



## การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์

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

ปวัน ภิรมย์ทอง<sup>1\*</sup> อธิ ตรีสิริสัตยวงศ์<sup>2</sup> และ อนุเฝ้า ออบแพทย์<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

<sup>3</sup> สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ 10210

#### บทคัดย่อ

กรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาแผ่นดินทรุดตัวต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาใหญ่ได้ในอนาคต ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Time-series InSAR ซึ่งให้ค่าความละเอียดในการวัดถึงระดับมิลลิเมตรและมีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการทำระดับที่มีจำนวนรังวัดน้อยกว่ามากซึ่งสามารถแก้ปัญหาในเรื่องความละเอียดในเชิงตำแหน่งไปได้ งานวิจัยนี้ตรวจสอบหาค่าอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี 1996-2000 โดยใช้ข้อมูลเฟสจากภาพดาวเทียมเรดาร์ ERS2 ทั้งหมด 16 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 10,000 ตร.กม. ตรวจพบจำนวนจุดรังวัดทั้งหมดกว่า 245,000 จุด และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งใช้เทคนิค Time-series InSAR ทหารทรุดตัวช่วงปี 2005-2010 และ 2009-2012 พบว่าในบริเวณที่มีข้อมูลซ้อนทับกัน ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร บริเวณฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาประมาณ 1,300 ตร.กม. พบแนวโน้มการทรุดตัวที่เร็วขึ้น ทรงตัว และช้าลง โดยในหลายบริเวณพบการทรุดตัวต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี 1996 และเป็นบริเวณที่ต้องมีการติดตามอย่างต่อเนื่องต่อไป

คำสำคัญ: อินซาร์, แผ่นดินทรุด, กรุงเทพมหานคร

#### Abstract

Bangkok and its neighborhood areas have experienced land subsidence for decades. It could be a big problem in the future if it is not taken care of. In this study, we apply InSAR time-series analysis that can give precision in millimeters and has an advantage getting much more observations than that leveling can provide. This advantage of InSAR can solve a problem of spatial resolution. This research detect land subsidence rates in Bangkok and its neighborhood areas in 1996-2000 by using phase data from 16 ERS2 images. We found over 245,000 observations in an area of approximately 10,000 km<sup>2</sup>. The research compare results with previous InSAR research which analyse data of the period

2005-2010 and 2009-2012. In the overlapping area of 1,300 km<sup>2</sup> covering central of Bangkok and Samutprakarn areas around 1,300 km<sup>2</sup> found trend of subsidence that shows increasing, decreasing and stable rates. Many areas have been subsiding since 1996 and so there is a need to be monitored closely further.

Keywords: InSAR, land subsidence, trend of subsidence, Bangkok

#### 1. คำนำ

กรุงเทพมหานครและปริมณฑลประสบปัญหาแผ่นดินทรุดตัวต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ซึ่งเริ่มมีรายงานครั้งแรกเมื่อปีค.ศ. 1968 [1] ปัญหาแผ่นดินทรุดตัวนี้ส่งผลต่อประชากรและประเทศเป็นอย่างมาก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือน้ำท่วมครั้งใหญ่ในปี 2011 ที่มีน้ำท่วมขังอยู่ถึงเกือบ 3 เดือน ซึ่งอาจจะเกิดจากระบบการจัดการน้ำที่ยากลำบาก และเนื่องด้วยบริเวณกรุงเทพเป็นพื้นที่ราบและมีความสูงเฉลี่ยจากระดับทะเลปานกลางประมาณ 0 - 1.5 เมตรเท่านั้น [2] ซึ่งหากเกิดปัญหาแผ่นดินทรุดต่อไปจนมีความสูงต่ำกว่าระดับทะเลปานกลางหรือเกิดพื้นที่รูปแอ่งขึ้น จะทำให้ปัญหาการระบายน้ำนั้นมีความเกิดวิกฤตมากขึ้น และนอกจากนี้ปัญหาแผ่นดินทรุดยังส่งผลกระทบอีกหลายด้าน เช่น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างอาคารต่างๆ เพราะฉะนั้นเราควรให้ความสำคัญในการศึกษาค้นคว้าในเรื่องแผ่นดินทรุดตัวต่อไป

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการประมวลผล Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) โดยการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศ เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเฮย์วาร์ด (Hayward fault) ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศอเมริกา [3], การตรวจวัดการทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองที่เหมืองไคหลวนในประเทศจีน [4], การทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาลซึ่งคล้ายกับสาเหตุของการทรุดตัวในบริเวณกรุงเทพมหานครที่บริเวณทางตอนเหนือของเขตคันโตที่ประเทศญี่ปุ่น [5], ที่เมืองเตหะรานในประเทศอิหร่าน [6] เป็นต้น เพราะเนื่องด้วยจากการครอบคลุมพื้นที่ที่

\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: piromthong.p@gmail.com

กว้างและค่าความละเอียดในการตรวจวัดที่ได้ถึงระดับมิลลิเมตรรวมถึงข้อได้เปรียบในเรื่องการใช้เวลาในการทำงานที่น้อยกว่าการทำงานระดับซึ่งทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ละเอียดกว่าในเชิงเวลา และการประมวลผล InSAR นั้นใช้การประมวลผลค่าเฟสในแต่ละจุดภาพทำให้ได้จำนวนค่ารังวัดจำนวนมาก ซึ่งสามารถจัดปัญหาในเรื่องความละเอียดในเชิงตำแหน่งที่เกิดกับงานระดับหรืองานรังวัดด้วยดาวเทียม ซึ่งเหมาะสมกับการตรวจวัดการทรุดตัวของแผ่นดินเป็นอย่างมากเพราะเนื่องจากการทรุดตัวนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่แปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและเวลา

อย่างไรก็ตามการประมวลผล InSAR มีข้อจำกัดที่จะไม่สามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่ขาดค่าสหสัมพันธ์หรือหมายถึงพื้นที่ในช่วงเวลาการตรวจวัดวัดถุนพื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงไปมากจนถึงจุดที่ไม่สามารถประมวลผลได้ และยังคงมีการพิจารณาถึงเรื่องความเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนตัว แต่เกิดจากปัจจัยอื่น เช่น สภาพอากาศ ในงานวิจัยนี้จึงใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค Stanford Method for Persistent Scatter (StamPS) และเทคนิค small baseline (SB) ร่วมกันเข้ามาช่วยในการประมวลผลหรือที่เรียกว่า InSAR StamPS-MTI SB combine ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้ถูกพัฒนามาเพื่อแก้ข้อจำกัดของเทคนิค InSAR แบบดั้งเดิมออกไป โดยหลักการของทั้งสองเทคนิคนี้จะใช้การคัดกรองหาเฉพาะจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันทั้งช่วงเวลาของข้อมูลและนำเฉพาะจุดภาพเหล่านั้นมาทำเป็นโครงข่ายเพื่อใช้ในการประมวลผล

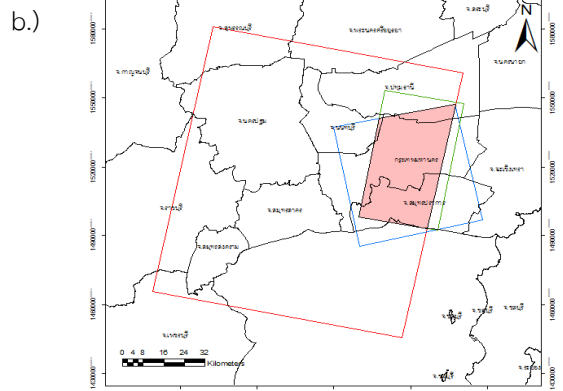
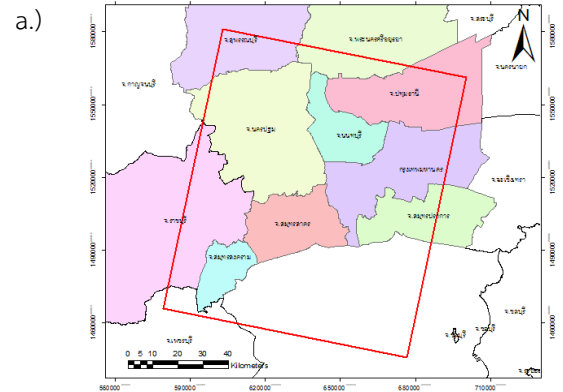
งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค InSAR time-series analysis ในการประมวลผลภาพจากดาวเทียม ERS2 ในช่วงปี 1996-2000 เพื่อหาอัตราการทรุดตัวที่เกิดขึ้นและจะนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้เทคนิค Time-series InSAR หาการทรุดตัวในช่วงเวลา 2005-2010 จากงานวิจัย [7] และช่วงปี 2009-2012 จากงานวิจัย [8] ในส่วนบริเวณที่มีข้อมูลซ้อนทับกัน เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มการทรุดตัวในระยะยาวมากขึ้น โดยแสดงผลเป็นแผนที่แสดงพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวที่เร็วขึ้น ทรงตัว และช้าลง

## 2. พื้นที่และข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

### 2.1 พื้นที่ศึกษา

2.1.1 พื้นที่ศึกษาหาอัตราการทรุดตัวของช่วงปี 1996-2000 มีขนาดประมาณ 10,000 ตร.กม. กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS2 ในวงโคจรขาลง (Descending orbit) ซึ่งพื้นที่จะครอบคลุมส่วนกลางและฝั่งตะวันตกของกรุงเทพมหานคร, จังหวัดสมุทรสาคร, ชิกตะวันตกของจังหวัดสมุทรปราการ, ชิกตะวันออกของจังหวัดนครปฐม และส่วนใต้ของจังหวัดนนทบุรีดังแสดงในรูปที่ 1(a)

2.1.2 พื้นที่ศึกษาการเปรียบเทียบข้อมูลกับงานวิจัยในอดีต จะมีพื้นที่ศึกษาบางส่วนซ้อนทับกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย [7] ซึ่งจะครอบคลุมส่วนกลางและชีกตะวันตกของกรุงเทพมหานคร และบริเวณปริมณฑลที่อยู่ทางฝั่งตะวันตกของกรุงเทพมหานคร ซึ่งส่วนของงานวิจัย [8] การครอบคลุมพื้นที่จะคล้ายกับงานวิจัย [7] แต่อาจจะมีส่วนที่ซ้อนทับกันน้อยกว่า โดยพื้นที่ศึกษานั้นจะนำเฉพาะพื้นที่ที่มีส่วนซ้อนทับกันทั้ง 3 งานวิจัยนำมาประมวลผล ดังรูปที่ 1(b)



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาในการศึกษาหาอัตราการทรุดตัวในงานวิจัยในกรอบสีแดง กำหนดโดย footprint ของภาพจากดาวเทียม ERS 2 (b) พื้นที่ศึกษาหาแนวโน้มการทรุดตัวในพื้นที่สีชมพู กำหนดโดยส่วนที่ซ้อนทับกันของ footprint ของงานวิจัยนี้กับของงานวิจัย [7] และ [8]

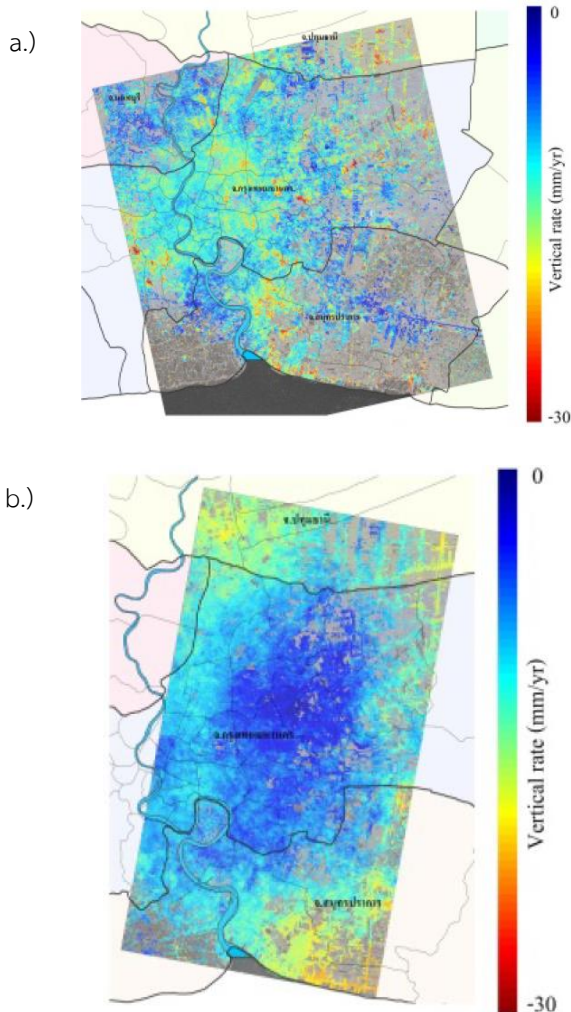
### 2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

2.2.1 รูปภาพ SAR ในระดับ Single look complex (SLC) ทั้งหมด 18 ภาพ จากดาวเทียม ERS1 บันทึกในโหมด StripMap มี Slant range resolution  $\approx 8$  เมตร และ Azimuth resolution  $\approx 4$  เมตร ซึ่งภาพถ่ายทั้งหมดนั้นถ่ายในช่วงดาวเทียมที่อยู่ใวงโคจรขาลง (Descending) ทั้งหมด และในการประมวลผลได้มีการโหลดค่า Precise orbit มาจาก Delft Institute for Earth-Oriented Space Research เพื่อนำมาแก้ค่า orbit ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วย

2.2.2 ข้อมูลจุดที่ประกอบด้วยค่าการทรุดตัวจากงานวิจัย [7] ซึ่งใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค InSAR StamPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของช่วงเวลาตั้งแต่ ตุลาคม 2005 ถึง มีนาคม 2010 โดยใช้ภาพจากดาวเทียม RADARSAT-1 ทั้งหมด 19 ภาพโดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2500 ตร.กม. ซึ่งภาพส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่กรุงเทพฝั่งตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 1(b) ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับ PS pixel ได้เกือบ 300,000 จุดภาพ และในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์พร้อมทั้งค่าการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับอีกด้วย ซึ่งได้ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวดังรูปที่ 2(a)

2.2.3 ข้อมูลจุดที่ประกอบด้วยค่าการทรุดตัวจากงานวิจัย [8] ซึ่งใช้การประมวลผล Time-series InSAR ด้วยเทคนิค InSAR StamPS-MTI SB combine ในการตรวจสอบอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของช่วงเวลาตั้งแต่ กันยายน 2009 ถึง สิงหาคม 2012 โดยใช้ภาพจากดาวเทียม TerraSAR-X ทั้งหมด 26 ภาพโดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1600 ตร.กม. ซึ่งภาพส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่กรุงเทพฝั่งตะวันตกเป็น

ส่วนใหญ่ ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับ PS pixel ได้ถึงเกือบ 4,000,000 จุดภาพ และในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ร่วมกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากงานระดับ ซึ่งค่าส่วนใหญ่แล้วมีความสอดคล้องกัน ซึ่งได้ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวดังรูปที่ 2(b)



รูปที่ 2 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบ (a) ในช่วงปี 2005-2010 [7]  
(b) ในช่วงปี 2009-2012 [8]

### 3. ทฤษฎีที่สำคัญ

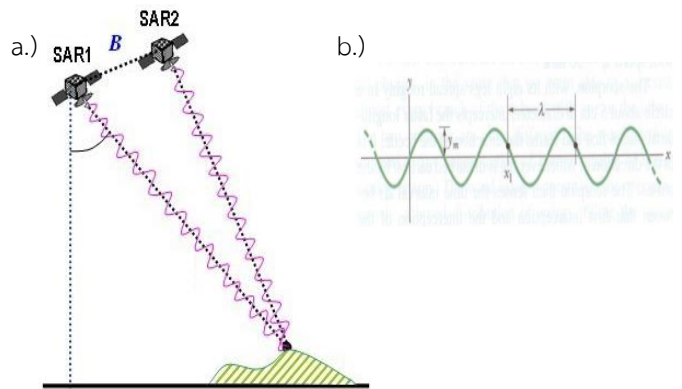
#### 3.1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

ภาพ Synthetic Aperture Radar (SAR) คือภาพที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์ซึ่งในแต่ละจุดภาพนั้นจะบันทึกค่าแอมพลิจูดและเฟส โดยค่าทั้งสองนั้นมาจากผลรวมแบบเวกเตอร์ของการกระเจิง (Backscattering) ที่เกิดจากวัตถุ (Scatterers) ต่าง ๆ ที่คลื่นไปมีปฏิสัมพันธ์ด้วย ถ้าหากมีการถ่ายภาพที่บริเวณเดียวกันสามารถนำภาพทั้งสองนั้นมา Interfere กันได้ ซึ่งนั่นก็คือเทคนิค InSAR

หากทำการหาผลต่างของเฟสจากทั้งสองภาพในทุกๆจุดภาพ (Interferogram image) โดยในช่วงเวลาระหว่างการถ่ายภาพของทั้งสองภาพนั้นพื้นผิวภูมิประเทศมีการเคลื่อนตัว ค่าต่างเฟสของภาพ interferogram จากคู่ภาพทั้งสองนั้นจะมีค่าเฟสของการเคลื่อนตัวของพื้นผิวปะปนเข้ามาด้วย ถ้าหากทำการตัดเรื่องการไม่มีค่าสหสัมพันธ์และ

ปัญหาความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศออกไป และทำการประมาณค่าเฟสที่เกิดภูมิประเทศ (topography) เช่น จาก Digital Elevation Model (DEM) และนำเฟสตรงส่วนนั้นมาลบออกจะทำให้ค่าเฟสที่เหลืออยู่คือค่าเฟสที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศเท่านั้น

แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค InSAR นี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ ถ้าหากเมื่อเวลาผ่านไปวัตถุในจุดภาพนั้นเปลี่ยนไปมากหรือ อาจจะหายไปหรือเปลี่ยนเป็นวัตถุอย่างอื่นเข้ามาแทนที่ อาจทำให้ค่าเวกเตอร์ผลรวมของค่าแอมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนไปมากจนทำให้ไม่สามารถนำมาประมวลผลได้ ซึ่งข้อจำกัดนี้เรียกว่า การไม่มีสหสัมพันธ์ (decorrelation) กันของข้อมูล ซึ่งในภาพ interferogram พื้นที่ส่วนใหญ่ในภาพจะไม่มีค่าสหสัมพันธ์ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ และอีกหนึ่งข้อจำกัดที่สำคัญคือการคลาดเคลื่อนของสัญญาณอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งปัญหานี้จะทำให้ค่าเฟสที่ตรวจวัดได้ผิดเพี้ยนไป



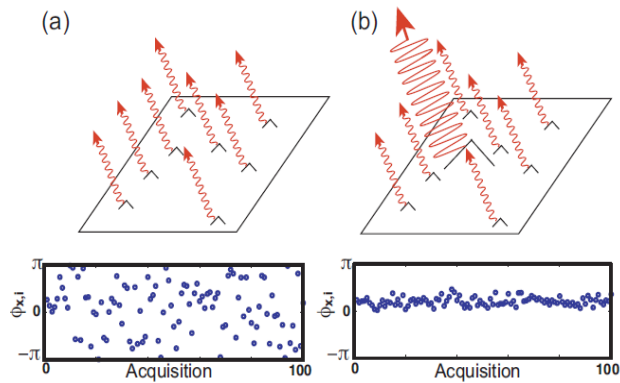
รูปที่ 3 a.) ลักษณะเรขาคณิตของ InSAR โดยเป็นการถ่ายภาพ SAR ณ เวลาที่ต่างกัน รูป b.) ลักษณะกราฟของคลื่น

#### 3.2 Stanford Method of Persistent Scatterers (StaMPS)

Persistent Scatterer InSAR [9] เป็นส่วนเทคนิคหนึ่งที่จะพัฒนาเพิ่มเติมจากเทคนิค InSAR แบบดั้งเดิม เพื่อขจัดปัญหาเรื่องการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันของข้อมูลและปัญหาในเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ ในแต่ละจุดภาพนั้นระดับค่าสหสัมพันธ์นั้นจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาจากพื้นดิน ซึ่งจุดภาพส่วนใหญ่แล้วจะมีการกระจายตัวของค่า Scattering ที่สะท้อนกลับมาที่ค่อนข้างสุ่ม (random) แต่ถ้าหากในบางจุดภาพที่มีส่วนที่สะท้อนกลับมาถูก dominate โดยตัว Scatter ตัวหนึ่งแล้ว (รูปที่ 4(b)) จุดภาพเหล่านี้จะมีค่าเฟสที่คงที่มากกว่า ซึ่งส่วนที่ สุ่ม (Random) อาจจะเล็กน้อยจนทำให้สามารถแยกสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศออกมาได้ ยิ่งจุดภาพที่ค่าความคงที่ของเฟสยิ่งมาจากจุดภาพนั้นก็จะมีโอกาสที่จะมีค่าสหสัมพันธ์มากตามไปด้วย เราเรียกจุดภาพเหล่านี้ว่า PS pixel เพราะฉะนั้นแล้วในส่วนหลักของเทคนิค Persistent Scatterers แล้วก็คือการหา PS pixel เหล่านี้ และนำเฉพาะค่าของจุดภาพที่ได้ผ่านการคัดกรองแล้วเท่านั้นมาใช้ในการประมวลผลหาค่าการเคลื่อนตัวต่อไป

โดยเทคนิค PS ในช่วงแรกนั้นจะใช้ค่าแอมพลิจูดเป็นสำคัญในการคัดกรองซึ่งทำให้ถูกจำกัดอยู่ว่าพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นต้องมี bright scatterer เช่นพวกสิ่งก่อสร้างที่ค่อนข้างเยอะ กับอีกหนึ่งข้อจำกัดที่จำเป็นจะต้องทราบค่าแบบจำลองการเคลื่อนตัวของพื้นผิวไว้ก่อนหน้าหรือมีการเคลื่อนตัวที่คงที่ จึงจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพได้ แต่ไว้ในเทคนิค StaMPS [10] ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ทั้งค่าแอมพลิจูดและหลักความสัมพันธ์เชิง

ตำแหน่งของค่าเฟสมาใช้ในการคัดกรอง PS pixel ซึ่งจะทำให้เทคนิค StaMPS นี้สามารถหา PS pixel ได้แม้ในภูมิภาคที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่น้อยก็ตาม และในเทคนิคนี้ยังสามารถทำงานในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนตัวแบบไม่คงที่ หรือไม่จำเป็นที่จะต้องทราบอัตราการเคลื่อนตัวของพื้นผิวมาก่อนล่วงหน้าก็สามารถทำได้



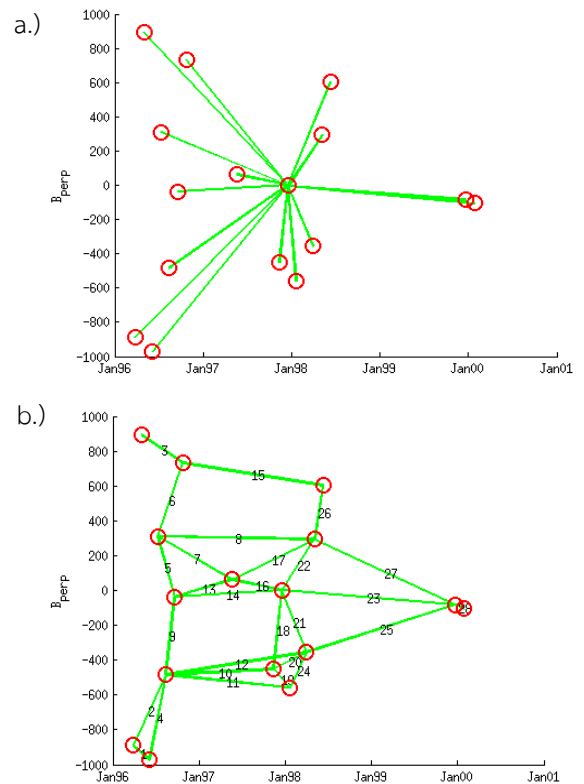
รูปที่ 4 การจำลองลักษณะของเฟส [10] ของ (a) จุดภาพที่ไม่มีการ dominate โดยตัวสะท้อนตัวใดตัวหนึ่ง (b) Persistent Scatter pixel เป็นลักษณะของจุดภาพที่มีการ dominate โดยตัวสะท้อนตัวใดตัวหนึ่ง

### 3.3 Small Baseline (SB)

เทคนิค Small Baseline ถูกริเริ่มโดย [11] โดยในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Small Baseline ที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติมโดย [12] อันเนื่องจากเทคนิค StaMPS นั้นใช้ภาพ master เพียงภาพเดียว ซึ่งอาจจะทำให้มีการสร้างภาพ interferogram ที่มีตำแหน่งการถ่ายภาพ (geometric baseline) หรือระยะห่างของเวลาในการถ่ายภาพ (temporal baseline) กว้างมากเกินไป แต่ในเทคนิค Small Baseline นั้นสามารถมีภาพ master ได้หลายภาพ (รูปที่ 5(b)) ซึ่งจะใช้การจับคู่ภาพที่มี geometric และ temporal baseline ที่มีขนาดเล็กในการสร้างภาพ interferogram เพื่อทำการลด noise ที่เกิดจากการไม่มีค่าสหสัมพันธ์กันลง โดยทุกภาพที่สร้างขึ้นนั้นจะทำการ co-registration ไปที่ภาพ master ตัวเดียวกับเทคนิค StaMPS และจะสามารถเพิ่มค่า signal to noise ratio ได้ด้วยการเฉลี่ยค่าสัญญาณจากจุดภาพรอบข้างหรือที่เรียกว่า Spectral filtering ได้อีกด้วย ซึ่งในเทคนิค Small baseline นั้นใช้การคัดเลือกจุดภาพที่มีค่าสหสัมพันธ์กันตลอดช่วงของชุดข้อมูล เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล โดยการคัดเลือกนั้นจะใช้การระบุโดยพิจารณาที่คุณลักษณะของเฟส ซึ่งวิธีการในการคัดเลือกนั้นจะเหมือนกับวิธี StaMPS ทุกอย่างแต่อาจจะต่างกันตรงส่วน ค่าพารามิเตอร์บางตัวเท่านั้น แต่ถึงแม้ว่าวิธีการในการคัดเลือกนั้นจะเหมือนกัน แต่ชุดของจุดภาพที่ได้ออกมานั้นจะไม่เหมือนกัน เพราะว่าใช้ชุดของภาพ interferogram ที่ต่างกัน

### 3.4 InSAR StaMPS-MTI SB combine

เป็นเทคนิคที่ใช้เทคนิค StaMPS และ Small baseline ร่วมกัน [12] เพื่อให้ได้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของทั้งสองเทคนิค โดยการเพิ่มจำนวนจุดภาพจากการคัดกรองมาจากทั้งสองวิธี ทำให้มีค่ารังวัดที่เพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มค่า signal to noise ratio (SNR) ให้กับจุดภาพที่ถูกเลือกมาจากทั้งสองเทคนิคอีกด้วย ซึ่งจุดภาพที่ถูกเลือกโดยทั้งสองเทคนิคนั้นจะมีการใช้ค่าน้ำหนักในการคิดเฟส ซึ่งเราจะทำการรวมจุดภาพที่ได้จากสองเทคนิคก่อน แล้วค่อยทำการ phase unwrapping จุดภาพรวมทั้งหมดที่ถูกคัดเลือกมาจากทั้งสองเทคนิค เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

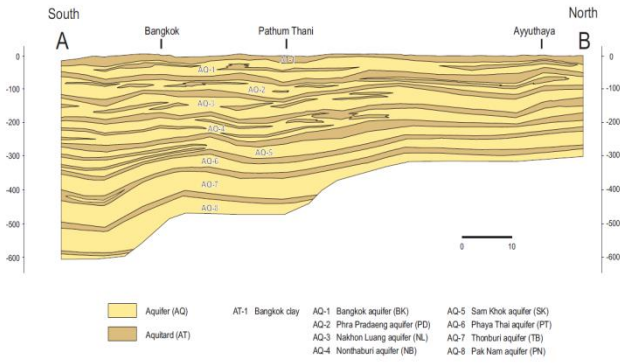


รูปที่ 5 ตัวอย่างการจับคู่ภาพ interferogram สำหรับ (a) เทคนิค StaMPS เป็นการจับคู่ภาพไปที่ภาพ master เพียงภาพเดียว (b) เทคนิค Small baseline มีภาพ master ได้หลายภาพ

### 3.5 ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

ชั้นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็ง (Medium stiff to stiff clay) หนาประมาณ 8-10 เมตร หลังจากนั้นจะพบชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายหนาประมาณ 10-15 เมตร โดยชั้นดินของจังหวัดนนทบุรีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12-15 เมตร ซึ่งในบางพื้นที่จะพบชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ ที่ระดับความลึก 2-6 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางแข็งหนาประมาณ 8-10 เมตร ถัดจากนั้นจะเป็นชั้นทรายหนาประมาณ 10-15 เมตร สำหรับชั้นดินในจังหวัดปทุมธานีประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10 เมตร ตามด้วยชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 8-10 เมตร แต่อาจจะพบชั้นทรายแทรกอยู่บ้าง ต่อจากนั้นจะพบชั้นทรายหนาประมาณ 5-10 เมตร

ชั้นน้ำบาดาลบริเวณที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนใต้ ได้พื้นดินกรุงเทพมหานครลงไปแหล่งกรวดทราย เม็ดกรวดและทรายมีขนาดใหญ่และกลม จึงมีช่องว่างสามารถกักเก็บน้ำบาดาลไว้ได้มาก ความหนาของชั้นกรวดทรายและดินเหนียวดังกล่าวหนามากมีความหนาถึง 1,830 เมตร สำหรับชั้นน้ำบาดาลตั้งแต่ระดับผิวจนถึงความลึกประมาณ 600 เมตร แบ่งได้เป็น 8 ชั้น ที่ระดับลึกกว่า 600 เมตรลงไป ยังมีชั้นน้ำบาดาลอยู่อีกแต่ยังไม่มีการใช้ [13] แสดงชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลไว้ดังรูปที่ 6



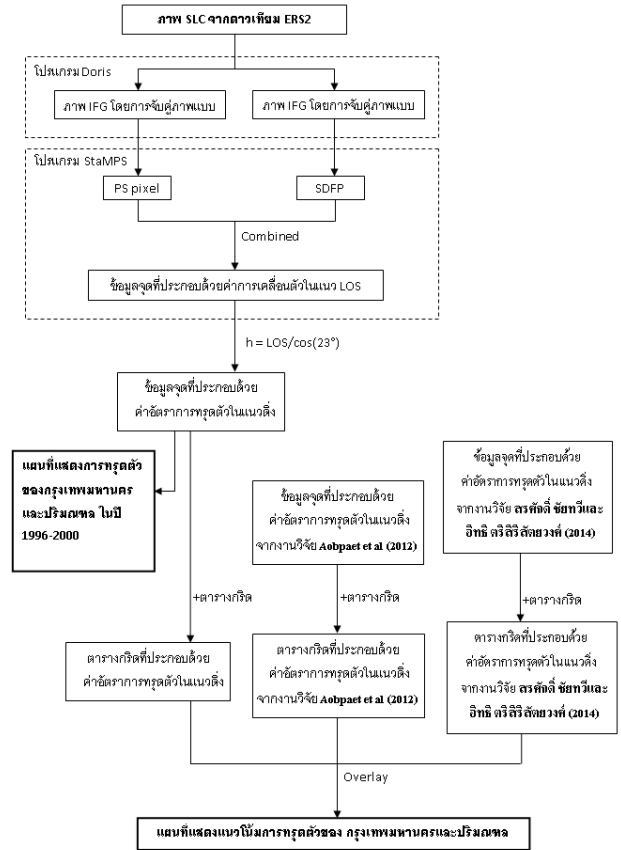
รูปที่ 6 ลักษณะชั้นน้ำบาดาลพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

#### 4. ขั้นตอนการประมวลผล

ในช่วงแรกจะเป็นขั้นตอนการสร้างภาพ interferogram โดยใช้โปรแกรม Doris เพื่อทำการอ่านและแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและนำข้อมูล precise orbit ที่ทำการดาวน์โหลดข้อมูลมาจาก Delft Institute for Earth-Oriented Space Research เข้ามาช่วยในการประมวลผลด้วย เมื่อได้ภาพ interferogram แล้วจะนำเข้าไปโปรแกรม StaMPS เพื่อประมวลผลหาจุดภาพที่เป็น PS Pixel และ SDFP (Slowly decorrelation filter phase) และทำการ phase unwrapping เพื่อให้ได้ค่าเฟสสมบูรณ์ ซึ่งเป็นค่าการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศในแนว line of sight (LOS) ของดาวเทียม

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สมมติฐานว่าการเคลื่อนตัวของพื้นผิวภูมิประเทศจากการเคลื่อนตัวในแนวราบ เพราะฉะนั้นจึงสามารถหาค่าอัตราการทรุดตัวในแนวตั้งได้โดยใช้หลักตรีโกณมิติโดยการนำค่า LOS หาด้านค่าโคไซน์ (cosine) ของมุม look angle ของดาวเทียม ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ 23° เมื่อได้ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวในแนวตั้งแล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการ Regression analysis กับเวลา เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวต่อไป

จากนั้นนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัย [7] และ [8] ซึ่งในงานวิจัยทั้งสองนั้นพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในทางทิศตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้นจะต้องทำการตัดนำมาศึกษาเฉพาะพื้นที่ที่มีส่วนข้อมูลซ้อนทับกันนำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะนำข้อมูลการทรุดตัวจากผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้กับผลลัพธ์จากอีกทั้งสองงานวิจัยมาทำเป็นแผนที่กริดขนาด 250x250 ตร.ม. อันเนื่องมาจากข้อมูลจุดการทรุดตัวจากทั้งสามงานวิจัยไม่อยู่ตรงตำแหน่งเดียวกันพอดีทั้งหมด และค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดที่ได้ไม่แม่นยำพอจึงต้องสร้างเป็นพื้นที่เพื่อเฉลี่ยจุดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน และนำไปสร้างเป็นแผนที่แสดงพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวที่เร็วขึ้น ทรงตัว หรือช้าลง โดยในขั้นตอนการเปรียบเทียบนั้นจะนำข้อมูลผลลัพธ์จากทั้งสามงานวิจัยมาสร้างสมการเส้นตรงเพื่อให้เป็น Overdetermined System โดยใช้ค่าความชันในการแบ่งลักษณะแนวโน้มการทรุดตัวในแต่ละพื้นที่ โดยแสดงผังขั้นตอนการประมวลผลทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผังขั้นตอนแสดงการประมวลผล

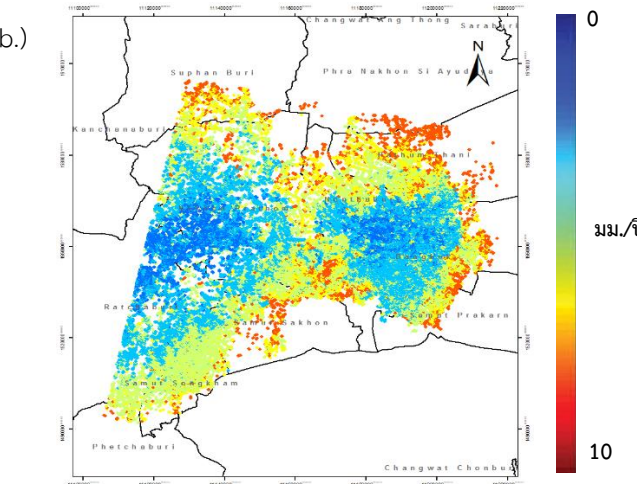
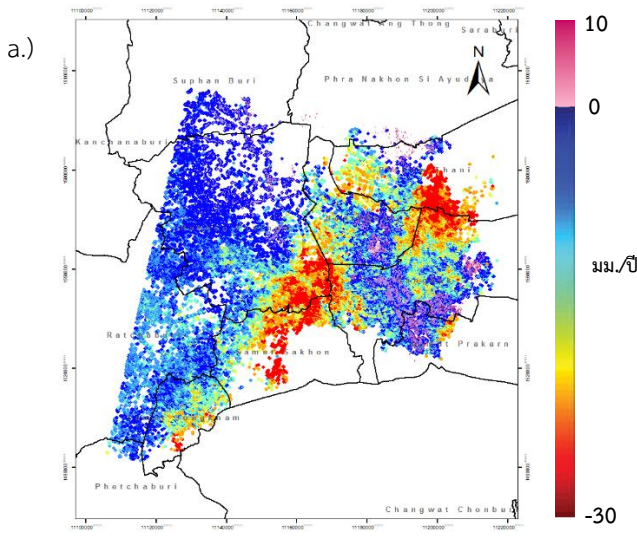
#### 5. ผลการศึกษา

##### 5.1 ผลลัพธ์การหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 ด้วยเทคนิค InSAR

ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจพบจุดภาพ ที่เป็น PS pixel ได้ถึง 245,842 จุดดังแสดงในรูปที่ 8(a) โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าจุดจะมีความหนาแน่นมากในบริเวณที่เป็นเมืองโดยมีค่าเฉลี่ยสูงถึงประมาณ 80-100 จุด/ตร.กม. แต่ในส่วนที่ไม่ใช่บริเวณเมืองนั้นจะมีจำนวนจุดที่เบาบางมากจนถึงไม่มีจุด PS pixel โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้จากบริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดนนทบุรี อาจเนื่องด้วยมาจากพื้นที่บริเวณนั้นในช่วงปีค.ศ. 1996-2000 อาจมีอาคารและสิ่งก่อสร้างอยู่ค่อนข้างน้อยรวมถึงตัวระบบของ ERS2 ที่ได้จำนวนจุดที่น้อยกว่าถ้าเปรียบเทียบกับดาวเทียมเรดาร์ดวงอื่น เนื่องจากว่าค่าความละเอียดของภาพจากดาวเทียม ERS2 ที่สูงถึงกว่า 20 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และความละเอียดภาพที่ใหญ่นี้ทำให้อาคารที่จุดภาพจะถูก dominate โดยตัว Scatter ตัวใดตัวหนึ่งลดน้อยลงลงตามไปด้วย และในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์นั้นจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 10 มม./ปี โดยจะสามารถเห็นได้ว่าในพื้นที่บริเวณเมืองและมีจุด PS pixel ที่หนาแน่นนั้น ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าค่อนข้างน้อยแต่ในส่วนที่ไม่ใช่บริเวณเมืองจะมีจุด PS pixel ที่ค่อนข้างน้อยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะมากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 8(b)

โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับค่าอัตราการทรุดตัวให้เข้ากับค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจากงานระดับเพราะเนื่องจากว่าตัวระบบของการประมวลผล InSAR นั้นค่าผลลัพธ์ที่นำเชื่อถือของอัตราการทรุดตัวของแต่ละจุด PS pixel นั้นจะเป็นแบบสัมพัทธ์(relative) ซึ่งค่าการทรุดตัวในแบบสัมบูรณ์(absolute) นั้นอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากเพราะฉะนั้นจึงควรมีการอ้างอิงปรับค่าโดยใช้หมุดระดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หมุดกม.313 ซึ่งเป็นหมุดที่แขวนติดอยู่กับอาคารเรียน ของโรงเรียนพหลโยธิน

ถ.วิภาวดี ซึ่งเป็นหมุดภายใต้การดูแลของกรมแผนที่ทหารโดยเป็นการทำงานระดับขั้นหนึ่ง ในการปรับค่าเพราะเนื่องจากสมมติฐานที่ว่าจุด PS pixel ส่วนใหญ่ที่ถูกคัดกรองออกมานั้นมาจากการสะท้อนจากตัวอาคารหรือสิ่งก่อสร้าง เพราะฉะนั้นจึงต้องเลือกหมุดระดับที่มีลักษณะติดอยู่กับตัวอาคาร เพื่อให้ได้ค่าอัตราการทรุดตัวที่อยู่ในระบบเดียวกัน ผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับค่าด้วยการลบค่าอัตราการทรุดตัวด้วย 7.353 มม./ปี เพราะเนื่องจากพบว่าค่าอัตราการทรุดตัวที่ตรวจพบจาก InSAR นั้นมีการทรุดตัวที่ช้ากว่าข้อมูลการทรุดตัวที่ตรวจพบจากหมุดระดับอยู่ขนาด 7.353 มม./ปี



รูปที่ 8 (a) อัตราการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (มม./ปี) โดยค่าอัตราการทรุดตัวที่มีค่าเป็นบวกจะแสดงผลในโทนสีม่วงอ่อน (b) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการทรุดตัว (มม./ปี)

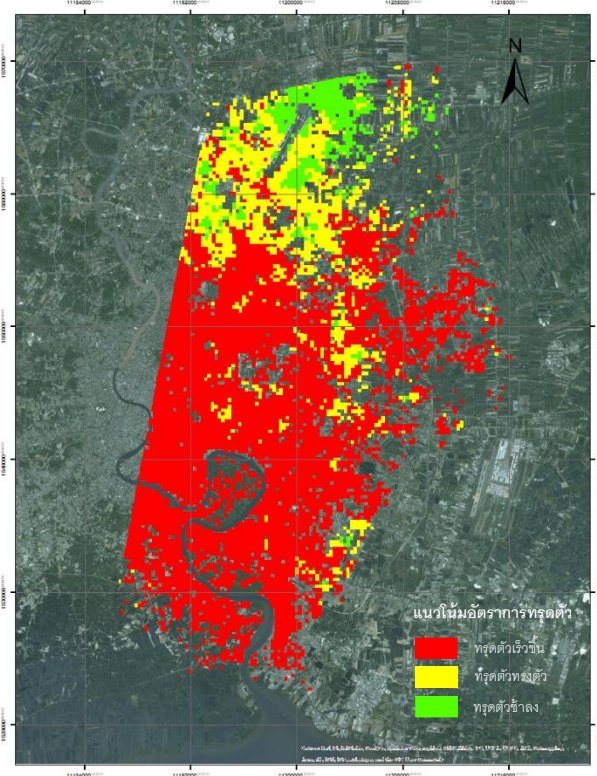
ซึ่งจากผลลัพธ์กรุงเทพมหานครและปริมณฑลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 มีค่าอัตราการทรุดตัวระหว่าง -30 ถึง 10 มม./ปี ซึ่งจะสังเกตได้ว่า มีค่าอัตราการทรุดตัวเป็นบวก ซึ่งอาจจะมาจากการปรับค่าผลลัพธ์เข้ากับหมุดระดับที่ไม่ดีพอหรือพื้นที่บริเวณนั้นอาจจะมีการยกตัวสูงขึ้นก็เป็นได้ ซึ่งควรจะต้องมีการตรวจสอบพื้นที่ในบริเวณนั้นเพิ่มเติมต่อไปว่ามีมีการยกตัวขึ้นของพื้นผิวจริงหรือไม่ โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ในบริเวณพื้นที่ชีกวันออกของจังหวัดนนทบุรีและพื้นที่ริมสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาของกรุงเทพมหานคร ,จังหวัดสมุทรสาครมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างน้อยและมีค่าเป็นบวกปะปนในบางพื้นที่โดยมีค่าอัตราการทรุดตัวระหว่าง -4 จนถึง 10 มม./ปี แต่

ในทางบริเวณทางทิศเหนือของกรุงเทพมหานคร,ทางทิศตะวันตกของกรุงเทพมหานคร,พื้นที่ทางเหนือของจังหวัดสมุทรสาคร และพื้นที่ทางใต้ชีกวันออกของจังหวัดนครปฐม มีค่าอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างมากโดยมีค่าระหว่าง -20 ถึง -30 มม./ปี โดยในส่วนพื้นที่ส่วนใหญ่ส่วนอื่น ๆจะมีค่าอัตราการทรุดตัวระหว่าง 0 ถึง -10 มม./ปี ปะปนกันไป

5.2 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบร่วมกับงานวิจัยก่อนหน้า

ผลจากการเปรียบเทียบกับงานวิจัย [7] ซึ่งใช้ InSAR ในการหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครในปี ค.ศ. 2005-2010 และ งานวิจัย [8] ในปี ค.ศ. 2009-2012 ดังแสดงในรูปที่ 9 จะสามารถเห็นได้ว่ามีขนาดพื้นที่ที่ทำการเปรียบเทียบที่ค่อนข้างน้อย เพราะเนื่องจากจะสามารถประมวลผลได้เฉพาะในพื้นที่ที่มีส่วนทับกันของทั้งสามงานวิจัยซึ่งภาพข้อมูลจากทั้งสามนั้นมาจากคนละดาวเทียมกันหมดจึงมีระบบการบันทึกภาพพื้นที่ที่ไม่สอดคล้องกันและในส่วนทางชีกขวาของพื้นที่ที่ซ้อนทับกันนั้นเป็นพื้นที่ที่ขอบภาพจากดาวเทียม ERS2 จึงทำให้มีจำนวนจุด PS pixel ที่ค่อนข้างเบาบางจนถึงไม่มีเลยจึงทำให้ไม่สามารถประมวลผลในบริเวณนั้นได้ แต่ในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้มานั้นก็ครอบคลุมในส่วนพื้นที่สำคัญหลายส่วนทั้งตอนกลางทั้งหมดของกรุงเทพมหานครจนถึงจังหวัดสมุทรปราการบางส่วน

จากผลลัพธ์พบว่าพื้นที่ตั้งแต่จังหวัดสมุทรปราการขึ้นมาจนถึงตอนกลางของกรุงเทพมหานครนั้นมีค่าอัตราการทรุดที่เร็วขึ้น แต่โซนทางเหนือของกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นพื้นที่เขตหลักสี่และเขตบางเขนมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างทรงตัวและในส่วนเขตพื้นที่ตอนเมืองที่ตรวจพบว่าม้ออัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างมากในช่วงปี ค.ศ. 1996-2000 มีแนวโน้มอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง



รูปที่ 9 แนวโน้มการทรุดตัวของบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดสมุทรสาครบางส่วน โดยพื้นที่ที่มีสีแดงคือมีอัตราการทรุดตัวที่เร็วขึ้น สีเหลืองคือมีอัตราการทรุดตัวที่ทรงตัว สีเขียวคือมีอัตราการทรุดตัวที่ช้าลง

## 6. สรุปผลการศึกษา

การตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้เทคนิค InSAR time-series analysis ในการประมวลผล ได้จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด 245,842 จุด ซึ่งสามารถจัดปัญหาในเรื่องความละเอียดในเชิงตำแหน่งที่เกิดกับงานระดับหรืองานรังวัดด้วยดาวเทียมไปได้ แต่จะต้องคำนึงถึงพื้นที่ที่ไม่ใช่บริเวณเมืองด้วย เพราะในบริเวณพื้นที่เหล่านั้นจะมีจุดตรวจสอบที่ค่อนข้างน้อยจนถึงไม่มี และถ้าหากมีจุดตรวจสอบจุดส่วนใหญ่จะมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างสูง และจากผลลัพธ์การตรวจสอบนั้นพบว่าในบางพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูง เช่นพื้นที่ตอนเมือง แต่จากแนวโน้มที่ได้ทำการเปรียบเทียบนั้นเห็นว่า การทรุดตัวในบริเวณนั้นมีอัตราที่ช้าลง แต่กลับกันในพื้นที่บริเวณตอนกลางของกรุงเทพที่มีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างน้อยในอดีตแต่กลับมีแนวโน้มของการทรุดตัวที่เร็วขึ้น ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีประชากรอาศัยอยู่เป็นจำนวนมากและมีความสำคัญเป็นศูนย์กลางของประเทศ ถ้าหากปล่อยให้เกิดปัญหาแผ่นดินทรุดนี้ต่อไปอาจจะทำให้เกิดปัญหาที่ใหญ่ตามมาได้เพราะฉะนั้นจึงควรให้ความสำคัญในการติดตามและแก้ปัญหาการทรุดตัวนี้ต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ขอขอบคุณ โครงการ GEO2TECDI-SONG ที่อนุเคราะห์ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลและข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม ERS2, ขอขอบคุณ TU Delft : Delft University of Technology สำหรับซอฟต์แวร์ DORIS และข้อมูล Precise Orbit ของดาวเทียม ERS2 และขอขอบคุณ Prof. Andy Hooper จาก Leed University ประเทศอังกฤษ สำหรับซอฟต์แวร์ StaMPS

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Cox, J.B., *A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in Southeast Asia*. 1968, Asian Institute of Technology, Bangkok: Research Report No. 6.
- [2] Nguten, A.D., *Updating and Analysis of Bangkok Land Subsidence caused by Deep Well Pumping with Emphasis on Shallow Soil Settlement*. 1999, Bangkok.
- [3] Lanari, R., et al., *Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California*. *Remote Sensing of Environment*, 2007. **109**(1): p. 20-28.
- [4] Daqing, G., et al. *Using Small Baseline SAR Interferometry to Investigate Land Subsidence Induced by Underground Coal Mining*. in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*. 2008.
- [5] Nakagawa, H., et al. *Land subsidence of the northern Kanto plains caused by ground water extraction detected by JERS-1 SAR interferometry*. in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*. 2000.
- [6] Dehghani, M., et al., *Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring*

*in the Tehran Basin, Iran*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013. **79**(0): p. 157-170.

- [7] Aobpaet, A., et al., *InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand*. *International Journal of Remote Sensing*, 2013. **34**(8): p. 2969-2982.
- [8] ชัยทวี, ศ. and อ. สิริสัตยวงษ์, การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยเทคนิค *Time-series InSAR*, in การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19. 2014.
- [9] Ferretti, A., et al., *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2011. **49**(9): p. 3460-3470.
- [10] Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, *Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007. **112**(B7): p. B07407.
- [11] Berardino, P., et al., *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002. **40**(11): p. 2375-2383.
- [12] Hooper, A., *A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches*. *Geophysical Research Letters*, 2008. **35**(16): p. L16302.
- [13] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, ศึกษาหาสาเหตุการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. 2009: รายงานสำหรับผู้บริหาร. กรุงเทพมหานคร.