimedia Technology (ICMT)*, 5116 - 5120.
- 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.
- Di Traglia, F., T. Nolesini, E. Intrieri, F. Mugnai, D. Leva, M. Rosi and N. Casagli (2014) Review of ten years of volcano deformations recorded by the ground-based InSAR monitoring system at Stromboli volcano: a tool to mitigate volcano flank dynamics and intense volcanic activity. *Earth-Science Reviews*, 139, 317-335.
- Fisher, R. A. (1925) Applications of Student's Distribution. *Reproduced with permission of Metron*, 5, 90-104.
- Ge, L., A. H.-M. Ng, X. Li, H. Z. Abidin and I. Gumilar (2014) Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 154, 46-60.
- Gumilar, I., H. Z. Abidin, H. Andreas, M. Sidiq and Y. Fukuda (2014) Land Subsidence, Groundwater Extraction, and Flooding in Bandung Basin (Indonesia). *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*, 139, pp 167-173.
- Heleno, S. I. N., L. G. S. Oliveira, M. J. Henriques, A. P. Falcão, J. N. P. Lima, G. Cooksley, A. Ferretti, A. M. Fonseca, J. P. Lobo-Ferreira and J. F. B. D. Fonseca (2011) Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2152-2167.
- Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35.

- 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*, 112.
- Hu, J., Z.-W. Li, J. Li, L. Zhang, X.-L. Ding, J.-J. Zhu and Q. Sun (2014) 3-D movement mapping of the alpine glacier in Qinghai-Tibetan Plateau by integrating D-InSAR, MAI and Offset-Tracking: Case study of the Dongkemadi Glacier. *Global and Planetary Change*, 118, 62-68.
- JICA (1995) The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in the Bangkok Metropolitan Area and Its Vicinity. *Department of Mineral resources*.
- Kim, J.-W., Z. Lu, Y. Jia and C. K. Shum (2015) Ground subsidence in Tucson, Arizona, monitored by time-series analysis using multi-sensor InSAR datasets from 1993 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107, 126-141.
- Liu, G., H. Jia, u. Nie, T. Li, R. Zhang, B. Yu and Z. Li (2014) Detecting Subsidence in Coastal Areas by Ultrashort-Baseline TCPIInSAR on the Time Series of High-Resolution TerraSAR-X Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 1911 - 1923.
- Luo, Q., D. Perissin, H. Lin, Y. Zhang and W. Wang (2014) Subsidence Monitoring of Tianjin Suburbs by TerraSAR-X Persistent Scatterers Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1642 - 1650.
- Ng, A. H.-M., L. Ge and X. Li (2015) Assessments of land subsidence in the Gippsland Basin of Australia using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 159, 86-101.
- Ng, A. H.-M., L. Ge, X. Li, H. Z. Abidin, H. Andreas and K. Zhang (2012) Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 232-242.
- Phien-wej, N., P. H. Giao and P. Nutalaya (2006) Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82, 187-201.

- Qu, F., Z. Lu, Q. Zhang, G. W. Bawden, J.-W. Kim, C. Zhao and W. Qu (2015) Mapping ground deformation over Houston–Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 169, 290-306.
- Samsonov, S., N. d'Oreye and B. Smets (2013) Ground deformation associated with post-mining activity at the French–German border revealed by novel InSAR time series method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 142-154.
- Takaya, Y. (1968) Quaternary Outcrops in the Central Plain of Thailand. *Geology and Mineral resources in Thailand and Malaya, Report on Research in Southeast Asia*.
- Tesauro, M., P. Berardino, R. Lanari, E. Sansosti, G. Fornaro and G. Franceschetti (2000) Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) Observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27, 1961-1964.
- 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.
- Wang, C., X. Ding, Q. Li, X. Shan, W. Zhu, B. Guo and P. Liu (2015) Coseismic and postseismic slip models of the 2011 Van earthquake, Turkey, from InSAR, offset-tracking, MAI, and GPS observations. *Journal of Geodynamics*, 91, 39-50.
- Yang, C.-s., Q. Zhang, C.-y. Zhao, Q.-l. Wang and L.-y. Ji (2014) Monitoring land subsidence and fault deformation using the small baseline subset InSAR technique: A case study in the Datong Basin, China. *Journal of Geodynamics*, 75, 34-40.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

การประมวลผล Time-series InSAR

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การประมวลผล Time-series InSAR

1. ซอฟต์แวร์และส่วนเสริมที่ใช้ในการประมวลผล InSAR ทำงานในระบบปฏิบัติการ LINUX
 - 1.1 DORIS (Software)
 - 1.2 StaMPS (Software)
 - 1.3 Matlab (Software)
 - 1.4 Getorb (Extension)
 - 1.5 Snaphu (Extension)
 - 1.6 Triangle (Extension)
2. ขั้นตอนการติดตั้งซอฟต์แวร์
 - 2.1 ติดตั้งส่วนเสริมของระบบปฏิบัติการ LINUX ที่จำเป็นต้องใช้ โดยเขียนคำสั่งดังต่อไปนี้ใน terminal (ต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต)


```

sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
sudo apt-get install build-essential
sudo apt-get install gfortran
sudo apt-get install tcsh
sudo apt-get install ia32-libs
sudo apt-get install pbuilder
sudo pbuilder create --distribution edgy --debootstrapopts arch --
debootstrapopts i386
sudo apt-get install gmt
sudo apt-get install gv
sudo apt-get install gawk
sudo apt-get install xorg-dev
sudo apt-get install gdal-bin
sudo apt-get install python-gdal
sudo apt-get install libc-dev-i386
sudo apt-get install gcc-4.3-multilib gcc-multilib lib32gomp libc6-dev-i386
          
```

2.2 ติดตั้งซอฟต์แวร์ DORIS

ใช้ terminal โดยคำสั่ง cd ไปยังแฟ้ม doris src จากนั้นให้ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้ตามลำดับ

```
./configure
sudo make
sudo make install
```

จากนั้น cd ไปยังแฟ้ม SARtools ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้ตามลำดับ

```
sudo make
sudo make install
```

ต่อมาให้ cd ไปยังแฟ้ม Envisat_tools ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้ตามลำดับ

```
sudo make ถ้าเกิด error ให้แก้ไข makefile จาก gcc เป็น gfortran
sudo make install
```

2.3 ติดตั้ง Extension Getorb

ใช้ terminal โดยคำสั่ง cd ไปยังแฟ้ม getorbits จากนั้นให้ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้ตามลำดับ

```
sudo make clean
sudo make
sudo make install
```

2.4 ติดตั้ง Extension snaphu

ใช้ terminal โดยคำสั่ง cd ไปยังแฟ้ม snaphu จากนั้นให้ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้ตามลำดับ

```
sudo make clean
sudo make
sudo make install
```

2.5 ติดตั้ง Extension triangle

ใช้ terminal โดยคำสั่ง cd ไปยังแฟ้ม snaphu จากนั้นให้ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้

```
sudo make
```

2.6 ติดตั้งซอฟต์แวร์ StaMPS

ใช้ terminal โดยคำสั่ง cd ไปยังแฟ้ม StaMPS จากนั้นให้ใช้คำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้

ตามลำดับ

```
sudo make
```

```
sudo make install
```

ต่อมาให้แก้ไขไฟล์ StaMPS_CONFIG.bash เพื่อให้ซอฟต์แวร์ทั้งหมดทำงาน
เชื่อมโยงกัน

```
export STAMPS="/home/cu/software/StaMPS_v3.3b1"
```

```
export GETORB_BIN="/home/cu/software/getorb"
```

```
export DORIS_BIN="/home/cu/software/doris_v406beta2/bin"
```

```
export TRIANGLE_BIN="/home/cu/software/triangle"
```

```
export SNAPHU_BIN="/home/cu/software/snaphu-v1.4.2/bin"
```

(cu/insar คือ ชื่อแฟ้มที่เก็บซอฟต์แวร์ ควรเปลี่ยนแปลงให้เหมือนกับชื่อของเครื่อง
ปัจจุบัน)

2.7 ติดตั้งซอฟต์แวร์ Matlab

ใช้ terminal โดยคำสั่งติดตั้งดังต่อไปนี้

```
sudo sh /home/cu/insar/StaMPS/matlab/install
```

(cu/insar คือ ชื่อแฟ้มที่เก็บซอฟต์แวร์ ควรเปลี่ยนแปลงให้เหมือนกับชื่อของเครื่อง
ปัจจุบัน)

จากนั้นจะมีหน้าต่างซอฟต์แวร์ matlab แสดงออกมา ให้ทำการติดตั้งเหมือนระบบ

Windows จนเสร็จ

ให้เข้าไปแก้ไข bashrc file ของระบบปฏิบัติการ โดยเพิ่มข้อความด้านล่างนี้

```
source /home/cu/insar/StaMPS/StaMPS_CONFIG.bash
```

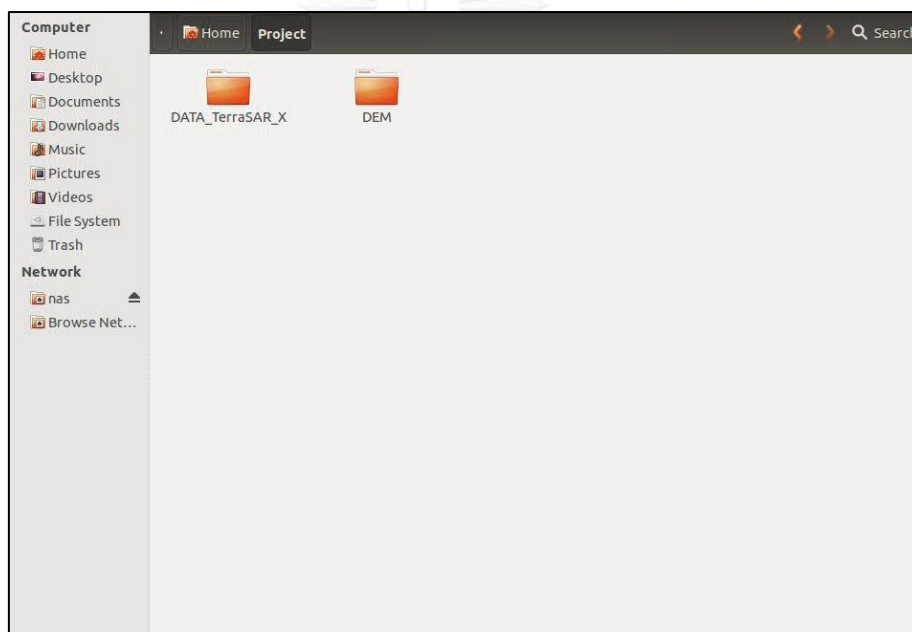
```
PATH=$PATH:/home/cu/insar/StaMPS/matu2k8b/bin:$PATH
```

```
export PATH
```

(cu/insar คือ ชื่อแฟ้มที่เก็บซอฟต์แวร์ ควรเปลี่ยนแปลงให้เหมือนกับชื่อของเครื่องปัจจุบัน)

3. การประมวลผล Time-series InSAR

3.1 สร้างแฟ้มงานที่ต้องการประมวลผล โดยมีแฟ้มย่อยคือข้อมูลภาพดาวเทียมทั้งหมดและแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขดังแสดงในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 การเตรียมแฟ้มข้อมูลก่อนการประมวลผล

3.2 ใช้ terminal โดย cd ไปยังแฟ้ม Project ที่มีข้อมูลภาพดาวเทียมเรดาร์กับ DEM จากนั้นให้ใช้คำสั่ง link_slcs ตามด้วย part ข้อมูลดาวเทียม เช่น

```
link_slcs /home/cu/Project/TerraSAR_X
```

สังเกตในแฟ้มข้อมูลจะมีไฟล์ชื่อ SLC ขึ้นมา ซึ่งข้างในแฟ้มจะมีไฟล์ชื่อเดียวกันกับข้อมูลภาพดาวเทียม TerraSAR_X เนื่องจากข้อมูลมีการเชื่อมโยงกัน (ขั้นตอนนี้ใช้กับดาวเทียมรุ่นใหม่เช่น

TerraSAR-X, Cosmo-Skymed และ RADARSAT-2 ถ้าหากเป็นดาวเทียม RADARSAT-1 ERS1/2 ให้ข้ามขั้นตอนนี้ไปได้เลย แต่ให้ใช้แฟ้มภาพดาวเทียมเรดาร์ต้นฉบับประมวลผลได้เลย)

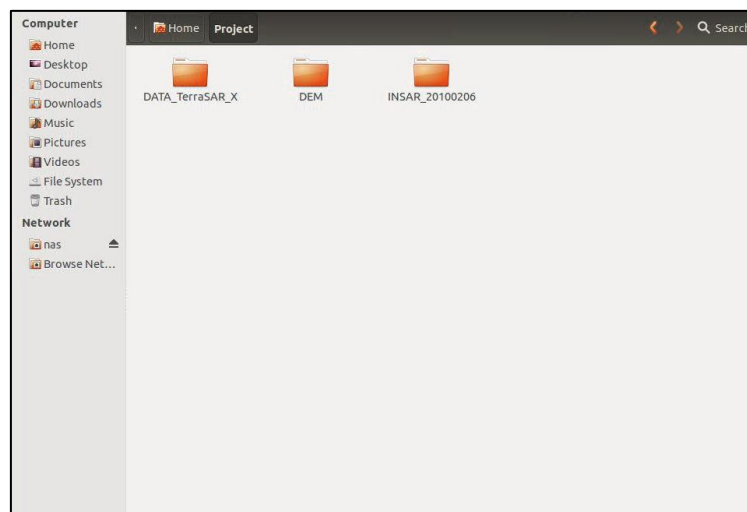
3.3 ใช้ `cd` เข้าไปในแฟ้ม SLC และเข้าไปในแฟ้มภาพที่เลือกเป็นภาพหลัก (แนะนำให้เลือกภาพที่อยู่กลาง) เมื่อเรียบร้อยแล้วให้ใช้คำสั่ง

`Step_read_whole_XXX` (XXX คือชื่อดาวเทียมที่ประมวลผลมีดังนี้ TSX, RSAT, RSAT2, ERS, Envisat และ CSK)

3.4 ให้สร้างไฟล์ชื่อ `master crop.in` ลงในแฟ้มภาพหลัก แล้วพิมพ์ค่าจุดภาพที่ต้องการจะตัดภาพคือ `first_l` และ `last_l` ค่าเริ่มต้นและสิ้นสุด azimuth line numbers, `first_p` และ `last_p` เป็นค่าเริ่มต้นและสิ้นสุด range pixels ตัวอย่างเช่น

```
first_l  1001
last_l   28900
first_p  1001
last_p   15550
```

ต่อจากนั้นให้ใช้คำสั่ง `step_master_read` ใน terminal เมื่อเสร็จให้ออกจากแฟ้มภาพหลัก มาแฟ้มภาพทั้งหมด (SLC) โดยใช้คำสั่ง `cd ..` จากนั้นใช้คำสั่ง `make_read` เมื่อเสร็จภาพทั้งหมดถูกตัดให้มีขนาดเท่ากับภาพหลัก แล้วแฟ้มใหม่เกิดขึ้นชื่อ `INSAR_` ตามด้วยชื่อวันที่ของภาพหลักดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 แฟ้ม `INSAR_20100206` ถูกสร้างหลังจากตัดภาพ

3.5 ให้ cd ไปยังแฟ้ม INSAR_20100206 แล้วให้สร้างไฟล์ชื่อ dummy.slcrsc เปิดขึ้นมาให้ใส่ค่า HEADING ของภาพตัวอย่างเช่น

```
HEADING      -167
```

(ถ้าใช้ข้อมูลภาพ TerraSAR-X ให้ข้ามขั้นตอนนี้ไปเนื่องจากโปรแกรมจะสร้างให้อัตโนมัติ)

3.6 แก้ไขไฟล์ timing.dorisin ในแฟ้ม INSAR_20100206 เพื่อให้ข้อมูลการประมวลผลเชื่อมโยงกับข้อมูล DEM ดังแสดงในรายการข้างล่าง

```
SAM IN FORMAT      real4
SAM IN DEM          /home/cu/Project/DEM/Bangkok.dem
SAM IN SIZE         4801 4801 // rows cols
SAM IN DELTA        0.000833333 0.000833333 // posting in degrees
SAM IN UL           -13 42 // lat and lon of upper left
SAM IN NODATA       -9999
```

ให้ปรับค่าอักษรสีแดงตามค่าในข้อมูลเชิงคุณลักษณะของ DEM

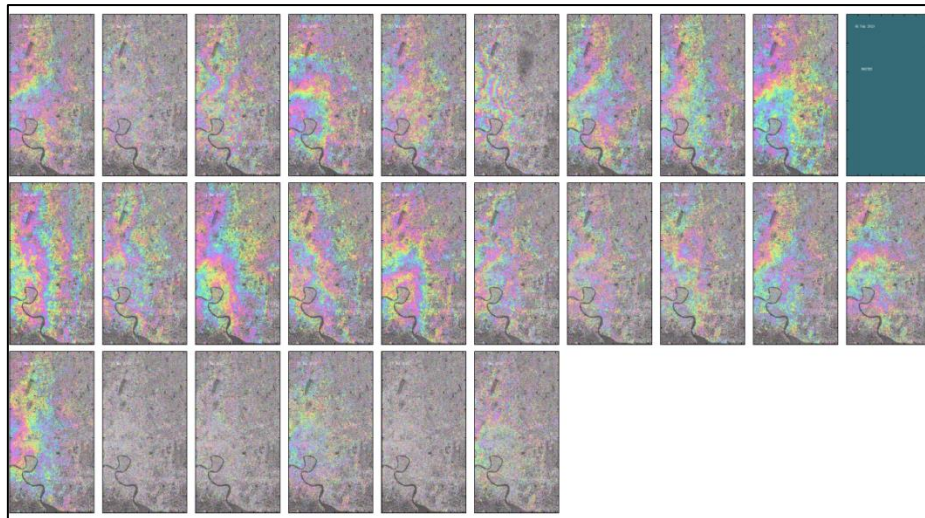
3.6 ประมวลผลคำสั่ง step_master_timing ขั้นตอนนี้ใช้เวลาค่อนข้างนาน สามารถประมวลผลคำสั่ง make_orbits, make_coarse และ make_coreg ตามลำดับควบคู่ไปได้

3.7 ประมวลผลคำสั่ง make_dems และ make_resample ตามลำดับ

3.8 ประมวลผลคำสั่ง make_ifgs เป็นการสร้าง interferogram ของคู่ภาพหลักกับภาพทั้งหมด เมื่อเสร็จสามารถดู interferogram ทั้งหมดได้โดยเปิดซอฟต์แวร์ matlab ขึ้นมาแล้วให้ใส่คำสั่ง plot_all_ifgs ก็จะได้ภาพดังแสดงในรูปที่ ก-3

3.9 ให้ cd ไปในแฟ้มภาพ slave แฟ้มใดก็ได้ในแฟ้ม INSAR_20100206 จากนั้นให้ใช้คำสั่ง

```
Step_geo (แฟ้มเดียวเท่านั้น)
```



รูปที่ ก-3 interferogram คู่ภาพทั้งหมดแบบ single master

3.10 ให้ cd กลับมายังแฟ้ม INSAR_20100206 อีกครั้งด้วยคำสั่ง cd .. จากนั้นประมวลผลด้วยคำสั่ง `mt_prep 0.4 3 2 50 200`

- 0.4 = amplitude dispersion (ค่าควรอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.42)
- 3 = number of patches in range (default 1)
- 2 = number of patches in azimuth, (default 1)
- 50 = overlapping pixels between patches in range (default 50)
- 200 = overlapping pixels between patches in azimuth (default 200)

3.11 เปิดซอฟต์แวร์ matlab โดยพิมพ์ `matlab` ลงใน terminal จากนั้น หน้าต่าง matlab จะแสดงออกมา แล้วให้ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลโดยใช้คำสั่ง `>>getparm`

สามารถแก้ไขพารามิเตอร์ได้โดยใช้คำสั่ง `>>setparm('param name',param value)`

3.12 ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง `>>stamps` ระบบจะประมวลผลขั้นตอนทั้งหมดจนเสร็จอาจจะใช้เวลาเป็นวันหรือบางข้อมูลอาจใช้เวลาเป็นสัปดาห์ หรืออาจจะประมวลผลทีละขั้นตอนซึ่งการประมวลผลจะแบ่งเป็น 8 ขั้นตอน โดยใช้คำสั่ง `>>stamps (1,3)` หมายความว่า จะประมวลผลขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นที่ 3

3.13 เมื่อประมวลผลเสร็จสามารถพล็อตกราฟดูผลการได้โดยใช้คำสั่ง `>ps_plot('v-do',4)`

- 'v' = mean LOS velocity (MLV) in mm/yr
- 'd' = for spatially correlated DEM error (rad/m)
- 'o' = for orbital ramps

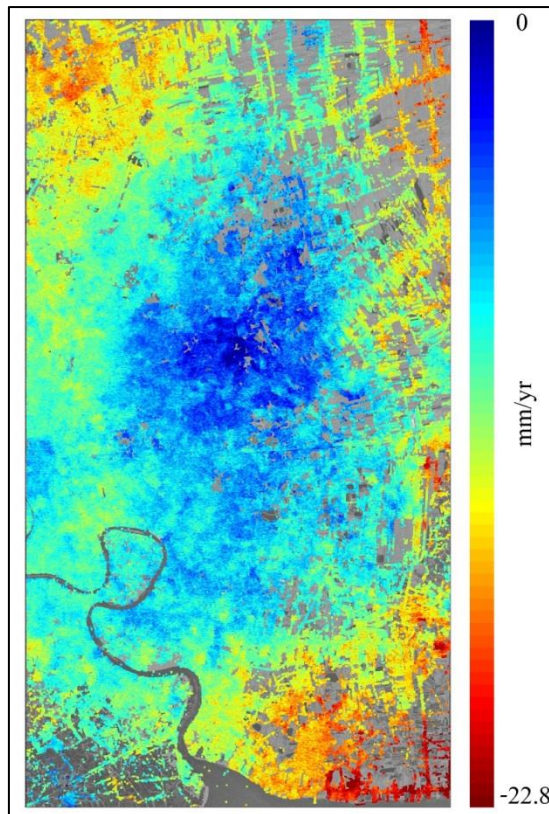
ส่วนเลข 4 คือภาพพื้นหลังสามารถเปลี่ยนได้หลายแบบดังนี้

- 1 = outputs the data to a .mat file instead of plotting
- 0 = black background, lon/lat axes
- 1 = white background, lon/lat axes (default)
- 2 = shaded relief topo, lon/lat axes
- 3 = 3D topo, lon/lat axes
- 4 = mean amplitude image
- 5 = mean amplitude image, brightness showing through PS
- 6 = white background, xy axis (rotated lon/lat)

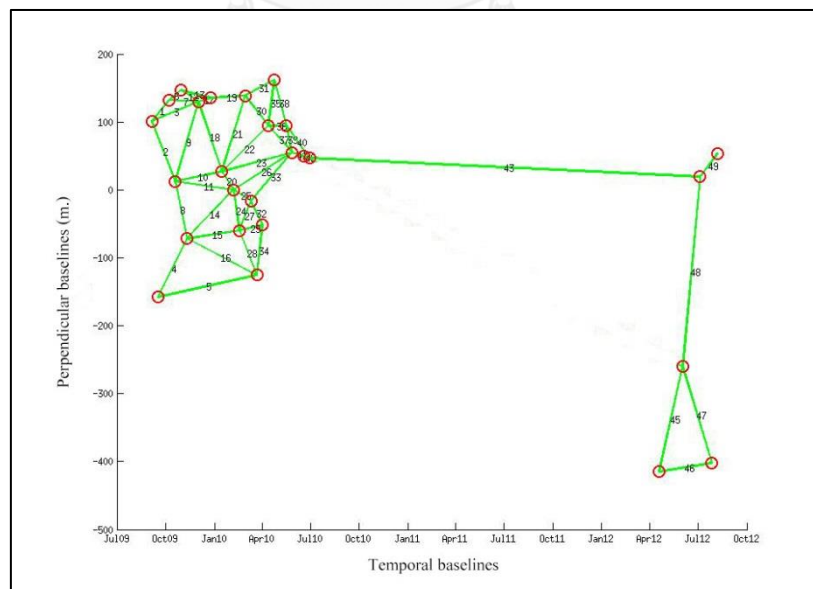
หลังจากสั่งพล็อตข้างต้นแล้วระบบจะแสดงผลออกมาดังแสดงในรูปที่ ก-4 ผลลัพธ์ข้างต้นยังเป็นการเคลื่อนตัวในทิศทางของ line of sight (LOS)

3.14 การประมวลผลวิธี Small baselines เริ่มจากเปิด terminal แล้ว cd ไปยังแฟ้ม INSAR_20100206 ให้พิมพ์คำสั่ง `mt_extract_info`

3.15 เปิดซอฟต์แวร์ matlab แล้วใช้คำสั่ง `>>ps_load_info` ตามด้วย `>>sb_find` ซอฟต์แวร์จะจับคู่ภาพแบบหลาย master ดังแสดงในรูปที่ ก-5



รูปที่ ก-4 ผลจากการพล็อตในวิธี PS ด้วยคำสั่ง >>ps_plot('v-do',4)



รูปที่ ก-5 จับคู่ภาพวิธี Small baselines

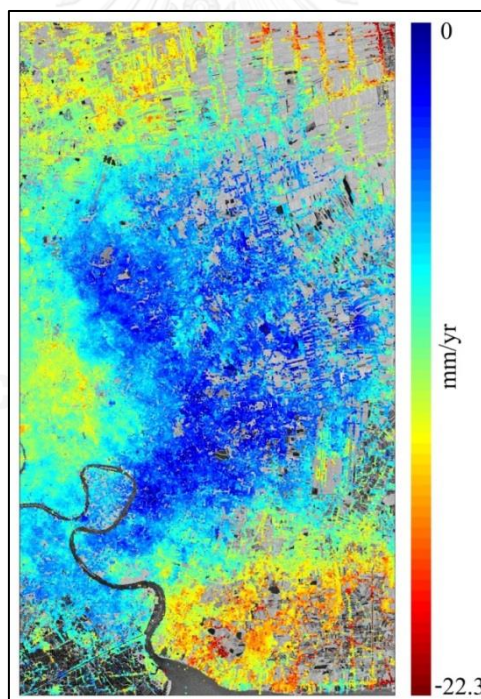
สามารถแก้ไขการจับคู่ภาพได้โดยเข้าไปแก้ไขในไฟล์ชื่อ small_baselines.list

3.16 สร้าง interferogram วิธี Small baselines โดยใช้คำสั่ง `make_small_baselines`. ระบบจะสร้างแฟ้ม interferogram ของวิธี small baseline ชื่อว่า SMALL_BASELINES

3.17 ให้ cd เข้าไปในแฟ้ม SMALL_BASELINES ให้ใช้คำสั่ง `mt_prep 0.6 3 2 50 200`

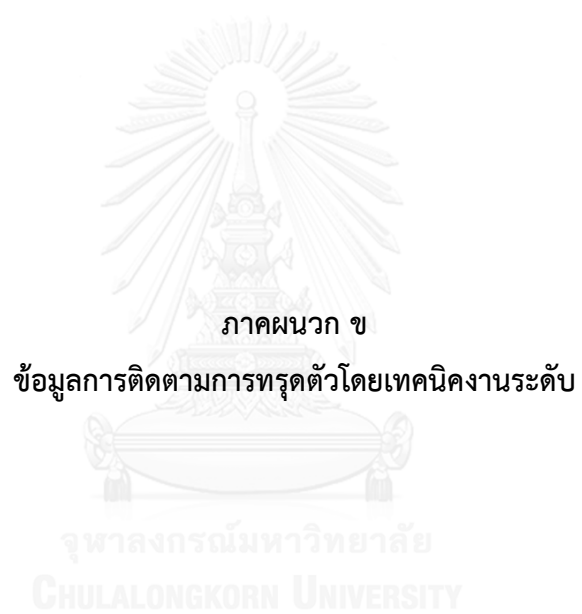
- 0.6 = amplitude difference dispersion (0.6 is reasonable)
- 3 = number of patches in range (default 1)
- 2 = number of patches in azimuth, (default 1)
- 50 = overlapping pixels between patches in range (default 50)
- 200 = overlapping pixels between patches in azimuth (default 200)

3.17 หลังจากนี้ให้ทำตามขั้นตอนในข้อที่ 3.12 – 3.13 เมื่อเสร็จจะได้ผลลัพธ์ออกมาดังแสดงในรูปที่ ก-6 จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการ Combined ทั้ง 2 วิธีเข้าด้วยกัน โดยเปิด matlab ให้ cd ไปยังแฟ้ม INSAR_20100206 ให้ใช้คำสั่ง `ps_sb_merge` ระบบจะสร้างแฟ้มข้อมูลที่ชื่อ MERGED ขึ้นมา



รูปที่ ก-6 ผลจากการพล็อตในวิธี Small baselines ด้วยคำสั่ง `>>ps_plot('v-do',4)`

3.18 ให้ cd ไปยังแฟ้ม MERGED จากนั้นให้ประมวลผลโดยใช้คำสั่ง `>>stamps(6,8)` สามารถตรวจสอบผลได้ตามข้อที่ 3.13 ถ้าหากผลออกมาเป็นที่น่าพอใจก็สามารถ export ผลการประมวลผลเป็นไฟล์ text ได้ จากนั้นก็สามารถนำเข้าระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการติดตามการทรมัตว์โดยเทคนิคงานระดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

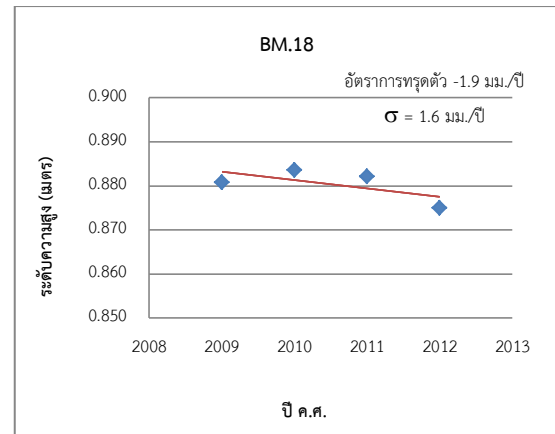
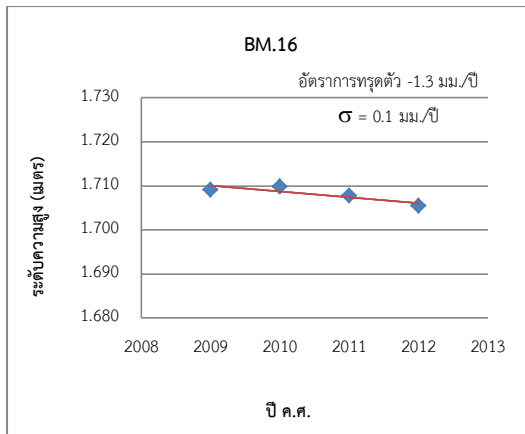
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการสำรวจระดับในพื้นที่ศึกษา

ที่	หมุด	จังหวัด	2009 (m)	2010 (m)	2011 (m)	2012 (m)	อัตราการทรุดตัว (mm/yr)	SD (mm/yr)
1	BM.16	กรุงเทพฯ	1.709	1.710	1.708	1.705	-1.3	0.5
2	BM.18	กรุงเทพฯ	0.881	0.884	0.882	0.875	-1.9	1.6
3	BM.28	กรุงเทพฯ	1.630	1.643	1.638	1.628	-0.9	3.7
4	BM.29	สมุทรปราการ	1.458	1.468	1.463	1.469	2.7	1.8
5	BM.46	ปทุมธานี	3.400	3.388	3.392	3.389	-2.9	2.3
6	BM.48	ปทุมธานี	2.482	2.484	2.487	2.479	-0.5	1.7
7	BM.56	กรุงเทพฯ	2.154	2.136	2.147	2.124	-8.0	4.5
8	S.13416-1/43	ปทุมธานี	4.553	4.536	4.549	4.525	-7.2	4.9
9	S.13417	ปทุมธานี	4.243	4.226	4.235	4.214	-7.6	4.0
10	S.14632	กรุงเทพฯ	2.724	2.720	2.718	2.721	-1.1	1.0
11	S.14634	กรุงเทพฯ	5.421	5.416	5.413	5.417	-1.3	1.4
12	S.2259/42	ปทุมธานี	2.889	2.868	2.873	2.871	-4.9	3.6
13	S.6943/47	สมุทรปราการ	3.792	3.791	3.791	3.787	-1.5	0.6
14	S.6945-1/47	สมุทรปราการ	1.638	1.624	1.617	1.632	-2.7	4.7
15	S.7030/40	สมุทรปราการ	1.441	1.430	1.421	1.416	-8.4	1.0
16	S.7034/40	สมุทรปราการ	1.569	1.549	1.536	1.533	-12.2	2.7
17	S.7035-3/43	สมุทรปราการ	2.476	2.468	2.464	2.467	-3.2	1.8
18	S.7036-1/43	สมุทรปราการ	1.339	1.332	1.328	1.328	-3.6	1.0
19	S.7037/43	สมุทรปราการ	1.508	1.504	1.502	1.499	-3.0	0.4
20	S.7039/43	สมุทรปราการ	1.637	1.633	1.630	1.629	-2.7	0.5
21	S.7641/45	ปทุมธานี	5.569	5.559	5.560	5.560	-2.5	1.8
22	S.7644/45	ปทุมธานี	5.109	5.101	5.099	5.100	-3.1	1.5
23	S.7645/47	ปทุมธานี	5.023	5.016	5.014	5.018	-1.6	1.7
24	S.8289/43	สมุทรปราการ	2.287	2.282	2.282	2.277	-2.8	0.6
25	S.8290/43	สมุทรปราการ	2.030	2.023	2.022	2.017	-4.1	0.7
26	S.8291/43	สมุทรปราการ	2.239	2.231	2.227	2.222	-5.7	0.6
27	S.8292/43	สมุทรปราการ	2.140	2.134	2.130	2.128	-4.2	0.6
28	S.8306/47	สมุทรปราการ	2.273	2.272	2.270	2.265	-2.5	0.7
29	S.8319/46	กรุงเทพฯ	0.794	0.790	0.788	0.783	-3.5	0.5
30	S.8392/34	กรุงเทพฯ	2.111	2.104	2.097	2.110	-1.2	3.6
31	S.8889/47	สมุทรปราการ	2.779	2.775	2.766	2.767	-4.5	1.5
32	S.8896	สมุทรปราการ	2.462	2.450	2.446	2.439	-7.1	1.2
33	S.8896-2/43	สมุทรปราการ	2.854	2.848	2.846	2.855	0.2	2.4
34	S.8993-1/47	ปทุมธานี	4.235	4.221	4.214	4.211	-7.8	1.8

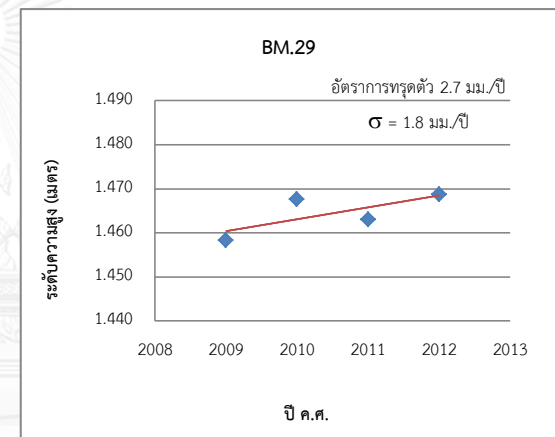
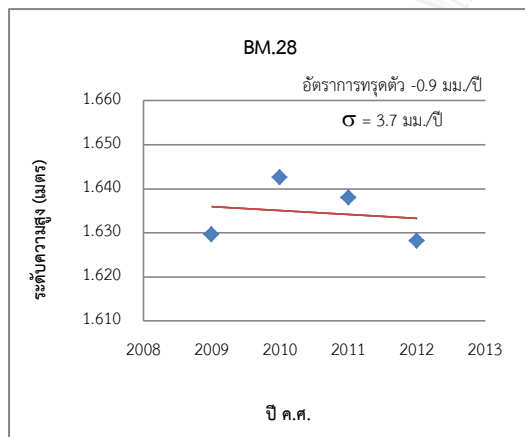
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการสำรวจระดับในพื้นที่ศึกษา (ต่อ)

ที่	หมู่	จังหวัด	2009 (m)	2010 (m)	2011 (m)	2012 (m)	อัตราการทรุดตัว (mm/yr)	SD (mm/yr)
35	S.ws.01/3/47	สมุทรปราการ	3.388	3.382	3.368	3.381	-3.5	4.0
36	S.กทม.353/47	ปทุมธานี	5.229	5.215	5.208	5.205	-7.8	1.8
37	S.กทม.365	กรุงเทพฯ	3.692	3.689	3.689	3.679	-3.8	1.4
38	S.กทม.418/37	กรุงเทพฯ	2.111	2.107	2.107	2.101	-2.9	0.9
39	S.กทม.448/46	กรุงเทพฯ	2.676	2.674	2.671	2.664	-3.8	0.7
40	S.กทม.527	กรุงเทพฯ	2.189	2.182	2.175	2.188	-0.9	3.7
41	S.กทม.530/34	กรุงเทพฯ	2.312	2.304	2.293	2.306	-2.9	3.9
42	S.กทม.532/34	กรุงเทพฯ	2.055	2.047	2.038	2.049	-2.9	3.2
43	SBM.1	ปทุมธานี	2.820	2.812	2.807	2.810	-3.4	1.8
44	กทม.124	กรุงเทพฯ	1.032	1.033	1.031	1.031	-0.5	0.4
45	กทม.157	กรุงเทพฯ	1.837	1.843	1.844	1.838	0.4	2.0
46	กทม.159	กรุงเทพฯ	1.819	1.827	1.827	1.817	-0.7	2.9
47	กทม.160	กรุงเทพฯ	0.562	0.566	0.567	0.562	-0.2	1.5
48	กทม.176	สมุทรปราการ	2.150	2.157	2.163	2.156	2.3	2.3
49	กทม.236/31	กรุงเทพฯ	0.891	0.897	0.897	0.889	-0.5	2.3
50	กทม.241	กรุงเทพฯ	2.393	2.394	2.395	2.393	-0.6	0.5
51	กทม.242	กรุงเทพฯ	1.485	1.485	1.485	1.485	-0.2	0.0
52	กทม.255	กรุงเทพฯ	2.259	2.257	2.256	2.255	-1.1	0.1
53	กทม.257	กรุงเทพฯ	1.845	1.842	1.842	1.841	-1.2	0.3
54	กทม.315	ปทุมธานี	2.334	2.326	2.329	2.326	-2.0	1.4
55	กทม.320	กรุงเทพฯ	2.152	2.142	2.140	2.136	-4.9	1.2
56	กทม.322	กรุงเทพฯ	4.865	4.859	4.858	4.854	-3.5	0.6
57	กทม.366	กรุงเทพฯ	3.514	3.527	3.529	3.520	2.0	3.7
58	กทม.415	กรุงเทพฯ	0.749	0.762	0.759	0.755	1.4	2.8



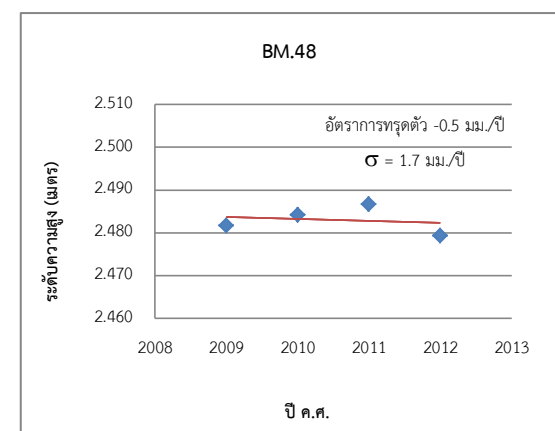
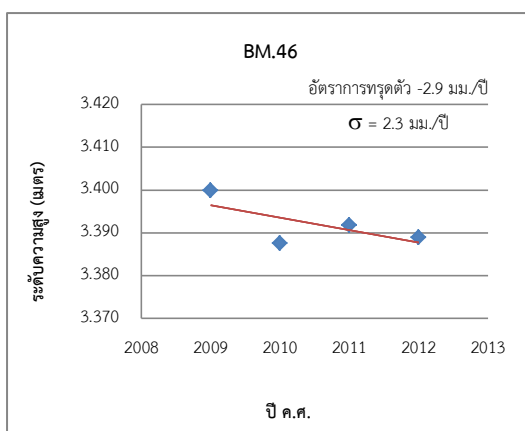
รูปที่ ข-1 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณกองบิน
สำนักงานตำรวจแห่งชาติ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-2 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณคลังพัสดุการ
เคหะ เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร



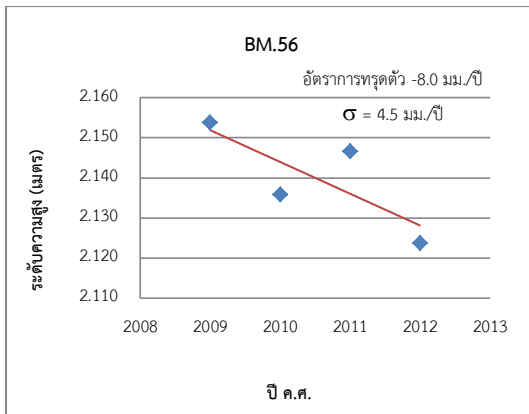
รูปที่ ข-3 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสำนักงานเขต
มีนบุรี กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-4 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณวัดกิ่งแก้ว
อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

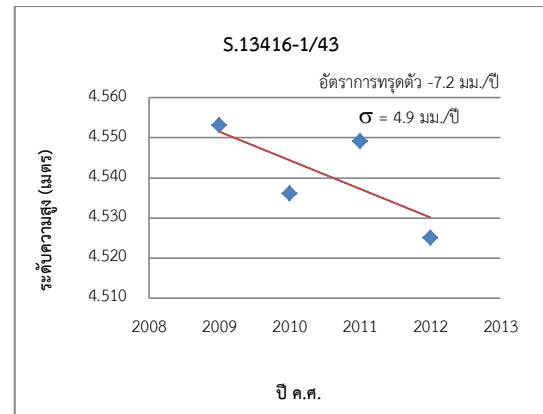


รูปที่ ข-5 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณหลังบ้านพัก
การประปาส่วนภูมิภาค อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

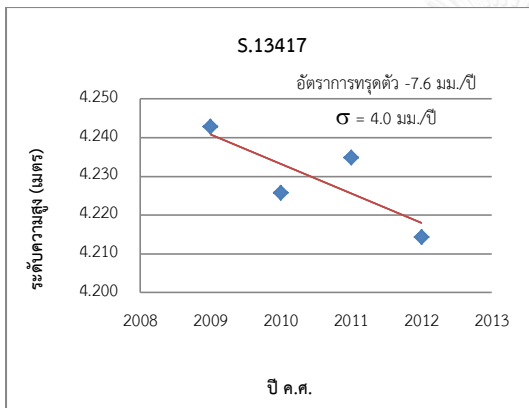
รูปที่ ข-6 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณที่ว่าการอำเภอ
ลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



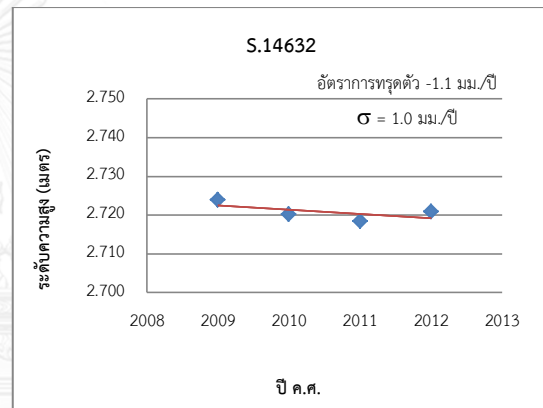
รูปที่ ข-7 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณวัดสี่ชมพู่
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร



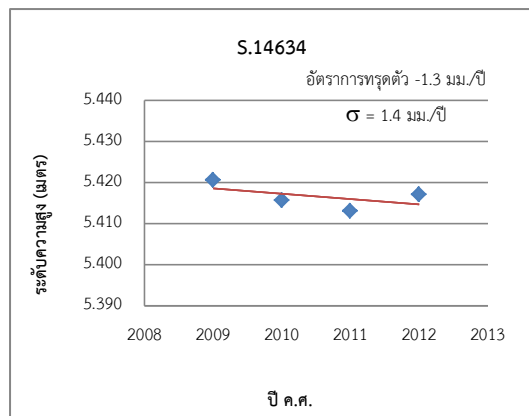
รูปที่ ข-8 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองสิบ อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



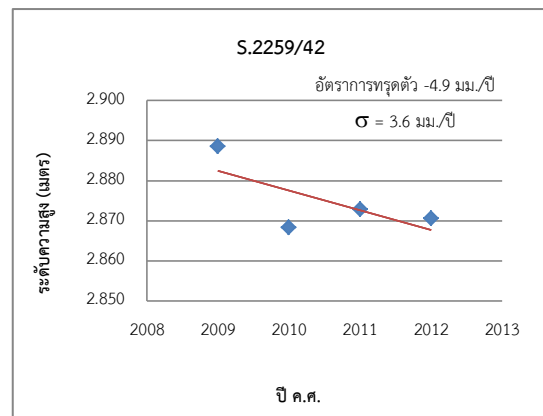
รูปที่ ข-9 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองหกวา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



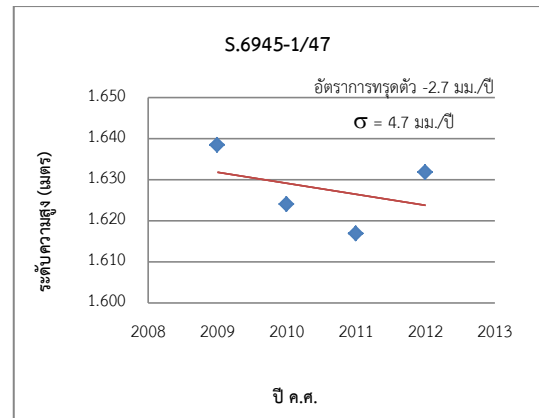
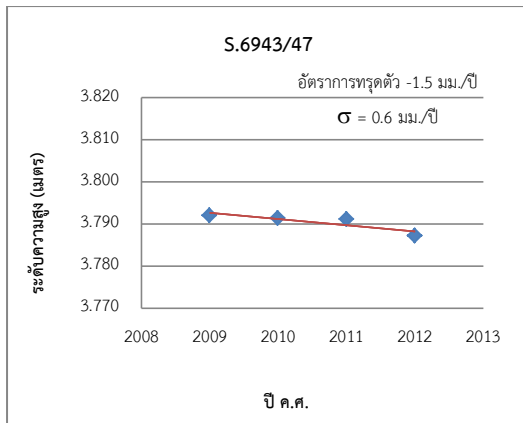
รูปที่ ข-10 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ทับช้างบน เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



รูปที่ ข-11 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณใกล้สะพาน
คลองแสนแสบ เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร

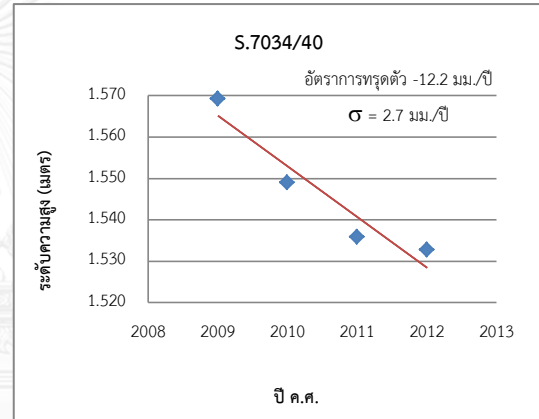
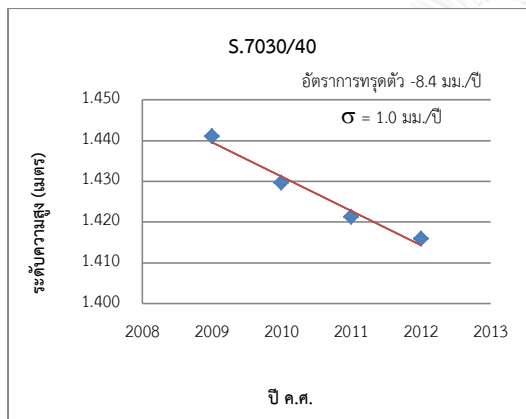


รูปที่ ข-12 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณเสาไฟฟ้าหน้า
โรงเรียนสินธุ์รุ่งเรือง อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี



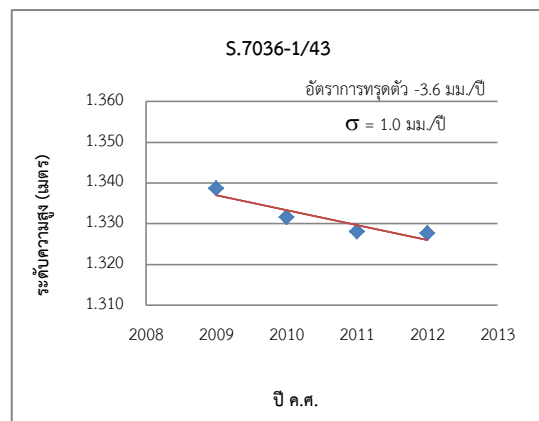
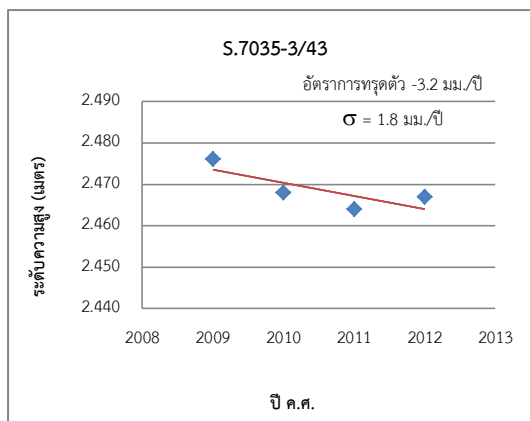
รูปที่ ข-13 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
บางนาเกรง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ

รูปที่ ข-14 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณเกาะกลาง
ถนน หน้า สภ.อ.พระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ



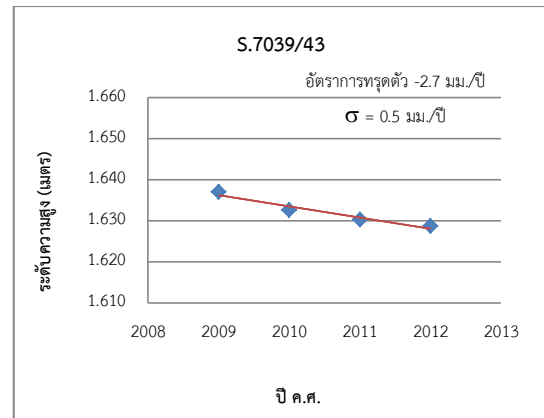
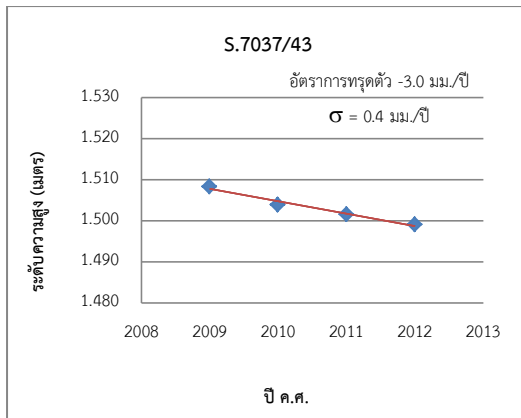
รูปที่ ข-15 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณฐานเสาไฟฟ้า
No.212 อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

รูปที่ ข-16 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณฐานเสาไฟฟ้า
No.278 อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ

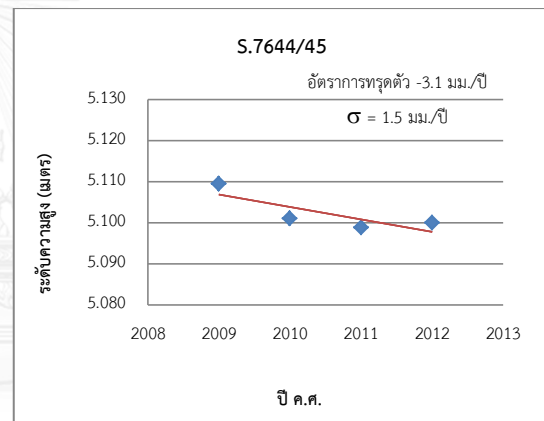
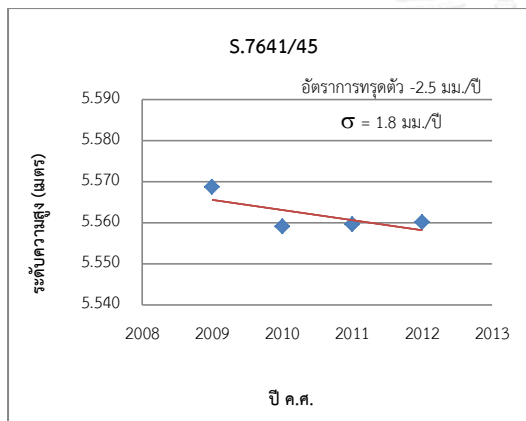


รูปที่ ข-17 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ชลประทาน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ

รูปที่ ข-18 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ชลประทาน ขอยเทศบาลบางปู 57 อำเภอเมือง
จังหวัดสมุทรปราการ

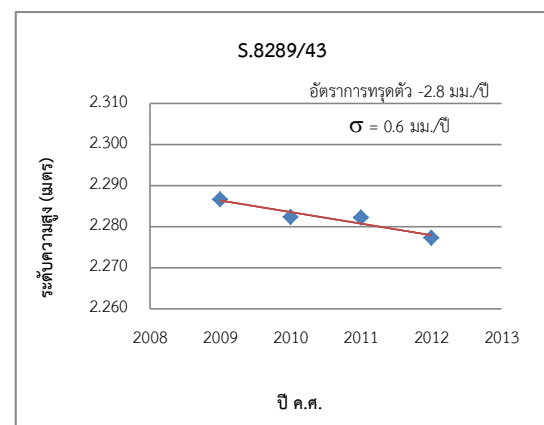
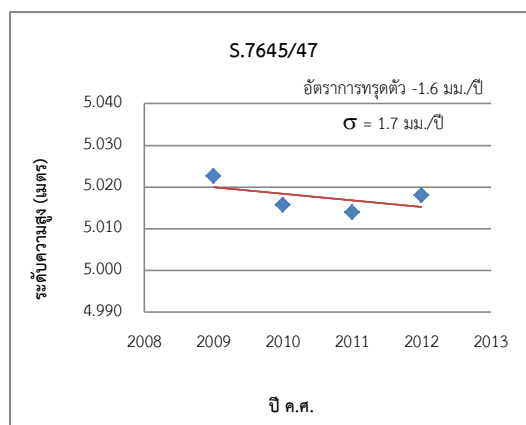


รูปที่ ข-19 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลองรูปที่ ข-20 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานลอย
ชลประทาน ขอยเทศบาลบางปู 47 อำเภอเมือง หน้าโรงเรียนสมุทรปราการ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ
จังหวัดสมุทรปราการ



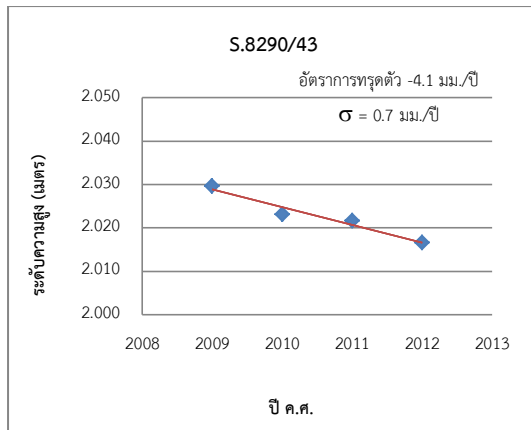
รูปที่ ข-21 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองหนึ่ง อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

รูปที่ ข-22 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองสาม อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

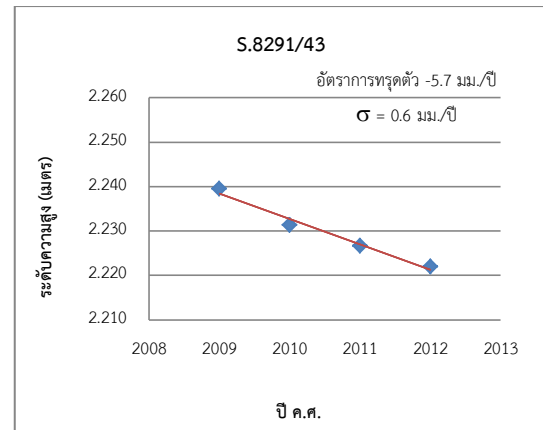


รูปที่ ข-23 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองสี่ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

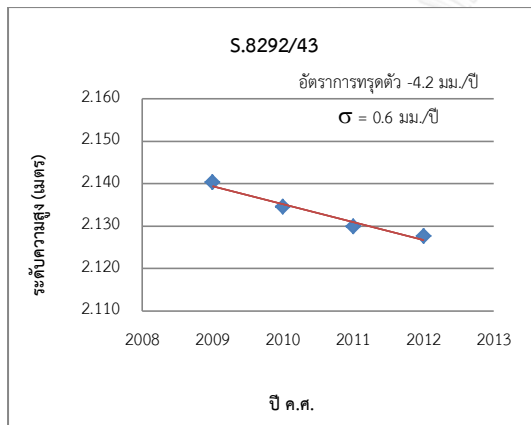
รูปที่ ข-24 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองบางปิ้ง อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ



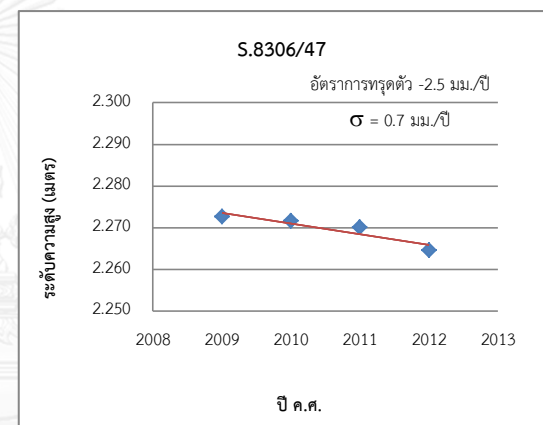
รูปที่ ข-25 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองหนามแดง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ



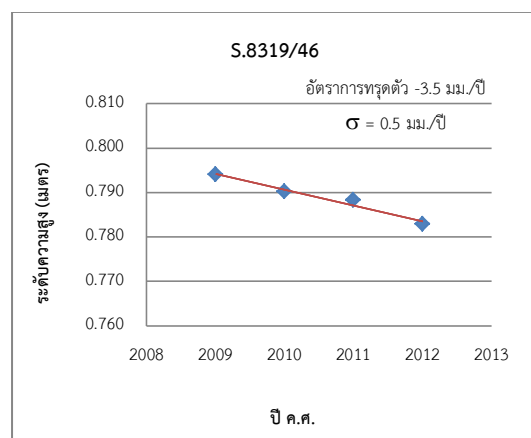
รูปที่ ข-26 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองท่อบาง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ



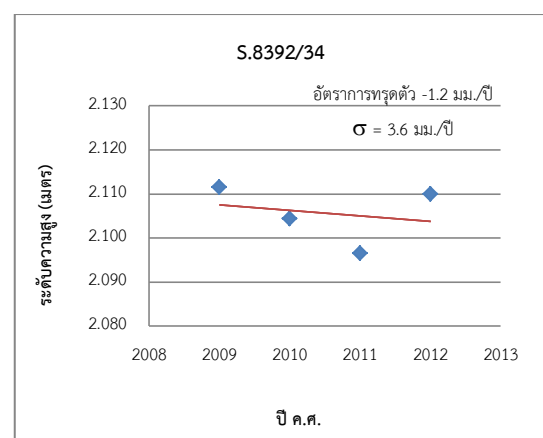
รูปที่ ข-27 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองกันยา อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ



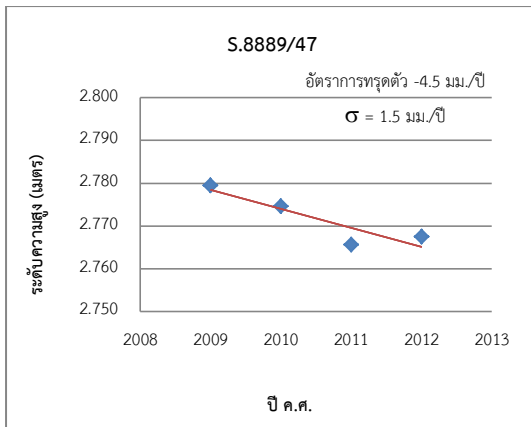
รูปที่ ข-28 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณประตูระบาย
น้ำคลอง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ



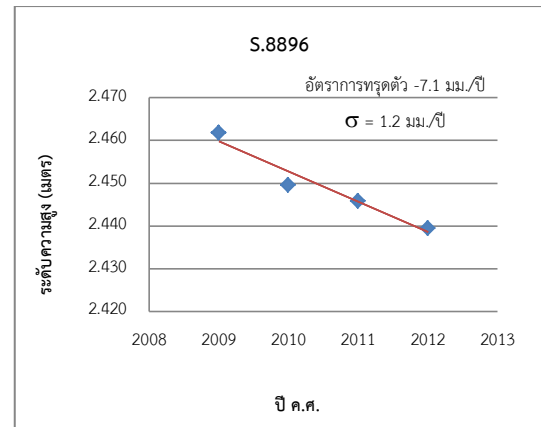
รูปที่ ข-29 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณฐาน
สะพานลอย ใกล้แยกลาดพร้าว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร



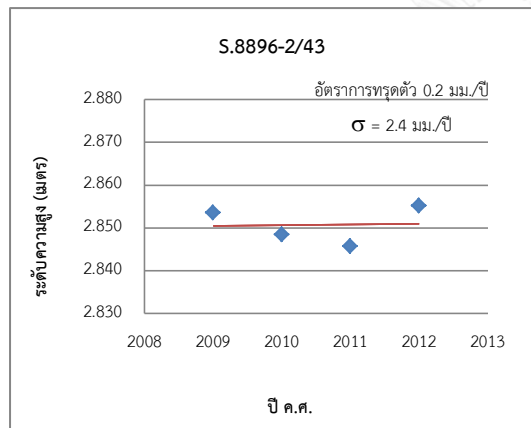
รูปที่ ข-30 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
รางตรง เขตราชบุรีบูรณะ กรุงเทพมหานคร



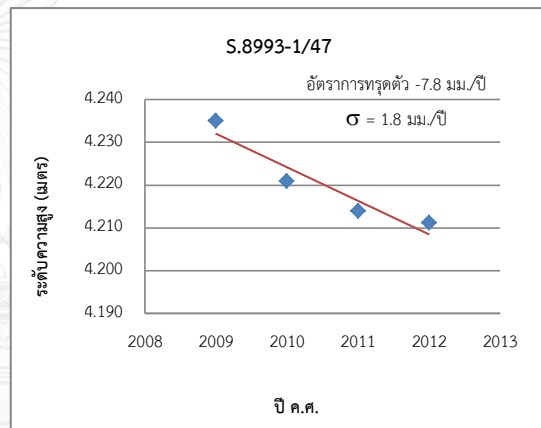
รูปที่ ข-31 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองกันยา อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ



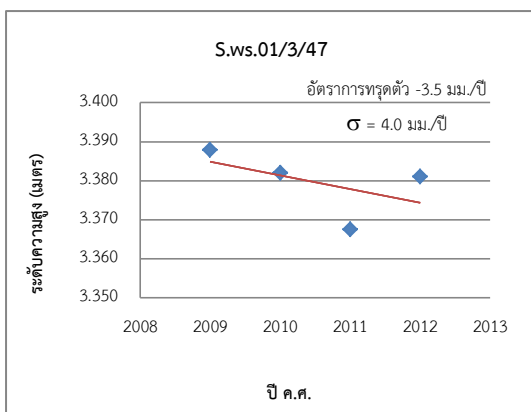
รูปที่ ข-32 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองบางปลา อำเภอมือง จังหวัดสมุทรปราการ



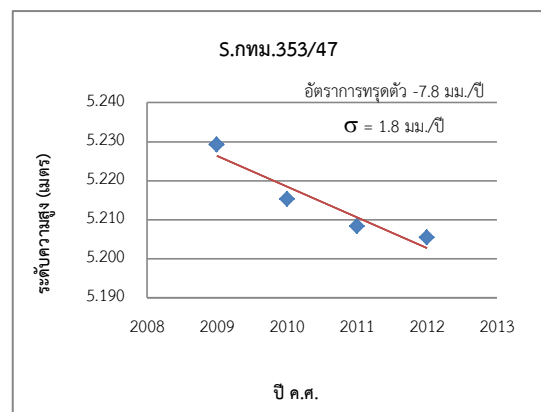
รูปที่ ข-33 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ชลประทาน ซอยเทศบาลบางปู 105 อำเภอมือง จังหวัด
สมุทรปราการ



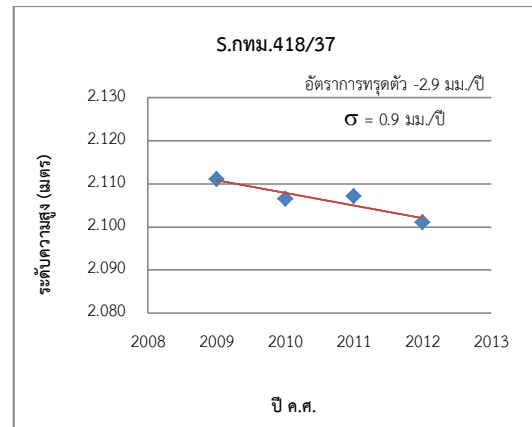
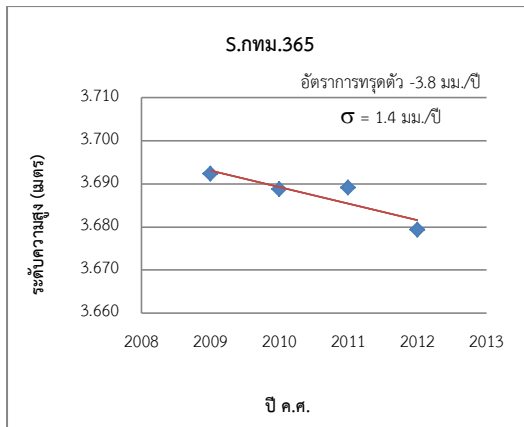
รูปที่ ข-34 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองเจ็ด อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



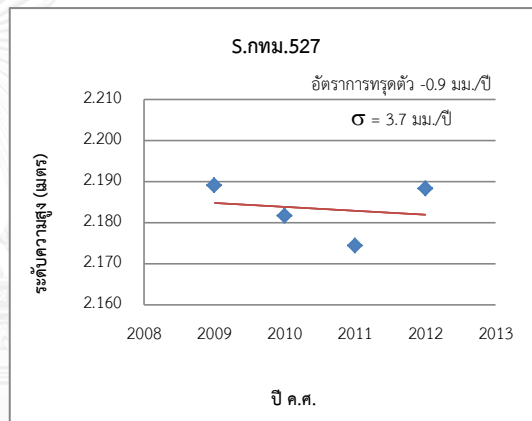
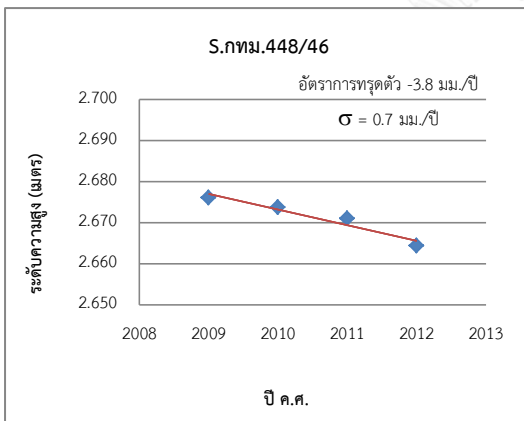
รูปที่ ข-35 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองตำ อำเภพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ



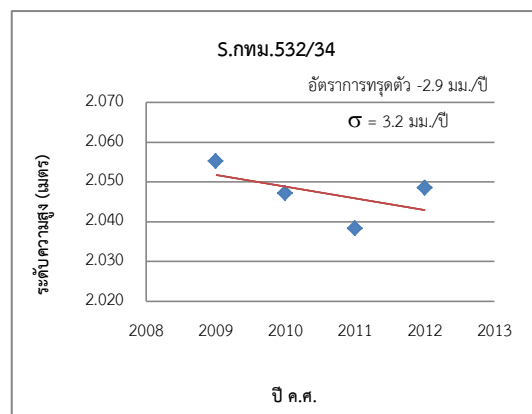
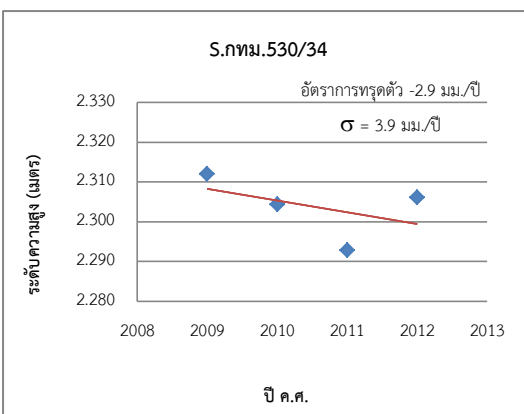
รูปที่ ข-36 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองหกวา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



รูปที่ ข-37 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ไฟเหลือง เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร

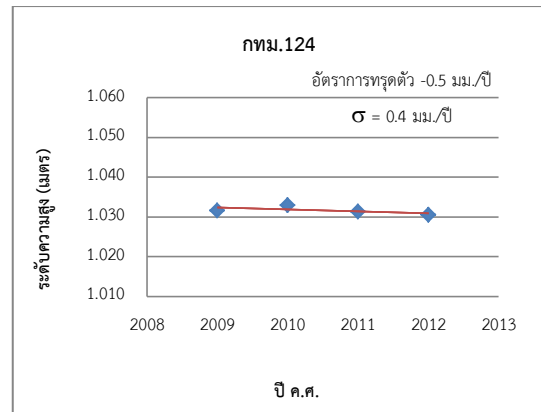
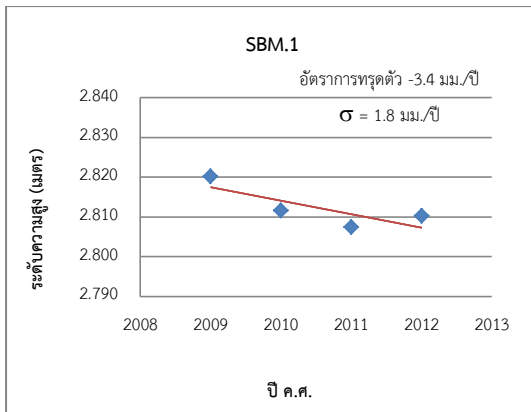


รูปที่ ข-39 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณนอตยึดเสาไฟ
ส่องสว่างสะพานคลองตาฟุก เขตประเวศน์ กรุงเทพมหานคร



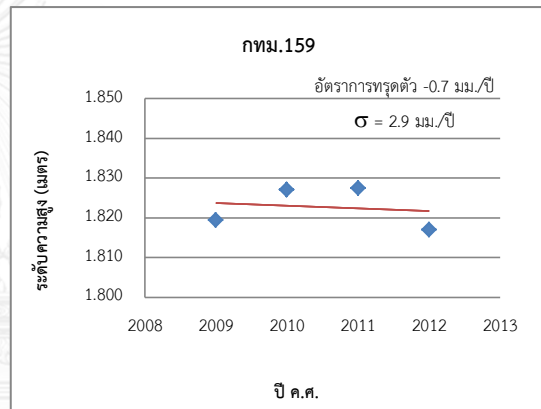
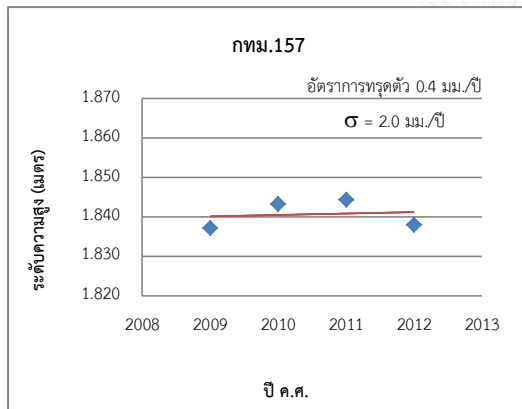
รูปที่ ข-41 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
หนองรี เขตราชบุรีบูรณะ กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-42 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองรางจาก เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร



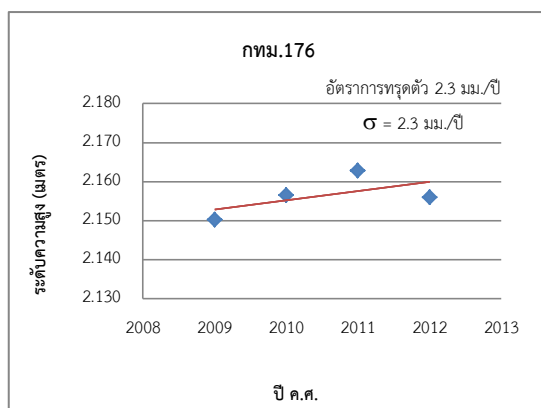
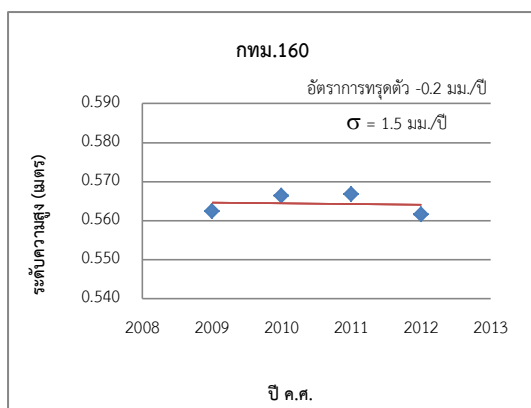
รูปที่ ข-43 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณประตูน้ำ
จุฬาลงกรณ์ อำเภอดัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

รูปที่ ข-44 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณศูนย์เยาวชน
ลุมพินี เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร



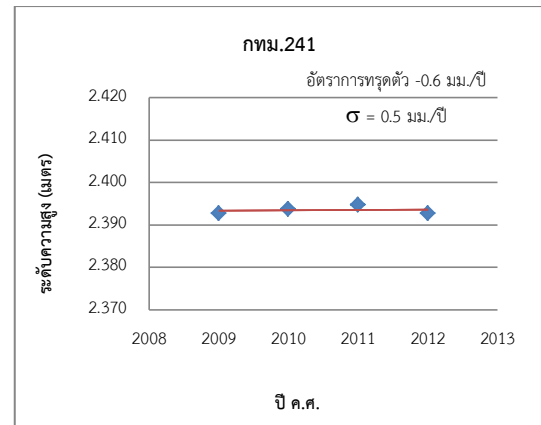
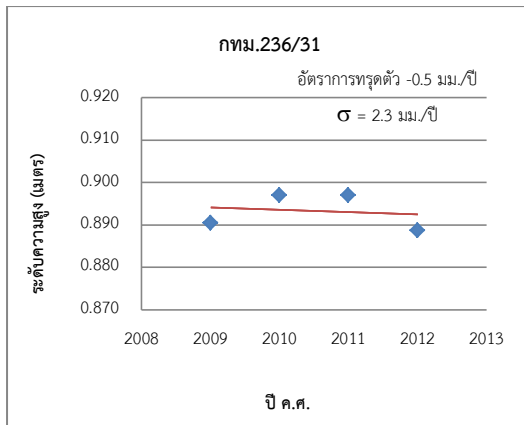
รูปที่ ข-45 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ประเวศบุรีรัมย์ เขตประเวศกรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-46 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ศาลเจ้า เขตประเวศกรุงเทพมหานคร

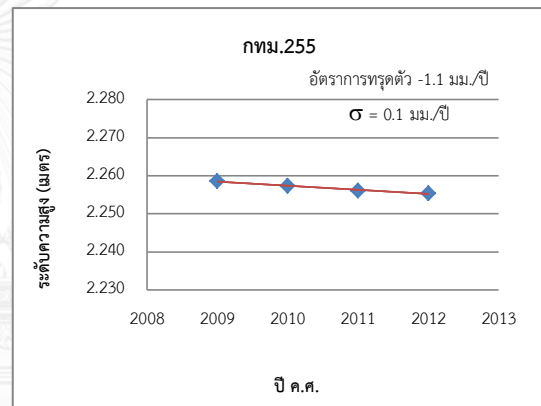
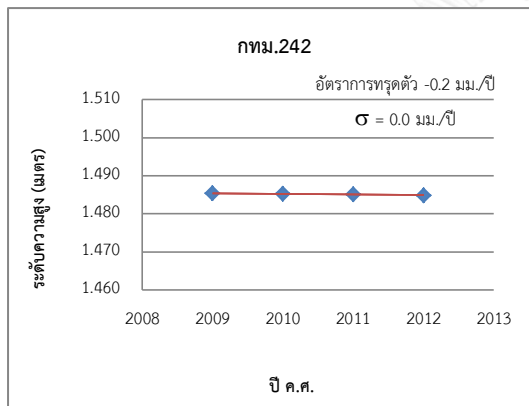


รูปที่ ข-47 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณโรงเรียนวัด
ปากบ่อ เขตประเวศกรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-48 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพาน
คลองสำโรง อำเภอมือง จังหวัดสมุทรปราการ

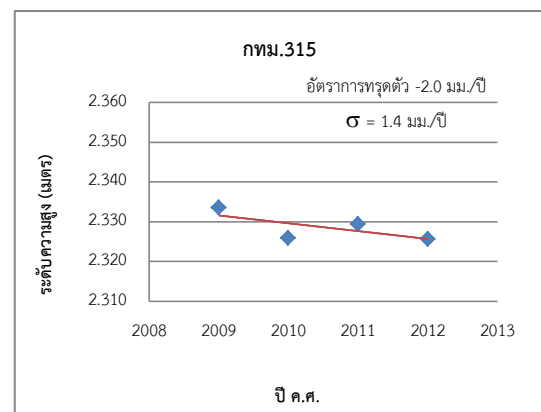
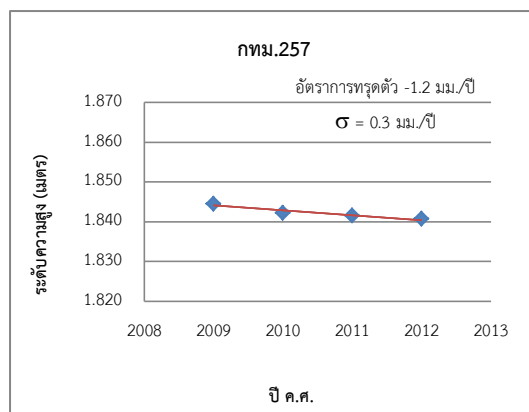


รูปที่ ข-49 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสำนักงานเขต บางกะปิ กรุงเทพมหานคร
รูปที่ ข-50 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณธนาคารนครหลวงไทย เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร



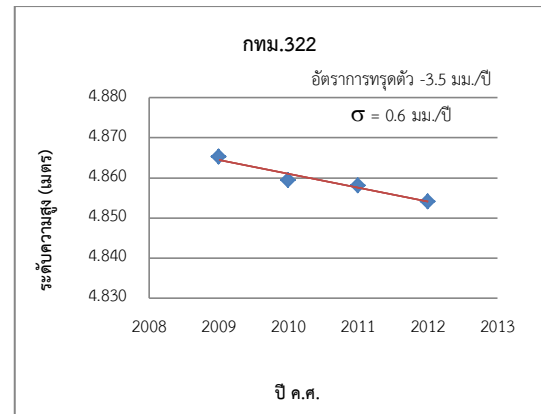
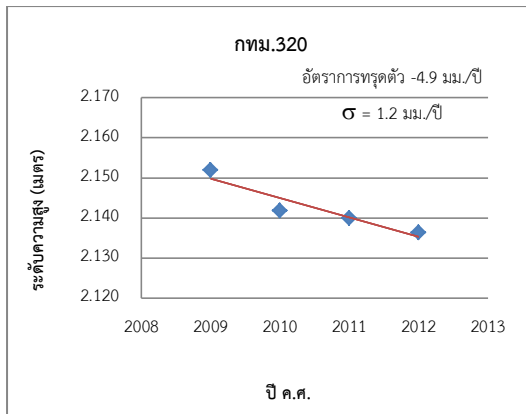
รูปที่ ข-51 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณอาคารสถาบันพัฒนาครูอาชีวศึกษา เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-52 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณห้างธนาคารกรุงเทพ สาขารามอินทรา เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร



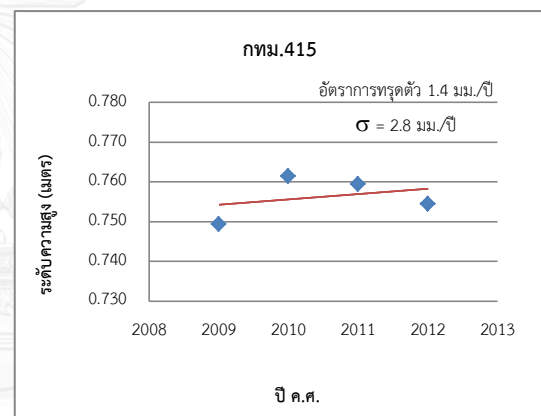
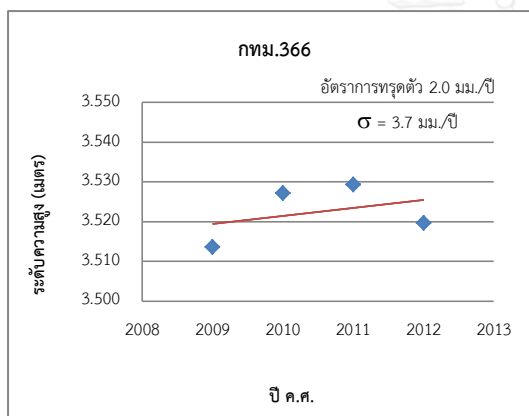
รูปที่ ข-53 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสำนักงานเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-54 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณชุมชนสายโทรศัพท์ดอนเมือง อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี



รูปที่ ข-55 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณโคนเสา
สะพานลอยหน้าโรงพยาบาลภูมิพล เขตดอนเมือง
กรุงเทพมหานคร

รูปที่ ข-56 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
ถนน เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร



รูปที่ ข-57 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณสะพานคลอง
บึงใหญ่ เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร

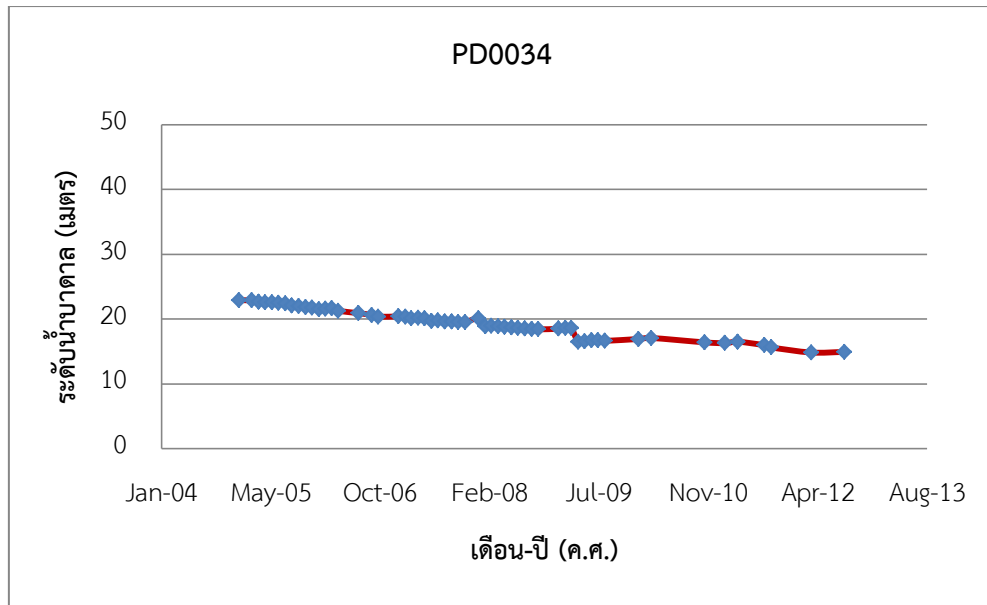
รูปที่ ข-58 กราฟการทรุดตัวปี 2009 – 2012 บริเวณโรงเรียนวัด
กระทุ่มเสือปลา เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร



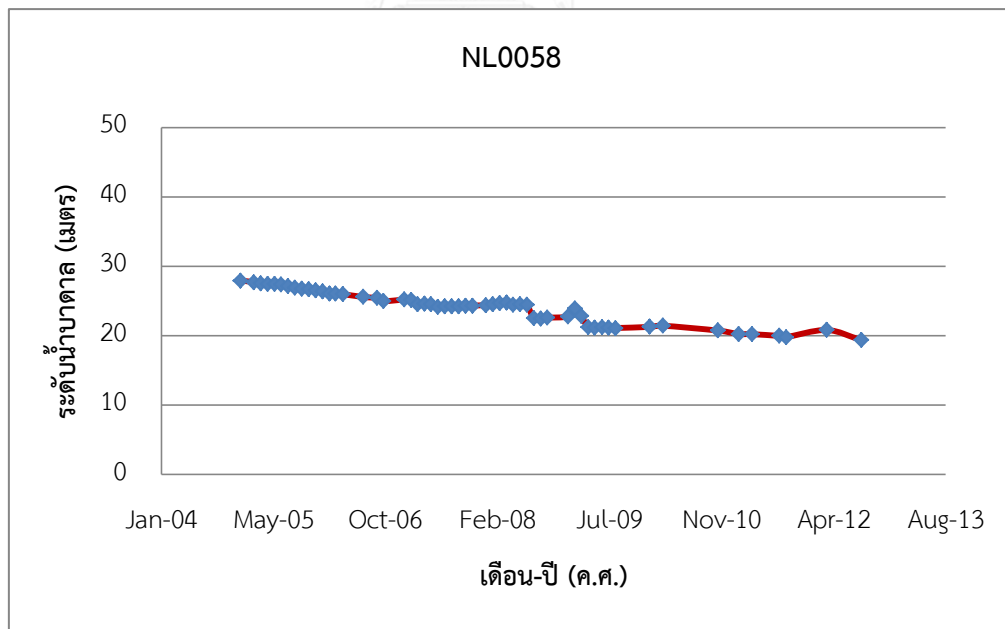
ภาคผนวก ค

กราฟการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในพื้นที่ศึกษา

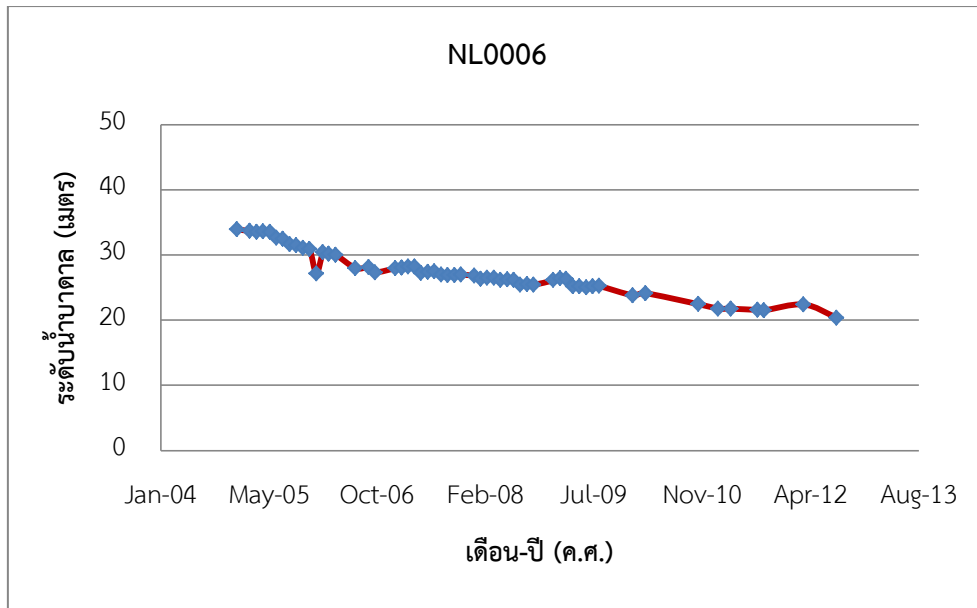
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



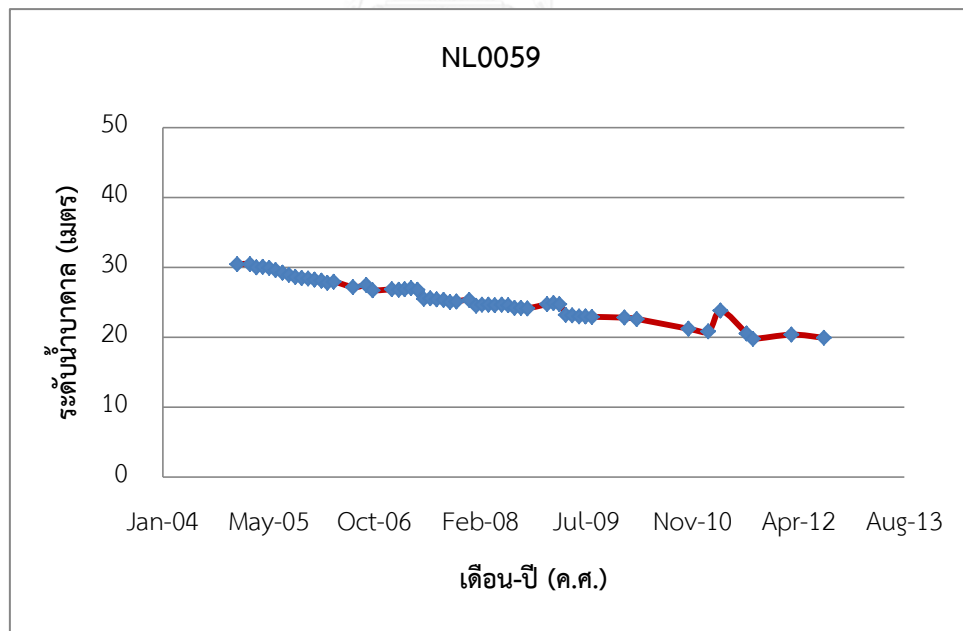
รูปที่ ค-1 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012 บริเวณสวนจตุจักร
แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร



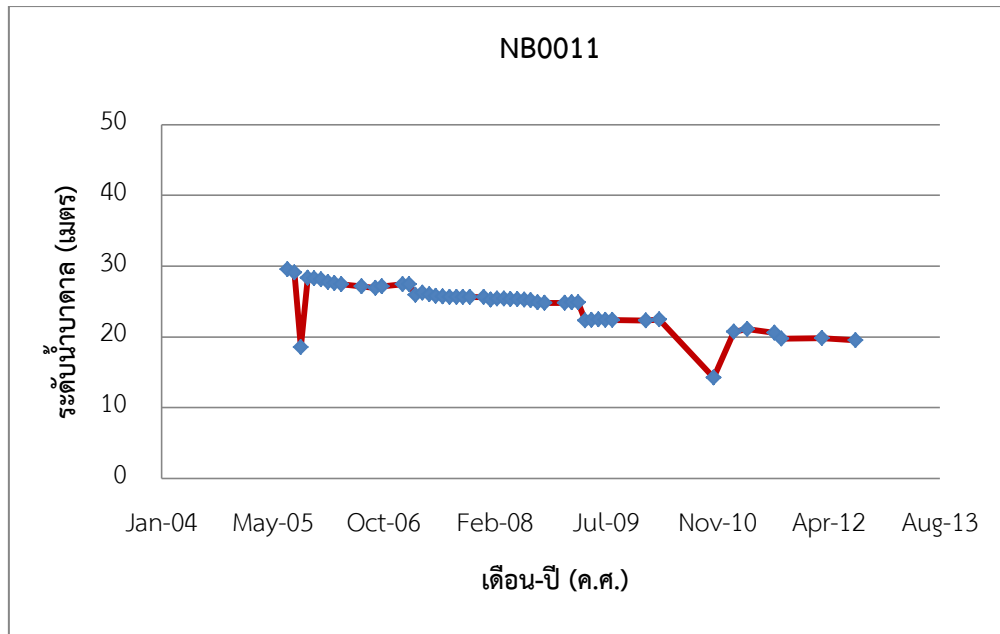
รูปที่ ค-2 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012 บริเวณโรงเรียนอิสลามวิทยาลัย
แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร



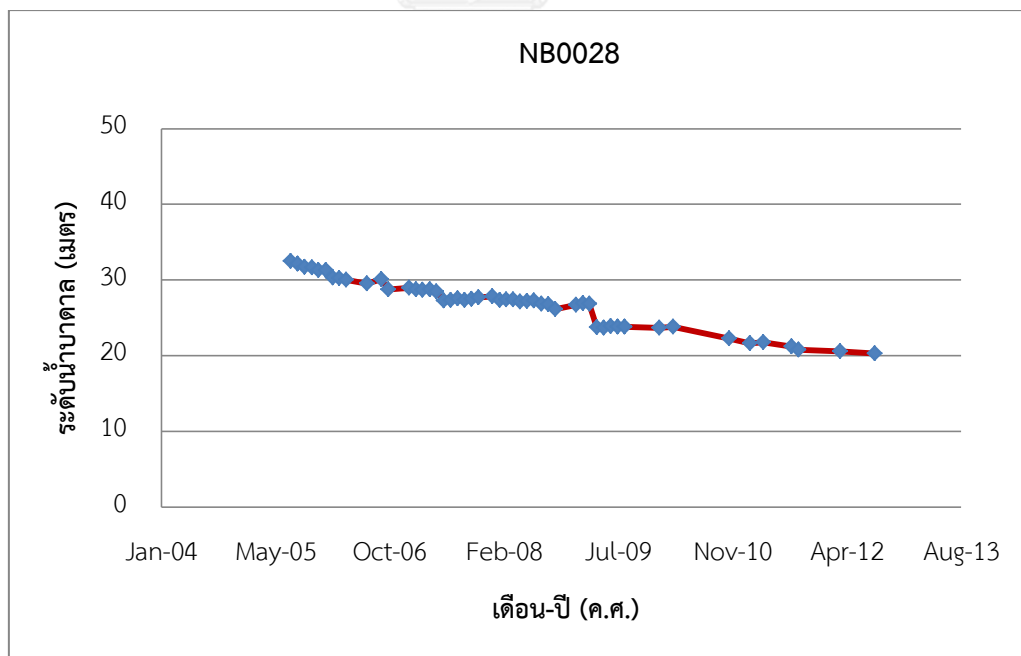
รูปที่ ค-3 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดศิริพงษ์ฯ แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร



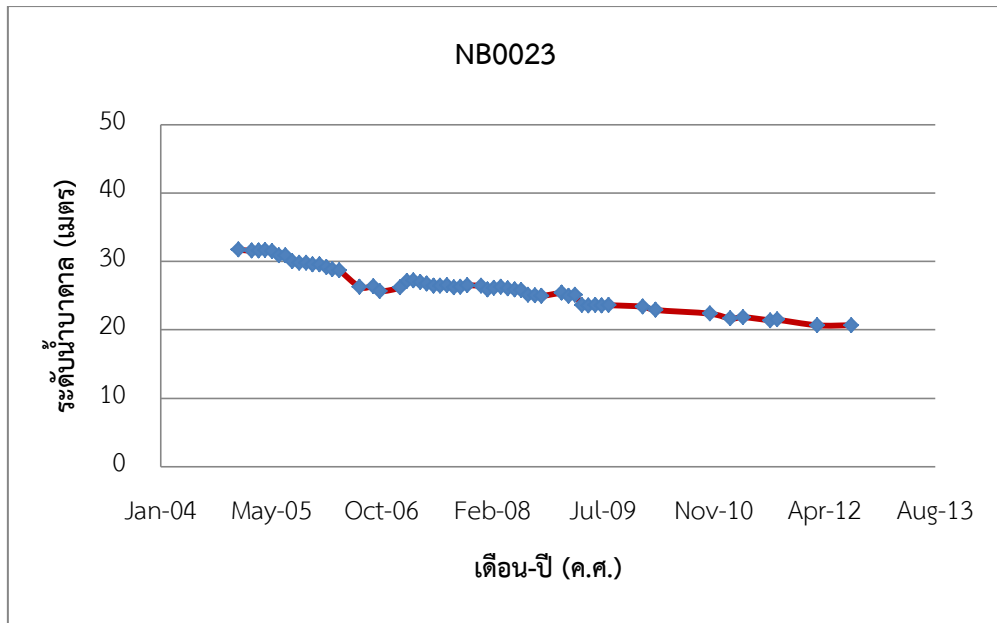
รูปที่ ค-4 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณสถานี ซ่อง 11 แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร



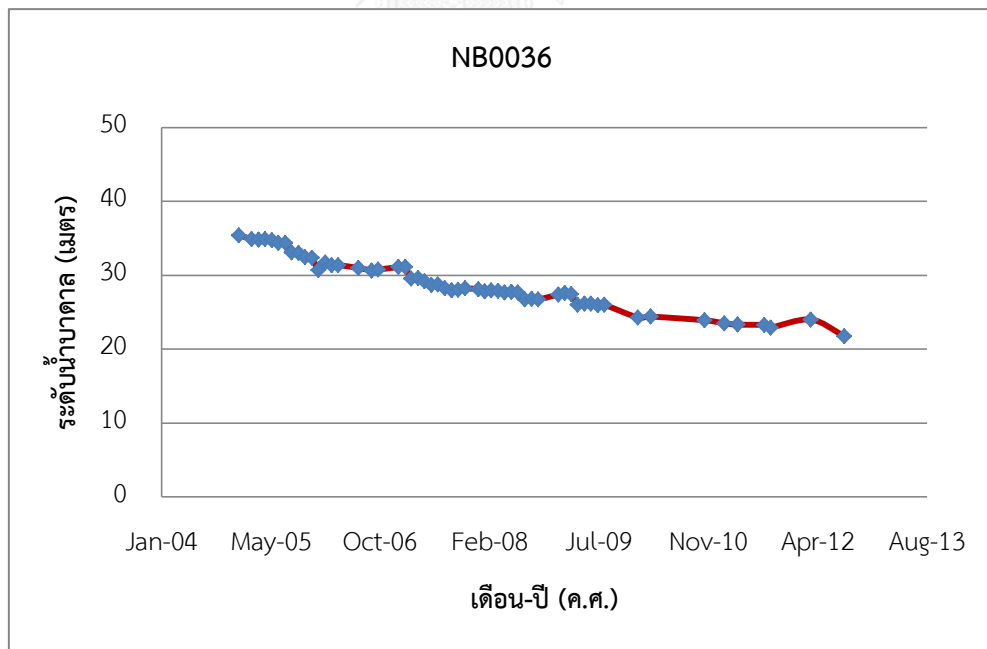
รูปที่ ค-5 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดบางบัว แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ



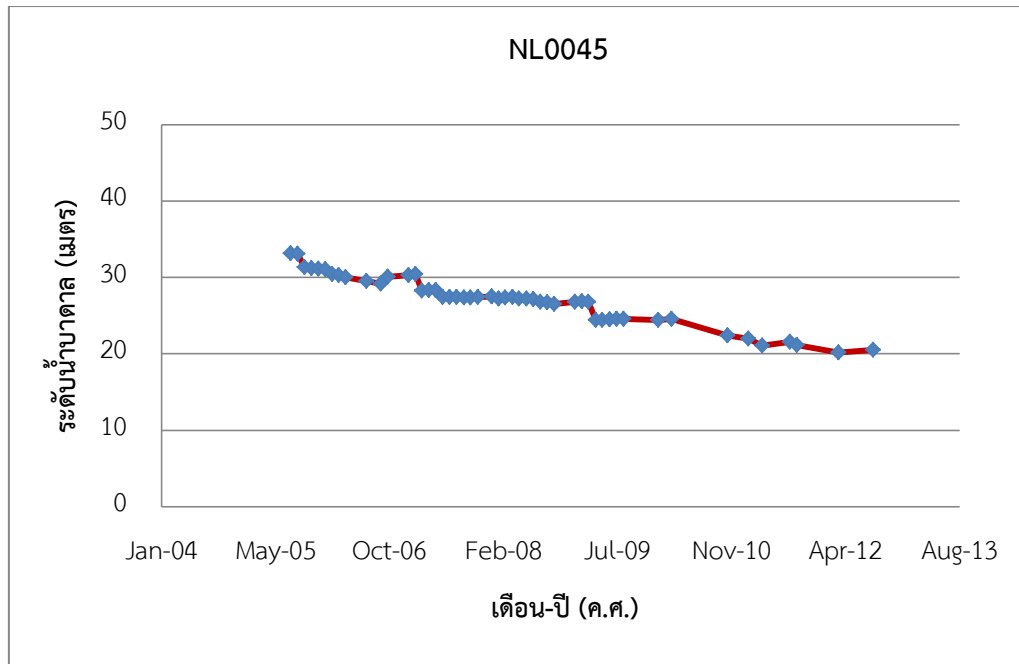
รูปที่ ค-6 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณการเคหะคลองจั่น แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร



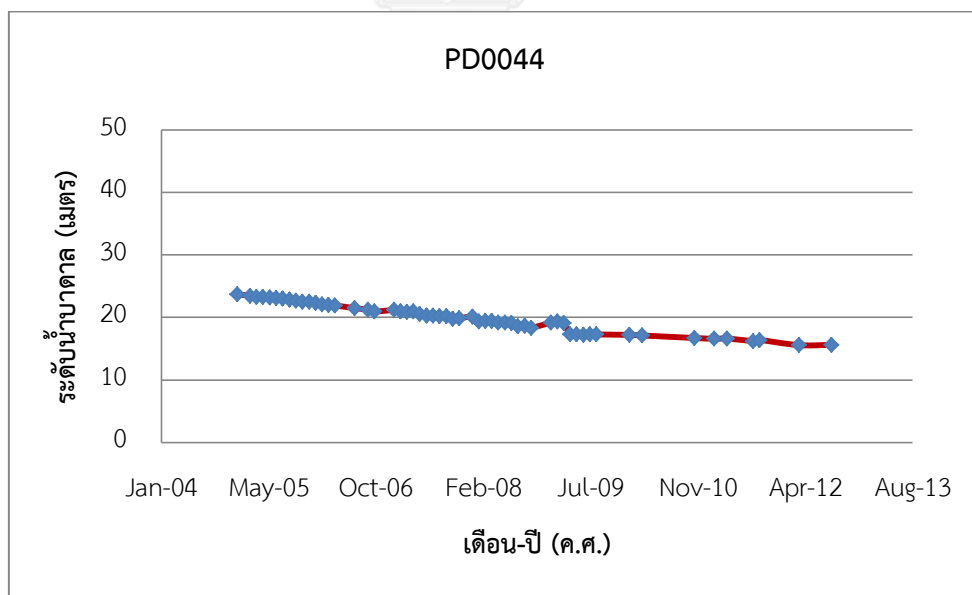
รูปที่ ค-7 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดสามัคคีธรรม แขวงวังทองหลาง เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร



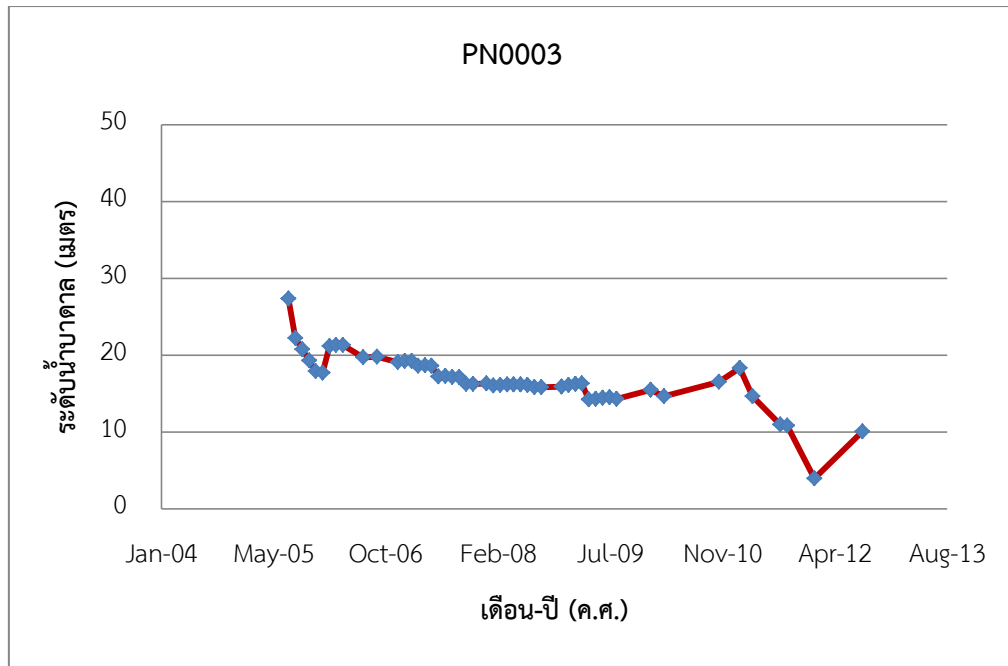
รูปที่ ค-8 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดศิริพงษ์ฯ แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร



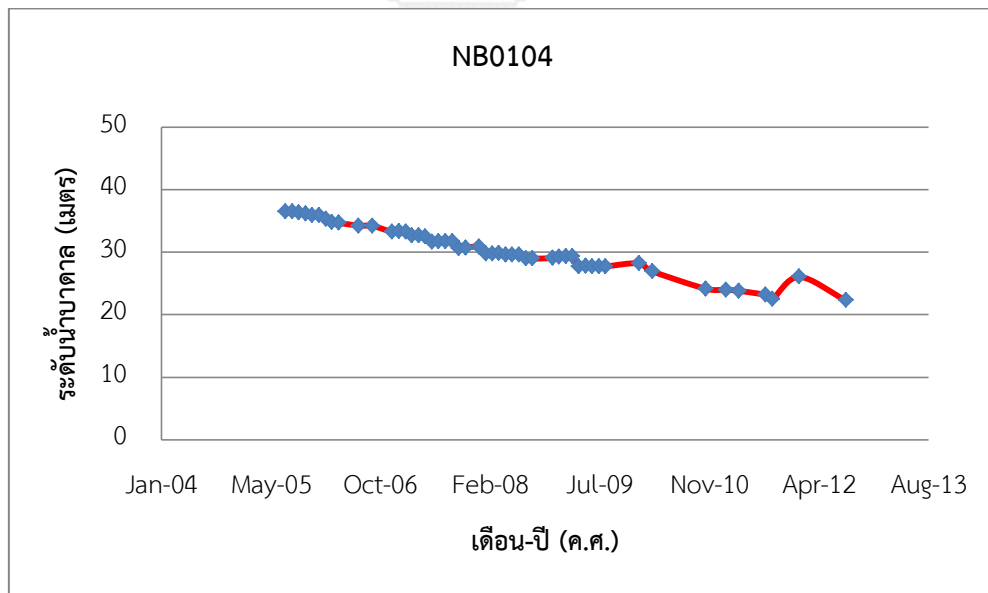
รูปที่ ค-9 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดเกาศิวรธรรมาราม แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพฯ



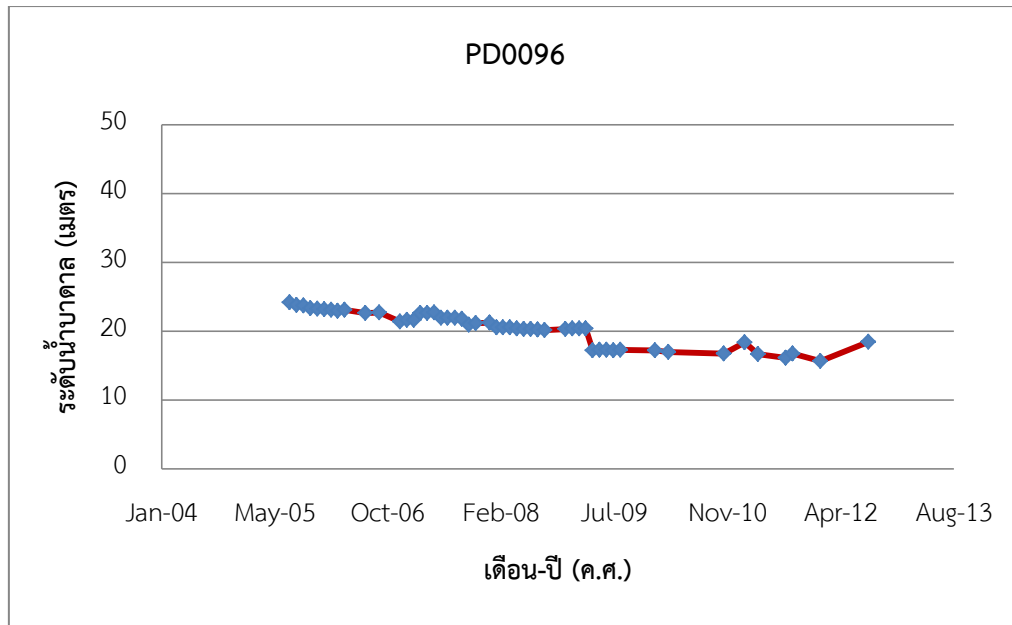
รูปที่ ค-10 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณสถานี ซ่อม 11 แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร



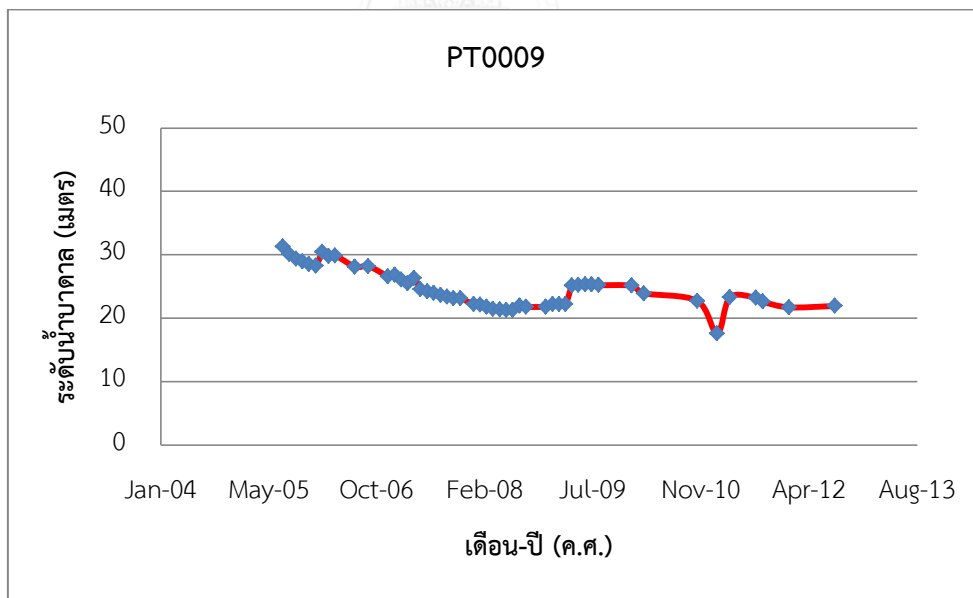
รูปที่ ค-11 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดน้อยสุวรรณาราม ตำบลแพรงษา อำเภอเมือง สมุทรปราการ



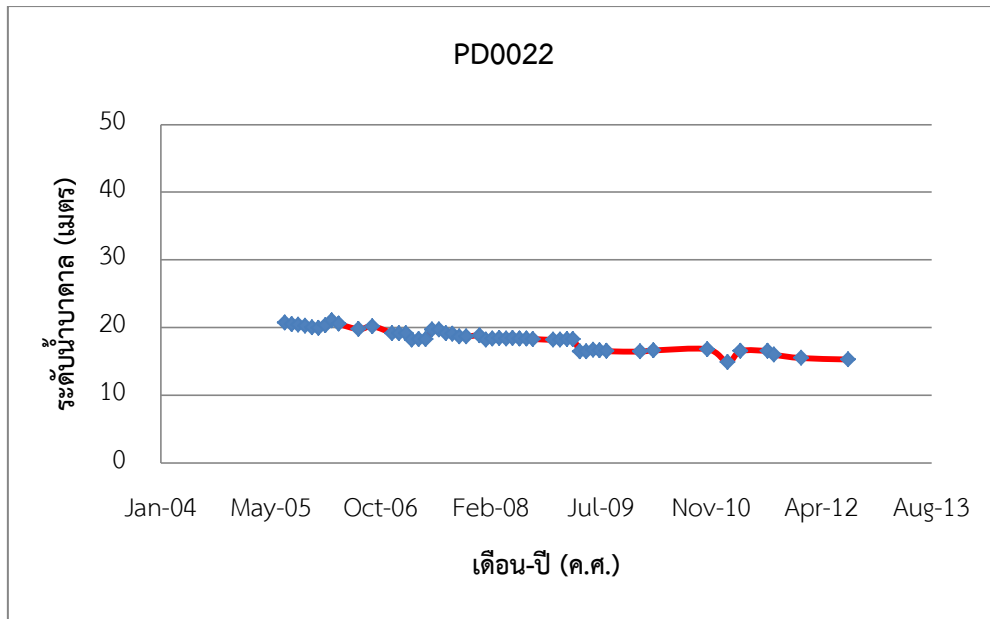
รูปที่ ค-12 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดคลองขวดลากข้าว ตำบลบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี สมุทรปราการ



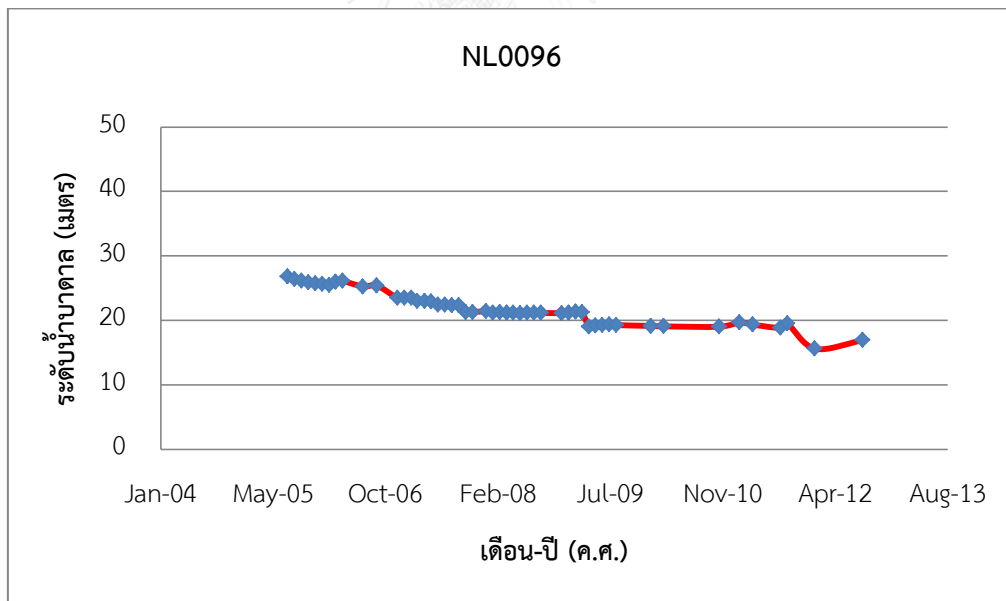
รูปที่ ค-13 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดราษฎร์บำรุง ตำบลบางปู อำเภอเมือง สมุทรปราการ



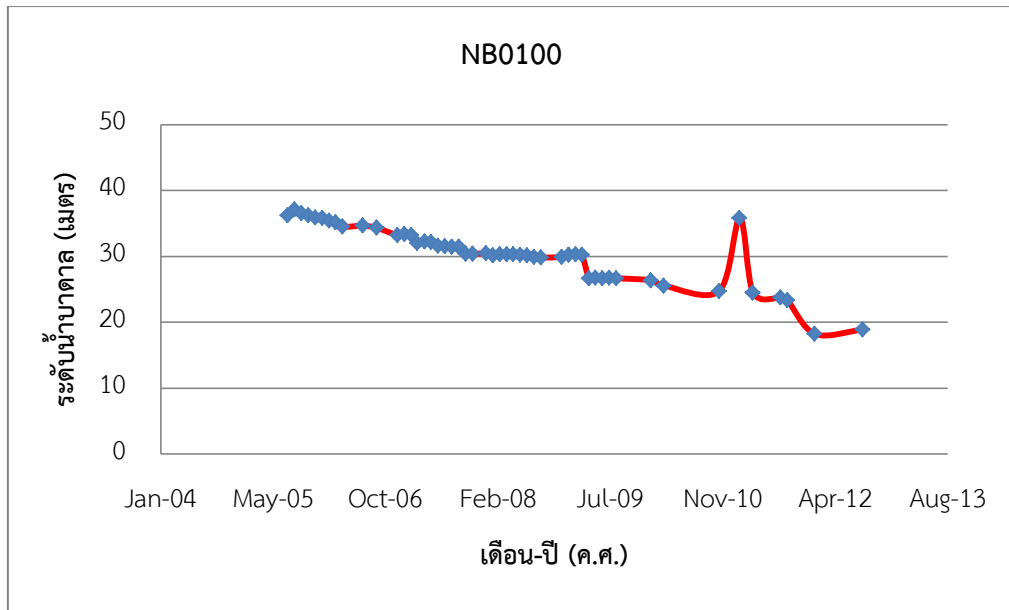
รูปที่ ค-14 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดตำหรุ ตำบลบางปูใหม่ อำเภอเมือง สมุทรปราการ



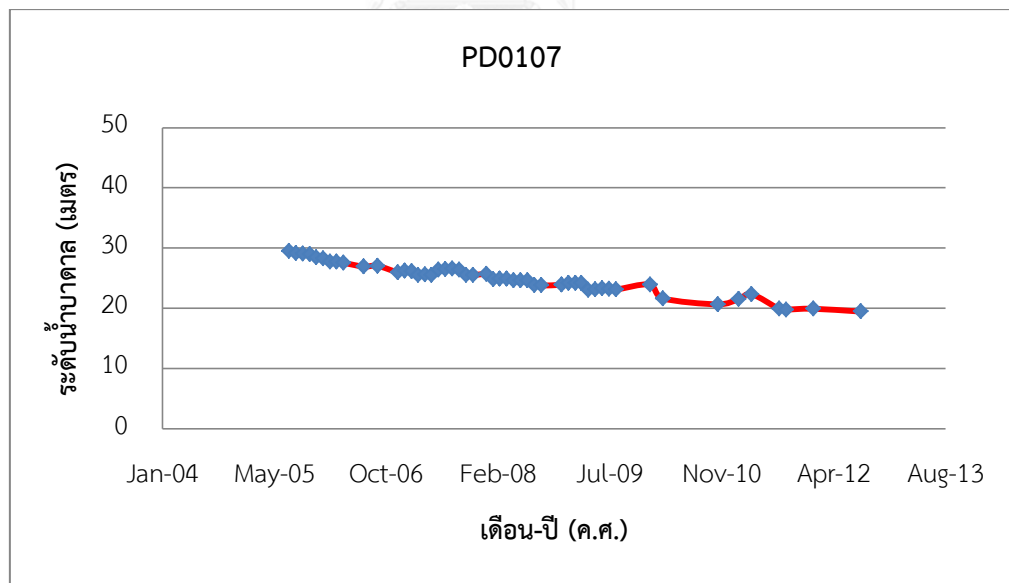
รูปที่ ค-15 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณศาลากลางจังหวัดสมุทรปราการ ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง สมุทรปราการ



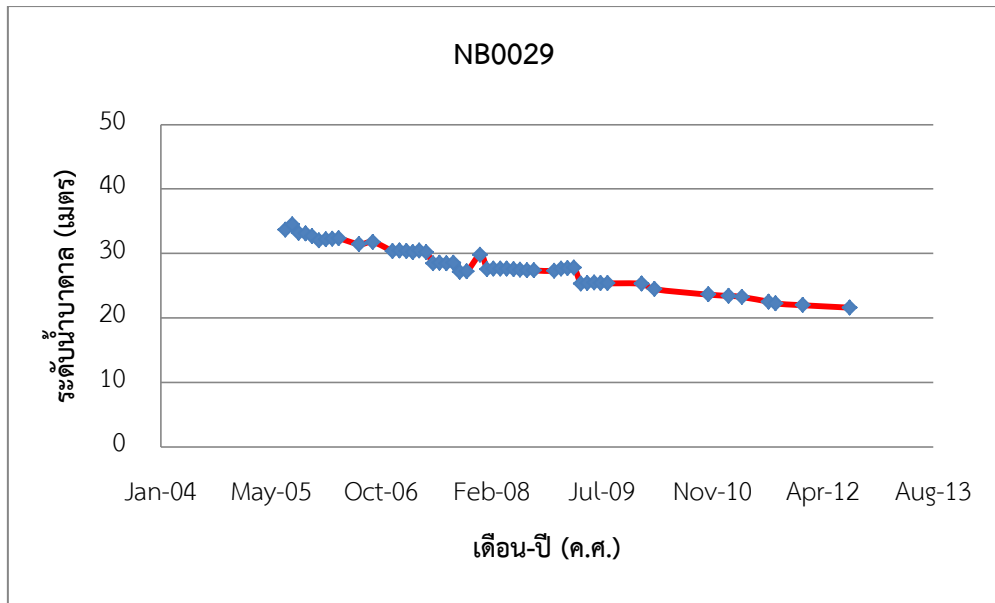
รูปที่ ค-16 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดราษฎร์บำรุง ตำบลบางปู อำเภอเมือง สมุทรปราการ



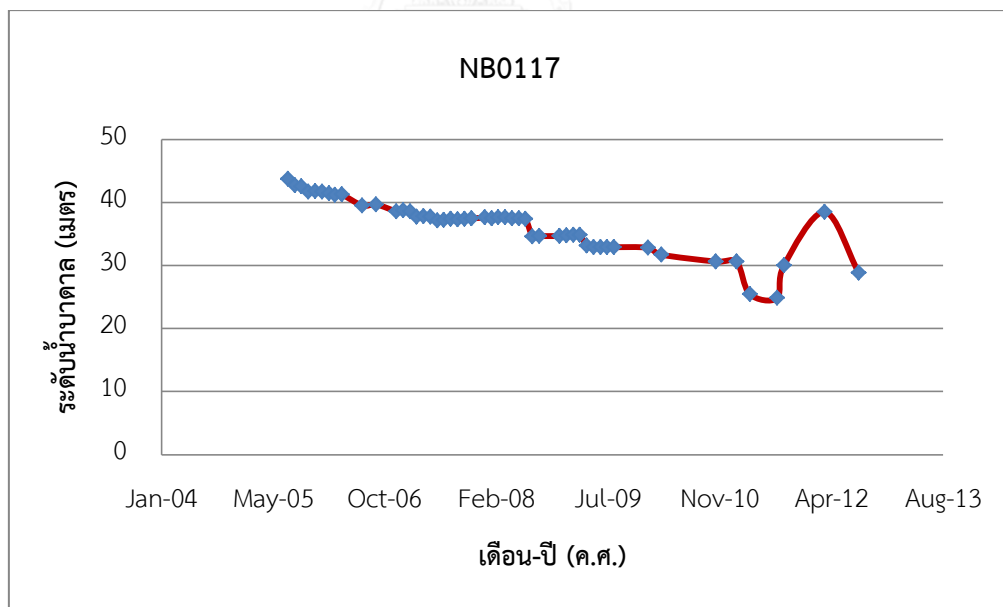
รูปที่ ค-17 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณโรงเรียนพุลเจริญวิทยาคม ตำบลบางโหนด อำเภอบางพลี สมุทรปราการ



รูปที่ ค-18 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดคลองขวดลากข้าว ตำบลบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี สมุทรปราการ



รูปที่ ค-19 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดบางพลีใหญ่กลาง ตำบลบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี สมุทรปราการ



รูปที่ ค-20 กราฟการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ปี 2005 – 2012
บริเวณวัดแจ้งลำหิน ตำบลบึงคำพร้อย อำเภอลำลูกกา ปทุมธานี

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสรศักดิ์ ชัยทวี เกิดวันที่ 29 ตุลาคม ค.ศ. 1989 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลศรีวิชัย เมื่อปี ค.ศ. 2011 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมสำรวจ
ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี ค.ศ. 2012

ผลงานตีพิมพ์วารสารวิชาการ

สรศักดิ์ ชัยทวี, อธิติ ตรีสิริสัตยวงศ์ และอนุเม่า อบแพทย์. (2014). การติดตามการทรุด
ตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series
InSAR. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

