

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล



โดยเทคนิค Time-Series InSAR

InSAR Time Series Analysis for Land Subsidence

Monitoring in Eastern Greater Bangkok

สรศักดิ์ ชัยทวี¹ อธิธิ ตรีวิริยัตยวงศ์² และ อนุเผ่า ออบแพทย์³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

³ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ 10210

บทคัดย่อ

ปัญหาการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน งานวิจัยนี้นำเทคนิค InSAR ซึ่งใช้ข้อมูลเฟสของภาพจากดาวเทียมเรดาร์ TerraSAR-X ย่าน X-band ความยาวคลื่น 3.1 ซม. จำนวน 26 ภาพในช่วงเดือน กันยายน ปี 2009 ถึงเดือนสิงหาคม ปี 2012 ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาและสมุทรปราการมาวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัวของพื้นดินที่เทคนิค InSAR ให้จุดตรวจสอบมากถึง 4 ล้านจุดในพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 1600 ตร.กม. มากกว่าจำนวนจุดตรวจสอบในโครงข่ายระดับซึ่งมีเพียงประมาณ 2000 จุดจึงมีความหนาแน่นมากพอที่จะใช้แก้ปัญหาจำนวนจุดตรวจสอบน้อยเกินพอและความลำเอียงทางด้านตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดของการใช้เทคนิคงานระดับในการตรวจสอบการทรุดตัวซึ่งเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นที่มีการแปรเปลี่ยนทางด้านตำแหน่งอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์จาก InSAR แสดงให้เห็นว่าในพื้นที่อำเภอลำลูกกา ปทุมธานีและอำเภอเมืองสมุทรปราการมีการทรุดตัวในอัตราประมาณ 20-23 มม./ปี ในขณะที่พื้นที่บางส่วนของอำเภอเมืองปทุมธานีและเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ที่มีอัตราการทรุดตัวที่ประมาณ 15-18 มม./ปีโดยพื้นที่ส่วนใหญ่ในกรุงเทพมหานครมีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 5 มม./ปี เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เทคนิค InSAR เช่นกันในการหาอัตราการทรุดตัวในช่วงเดือนตุลาคม ปี 2005 ถึงเดือนมีนาคม ปี 2010 พบว่าพื้นที่อำเภอเมืองสมุทรปราการและอำเภอลำลูกกา ปทุมธานี มีการทรุดตัวช้าลงที่อัตรา 5-10 มม./ปี ในขณะที่พื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นในทรุดตัวช้าลงเช่นกันด้วยที่อัตรา 3-5 มม./ปี

คำสำคัญ: อินซาร์, การทรุดตัวของแผ่นดิน, กรุงเทพมหานครและปริมณฑล, เทอร์ราซาร์-เอ็กซ์

Abstract

Greater Bangkok has been experiencing land subsidence problem for a considerable period of time. This research employs InSAR technique using phase data from 26 X-band radar images of TerraSAR-X satellites acquired between September 2009 and August 2012. The images cover most of the East side of Chao Phraya river of Bangkok and Samutprakarn. The InSAR analysis yields more than 4 million radar persistent scatterers over the 1,600 square kilometer area which is much greater than the 2,000 monitoring benchmarks established in subsidence monitoring leveling network. The large numbers of scatterers overcome the problems of under sampling and location bias which are serious drawbacks of leveling technique in evaluating fast-varying and small-scale phenomenon such as land subsidence. The InSAR results reveal subsidence rates of 20-23 mm/yr. in Lam luk ka, Pathumthani and Muang, Samutprakarn, 15-18 mm/yr. in Muang, Pathumthani and Nong Chok, Bangkok and around 5 mm/yr or less in central Bangkok. Comparing with a previous research which also employed InSAR technique to determine subsidence velocity between October 2005 to March 2010 shows that the area in Muang, Samutprakarn and Lam luk ka, Pathumthani exhibit a slower rate of by 5-10 mm/yr. whereas subsidence in inner Bangkok also slow down by 3-5 mm/yr.

Keywords: InSAR, land subsidence, Greater Bangkok, TerraSAR-X

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: leesurvey01@hotmail.com

1. คำนำ

การทรุดตัวของแผ่นดินเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อและอาจนำไปสู่ปัญหาที่ร้ายแรงเช่นความเสี่ยงต่อการถูกน้ำท่วมในพื้นที่ชายฝั่ง การพังเสียหายของโครงสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานทั่วไป ทำลายระบบน้ำบาดาล ทำให้เกิดรอยแยกบนพื้นแผ่นดินและทำให้เกิดความเสียหายต่างๆ ตามมา การทรุดตัวของแผ่นดินที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลมากเกินไปมีผลกระทบในหลายเมืองใหญ่ในทวีปเอเชียเช่น โตเกียว โอซาก้า เชียงไฮ้ ไทเป กรุงเทพมหานคร จาการ์ตา กัลกัตตา มะนิลาและฮานอย ฯลฯ [1]. การทรุดตัวของแผ่นดินที่เกิดจากการทำเหมืองถ่านหินเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างพื้นฐาน [2]

การทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่อเนื่องและยาวนาน จากข้อมูลการติดตามระดับการทรุดตัวของแผ่นดินของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลและกรมแผนที่ทหารดำเนินการมาตั้งแต่ปี 1978 พบว่าข้อมูลการทรุดตัวสะสมของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลระหว่างปี 1978-2007 เกิดพื้นที่ที่มีการทรุดตัวสะสมขนาด 1080 มม. บริเวณมหาวิทยาลัยรามคำแหง เขตบางกะปิ เนื่องจากในพื้นที่นี้มีการสูบน้ำบาดาลในปริมาณมากเพราะเมืองได้มีการเติบโตและขยายตัวออกไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้มีการสร้างตึกสูงและระบบโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ เช่น ถนน สะพาน เป็นต้น ยังเป็นปัจจัยเสริมที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของแผ่นดินเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวอาคารและสิ่งปลูกสร้างที่กดทับลงบนชั้นดิน [3]

สถานการณ์การทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี 1978-1981 บริเวณด้านตะวันออกมีอัตราการทรุดตัว 100 มม./ปี ส่วนบริเวณตอนกลางมีอัตราการทรุดตัว 50-100 มม./ปี ภายหลังจากมีมาตรการควบคุมการใช้น้ำบาดาลในปี 1983 ระดับน้ำบาดาลเริ่มฟื้นตัวสูงขึ้น ในช่วงปี 1988-1989 ในบริเวณด้านตะวันออกมีอัตราการทรุดตัว 30-50 มม./ปี ส่วนบริเวณตอนกลางมีอัตราการทรุดตัว 20-30 มม./ปี นอกจากนี้ในช่วงระหว่างปี 1989-1990 การทรุดตัวในพื้นที่บริเวณด้านตะวันออกมีอัตราการทรุดตัวลดลง 20-30 มม./ปีและบริเวณตอนกลางมีอัตราการทรุดตัวลดลง 10-20 มม./ปี [4]

ในอดีตการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในกรุงเทพมหานครนั้นใช้งานระดับเป็นหลัก กรมแผนที่ทหารเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการทำระดับในทุก ๆ ปี โครงการระดับครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล มีจำนวนหมุดระดับประมาณ 2000 จุด แต่เนื่องจากงานระดับเป็นงานที่ต้องใช้กำลังคนเป็นจำนวนมากใช้เวลานาน เพื่อให้ได้หมุดระดับทั่วพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปัจจุบันได้มีการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้เทคนิค Time-Series InSAR เพื่อช่วยติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินอีกวิธีหนึ่งซึ่งเทคนิค Time-series InSAR นั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลเฟสของภาพดาวเทียมเรดาร์ มาวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง เทคนิคนี้สามารถให้จุดตรวจสอบมากกว่าจำนวนจุดตรวจสอบในโครงการระดับ จึงมีความหนาแน่นมากพอที่จะใช้แก้ปัญหาจำนวนจุดตรวจสอบน้อยเกินไปและความลำเอียงทางตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดของการใช้เทคนิค

งานระดับในการตรวจสอบการทรุดตัว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่นที่มีการแปรเปลี่ยนทางตำแหน่งอย่างรวดเร็ว

งานวิจัยครั้งนี้มีนำเสนอผลการศึกษาคาดการณ์การทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ในช่วงเดือนกันยายน ปี 2009 ถึงเดือนสิงหาคม ปี 2012 ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาและสมุทรปราการ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและอัตราการทรุดตัวของพื้นที่ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไรและการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีอัตราที่สูงขึ้นหรือลดลงจากอดีตที่ผ่านมา

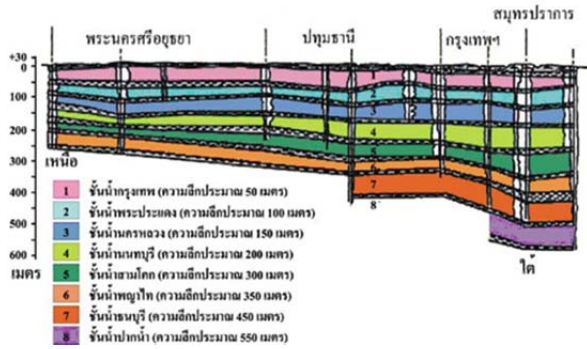
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

ธรณีสัณฐานของกลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างมีรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยม มียอดของสามเหลี่ยมอยู่ที่จังหวัดชัยนาทแล้วแผ่กว้างลงมาทางใต้ถึงปากอ่าวไทยบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยาในปัจจุบัน มีจังหวัดลพบุรี สระบุรี นครนายก ปราจีนบุรี และฉะเชิงเทรา เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันออกและจังหวัดอุทัยธานี กาญจนบุรี และราชบุรี เป็นขอบของสามเหลี่ยมด้านตะวันตก ส่วนที่เป็นฐานและใจกลางของดินดอนสามเหลี่ยม ได้แก่ พื้นที่ของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี นครนายก ต่อลงมาทางใต้จนถึงจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานครและสมุทรปราการ จากการศึกษา [5] พบหลักฐานการเกิดดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยาในอดีต โดยพบร่องรอยการเคลื่อนที่และการแกว่งตัวของแม่น้ำสายหลักและสาขาในอดีตเช่น แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำน้อย แม่น้ำสุพรรณ แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำนครนายกและแม่น้ำบางปะกง ซึ่งไหลลัดเลี้ยวไปมาแล้วบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีลักษณะเป็นร่องแหวนดินในบริเวณกรุงเทพมหานครประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน (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 [3]

ความหนาของชั้นกรวดทรายและดินเหนียวดังกล่าวหนามาก ผลจากการสำรวจปีโตรเลียมทำให้ทราบว่า บริเวณท้องที่อำเภอภาณุเจริญมีชั้น

กรวดทรายสลับชั้นดินเหนียวหนาลึกลงถึง 1830 เมตร สำหรับชั้นน้ำบาดาลตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 600 เมตร แบ่งได้เป็น 8 ชั้นที่ระดับลึกกว่า 600 เมตรลงไป ยังมีชั้นน้ำบาดาลอยู่อีกแต่ยังไม่มีการใช้รายงานการศึกษา [6] สรุปลักษณะชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล แบ่งเป็น 8 ชั้น โดยชั้นน้ำ (Aquifer) อยู่ในชั้นกรวด ทราย ซึ่งถูกคั่นด้วยชั้นดินเหนียวบาง ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นน้ำ (Aquitard) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างอุทก-ธรณีวิทยา [3]

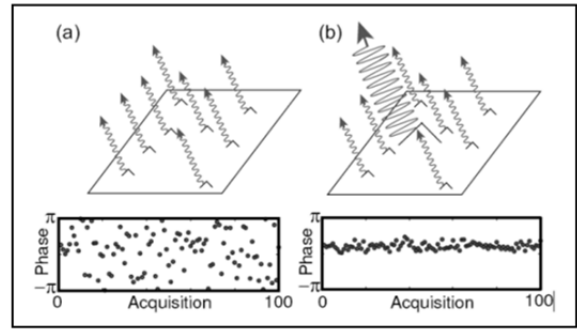
2.2 หลักการของ Time-Series InSAR

หลักการงานที่สำคัญของเทคนิค InSAR นี้คืออาศัยการวิเคราะห์ผลต่างเฟส (Phase Differences) ของภาพเรดาร์ระบบ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไปซึ่งภาพทั้งสองภาพนี้จะถูกบันทึกในตำแหน่งเดียวกันแต่คนละช่วงเวลา ผลต่างเฟสนี้สามารถนำมาศึกษาถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Deformation Pattern) ในลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นบนโลก สำหรับเทคนิค Time-series InSAR นั้นจะอาศัยค่าสะท้อนกลับของสัญญาณที่คงที่และถาวรหรือเรียกว่า Permanent Scatterer (PS) ของสัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเสาอากาศโดยใช้หลักการสร้างจำนวนภาพ Differential Interferograms หลายๆคู่ภาพ คู่ภาพที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะอาศัยการอ้างอิงจากภาพ Master ตัวเดียวกันหรือที่เรียกว่า Single Master แตกต่างจากแบบ Multiple Master ที่สามารถใช้ภาพใดก็ได้เป็นภาพ Master ในการจับคู่ภาพ วิธีหลังนี้จะใช้สำหรับเทคนิค Small Baseline ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีของเทคนิค Time-series InSAR สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการประมวลผลอนุกรมเวลาของภาพเรดาร์โดยวิธี Persistent Scatterers

2.3 Persistent scatterer InSAR

ค่าแอมพลิจูดและเฟสของแต่ละจุดภาพ (pixel) เป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของการกระเจิง (Backscattering) ที่เกิดจากวัตถุ (Scatterers) ต่างๆ ในแต่ละจุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2a เมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัตถุเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มจำนวนขึ้นหรือลดลง วัตถุมีขนาดใหญ่อขึ้นหรือเล็กลง (เช่น ในกรณีของพืช) หรือมีการเปลี่ยนตำแหน่ง ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากสาเหตุใดก็ตามล้วนแล้วแต่ทำให้แอมพลิจูดและเฟสรวมของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม หากภายในจุดภาพนั้นมีวัตถุจำนวนหนึ่งที่ทำให้เกิดการกระเจิงที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุอื่น ๆ เป็นอย่างมาก และตลอดช่วงเวลาที่มีการบันทึกภาพ วัตถุเหล่านี้ไม่มีการ

เปลี่ยนแปลง (วัตถุเหล่านี้เรียกว่า Persistent หรือ Permanent scatterers, PS) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัตถุอื่น ๆ ภายในจุดภาพเดียวกันนี้ก่อให้เกิดการกระเจิงที่มีขนาดเล็กกว่าจะไม่ทำให้ผลรวมของแอมพลิจูดและเฟสของการกระเจิงของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป ดังรูป 2b ในบริเวณพื้นที่เมือง PS ส่วนใหญ่คือสิ่งปลูกสร้าง อาคารบ้านเรือน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นในจุดภาพเหล่านี้ จึงอนุมานได้ว่าเกิดจากการเคลื่อนตัว (จากสาเหตุใดก็ได้แล้วแต่ เช่น แผ่นดินทรุด) ของ PS ทั้งหมดนี้คือหลักการพื้นฐานของเทคนิค PS InSAR



รูปที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟสตามเวลา ภาพ (a) การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเฟสภายในจุดภาพทั่วไป ภาพ (b) แสดงเฟสก่อนข้างคงที่ในจุดภาพที่มี Persistent Scatterers [7]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัย [3] ได้ศึกษาคิดตามการทรุดตัวของแผ่นดินพบว่าข้อมูลแผ่นดินทรุดจากข้อมูลสถานีสังเกตการณ์พบว่า การทรุดตัวของผิวดินส่วนใหญ่ในปัจจุบัน (2009) มีค่าประมาณ 20 มม./ปีโดยพื้นที่ที่ยังคงมีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 20 มม./ปีอยู่บริเวณสถานีตรวจวัดที่ 22 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด)) สถานีตรวจวัดที่ 32 (อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร) สถานีตรวจวัดที่ 35 (ศาลากลางจังหวัดปทุมธานี) นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นดินมีการคืนตัวหรือมีระดับที่สูงขึ้นเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม./ปี) ในบางพื้นที่เช่น สถานีตรวจวัดที่ 1 (อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 16 (เขตบางเขน กรุงเทพฯ) สถานีตรวจวัดที่ 17 (อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 18 (เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ) สถานีตรวจวัดที่ 33 (อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 34 (อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี) สถานีตรวจวัดที่ 41 (อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี) เนื่องจากระดับแรงดันน้ำมีระดับที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาการยุบอัดตัวในระดับความลึกต่างๆ พบว่า เริ่มมีการคืนตัวในชั้นดินระดับลึกตั้งแต่ 20 เมตรลงไปด้วยอัตราการคืนตัวปานกลาง (10-20 มม./ปี)

จากการศึกษา [9] พบว่าผลลัพธ์จาก InSAR แสดงให้เห็นว่าอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการและอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี มีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในอัตรา 20-30 มม./ปี ส่วนใจกลางกรุงเทพฯ ด้านตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยามีลักษณะการทรุดก่อนข้างช้ากว่าในอัตราประมาณ 10 มม./ปี ในขณะที่บริเวณชานเมืองทางทิศเหนือและทิศตะวันตกพบอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ 10-20 มม./ปี นอกจากนี้ InSARยังแสดง

ให้เห็นการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในเขตสะพานสูงและลาดกระบัง กรุงเทพฯ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูลจากงานระดับ

ในงานวิจัย [10] พบว่าการสูบน้ำบาดาลเป็นจำนวนมากในเม็กซิโก เป็นสาเหตุการเกิดแผ่นดินทรุด แต่ส่วนใหญ่การติดตามแผ่นดินทรุดจะมุ่งเน้นไปที่เมืองใดเมืองหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นเม็กซิโก ซิตี้และทำให้ไม่ทราบขอบเขตของปัญหาในระดับภูมิภาค งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) time-series analysis จากข้อมูลดาวเทียม ALOS ในช่วงปี 2007-2011 เพื่อที่จะแก้ปัญหาแผ่นดินทรุดในภูมิภาคเม็กซิโกกลางทั้งหมดเป็นการติดตามแผ่นดินทรุดใน 21 พื้นที่รวมทั้ง 17 เมืองพบว่าอัตราการทรุดตัวในเม็กซิโก ซิตี้สูงกว่า 300 มม./ปี ในขณะที่มีการตรวจพบในสถานที่อื่น ๆ อัตราการทรุดตัว 50-100 มม./ปี

3. วิธีการศึกษา

3.1 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน ในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงเดือนกันยายน 2009 ถึงเดือนสิงหาคม 2012 โดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ด้วยวิธี Persistent scatterer จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาตรวจสอบกับหตุระดับที่ใช้ติดตามการทรุดตัวจากกรมแผนที่ทหารและนำผลลัพธ์ที่ได้จาก เทคนิค Time-series InSAR ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล [11] เพื่อวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีอัตราที่ช้าลงหรือเร็วขึ้น

3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา 1600 ตร.กม. พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา ครอบคลุมกรุงเทพมหานครเป็นหลักและมีพื้นที่บางส่วนของจังหวัดสมุทรปราการ นนทบุรีและปทุมธานีดังแสดงในรูปที่ 5 พื้นที่ศึกษามีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นบริเวณเดียวกับงานวิจัยการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้เทคนิค Time-Series InSAR ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ใช้เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2005-2010 ในงานวิจัย [11] มีพื้นที่ศึกษา 2500 ตร.กม.

3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษางานวิจัย

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินโดยใช้เทคนิค Time-series InSAR ต้องมีการบันทึกภาพจากดาวเทียมเรดาร์แบบต่อเนื่องในช่วงเวลาที่มีการศึกษา มีดาวเทียมเรดาร์มากมายที่สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน งานวิจัยนี้ใช้ภาพเรดาร์จากดาวเทียม TerraSAR-X เนื่องจากเป็นดาวเทียมที่ใช้งานต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน มีการบันทึกข้อมูลตลอดทั้งช่วงเวลาที่ต้องการศึกษาและมีข้อมูลเพียงพอที่จะประมวลผล Time-series InSAR ข้อมูลดาวเทียม TerraSAR-X บันทึกภาพในโหมด StripMap ความละเอียดในแนว range 1 เมตรและในแนว azimuth 2 เมตร จำนวน 26 ภาพ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

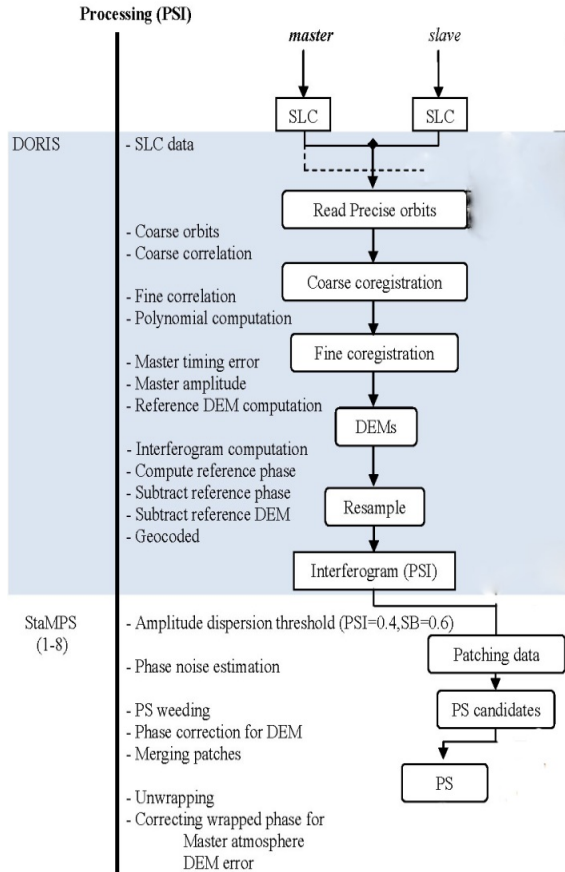
ตารางที่ 1 แสดงเวลาการบันทึกข้อมูลดาวเทียม ช่วงระยะเวลาการรับสัญญาณ จาก Master date (Temporal baselines) และระยะทางระหว่างตำแหน่งในการรับสัญญาณที่ตั้งฉากกับมุมมองของดาวเทียมที่เป็นภาพ Master (Perpendicular baselines) สำหรับการเลือกภาพ Master อาศัยหลักการตามที่ระบุไว้ใน [7]

| DATE | Temporal baselines T (days) | Perpendicular baselines (m.) |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 5 September 2009 | -154 | 98 |
| 16 September 2009 | -143 | -155 |
| 8 October 2009 | -121 | 129 |
| 19 October 2009 | -110 | 12 |
| 30 October 2009 | -99 | 150 |
| 10 November 2009 | -88 | -69 |
| 2 December 2009 | -66 | 128 |
| 24 December 2009 | -44 | 131 |
| 15 January 2010 | -22 | 26 |
| 6 February 2010 | 0 | 0 |
| 17 February 2010 | 11 | -61 |
| 28 February 2010 | 22 | 134 |
| 11 March 2010 | 33 | -16 |
| 22 March 2010 | 44 | -128 |
| 2 April 2010 | 55 | -50 |
| 13 April 2010 | 66 | 96 |
| 24 April 2010 | 77 | 165 |
| 16 May 2010 | 99 | 96 |
| 27 May 2010 | 110 | 53 |
| 18 June 2010 | 132 | 48 |
| 29 June 2010 | 143 | 47 |
| 19 April 2012 | 803 | -399 |
| 2 June 2012 | 847 | -257 |
| 5 July 2012 | 880 | 19 |
| 27 July 2012 | 902 | -391 |

3.4 ขั้นตอนการประมวลผล

การประมวลผลข้อมูลใช้ซอฟต์แวร์ DORIS v 4.06 ในการประมวลผลข้อมูลในขั้นต้นคือ การจับคู่ภาพระหว่างภาพ Master กับภาพ Slave เพื่อวิเคราะห์ผลต่างเฟสเพื่อนำมาสร้าง Interferogram (ในที่นี้จะได้ Interferogram ทั้งสิ้น 25 ภาพ) เริ่มต้นโดยนำแต่ละภาพมาทำการแปลงให้อยู่ใน DORIS Format และทำการ Coregistration ในแต่ละจุดภาพเพื่อให้มีความถูกต้องทางตำแหน่ง ใช้แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ SRTM DEM ซึ่งมีความละเอียด 90 เมตรในการลบค่า Φ_{topo} ออกไป จากนั้นสร้าง differential Interferogram ขึ้นเพื่อจะนำไปสู่การประมวลผลในขั้นตอนต่อไปสามารถดูรายละเอียดขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3

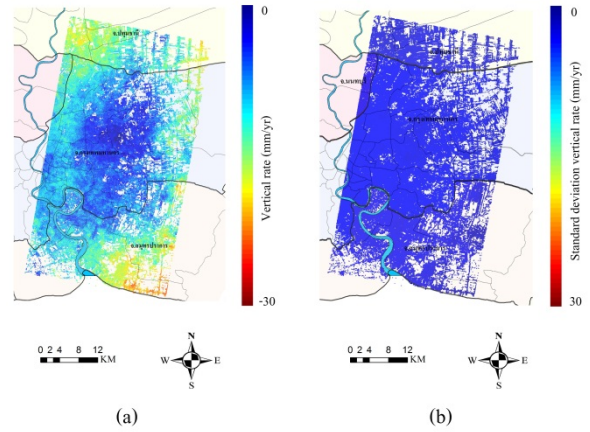
จากการประมวลผลในซอฟต์แวร์ DORIS เสร็จ เป็นการประมวลผลในลำดับต่อไปโดยใช้ซอฟต์แวร์ StaMPS v 3.3 หลักการคือใช้ Differential Interferograms ของหลาย ๆ คู่ภาพจากโปรแกรม DORIS มาวิเคราะห์เพื่อหาจุดภาพที่เป็น PS แล้วเอาข้อมูลเฟสของ PS เหล่านี้มาหาอัตราการทรุดตัวต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประมวลผล [12]

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพฯฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา เทคนิค InSAR ให้จุดตรวจสอบการทรุดตัวมากถึง 4 ล้านจุดในพื้นที่ 1600 ตร.กม. เฉลี่ยประมาณ 2500 จุด/ตร.กม. ซึ่งมีจำนวนมากพอเพื่อแก้ปัญหาจุดตรวจสอบการทรุดตัวน้อยเกินไป จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของจุดตรวจสอบการทรุดตัวมากกว่าจุดตรวจสอบที่ได้จากวิธีการทำระดับของกรมแผนที่ทหาร ที่มีจุดตรวจสอบในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลประมาณ 2000 จุด ผลที่ได้จากเทคนิค InSAR แสดงให้เห็นการทรุดตัวของแผ่นดินว่ามีพื้นที่หลายๆแห่งมีการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูง มีอัตราสูงสุดอยู่ที่ 22.8 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 4(a) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัวในพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0-1 มม./ปี และมีพื้นที่บางส่วนที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัวสูงถึง 3 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 4(b)



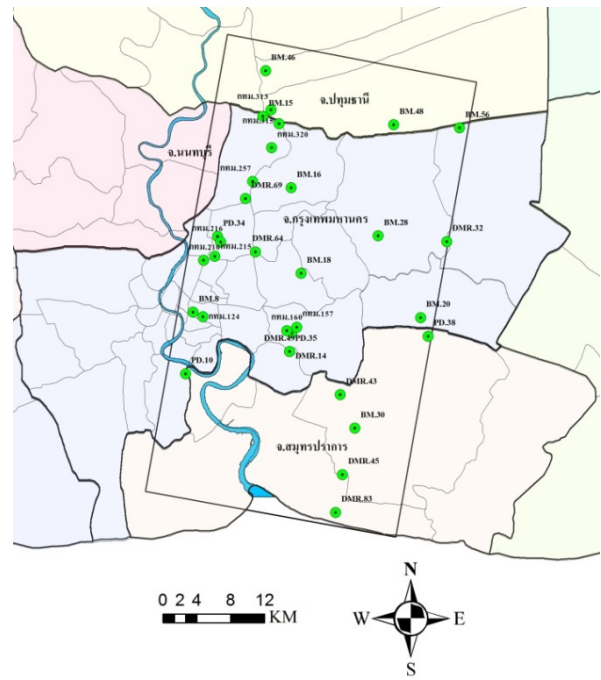
รูปที่ 4 (a) อัตราการทรุดตัว มม./ปี (b) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัว มม./ปี

ผลลัพธ์จาก InSAR แสดงให้เห็นว่าในพื้นที่อำเภอสาธุการ ปทุมธานี และอำเภอเมืองสมุทรปราการมีการทรุดตัวในอัตราประมาณ 20-23 มม./ปี ในขณะที่พื้นที่บางส่วนของอำเภอเมืองปทุมธานีและเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ที่มีอัตราการทรุดตัวที่ประมาณ 15-18 มม./ปี โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ในกรุงเทพมหานครมีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 5 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 4(a) จากผลที่ได้จาก InSAR พื้นที่ที่มีปัญหาการทรุดตัวในอัตราที่สูงจะอยู่ในบริเวณปริมณฑลรอบนอกของกรุงเทพมหานคร ซึ่งบริเวณดังกล่าวส่วนใหญ่จะเป็นอาคารบ้านชั้นเดียวหรือสองชั้นและเป็นโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนบางพื้นที่ที่ไม่มีจุดตรวจสอบการทรุดตัวจากเทคนิคนี้ เนื่องจากพื้นที่เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ตามวงรอบการเพาะปลูก หรือการเจริญเติบโตของพืช จึงไม่มีจุดตรวจสอบการทรุดตัว

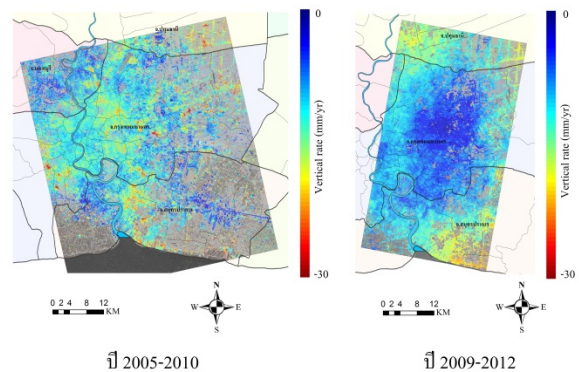
ผลจากการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวในงานศึกษานี้กับข้อมูลงานระดับจากกรมแผนที่ทหารที่สุ่มเลือกมา 28 จุดทั่วพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 5 ปรากฏว่าผลการเปรียบเทียบนั้นอัตราการทรุดตัวที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 2 แต่เนื่องจากอัตราการทรุดตัวจาก InSAR ที่นำมาเปรียบเทียบนั้น ได้จากการเฉลี่ยอัตราการทรุดตัวของจุดในบริเวณ โดยรอบที่ใกล้กับจุดของงานระดับในรัศมี 100 เมตร ทำให้อัตราการทรุดตัวย่อมมีความแตกต่างกันเล็กน้อย มีบางจุดเช่นจุดที่ 15 อัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR มีอัตราที่เร็วกว่าอัตราการทรุดตัวจากงานระดับที่ 4.4 มม./ปี สาเหตุอาจจะเกิดจากคลื่นสะท้อนแบบ double-bounce จากอาคารสิ่งปลูกสร้างไปยังพื้นดินหรือจากพื้นดินไปยังสิ่งปลูกสร้างทำให้อัตราการทรุดตัวที่ได้จาก InSAR มีอัตราที่เร็วกว่ามากและจุดที่ 22 อัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับมีอัตราที่สูงกว่าอัตราการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิค InSAR ที่ 4 มม./ปี สาเหตุนี้จะมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตถึงประเด็นที่ว่าทำไมอัตราการทรุดตัวของงานระดับเร็วกว่ามาก ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานวิจัยนี้กับอัตราการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับจากกรมแผนที่ทหาร

| ที่ | ชื่อหมาะระดับ ที่นำมา เปรียบเทียบ | อัตราการทรุด ตัวของงาน ระดับ (มม./ปี) | อัตราการทรุด ตัวของ InSAR (มม./ปี) | Δ (มม./ปี) |
|-----|---|---|--|----------------------|
| 1 | BM.15 | -14.5 | -14.8 | 0.3 |
| 2 | BM.46 | -15.6 | -15.8 | 0.2 |
| 3 | BM.56 | -19.0 | -19.1 | 0.1 |
| 4 | BM.28 | -11.4 | -10.2 | -1.2 |
| 5 | BM.48 | -16.1 | -15.4 | -0.7 |
| 6 | BM.16 | -11.9 | -9.7 | -2.2 |
| 7 | BM.8 | -12.8 | -10.3 | -2.5 |
| 8 | BM.18 | -10.6 | -8.9 | -1.7 |
| 9 | BM.20 | -8.2 | -12.0 | 3.8 |
| 10 | BM.30 | -10.6 | -11.9 | 1.3 |
| 11 | DMR.83 | -22.7 | -22.7 | 0 |
| 12 | PD.34 | -11.4 | -12.1 | 0.7 |
| 13 | PD.10 | -2.0 | -1.5 | -0.5 |
| 14 | PD.36 | -8.3 | -5.2 | -3.1 |
| 15 | PD.38 | -10.8 | -15.2 | 4.4 |
| 16 | กทม.366 | -9.6 | -12.6 | 3.0 |
| 17 | กทม.210 | -12.1 | -11.2 | -0.9 |
| 18 | กทม.215 | -12.0 | -10.2 | -1.8 |
| 19 | กทม.216 | -11.2 | -10.4 | -0.8 |
| 20 | กทม.115 | -10.3 | -10.3 | 0 |
| 21 | กทม.124 | -9.7 | -9.6 | -0.1 |
| 22 | กทม.160 | -11.3 | -7.3 | -4.0 |
| 23 | กทม.257 | -13.1 | -10.1 | -3.0 |
| 24 | กทม.157 | -10.6 | -8.4 | -2.2 |
| 25 | กทม.450 | -7.4 | -8.6 | 1.2 |
| 26 | กทม.313 | -14.0 | -14.0 | 0 |
| 27 | กทม.315 | -13.0 | -12.2 | -0.8 |
| 28 | กทม.415 | -9.3 | -8.0 | -1.3 |

ผลการศึกษาเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินกรุงเทพฯและปริมณฑลโดยใช้เทคนิค Time-Series InSAR ในช่วงเดือนตุลาคม ปี 2005 ถึงเดือนมีนาคม ปี 2010 [11] พบว่าพื้นที่อำเภอเมืองสมุทรปราการและอำเภอลำลูกกา ปทุมธานี มีการทรุดตัวช้าลงที่อัตรา 5-10 มม./ปี ในขณะที่พื้นที่ที่กรุงเทพมหานครชั้นในทรุดตัวช้าลงเช่นกันด้วยที่อัตรา 3-5 มม./ปี ดังแสดงในรูปที่ 6 จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาจะเห็นว่าทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพฯและปริมณฑลมีอัตราที่ลดลง โดยเฉพาะพื้นที่กรุงเทพฯชั้นในภาพรวมของอัตราการทรุดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5 หมาะระดับที่ใช้เปรียบเทียบกับงานศึกษานี้



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2009-2012 ที่ได้จากการศึกษานี้ (ขวา) กับอัตราการทรุดตัวในช่วงปี 2005-2010 (ซ้าย) จาก [11]

5. สรุปผลการศึกษา

การใช้เทคนิค Time-Series InSAR เพื่อการติดตามการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้ภาพเรดาร์จากดาวเทียม TerraSAR-X จำนวน 26 ภาพในช่วงปี 2009-2012 พบว่าการทรุดตัวของแผ่นดินมีอัตราที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงปี 2005-2010 ตามที่ได้เคยมีการศึกษาไว้ในงานของ [11] ในเขตปริมณฑลแม้ว่าการทรุดตัวมีอัตราที่ลดลง แต่อัตราการทรุดตัวที่วัดได้ยังมีค่าที่สูงอยู่เช่นพื้นที่บริเวณอำเภอเมืองสมุทรปราการและอำเภอลำลูกกา ปทุมธานี ในช่วงปี 2005-2010 จากงานวิจัย [11] มีอัตราการทรุดตัว 25-30 มม./ปี ในงานวิจัยนี้สามารถวัดได้ 20-23 มม./ปี แม้ว่าอัตราที่ลดลงแต่อัตราที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ก็ยังมียอดค่าที่สูงอยู่ ส่วนในพื้นที่กรุงเทพฯชั้นในโดยรวมอัตราการทรุดตัวลดลงเหลือค่า

กว่า 5 มม./ปี แต่ก็ยังไม่เป็นที่ยืนยันว่าอัตราการทรุดตัวหลังจากนี้จะมีอัตราลดลงไปเรื่อย ๆ อาจจะมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้มีอัตราการทรุดตัวสูงขึ้นได้อีก คงต้องมีการศึกษาติดตามการทรุดตัวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่แผ่นดินไม่สามารถทรุดตัวต่อไปได้ ในเวลานั้นกรุงเทพมหานครอาจจะมีระดับต่ำกว่าระดับทะเลปานกลางทั่วทุกบริเวณ

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลครั้งนี้ ขอขอบคุณ TU Delft : Delft University of Technology สำหรับซอฟต์แวร์ DORIS, Andy Hooper สำหรับซอฟต์แวร์ StaMPS และขอบคุณโครงการ GEO2TECDI-SONG ที่อนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม TerraSAR-X

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Phien-wej, P.H. Giao and P. Nutalaya. Land subsidence in Bangkok, *Thailand Engineering Geology* Vol. 82 pp. 187-201, 2006.
- [2] W. Zhiyong, L. Guolin, C. Tian'en, Z. Jixian and H. Guoman. Detecting and Assessing the Land Subsidence in Coal Mining Area Using PALSAR Data Based on D-InSAR Technique, *Computer Engineering and Technology (IC CET), 2010 2nd International Conference on (Volume:3)*, 2010.
- [3] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. ศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. *รายงานสำหรับผู้บริหาร กรุงเทพมหานคร*, 2009.
- [4] V. Ramnarong and S. Buapeng. Groundwater resources of Bangkok and its vicinity impact and management: in Piancharoen, C. (editor-in-chief), *National Conference on Geologic Resources of Thailand, Potential for future development: Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand*, 17-24 November 1992, p. 172-174., 1992.
- [5] Y. Takaya. Quaternary Outcrops in the Central Plain of Thailand, Geology and Mineral resources in Thailand and Malaya, *Report on Research in Southeast Asia*, N-3, pp. 7-68, Kyoto Univ, 1968.
- [6] JICA. The Study on Management of Groundwater and Land Subsidence in the Bangkok Metropolitan Area and Its Vicinity. *Department of Mineral resources*, March 1995.
- [7] A. Hooper, P. Segall and H. Zebker Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with to application Volcáno Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112 (July), 2007.
- [8] A. Aobpaet. 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*, 2012.
- [9] E. Chaussard, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano and F. Amelung. Land Subsidence in Central Mexico Detected by ALOS InSAR Time-Series, *Remote Sensing of Environment* 140 (2014) 94-106, 2014.
- [10] A. Aobpaet, M. C. Cuenca, A. Hooper and I. Trisirisatayawong. InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand, *International Journal of Remote Sensing*, 34:8, 2969-2982, 2013.
- [11] D. Bekaert. InSAR time series analysis of the 2006 slow slip event on the Guerrero Subsidence Zone, Mexico. Master Thesis. *Delft University of Technology, the Netherlands*, 116p, 2010.