



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การติดตามการฟื้นฟูสภาพหาดทรายหลังจากเหตุการณ์สึนามิปี 2547 และการสำรวจ
สึนามิในอดีต ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี ชูวงศ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ

พฤษภาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การติดตามการฟื้นฟูสภาพหาดทรายหลังจากเหตุการณ์สึนามิปี 2547 และการสำรวจ
สึนามิในอดีต ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี ชูวงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
สัญญาเลขที่ MRG5180188

โครงการ การติดตามการฟื้นฟูสภาพหาดทรายหลังจากเหตุการณ์สึนามิปี 2547 และการสำรวจสึนามิในอดีต ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย

สรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive summary)

โครงการนี้ได้ตั้งวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลและวิเคราะห์หลักฐานทางตะกอนวิทยาของสึนามิทั้งปัจจุบันและในอดีต รวมถึงธรณีแปรสัณฐานยุคใหม่ และแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้นในอดีตประเพณีคาบวิบัติซ้ำของสึนามิในอดีตและในอนาคต ซึ่งผู้วิจัยหลักได้ต่อยอดจากงานวิจัยเดิมที่ได้ดำเนินการมาภายหลังเหตุการณ์สึนามิเมื่อปี 2547 เรื่อยมา ในการดำเนินงานที่ผ่านมาในระยะเวลาสองปีของการรับทุนพัฒนาศักยภาพอาจารย์รุ่นใหม่ พบว่า ได้บรรลุเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้และการดำเนินงานไม่มีปัญหาแต่อย่างใด โดยในช่วงปีแรกของการดำเนินงานจะเน้นการเก็บข้อมูลในภาคสนามเป็นหลักเพื่อค้นหาข้อมูลทางธรณีวิทยาใหม่ในด้านพิบัติภัยสึนามิ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ขยายพื้นที่สำรวจให้รวมถึงชายฝั่งทะเลอันดามันของไทยที่คาดว่าจะค้นพบหลักฐานทางธรณีวิทยา และตะกอนวิทยา ที่น่าจะประมวลและวิเคราะห์ระดับลึกในเรื่องธรรมชาติของการสะสมตัวผิดปกติทั้งจากสึนามิในอดีตและจากพายุไซโคลน

ผลการดำเนินงานที่เป็นรูปธรรมที่สำคัญตามข้อกำหนดของ สกว และ สกอ ของโครงการนี้ คือ การนำเสนอบทความทางวิชาการที่ผู้วิจัยหลักเป็นผู้เขียนชื่อแรก (first author) และเป็น corresponding author โดยได้ทำการเผยแพร่ในวารสารวิชาการนานาชาติจำนวน 4 บทความ (ภาคผนวก) บทความแรกเป็นการนำเสนอผลงานวิจัยจากการศึกษาตะกอนวิทยาของสึนามิที่สะสมตัวเมื่อปี 2547 ในวารสาร *Terra Nova* มี ISI impact factor (2008) 1.899 บทความที่สองเป็นผลงานการประเมินการฟื้นฟูสภาพทางธรณีวิทยาชายฝั่งในพื้นที่ประสบพิบัติภัยสึนามิรุนแรงจากบริเวณแหลมปะการังถึงบ้านเขาหลัก จังหวัดพังงา โดยได้เผยแพร่ในวารสาร *Geomorphology* มี ISI impact factor (2008) 2.339 ฉบับเดือนมีนาคม 2552 นอกจากนี้สำหรับผลการขุดเจาะสำรวจเพื่อค้นหาหลักฐานทางธรณีวิทยาที่จะบ่งบอกประวัติของสึนามิในอดีตตามแนวชายฝั่งอันดามัน ผู้วิจัยได้ร่วมทำงานกับคณะวิจัยไทยและต่างประเทศโดยได้เผยแพร่บทความในวารสาร *Nature* ฉบับเดือนตุลาคม 2551 มี ISI impact factor (2008) 31.434 ซึ่งผู้วิจัยเป็นหนึ่งใน co-authors และผลการร่วมสำรวจธรณีวิทยาใต้ทะเลบริเวณแหลมปะการังและชายฝั่งทะเลเขาหลัก ได้เผยแพร่ในรูปบทความวิชาการในวารสาร *Polish Journal of Environmental Studies* มี ISI impact factor (2008) 0.963 เมื่อต้นปี 2552 โดยเป็น co-author (ดูในภาคผนวก)

นอกจากนี้ หัวหน้าโครงการและนักวิจัยร่วมได้ทำการเผยแพร่บทความที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาร่องรอยตะกอนสึนามิและร่องรอยตะกอนที่เกิดจากพายุในอดีต ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติแล้ว 1 ครั้ง คือ การประชุมวิชาการ *Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT2008)* จัดขึ้นที่กรุงเทพมหานคร เมื่อเดือนพฤศจิกายน 2551

ผลงานการเผยแพร่ดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยหลักได้รับการคัดเลือกให้เป็นนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่น ประจำปี 2552 (TRF-CHE Scopus Young Researcher Award 2009) สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Sciences Category)



คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุนแก่คณะผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ที่สำคัญอย่างยิ่งคือ นักวิจัยพี่เลี้ยง คือ รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ ที่มีส่วนร่วมอย่างมากในการศึกษากรณีพิบัติภัยสึนามิในครั้งนี้ซึ่งได้ให้กรอบแนวคิดสำคัญต่อผู้วิจัยหลักตั้งแต่เกิดเหตุการณ์สึนามิ

ศาสตร์ของธรณีวิทยาสึนามิสำหรับประเทศไทยยังจัดได้ว่าอยู่ในขั้นเริ่มต้นการค้นคว้าวิจัยอย่างจริงจัง งานวิจัยนี้ก็เป็นจุดเริ่มต้นของการค้นคว้าและการสำรวจทางธรณีวิทยาโดยทีมงานนักธรณีวิทยาไทยความสำเร็จของโครงการนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลย หากขาดการสนับสนุนและแรงกระตุ้นจากอดีตคณาจารย์ของภาควิชาธรณีวิทยา คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทิวา ศุภจรรยา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิโรจน์ ดาวฤกษ์ ซึ่งดำรงตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาธรณีวิทยาในขณะนั้น คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอาจารย์ทั้งสองท่านและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เข้าใจในความจำเป็นเร่งด่วนและอนุมัติให้ลงสำรวจพื้นที่เสียหายทันทีหลังเหตุการณ์สึนามิ และยังให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ เพื่อสานต่องานวิจัยนี้เรื่อยมา

ข้อมูลบางส่วน อาทิ ภาพถ่ายเทียมและภาพถ่ายทางอากาศ คณะผู้วิจัยได้รับความเอื้อเฟื้อจากกรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย GISTDA, CRISP (Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing, National University of Singapore) และเว็บไซต์ของ PointAsia.com

ขอบคุณเพื่อนร่วมงานทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศทุกท่าน สำหรับช่วงเวลาดีๆ ที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ร่วมกันในการสำรวจภาคสนาม ขอขอบคุณ คุณบัญชา ขอสกุล คุณเทพ คุณนุญทองจิ้น และชาวเกาะพระทองที่ได้ช่วยเหลือทีมวิจัยเราอย่างดียิ่งตลอดการค้นหาหลักฐานทางธรณีวิทยาบนเกาะพระทอง จังหวัดพังงา

ขอขอบคุณอาจารย์และนิสิตภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความร่วมมือร่วมใจ ความเอื้ออาทร และช่วยอำนวยความสะดวกให้คณะผู้วิจัยทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ

Abstract

Project Code : MRG5180188

Project Title : Post 2004 tsunami beach recovery and paleotsunami investigation along the Andaman coast of Thailand

Investigator : Associate Professor Dr. Montri Choowong and Associate Professor Dr. Punya Charusiri, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

E-mail Address : monkeng@hotmail.com; cpunya@chula.ac.th

Project Period : 2 years (May 2008- May 2010)

The 2004 Indian Ocean tsunami demonstrated that catastrophic tsunamis cannot be predicted by historical records alone. The 2004 and the pre 2004 deposits left behind by tsunamis provide opportunities to assess tsunami hazards more fully. Such the pre-2004 tsunami deposits help assess location where the past tsunami affected, water depth and tsunami flow behavior, estimate source locations, and aid in the better understanding on tsunami behaviors. Dated deposits allow us to estimate times and recurrence intervals of the past tsunamis.

Tsunamis have the potential to affect a wide variety of coastal systems. While tsunamis are termed 'destructive wave', are always important in shaping sedimentary systems and the stratigraphic record. A preliminary investigation on the pre-2004 tsunami deposits by Chulalongkorn Geology Research Team during 2005-2007 from Phang-nga provides the opportunity to compare 2004 Indian Ocean tsunami-related coastal sedimentation. Information on the recurrence of tsunamis is important to better understanding how tsunamis influence coastal systems therefore this project addresses the question of the repeat frequency of these destructive events.

This project is firstly aimed to evaluate rate of eroded beach recovery. Remote sensing data and field survey were mainly used in this research. Twelve periods from 2002 to 2006 of a diverse array of satellite images were used to calculate beach area and shoreline change. Field survey was carried out every 3 months for beach profiling and sediment sampling in four periods since January to November 2006. Beach profiles showed the balance of deposition and erosion through time to which the change depends largely on season changes. Grain size of recovered beach sediments at Ban Bang Niang was coarse to very coarse sand and finer to the north as fine to medium sand at Blue Village Pakarang Resort. Beach sediments were composed of quartz (60%), bio clasts (35%), and others (5%). Shoreline and beach areas in the research areas were almost recovered after one year whereas inlet/outlet channels (except Ban Bang Niang) were not recovered. In general, eroded areas by 2004 tsunami were approximately 90 percent recovered until November 2006.

The second aim of the project focused on studying the deposits of the most recent (2004) tsunami, developing recognition criteria for tsunami deposits, applying these criteria to identify paleotsunami deposits along the Andaman coast of Thailand and dating of these paleotsunami deposits. Such information provides more reliable geological data and guides mitigation efforts and may reduce losses from future tsunamis. Coupled with contemporaneous seismogenic features, tsunami deposits can also help to assess seismic hazards.

A sand layer from a predecessor to the 2004 Indian Ocean tsunami underlies a freshwater marsh on Phra Thong Island, Phang Nga Province, Thailand. At this marsh, about 300 meters from the sea, the 2004 tsunami left sand layer about 15 cm thick on top of a peaty soil. The previous tsunami deposit, of similar thickness, rests on another peaty soil about 40 cm below present ground surface. Observed in trenches and cores, the pre-2004 deposit begins with a razor-sharp contact with the underlying soil. Radiocarbon dating shows the uppermost layer of the pre-2004 tsunami deposit occurred around 600 years ago. This result guides us to further our geological investigation Thailand historical record since Sukhothai, Ayutthaya and probably Ratanakosin periods.

Keywords : Beach recovery, 2004 Indian Ocean tsunami, Khao Lak, paleotsunami

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ MRG5180188

ชื่อโครงการ การติดตามการฟื้นฟูสภาพหาดทรายหลังจากเหตุการณ์สึนามิปี 2547 และการสำรวจสึนามิในอดีต ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address : monkeng@hotmail.com; cpunya@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 3 ปี (2551-2553)

เหตุการณ์สึนามิที่ทำลายประเทศในแถบมหาสมุทรอินเดียเป็นเหตุการณ์ที่ไม่สามารถให้ข้อมูลทางประวัติศาสตร์เพียงชนิดเดียวในการทำนายว่าจะมีเหตุการณ์คล้ายคลึงกันเกิดขึ้นในอนาคตอีกหรือไม่ ในทางธรณีวิทยาข้อมูลด้านตะกอนวิทยาที่สึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ ได้ทิ้งร่องรอยไว้นั้นมีความสำคัญและจัดว่าเป็นโอกาสดีเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้ในการตามรอยสึนามิในอดีต รวมถึงการประเมินพื้นที่ที่อาจจะได้รับผลกระทบจากสึนามิในอนาคต การประเมินความสูงและระยะทางที่สึนามิจะท่วมเข้าไปในแผ่นดิน การคาดการณ์ตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว และการคาดการณ์ช่วงคาบวิบัติซ้ำจากสึนามิในอดีต

สึนามินอกจากจะได้ชื่อว่าเป็นคลื่นแห่งการทำลายล้าง แต่บางครั้งก็เป็นที่น่าสนใจในการใช้หลักฐานด้านตะกอนวิทยาในการบ่งบอกประวัติการเกิดสึนามิในอดีตได้ คณะทำงานจากภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการสำรวจตะกอนสึนามิที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ รวมถึงสำรวจพื้นที่ที่คาดว่าจะพบตะกอนสึนามิในอดีตซึ่งผลการสำรวจก็เป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่งว่า เราพบหลักฐานว่าสึนามิเคยเกิดขึ้นแล้วในอดีตกาล

เป้าหมายหนึ่งของโครงการนี้คือ ประเมินผลการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพโดยเฉพาะการฟื้นตัวของพื้นที่หน้าหาดที่ถูกกัดเซาะจากสึนามิ ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชายหาดทั้งในแนวระนาบและแนวตั้งในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นว่าเป็นชายฝั่งแบบคงสภาพมีความสมดุลย์กันในเรื่องของการสะสมตัวและการกัดเซาะ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ขนาดของเม็ดตะกอนชายหาดในพื้นที่ศึกษาจะมีขนาดตั้งแต่ทรายหยาบจากทางตอนใต้ที่บริเวณบ้านบางเนียงและลดขนาดลงจนถึงทรายละเอียดทางตอนเหนือที่บลูวิลเลจ ปะการังรีสอร์ท ส่วนประกอบของตะกอนประกอบด้วย แร่ควอร์ตซ์ ๖๐ % เศษหอยและเศษปะการัง ๓๕ % และส่วนประกอบอื่นๆ ๕ % และจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโทรมัสม์และข้อมูลการสำรวจภาคสนามพบว่าแนวชายฝั่งและพื้นที่ชายหาดส่วนใหญ่ได้ฟื้นตัวกลับมาเกือบเท่าเดิมก่อนเกิดเหตุการณ์สึนามิแล้ว แต่พื้นที่ในบริเวณที่เป็นทางน้ำเข้า/ออกที่ติดกับทะเล (ยกเว้นที่บ้านบางเนียง) ยังไม่ฟื้นตัว โดยยังคงสภาพเหมือนเดิมหลังเกิดเหตุสึนามิ โดยสรุปแล้วจากการศึกษาจนถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๔๙ พื้นที่ที่ถูกกัดเซาะจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ ได้ฟื้นสภาพกลับมาแล้ว ประมาณ ๙๐ เปอร์เซ็นต์

เป้าหมายอีกข้อหนึ่งของโครงการคือ การค้นหาสึนามิในอดีต ซึ่งผลการสำรวจก็ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี คือ ทีมงานพบชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายที่คาดว่าจะเกิดจากสึนามิในอดีต โดยเฉพาะพื้นที่เกาะพระทอง พบชั้นตะกอนทรายแทรกสลับกับชั้นดินหลายชั้น และมีความหนาแตกต่างกันไปตามสภาพ

ภูมิประเทศ ผลการกำหนดอายุของชั้นตะกอนสีนํามีโบราณได้อายุน้อยที่สุดของชั้นสะสมตัวบนสุด ประมาณ ๖๐๐ ปี ผลการกำหนดอายุนี้อเองที่สามารถทำให้เราต่อยอดการค้นคว้าในเรื่องประวัติการเกิดสีนํามีกับประวัติศาสตร์ของชาติได้ ซึ่งอาจจะมีเหตุการณ์สีนํามีเกิดมาแล้วตั้งแต่สมัยสุโขทัย อยุรยา และรัตนโกสินทร์ แต่ที่ช่วงอายุเท่าได้นั้นคงเป็นโจทย์วิจัยที่ต้องหาคำตอบกันต่อไปในอนาคต

คำหลัก การฟื้นฟูสภาพชายหาด, สีนํามีในมหาสมุทรอินเดียปี 2547, เขาหลัก, สีนํามีโบราณ

สารบัญ

	หน้า
สรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive summary)	ก
คำขอบคุณ	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
บทคัดย่อภาษาไทย	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง	ท
 บทที่ ๑ บทนำ	 ๑
ที่มาของโครงการ	๑
วัตถุประสงค์ของโครงการ	๑
วิธีดำเนินการวิจัย และแนวทางในการศึกษา	๑
ขอบเขตการวิจัย	๔
ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินโครงการ	๔
 บทที่ ๒ ขั้นตอนการวิจัยโดยละเอียด	 ๕
การสำรวจการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพโดยละเอียด	๕
พื้นที่สำรวจตะกอนสีนามิบริเวณกว้าง	๕
การสำรวจภาคสนาม	๘
การวัดระดับชายหาด	๑๐
การเก็บตัวอย่างตะกอนหน้าหาดและการวิเคราะห์	๑๒
การวิเคราะห์ตะกอนพื้นผิวชายหาด	๑๕
การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม	๒๕
การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลและพื้นที่ชายหาด	๒๘
การสำรวจตะกอนสีนามิบนบกโดยละเอียด	๒๙
การเก็บตัวอย่างตะกอนและการวิเคราะห์	๓๐
การเก็บตะกอนสีนามิ	๓๐
การคัดลอกชั้นตะกอน	๓๑
การเก็บตะกอนเพื่อการเอ็กซ์เรย์	๓๒
การวิเคราะห์ขนาดตะกอนสีนามิโดยวิธี Setting tube	๓๕
การกำหนดอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔	๓๖
การสำรวจภูมิประเทศ ตะกอนและสิ่งมีชีวิตใต้น้ำทะเล	๓๖

บทที่ ๓ การฟื้นฟูสภาพชายฝั่งทะเลที่ถูกกัดเซาะหลังจากสึนามิ	๓๗
การฟื้นฟูสภาพหน้าหาด	๓๗
พื้นที่บลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท	๓๗
พื้นที่โซฟีเทล เมจิก ลากูน รีสอร์ท	๔๐
พื้นที่คลองคึกคัก	๔๓
พื้นที่บ้านบางเนียง	๔๖
ผลการวิเคราะห์ตะกอนใหม่บริเวณหน้าหาดรายพื้นที่	๔๙
พื้นที่บลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท	๔๙
พื้นที่โซฟีเทล เมจิก ลากูน รีสอร์ท	๕๒
พื้นที่คลองคึกคัก	๕๔
พื้นที่บ้านบางเนียง	๕๖
 บทที่ ๔ การสำรวจตะกอนสึนามิที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ และตะกอนสึนามิในอดีต	๕๙
ข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สึนามิปี ๒๕๔๗ ที่ร่องรอยไว้	๕๙
ร่องรอยทางธรณีสัณฐานวิทยา	๕๙
ร่องรอยทางตะกอนวิทยา	๖๐
ผลการวิเคราะห์ทางตะกอนวิทยาของตะกอนสึนามิ	๖๐
หาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต	๖๐
แหลมปะการังถึงเขาหลัก จังหวัดพังงา	๖๓
บลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท	๖๓
บ้านบางเนียง	๖๖
เกาะคอเขา จังหวัดพังงา	๗๒
เกาะพระทอง จังหวัดพังงา	๗๖
อุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง	๗๙
ผลการสำรวจและวิเคราะห์ตะกอนสึนามิในอดีต	๘๕
หาดกมลา จังหวัดภูเก็ต	๘๕
บทวิเคราะห์จากการเจาะสำรวจหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต	๘๗
ปากน้ำคลองทับละมุ จังหวัดพังงา	๘๘
เกาะพระทอง จังหวัดพังงา	๙๑
ผลการวิเคราะห์ซากสิ่งมีชีวิต	๙๖
ฟอแรมมินิเฟอรา	๙๖
ไดอะตอมในตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗	๙๗
ผลวิเคราะห์อายุชั้นตะกอนสึนามิโดยวิธีคาร์บอน ๑๔	๙๙

บทที่ ๕ สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ	๑๐๐
บทสรุปเชิงวิชาการ	๑๐๐
การประเมินผลการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพ	๑๐๐
การสำรวจตะกอนสีนามิในอดีต	๑๐๐
ผลผลิตของโครงการ	๑๐๑
ผลผลิตในเรื่องการผลิตบัณฑิตและมหาบัณฑิตของโครงการ	๑๐๑
ผลผลิตในรูปแบบการประชุมวิชาการ	๑๐๓
ผลผลิตในรูปแบบเอกสารวิชาการในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ	๑๐๓
เอกสารอ้างอิง	๑๐๕
ภาคผนวก	๑๐๗
บทความวิจัยของโครงการ	๑๐๘

สารบัญรูป

หน้า

รูป ๒.๑ แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตะกอนสีนามิตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามัน (จุดสีแดง) (แผนที่ดัดแปลงจาก Choowong และคณะ ปี ๒๐๐๗ วารสาร Terra Nova)	๖
รูป ๒.๒ แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างโดยละเอียด (A) พื้นที่หาดบางเทา จังหวัด ภูเก็ต (B) พื้นที่แหลมวัดระดับการเปลี่ยนแปลงชายหาดตั้งแต่แหลมปะการังถึง เขาหลัก (C) พื้นที่อุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง และ (D) พื้นที่เกาะ พระทอง จังหวัดพังงา (ภาพดัดแปลงจาก Choowong และคณะ ปี ๒๐๐๗ วารสาร Terra Nova)	๗
รูป ๒.๓ การวัดระดับหน้าหาดโดยใช้กล้องวัดระดับ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๘
รูป ๒.๔ ขั้นตอนในการดำเนินการประเมินการฟื้นฟูสภาพธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ถูกกัด เซาะจากสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)	๑๐
รูป ๒.๕ ภาพแสดงวิธีการวัดระดับชายหาดและการทำภาพตัดขวางของปากคลองในบริเวณ พื้นที่ศึกษาโดยทำการวัดระดับและเก็บตะกอนบริเวณหน้าหาดไปพร้อมกัน (ภาพ โดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ สุเมธ พันธุวงศ์ราช)	๑๒
รูป ๒.๖ รูปภาพแสดงการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวชายหาดจากจุดอ้างอิงบนฝั่งไปจนถึง แนวระดับน้ำทะเลลงต่ำสุด (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ สุเมธ พันธุวงศ์ ราช)	๑๓
รูป ๒.๗ ภาพจากดาวเทียม LANDSAT-5 แสดงพื้นที่วัดระดับชายหาดและเก็บตะกอน พื้นผิวชายหาด (ในวงกลม) บริเวณตอนเหนือของบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) โซฟีเทลเมจิกลากูนิสอร์ท (SF) คลองคึกคัก (KK) และบ้านบางเนียง (BN) (บันทึกภาพก่อนเหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี) (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)	๑๔
รูป ๒.๘ การเตรียมตัวอย่างตะกอนที่เก็บได้จากบริเวณหน้าหาดที่ถูกกัดเซาะจากสึนามิ ก่อนนำเข้าตูบแห้งเพื่อการวิเคราะห์ขนาดตะกอนโดย sieving test (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)	๑๗
รูป ๒.๙ รูปภาพแสดงการอบตัวอย่างตะกอนภายในตูบที่อุณหภูมิ ๘๐ องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาประมาณ ๕-๖ ชั่วโมงเพื่อให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างตะกอนทั้งหมด (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)	๑๘
รูป ๒.๑๐ รูปภาพแสดง ตะแกรงคัดขนาด (sieve mesh) และเครื่องคัดขนาด (sieve)	๑๙

shaker) รูป (A) และเครื่องชั่งน้ำหนัก (weight measurement) รูป (B) (ภาพโดย
สุเมธ พันธวงศ์ราช)

- รูป ๒.๑๑ รูปแสดงตารางที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของเม็ดตะกอนที่ผ่านการคัด
ขนาดแล้ว ๒๑
- รูป ๒.๑๒ รูปแสดงตารางคำนวณหาค่าตัวแปรทางสถิติของเม็ดตะกอนที่ผ่านการคัดขนาด
แล้ว (จาก Fritz and Moore, 1988) ๒๒
- รูป ๒.๑๓ รูปภาพแสดงชนิดกล้องไมโครสโคปที่ใช้ในวิเคราะห์องค์ประกอบตะกอน ๒๓
- รูป ๒.๑๔ แผนภูมิที่ใช้ในการประเมินส่วนประกอบของตะกอนในงานวิจัยนี้ (จาก Fritz
and Moore, 1988) ๒๓
- รูป ๒.๑๕ รูปภาพแผนภูมิที่ใช้ในการประเมินลักษณะทางกายภาพของเม็ดตะกอนในการ
วิจัยนี้ (ดัดแปลงจาก Powers, 1953) ๒๔
- รูป ๒.๑๖ ภาพจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM แสดงพื้นที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแนว
ชายฝั่งโดยละเอียด โดยเริ่มจากทางตอนใต้ของแหลมปะการังลงมาถึง บลูวิล
เลจเมจิกปะการังรีสอร์ท (A) พื้นที่ที่สองตอนเหนือของไซไฟเทลเมจิก ลาภูนรี
สอร์ท (B) พื้นที่ที่สามทางตอนเหนือของคลองคึกคัก (C) พื้นที่ที่สี่ตอนใต้ของ
คลองคึกคัก (D) พื้นที่ที่ห้าทางตอนใต้ของร่องน้ำธรรมชาติที่บ้านบางเนียง (E)
(ภาพโดย สุเมธ พันธวงศ์ราช) ๒๗
- รูป ๒.๑๗ เส้นแนวชายฝั่ง (สีแดง) ที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียมโดยใช้แนวระดับ
น้ำขึ้นสูงสุดเป็นตัวกำหนดขอบเขตซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม IKONOS ซึ่ง
บันทึกภาพก่อนเหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี (ภาพโดย สุเมธ พันธวงศ์ราช) ๒๘
- รูป ๒.๑๘ ขอบเขตของพื้นที่ชายหาด (เส้นสีแดง) ที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียม
โดยใช้แนวระดับน้ำขึ้นสูงสุดและแนวต้นไม้เป็นตัวกำหนดขอบเขต ซ้อนทับบน
ภาพจากดาวเทียม IKONOS ซึ่งบันทึกภาพก่อนเหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี (ภาพ
โดย สุเมธ พันธวงศ์ราช) ๒๙
- รูป ๒.๑๙ (บนซ้าย) การขุดร่องสำรวจเพื่อศึกษาตะกอนที่สะสมตัวโดยสึนามิปี ๒๕๔๗ ใน
บริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต (บนขวา) ศึกษาชั้นตะกอนสึนามิจากร่องสำรวจ
(ล่างซ้าย) การขุดร่องสำรวจยาวกว่า ๓ เมตร บริเวณแหลมสน จังหวัดระนอง
และ (ล่างขวา) การปาดหน้าตัดตะกอนชายหาดเพื่อศึกษาตะกอนนิเวศวิทยาบริเวณ
แหลมปะการัง จังหวัดพังงา (ภาพโดย สุเมธ พันธวงศ์ราช) ๓๐

รูป ๒.๒๐ การเก็บตัวอย่างตะกอนสีนามิโดยละเอียดแต่ละชั้นการสะสมตัว (layer to layer) โดยบรรจุตัวอย่างลงในหลอดพลาสติกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและเพื่อรักษาภาพตะกอนให้เป็นไปตามธรรมชาติมากที่สุด ตัวอย่างดังกล่าวจะใช้ในการวิเคราะห์ขนาดโดยวิธี Settling tube analysis (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๑
รูป ๒.๒๑ การคัดลอกตะกอนจากหน้าตัดหลุมทดสอบ (peel technique) ตัวอย่างจากบริเวณแหลมสน จังหวัดระนอง เพื่อศึกษาการกระจายตัวของชั้นตะกอนสีนามิในแนวตั้งฉากกับชายหาด (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๒
รูป ๒.๒๒ (บน) วิธีการเก็บตัวอย่างตะกอนสีนามิในกล่องพลาสติกจากหน้าตัดชั้นตะกอนในภาคสนาม (ล่าง) ตัวอย่างที่บรรจุใส่กล่องแล้วทำการแพ็คเพื่อป้องกันการกระเทือนและการปนเปื้อนเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการเอ็กซ์เรย์ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๓
รูป ๒.๒๓ (บน) เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ทางการแพทย์ที่ประยุกต์ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของตะกอนสีนามิ (ล่าง) ตัวอย่างผลที่ได้จากการเอ็กซ์เรย์ตะกอนสีนามิแสดงริ้วคลื่นที่เกิดจากการพัดพาโดยกระแสน้ำจากสีนามิ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๔
รูป ๒.๒๔ อุปกรณ์วิเคราะห์ขนาดตะกอนโดยวิธี Settling tube (สองรูปบน) ท่อพลาสติกเพื่อหยอดตัวอย่างตะกอนสีนามิ และ (สองรูปล่าง) แสดงระบบประมวลผลคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณขนาดและเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๕
รูป ๓.๑ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สีนามิ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง	๓๗
รูป ๓.๒ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๕๙	๓๘
รูป ๓.๓ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณโซฟีเทลเมจิกลาгуนรีสอร์ท (SF) ซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์	๔๐

สีน้ำ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด
และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง

- รูป ๓.๔ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณโซฟีเทลเมจิกลาทุนรีสอร์ท (SF) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙ ๔๑
- รูป ๓.๕ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณคลองคึกคัก (KK) ช้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สีน้ำ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง ๔๓
- รูป ๓.๖ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณคลองคึกคัก (KK) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙ ๔๔
- รูป ๓.๗ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณบ้านบางเหียง (BN) ช้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สีน้ำ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง ๔๖
- รูป ๓.๘ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณบ้านบางเหียง (BN) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙ ๔๗
- รูป ๓.๙ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙ ๔๘
- รูป ๓.๑๐ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิกลาทุนรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙ ๕๒
- รูป ๓.๑๑ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙ ๕๔
- รูป ๓.๑๒ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบ้านบางเหียง (BN) ปี ๒๕๔๙ ๕๖
- รูป ๔.๑ แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่สำรวจตะกอนสีน้ำมึนระดับรายละเอียดบริเวณหาดบาง ๖๑

เทา จังหวัดภูเก็ต พื้นที่สีน้ำตาลในแผนที่ B แสดงพื้นที่ที่ถูกน้ำทะเลท่วมถึงจาก
สึนามิ (ภาพดัดแปลงจาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๗ วารสาร Marine
Geology)

- รูป ๔.๒ โครงสร้างตะกอนบนพื้นผิว บริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต แสดงให้เห็นการ
ทิศทางการพัดพาของตะกอนเคลื่อนตัวเข้าหาแผ่นดินได้เป็นอย่างดี โครงสร้าง
ตะกอนดังกล่าวจัดว่าเป็นข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สำคัญมากเพราะโครงสร้างบน
พื้นผิวตะกอนมักจะถูกทำลายไปทันทีหลังการสะสมตัว ในระดับสากลมีการ
รายงานการค้นพบโครงสร้างตะกอนพื้นผิวไม่มากนัก โครงสร้างตะกอนบนพื้นผิว
ที่เห็นได้ชัดเจน ประกอบด้วย เนินทรายรูปร่างสมมาตรและไม่สมมาตรแสดง
ทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (symmetrical and asymmetrical landward dunes) (รูป A,
B และ C) ริวคลื่นแสดงทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (landward ripple) (รูป D และ E) ริว
คลื่นแสดงทิศทางออกสู่ทะเลเปิดทับบนเนินทราย (seaward ripple on dune) (รูป
F) ลูกศรสีขาวแสดงทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (รูปดัดแปลงจาก Choowong และคณะ
ปี ๒๐๐๗ วารสาร Marine Geology) ๖๒
- รูป ๔.๓ แผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจและความหนาของตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ ในพื้นที่
ด้านหลังบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท จังหวัดพังงา (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอ
เทอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน) ๖๓
- รูป ๔.๔ ระดับความลึกของการขุดหลุมทดสอบในพื้นที่ซึ่งพบชั้นสะสมตัวที่เป็นตะกอน
ทรายธรรมชาติและพบชั้นปะการังในระดับความลึกประมาณ ๑๒๐ เซนติเมตร
(ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเทอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน) ๖๔
- รูป ๔.๕ การขุดสำรวจตามคลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพบตะกอนสึนามิในอดีต
โดยการปาดชั้นตะกอน เพื่อจำแนกชนิดการสะสมตัวที่เป็นธรรมชาติและตะกอนที่
ได้จากการขุดเหมืองเก่า (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเทอร์ มหาวิทยาลัย
วอชิงตัน) ๖๔
- รูป ๔.๖ ชั้นตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ สะสมตัวอยู่ด้านบนชั้นตะกอนดินโคลนโดยเห็นความ
แตกต่างทางกายภาพ เช่น สี ขนาดตะกอน และรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนด้านบน
กับด้านล่างที่เป็นตะกอนดินโคลนชัดเจน ซึ่งเป็นอีกรูปแบบการสะสมตัวที่จะใช้
เป็นต้นแบบในการตามหาตะกอนสึนามิในอดีต (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์) ๖๕
- รูป ๔.๗ (ซ้าย) ชั้นตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ ที่พบในบริเวณคลองด้านหลังบลูวิลเลจ
ปะการัง รีสอร์ท (ขวา) ภาพหน้าตัดชั้นตะกอนเดิมที่ทีมสำรวจทำการขุดเพื่อ
ค้นหาตะกอนสึนามิในอดีตบริเวณเดียวกัน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์) ๖๕
- รูป ๔.๘ รวมภาพลักษณะปรากฏบนพื้นผิวของตะกอนสึนามิที่เป็นรอยริวคลื่นแสดงทิศ ๖๖

ทางการพัดพาออกสู่ทะเล (seaward slightly straight-crested ripple sand) (สองภาพบนสุด) และโครงสร้างตะกอนที่เกิดจากการตกหรือกระแทกของวัตถุที่ลอยมากับน้ำทะเล (tool or bounce mark) (ภาพกลางและล่าง) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่เกิดรอยร้าวคลื่นและวัตถุบางตำแหน่งได้รับการสร้างตัวของรื้อรอยคลื่น (ภาพโดย ดร. วิชัย จูทะโกสิทธิ์กานนท์)

- รูป ๔.๙ ประมวลภาพการศึกษาชั้นตะกอนโดยการขุดแนวร่องสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่าง (trench) เป็นแนวยาวเพื่อให้ครอบคลุมโครงสร้างตะกอนในแนวระนาบ จากรูปจะเห็นว่าตะกอน สีนามีในบริเวณบ้านบางเนียงนี้มีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ ๖ เซนติเมตร ที่วัดในตำแหน่งประมาณ ๕๐๐ เมตร ห่างแนวชายฝั่งทะเลปัจจุบัน ตะกอนสีนามีที่พบมีขนาดตั้งแต่ทรายละเอียดถึงทรายขนาดปานกลางเป็นส่วนใหญ่ ด้านบนของชั้นตะกอนทรายพบตะกอนขนาดโคลนหนาประมาณ ๑ ถึง ๒ มิลลิเมตร ปิดทับอยู่ซึ่งจะสังเกตได้จากสีเทาเข้มที่อยู่ระหว่างชั้นรื้อรอยคลื่น (ภาพโดย ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว และ ดร. วิชัย จูทะโกสิทธิ์กานนท์) ๖๘
- รูป ๔.๑๐ โครงสร้างตะกอนที่เป็นรื้อรอยคลื่นรูปแบบโค้ง (linguoid-crested ripple sands) ที่พบได้ทั่วไปในบริเวณนี้และยังเห็นร่องรอยการตกผลึกของเกลือ (salt crystallization) ในแอ่งของรื้อรอยคลื่นอยู่ด้านบนสุดเหนือชั้นตะกอนโคลน รูปแบบโครงสร้างตะกอนลักษณะนี้บ่งบอกความแตกต่างในเรื่องความเร็วของสึนามิ และความสูงของระดับน้ำทะเล (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์) ๖๙
- รูป ๔.๑๑ ภาพตัดขวางแสดงหน้าตัดชั้นตะกอน จะเห็นว่า ตะกอนมีการคัดขนาดจากใหญ่ขึ้นไปเล็ก (normal grading) และในบางพื้นที่พบการสะสมตัวเป็นสองชั้นที่มีชุดการคัดขนาดสองชุด (double-layered normal grading) การขุดร่องสำรวจและการทำรายละเอียดชั้นตะกอนสีนามีในระดับโครงสร้างตะกอนจะช่วยให้สามารถประมาณความเร็วและเปรียบเทียบความรุนแรงของสึนามิได้ (ภาพโดย ดร. วิชัย จูทะโกสิทธิ์กานนท์) ๗๐
- รูป ๔.๑๒ ลักษณะตะกอนสีนามีที่แสดงการสะสมตัวสองชั้น (double-layered tsunami deposits) ที่พบบริเวณแกรนด์ ไดมอนด์ รีซอร์ท แอนด์ สปา บ้านบางเนียง โดยชุดตะกอนทั้งสองชั้นแสดงการคัดขนาดตะกอนจากหยาบขึ้นไปละเอียด ด้านบน (normal grading) อย่างไรก็ตามโครงสร้างภายในของตะกอนแต่ละชั้นปรากฏไม่ชัดเจนนัก แต่พอสรุปได้ว่า มีการสะสมจากพัดพาโดยสึนามิอย่างน้อยสองครั้งในบริเวณนี้ (ข้อมูลวิเคราะห์บางส่วนจาก Choowong และคณะ ปี ค.ศ. ๒๐๐๗ วารสาร Journal of coastal research ฉบับที่ ๒๓ หมายเลข ๕ ภาพโดย ดร. นาโอมิ มูราโกชิ มหาวิทยาลัยชินชิว ญี่ปุ่น) ๗๑

รูป ๔.๑๓	แผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจตะกอนสีนามิอย่างเป็นระบบตามแนวสำรวจจากบริเวณบ้านนอกนา เกาะคอเขา จังหวัดพังงา (ภาพจาก Jitranoon ปี ๒๐๐๖)	๓๒
รูป ๔.๑๔	ตำแหน่งแนวสำรวจตะกอนสีนามิตอนเหนือของเกาะคอเขา ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศเป็นสันทรายสลับที่ลุ่มต่ำ ดังเห็นในรูปถ่ายทางอากาศ (ภาพจาก Jitranoon ปี ๒๐๐๖)	๓๓
รูป ๔.๑๕	แผนภาพแสดงการเทียบเคียงชั้นตะกอนสีนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ และชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายปกติที่ได้จากการขุดหลุมทดสอบ (ภาพจาก Jitranoon ปี ๒๐๐๖)	๓๔
รูป ๔.๑๖	แผนภาพแสดงการเทียบเคียงชั้นตะกอนสีนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ และชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายปกติที่ได้จากเครื่องเจาะตะกอนแบบกระแทก (ESP Plus) (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๕
รูป ๔.๑๗ (ซ้าย)	ภาพดาวเทียมแสดงสภาพภูมิประเทศบนเกาะพระทองและเกาะคอเขา จังหวัดพังงา และ (ขวา) แผนที่แสดงพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสีนามิพร้อมระดับความสูง สีนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ และตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเกาะพระทอง เกาะคอเขา (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๖
รูป ๔.๑๘	แผนที่แสดงตำแหน่งการขุดและเจาะสำรวจตะกอนสีนามิปี ๒๕๔๗ และตะกอนสีนามิในอดีตนบนเกาะพระทองซ้อนทับบนรูปถ่ายทางอากาศ หมายเลขสีแดงแสดงความหนาของตะกอนสีนามิที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ และวงกลมสีต่างๆ แสดงชั้นตะกอนทรายที่คาดว่าจะเป็นชั้นตะกอนที่เกิดจากสีนามิในอดีตแทรกสลับหรืออยู่ระหว่างชั้นดิน (ภาพจาก ดร. เครือวัลย์ จันท์แก้ว ปรับปรุงเพิ่มเติมข้อมูลโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๗
รูป ๔.๑๙	ภาพแสดงลักษณะภูมิประเทศชนิดต่างๆ ที่ทีมงานเลือกในการสำรวจตะกอนสีนามิ (รูปบน) ภูมิประเทศแบบที่ลุ่มต่ำหลังแนวสันทรายที่มีความชันและในบางช่วงเวลาในรอบปี (wet swale) โดยส่วนใหญ่จะต่ำจากแนวสันทรายประมาณ ๑ เมตร (รูปล่าง) แสดงสภาพภูมิประเทศที่เป็นที่ลุ่มต่ำที่ไม่มีน้ำขัง (dry swale) โดยทั้งสองชนิดของภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ลุ่มต่ำระหว่างแนวสันทรายนี้ (swale) จะพบตะกอนสีนามิปี ๒๕๔๗ กระจายตัวอยู่เสมอแต่ด้วยความหนาที่แตกต่างกันไปตามระยะทางจากหน้าหาดปัจจุบัน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)	๓๘
รูป ๔.๒๐	ภาพถ่ายจากภาคสนามแสดงลักษณะปรากฏที่พบของตะกอนสีนามิปี ๒๕๔๗ ทั้งในภูมิประเทศแบบ wet swale และ dry swale (รูปบนซ้ายและขวา) และแสดงชั้นตะกอนทรายที่คาดว่าจะเป็นสีนามิในอดีตอยู่ใต้ชั้นตะกอนสีนามิปี	๓๙

๒๕๔๗ และชั้นดินธรรมชาติ (รูปล่าง) ที่พบในสภาพภูมิประเทศแบบ wet swale (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

- รูป ๔.๒๑ โครงสร้างพื้นผิวของตะกอนสีนํ้าที่บันทึกได้จากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง โดยพบเป็นลักษณะรอยรั้วคลื่นชนิดต่างๆ คือ (A) slightly straight-crested, (B) linguoid crested, (C) straight-crested และ linguoid-crested, และ (D) straight-crested ripple (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ ดร. วิชัย จุฑะโกสิทร์กานนท์ จาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๗ เผยแพร่ในวารสาร Terra Nova) ๘๐
- รูป ๔.๒๒ แนวการสำรวจและวัดระดับพื้นที่อย่างละเอียดจากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง (รูปบน) แสดงสภาพความสูงต่ำของพื้นที่เก็บตัวอย่าง (สีน้ำเงิน) และความหนาของตะกอนสีนํ้าปี ๒๕๔๗ (แสดงโดยสีชมพู) (รูปล่างแสดง) ตำแหน่งเก็บตะกอนเพื่อเอ็กซ์เรย์วิเคราะห์โครงสร้างภายในของชั้นตะกอน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์) ๘๑
- รูป ๔.๒๓ แสดงชั้นตะกอนที่ได้จากหลุมทดสอบตามแนวร่องสำรวจ (trench) จากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง หมายเลขหลุมเจาะเริ่มจากบริเวณด้านตะวันตกที่ใกล้ชายฝั่งทะเล (seaward) และหมายเลขหลุมเจาะเพิ่มขึ้นไปในทิศตะวันออก (landward) (ภาพจาก Wongkok ปี ๒๐๐๖) ๘๒
- รูป ๔.๒๔ ผลการเอ็กซ์เรย์โครงสร้างภายในของตะกอนสีนํ้าปี ๒๕๔๗ โดยรูปบนแสดงตำแหน่งและลักษณะชั้นตะกอนจริงจากร่องสำรวจพร้อมตำแหน่งเก็บตัวอย่าง (รูปกลาง) ผลการเอ็กซ์เรย์โดยสามารถเห็นลักษณะการพัดพาโดยกระแสนํ้าจากสีนํ้าที่เป็นชนิด supercritical flow และภาพล่างแสดงภาพสเก็ตโครงสร้างตะกอนที่ทั้งหมดบ่งบอกว่าเป็นลักษณะการสะสมตัวที่เป็น antidune (จาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๗ เผยแพร่ในวารสาร Terra Nova) ๘๓
- รูป ๔.๒๕ ลักษณะการสะสมตัวของตะกอนสีนํ้าปี ๒๕๔๗ จากหลุมทดสอบต่างๆ แสดงรูปแบบการสะสมตัวและโครงสร้างตะกอนที่แตกต่างกัน (รูปบนซ้าย) แสดงลักษณะการสะสมตัวของตะกอนที่มีการคัตขนาดเล็กลงไปขนาดใหญ่ด้านบน (reverse grading) และการสะสมตัวแบบปกติที่มีการคัตขนาดตะกอนจากใหญ่ขึ้นไปเล็กด้านบน (normal grading) (รูปบนขวา) ตะกอนสีนํ้าเข้าไปสะสมตัวในรูที่เกิดจากรากต้นไม้ถูกถอนออกไปโดยแรงจากสีนํ้า (รูปล่างซ้าย) แสดงชั้นตะกอนเดิมมีการถูกดึงขึ้นมาด้านบนจากกระแสนํ้าพัดพาของสีนํ้า (rip-up) และ (รูปล่างขวา) แสดงลักษณะการวางตัวของชั้นตะกอนสีนํ้าแบบขนานไปกับสภาพพื้นที่และกระแสนํ้าพัดพา (parallel lamination) (ภาพจาก Wongkok ปี ๒๐๐๖) ๘๔

- รูป ๔.๒๖ สภาพพื้นที่ลุ่มต่ำบริเวณด้านตะวันออกของหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ๘๕
 คณะทำงานเลือกสุ่มเจาะตัวอย่างตะกอนบริเวณนี้บนพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า
 ถ้าในกรณีที่มีสึนามิเกิดขึ้นในอดีต ตะกอนที่ถูกพามาโดยสึนามินั้นอาจถูกทับ
 ถมในบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำนี้ พื้นที่นี้เป็นที่โล่งไม่มีกิจกรรมของมนุษย์และอยู่ห่าง
 จากชายฝั่งปัจจุบันพอสมควร (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)
- รูป ๔.๒๗ สภาพหลุมขุดทดสอบเพื่อศึกษาชั้นตะกอนในเบื้องต้น บริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำหลัง ๘๖
 หาดกมลา จังหวัดภูเก็ต
- รูป ๔.๒๘ การเจาะสำรวจตะกอนโดยใช้เครื่องเจาะตะกอนแบบหมุน (hand auger) เพื่อ ๘๖
 สุ่มตัวอย่างพื้นที่และดูความเป็นไปได้ที่จะพบชั้นตะกอนทรายแทรกสลับกับ
 ตะกอนดินโคลน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)
- รูป ๔.๒๙ ภาพตัดขวางชั้นตะกอนบริเวณที่ลุ่มต่ำด้านหลังหาดกมลา ชั้นตะกอนสีเหลือง ๘๗
 แสดงตะกอนขนาดทรายเป็นหย่อมๆ แทรกสลับกับชั้นดินเหนียวโคลนเป็นส่วน
 ใหญ่ (ภาพโดย Dr. Brady Rhodes)
- รูป ๔.๓๐ (ซ้าย) ภาพดาวเทียมแสดงสภาพภูมิประเทศบริเวณบ้านทับละมุ และ (ขวา) ๘๘
 แผนที่แสดงสภาพธรณีสัณฐานวิทยาและพื้นที่สำรวจในรายละเอียด (ภาพจาก
 Rhodes และคณะปี ๒๐๐๖)
- รูป ๔.๓๑ ก้อนปะการังที่ถูกพัดพาจากสึนามิปี ๒๕๔๗ กระจัดกระจายตลอดแนวป่าชาย ๘๙
 เลนทับละมุ (ภาพโดย Dr. Brady Rhodes)
- รูป ๔.๓๒ การเจาะตะกอนโดยเครื่องมือเจาะแบบกระแทก (piston core) ซึ่งเก็บตะกอน ๘๙
 ได้อย่างต่อเนื่องถึงระดับความลึกกว่า ๕ เมตร (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)
- รูป ๔.๓๓ รศ.ดร.ปัญญา จารุศิริ ในขณะที่ขุดหลุมทดสอบเพื่อให้เห็นชั้นการสะสมตัวของ ๙๐
 ตะกอนในพื้นที่ทับละมุ (ภาพโดย ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว)
- รูป ๔.๓๔ สภาพหลุมทดสอบและการบันทึกรายละเอียดตะกอนที่พัดพาจากสึนามิใน ๙๑
 บริเวณแหลมปะการัง จังหวัดพังงา (ภาพโดย ผศ.ดร. ฐาสินี เจริญจิตต์)
- รูป ๔.๓๕ ชั้นตะกอนทรายสีขาวและทรายสีน้ำตาลแดงพบบนเกาะพระทอง เกิดจากการ ๙๒
 สะสมตัวจากกระบวนการทำงานของทะเลตั้งแต่สมัยไพลสโตซีน มีอายุการ
 สะสมตัวมานานมากกว่าหมื่นปี (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)
- รูป ๔.๓๖ การขุดร่องสำรวจหาตะกอนสึนามิในอดีตบริเวณที่ลุ่มต่ำหลังแนวสันทรายบน ๙๓

เกาะพระทองเมื่อเดือนเมษายน ๒๕๕๐ (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์)

- รูป ๔.๓๗ สภาพภูมิประเทศและธรณีสัณฐานวิทยานบนเกาะพระทองที่เป็นสันทรายสลับกับพื้นที่ลุ่มต่ำ พบหลักฐานทางตะกอนวิทยาของสึนามิโบราณสะสมตัวในที่ลุ่มต่ำ (บริเวณจุดสีแดง) (ภาพดาวเทียมจาก PointAsia.com ดัดแปลงโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์) ๕๓
- รูป ๔.๓๘ เจาะสำรวจตะกอนแม่ในพื้นที่ลุ่มต่ำที่มีน้ำขังด้านหลังแนวสันทราย (ภาพ ดร. ไบรอัน แอทวอร์เทอร์ กำลังสำรวจพื้นที่ บันทึกโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์) ๕๔
- รูป ๔.๓๙ (ภาพซ้าย) ชั้นตะกอนทรายแทรกสลับระหว่างชั้นดินโดยชั้นทรายสีเทาด้านบนสุดเป็นชั้นตะกอนสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ และ (ภาพขวา) ชั้นตะกอนสึนามิโบราณที่มีอายุราว ๖๐๐ ปี (สีขาวและแดงบนพลั่วสนามและไม้วัดมาตราส่วน มีความยาว ๑๐ เซนติเมตร) (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์) ๕๔
- รูป ๔.๔๐ ประมวลภาพชั้นตะกอนสึนามิโบราณที่ขุดสำรวจพบบนเกาะพระทอง จังหวัดพังงา (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์) ๕๕
- รูป ๔.๔๑ ภาพจาก Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงฟอรัมมินิเฟอราที่พบในตะกอนสึนามิในอดีตจากเกาะพระทอง จังหวัดพังงา (วิเคราะห์โดย ผศ.ดร. จุฬาลักษณ์ เจริญวิจิตรพันธ์) ๕๖
- รูป ๔.๔๒ ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างตะกอนสึนามิเพื่อศึกษาซากชีวิตไดอะตอมบนเกาะพระทอง วิเคราะห์โดย ดร. ยูกิ ซาโวะ จากกรมทรัพยากรธรณี ประเทศญี่ปุ่น หนึ่งในทีมงานที่ร่วมทำงานกับผู้วิจัยและคณะจากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยพบว่า ไดอะตอมมาจากหลายแหล่ง ได้แก่ จากพื้นทะเลลึก จากหาดทราย จากคลองน้ำกร่อย ซึ่งพบว่า ไดอะตอมจากน้ำทะเลลึกมีเปอร์เซ็นต์มากที่สุด ผลงานวิเคราะห์ไดอะตอมได้เผยแพร่แล้วในวารสาร Marine Micropaleontology เมื่อปลายปี ๒๕๕๒ ที่ผ่านมา (ภาพจาก Sawai *et al.*, 2009) ๕๗
- รูป ๔.๔๓ ผลการวิเคราะห์ชนิดพันธุ์ของซากชีวิตไดอะตอมในตะกอนสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ จากบริเวณเกาะพระทอง (ภาพจาก Sawai *et al.*, 2009) ๕๘
- รูป ๔.๔๔ ผลการกำหนดอายุชั้นตะกอนสึนามิในอดีตจากเกาะพระทอง (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอร์เทอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน) ๕๙

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง ๒.๑ แสดงสถานที่และวันเวลาในการวัดระดับชายหาดและการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวชายหาดในงานวิจัยนี้	๑๕
ตาราง ๒.๒ ข้อมูลรายละเอียดภาพจากดาวเทียมที่ใช้ในการวิจัย	๒๕
ตาราง ๒.๓ ความละเอียดจุดภาพ (Pixel resolution) ของข้อมูลภาพจากดาวเทียม	๒๖
ตาราง ๓.๑ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙	๓๕
ตาราง ๓.๒ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙	๓๕
ตาราง ๓.๓ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณโซฟีเทลเมจิก ลากูน รีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙	๔๒
ตาราง ๓.๔ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณโซฟีเทลเมจิก ลากูน รีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙	๔๒
ตาราง ๓.๕ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙	๔๕
ตาราง ๓.๖ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙	๔๕
ตาราง ๓.๗ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๔๙	๔๘
ตาราง ๓.๘ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๔๙	๔๘
ตาราง ๓.๙ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙	๕๐
ตาราง ๓.๑๐ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอนชายหาดบริเวณบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙	๕๑
ตาราง ๓.๑๑ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิก ลากูน รีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙	๕๒

ตาราง ๓.๑๒ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอน ชายหาดบริเวณไซไฟเทลเมจิกลาทุนรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙	๕๓
ตาราง ๓.๑๓ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙	๕๕
ตาราง ๓.๑๔ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอน ชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙	๕๖
ตาราง ๓.๑๕ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบ้านบาง เนียง (BN) ปี ๒๕๔๙	๕๗
ตาราง ๓.๑๖ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอน ชายหาดบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๔๙	๕๘

บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ ที่มาของโครงการ

สืบเนื่องจากธรณีพิบัติภัยแผ่นดินไหวและสึนามิ เมื่อ 26 ธันวาคม 2547 ที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบในเขต 6 จังหวัดทางฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย ได้แก่ ระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล ได้ก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างใหญ่หลวงต่อประเทศชาติ บุคคลสำคัญ ประชาชน ทั้งคนไทยและนักท่องเที่ยวจากต่างประเทศ ธรณีพิบัติภัยดังกล่าวอยู่เหนือความคาดหมายของ นักวิชาการทั่วโลก สาเหตุของการเกิดพิบัติภัย ผลกระทบทางกายภาพและชีวภาพได้มีการ ประเมินกันเป็นที่เรียบร้อยแล้ว แต่ก็ยังปรากฏคำถามทางวิชาการธรณีวิทยาและทางกายภาพ อื่นๆ ตามมามากมาย คำถามสำคัญหลักๆ ที่ว่านั่น คือ ต้องใช้เวลานานเท่าใดที่จะทราบว่ พื้นที่ที่สูญเสียจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมได้ และทำอย่างไรที่จะทราบและกำหนดคาบการเกิด วัฏจักร (recurrence) ของสึนามิ

การได้มาซึ่งคำตอบที่มีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและทาง ธรณีวิทยาที่ชัดเจน จะทำให้อย่างน้อยที่สุดการทราบระยะเวลาของการฟื้นตัวของพื้นที่ที่ได้รับ ผลกระทบทางกายภาพ และช่วงของระยะเวลาที่เกิดสึนามิในอดีตจะทำให้สามารถประเมินคาบ การเกิดวัฏจักรดังกล่าวในอนาคตได้ หลังจากเกิดพิบัติภัยดังกล่าว ยังไม่มีความชัดเจน โดยเฉพาะการคาดการณ์ช่วงเวลาและความเป็นไปได้ในเชิงพื้นที่และทางธรณีวิทยาของการเกิด แผ่นดินไหวในทะเลที่อาจจะก่อให้เกิดสึนามิ จากประเด็นดังกล่าวในทางวิชาการนับว่าเป็น คำถามที่ค้นหาคำตอบได้ยากที่สุด และยังไม่มีใครกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวใน ทะเลได้อย่างชัดเจนและแม่นยำ แต่ประวัติของการเกิดแผ่นดินไหวในอดีตที่ก่อให้เกิดสึนามิ ตามมานั้น ได้มีการศึกษากันอย่างจริงจังในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะในประเทศที่อยู่ใน แนวบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวในทะเลที่ก่อให้เกิดสึนามิ ดังเช่น สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น แต่ไม่ เคยมีการศึกษาในประเทศไทย

คำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านสึนามิจากประเทศที่มีประสบการณ์จริงในเรื่องดังกล่าวที่ ให้กับผู้วิจัย จัดได้ว่า เป็นคำแนะนำที่มีคุณค่าอย่างยิ่งในการเสริมสร้างองค์ความรู้ และพัฒนา งานวิจัยด้านแผ่นดินไหวและสึนามิในประเทศไทยให้เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม ผู้วิจัยและคณะ จากภาควิชาธรณีวิทยาได้สำรวจพื้นที่ที่คาดว่าจะพบการสะสมตัวของสึนามิในอดีตตลอดตาม แนวชายฝั่งทะเลอันดามัน และเกาะต่างๆ และประสบความสำเร็จในเบื้องต้น คือ พบการสะสม ตัวที่คาดว่าจะเกิดจากสึนามิในอดีตในหลายพื้นที่และคาดว่าจะพบลักษณะการสะสมตัว ดังกล่าวอีกในหลายพื้นที่ ตลอดจนข้อมูลพื้นฐานทางธรณีวิทยากายภาพที่ผู้วิจัยเองได้จัดทำขึ้น มีปริมาณมากพอที่จะใช้ในการสานต่องานวิจัยชิ้นนี้ให้เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะงานวิจัย นี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการค้นคว้า สืบหาประวัติการเกิดสึนามิในอดีตของประเทศไทย ซึ่งที่ผ่านมา ยังไม่มีกลุ่มวิจัยทางธรณีวิทยาไทยได้กระทำกันอย่างจริงจัง ผลการสำรวจและวิจัยโครงการนี้

คาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาการเรียนการสอนทางธรณีวิทยาของสื่อนามิที่สำคัญ และจะเป็นงานวิจัยที่เป็นที่สนใจในระดับสากลอย่างแท้จริงที่กระทำโดยนักธรณีวิทยาไทย

๑.๒ วัตถุประสงค์ของโครงการ

๑. สำรวจ เก็บข้อมูล และวิเคราะห์หลักฐานทางตะกอนวิทยาของสื่อนามิทั้งปัจจุบันและในอดีต รวมถึงธรณีแปรสัณฐานยุคใหม่ และแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้นในอดีต
๒. ประเมินคาบวิบัติซ้ำของสื่อนามิในอดีต และในอนาคต

๑.๓ วิธีดำเนินการวิจัย และแนวทางในการศึกษา

๑. จัดระบบฐานข้อมูลทางแผ่นดินไหวและสื่อนามิ โดยเฉพาะการเฝ้าติดตามข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว การสืบค้นงานวิจัยทั่วโลกในเรื่องข้อมูลสื่อนามิ โดยการจัดทำในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล
๒. การติดตามการฟื้นฟูทางกายภาพของระบบการหมุนเวียนตะกอนหน้าหาดที่สูญเสียไปจากผลของสื่อนามิ โดยจะแบ่งการดำเนินงานเป็นขั้นตอนย่อย ดังนี้
 - ๒.๑ การวัดระดับพื้นที่บริเวณหน้าหาดที่ถูกกัดเซาะจากสื่อนามิอย่างต่อเนื่อง ทุกๆ ๓ เดือน เพื่อการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ และประเมินอัตราการฟื้นฟูทางกายภาพในแต่ละพื้นที่ย่อย เช่น บริเวณแหลมปะการังถึงบ้านเขาหลัก จังหวัดพังงา
 - ๒.๒ การเก็บข้อมูลด้านตะกอนวิทยาเพื่อประเมินแหล่งที่มาของตะกอน ระบบการหมุนเวียนตะกอนบริเวณหน้าหาดในพื้นที่ทำการวัดระดับพื้นที่อย่างละเอียด
 - ๒.๓ การสำรวจสภาพการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศใต้น้ำนอกชายฝั่งทะเล หลังจากเหตุการณ์สื่อนามิ โดยใช้เครื่องมือวัดระดับความลึกใต้ทะเล โดยความร่วมมือจากทีมสำรวจจากมหาวิทยาลัยคาตาเนีย ประเทศอิตาลี
๓. ศึกษา สำรวจตะกอนสื่อนามิที่สะสมตัวเมื่อ ๒๖ ธันวาคม ๒๕๔๗ อย่างละเอียดในเชิงตะกอนวิทยา บรรพชีวินวิทยา และธรณีสัณฐานวิทยา เพื่อเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของตะกอนสื่อนามิในอดีตในพื้นที่แถบทะเลอันดามันของประเทศไทย โดยการศึกษา สำรวจภาคสนาม ประกอบด้วย
 - ๓.๑ เก็บตัวอย่างตะกอนสื่อนามิอย่างเป็นระบบ และต่อเนื่องจากการเก็บข้อมูลโดยทีมงานวิจัยในรอบปีที่ผ่านมา โดยการวางแนวขุดร่องสำรวจ (trenching) และการขุดหลุมทดสอบ (pitting) เพิ่มเติมเพื่อเก็บข้อมูลโครงสร้างตะกอน และความแตกต่างทางกายภาพอื่น โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างตะกอนโดยวิธีการคัดลอกตะกอนจริง (peel technique) การเก็บ

ตัวอย่างตะกอนเพื่อนำมาศึกษาโครงสร้างตะกอนขนาดเล็กมากที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า soft x-ray โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือ x-ray ทางการแพทย์ และการเก็บตัวอย่างตะกอนเพื่อศึกษาการเรียงตัวของเม็ดตะกอนในการที่จะกำหนดทิศทางการพัดพาโดยสึนามิ เพื่อประเมินความเร็วและความแรงของการพัดพา

๓.๒ เก็บตัวอย่างตะกอนที่อาจจะเป็นตะกอนสึนามิในอดีต จากพื้นที่ที่มีโอกาสพบตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามัน ซึ่งต้องใช้เทคนิคเดียวกันกับการเก็บตะกอนสึนามิในหัวข้อที่แล้ว แต่ต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่ในการขุดเจาะตะกอน เช่น เครื่องเจาะตะกอนแบบหมุน (hand auger) เครื่องเจาะตะกอนแบบกระแทก (piston corer) การขุดแนวสำรวจ (trenching) โดยใช้รถขุดหน้าตัดดินในช่วงความลึกมากขึ้น และทำการเก็บตัวอย่างชั้นตะกอนจริงโดยใช้ peel technique, soft x-ray ในทุกชั้นการสะสมตัวของตะกอนอย่างละเอียด โดยความร่วมมือจาก California State University (Fullerton)

๓.๓ เก็บตัวอย่างตะกอนหน้า (shoreface sediment) และสิ่งมีชีวิต ตั้งแต่บริเวณหน้าหาดปัจจุบันลงไปในพื้นที่ระดับความลึกต่างๆ เพื่อศึกษาชนิด ขนาดตะกอนและการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตในท้องทะเล ที่ถูกพัดพาขึ้นมาสะสมตัวบนบกโดยสึนามิ ซึ่งต้องใช้เรือประมงในการลากเก็บตัวอย่างตะกอนดังกล่าว

๓.๔ การเก็บตัวอย่างชั้นตะกอนสึนามิในอดีตโดยใช้เทคนิคการทำ peel ขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ต้องใช้เครื่องมือใหญ่ในการขุดเจาะตะกอนเพื่อนำมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะในกรณีที่พบชั้นตะกอนที่มีการสะสมตัวผิดปกติที่อาจจะเป็นการสะสมตัวโดยสึนามิ มีความจำเป็นต้องใช้เทคนิคนี้ในการดำเนินงาน

๔. ศึกษาตะกอนวิทยา บรรพชีวินวิทยา ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย

๔.๑ การจำแนกโครงสร้างตะกอนด้วยตาเปล่าโดยเทคนิคพิเศษที่สามารถเห็นโครงสร้างตะกอนขนาดเล็ก ที่เรียกว่า soft x-ray ซึ่งจะได้ทำการประยุกต์เครื่องมือ x-ray ที่ใช้ในการแพทย์ในการ x-ray ตะกอนสึนามิ

๔.๒ การศึกษาขนาดตะกอนโดยวิธี grain size analysis ในกรณีที่ตะกอนมีขนาดทราย จะใช้วิธี sieve analysis และ grain settling tube ส่วนในกรณีที่ตะกอนมีขนาดเล็กกว่าทราย จะใช้วิธี Laser granulometric analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ขนาดตะกอนที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

๔.๓ การศึกษาความเร็วและพฤติกรรมของการสะสมตัวของตะกอน ที่เรียกว่า grain settling analysis เพื่อคำนวณอัตราการสะสมตัวของตะกอนใน

สภาวะที่แตกต่างกัน เช่น การสะสมตัวในช่วงความเร็วและความลึกของระดับน้ำต่าง ๆ เป็นต้น

๔.๔ การกำหนดอายุตะกอนสีนํามีและอินทรีย์วัตถุในอดีต ต้องใช้การกำหนดอายุโดยคาร์บอน ๑๔ (C14 หรือ AMS dating) ซึ่งจะสามารถทราบค่าอายุของตะกอนและอินทรีย์วัตถุได้อย่างชัดเจน

๕. การประมวลผล และการวิเคราะห์ข้อมูล

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้เป็นงานริเริ่ม หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นโครงการแรกที่ทำการศึกษาตะกอนสีนํามีในอดีตของประเทศไทย ฉะนั้นการวิเคราะห์และประมวลผลมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องระดมมันสมองผู้เชี่ยวชาญในสาขาต่างๆ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้เสนอชื่อผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศดังกล่าวไว้แล้วในรายชื่อผู้ร่วมวิจัย โดยการดำเนินการระดมมันสมองในกลุ่มผู้วิจัยจากประเทศไทยและต่างประเทศดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง

๑.๔ ขอบเขตการวิจัย

เนื่องจากโครงการนี้เป็นการต่อยอดงานวิจัยเดิมจากผลงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กระทำงานวิจัยโดยผู้วิจัยและคณะเดิม ฉะนั้น ขอบเขตการดำเนินการจะเน้นเรื่องของการประยุกต์ข้อมูลทางธรณีวิทยา ธรณีสัณฐานวิทยา ธรณีแปรสัณฐาน และข้อมูลจริงจากการสำรวจภาคสนามเป็นหลัก และการวิเคราะห์อายุทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งต้องส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการต่างประเทศที่น่าเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินงานของโครงการในครั้งนี้ได้วางเป้าหมายหลักในการเก็บข้อมูลให้ได้มากที่สุด

๑.๕ ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินโครงการ

คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถนำเสนอผลงานวิจัยในรูปเอกสารวิชาการในวารสารวิชาการระดับนานาชาติได้อย่างน้อย ๒ บทความ ด้วยการวิจัยนี้กำลังเป็นที่สนใจทั้งในวงวิชาการธรณีวิทยา ธรณีสัณฐานวิทยาชายฝั่ง ตะกอนวิทยา และสามารถนำเสนอบทความในรูปการนำเสนอในการประชุมวิชาการต่างๆ อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ผลงานวิจัยทั้งที่ผ่านมา ผู้วิจัยและคณะได้นำมาใช้ในการเรียน การสอน นิสิต ทั้งในภาควิชาและนอกภาควิชา เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้ใหม่ๆ ให้เกิดขึ้น และผู้วิจัยก็ได้รับการติดต่อจากนักวิจัยผู้เชี่ยวชาญด้านแผ่นดินไหวและสีนํามีในการสานต่องานวิจัยนี้อย่างต่อเนื่อง

บทที่ ๒

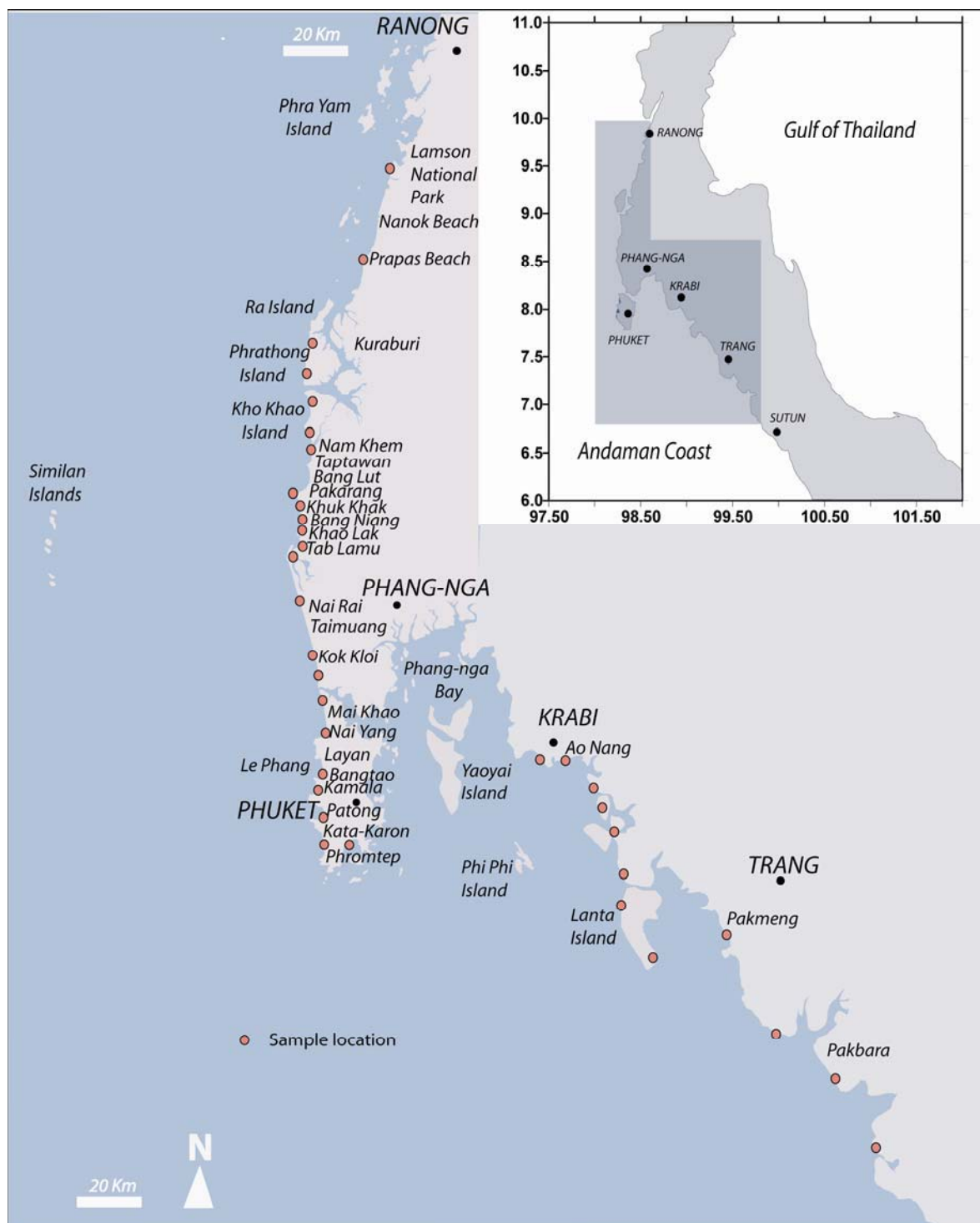
ขั้นตอนการวิจัยโดยละเอียด

๒.๑ การสำรวจการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพโดยละเอียด

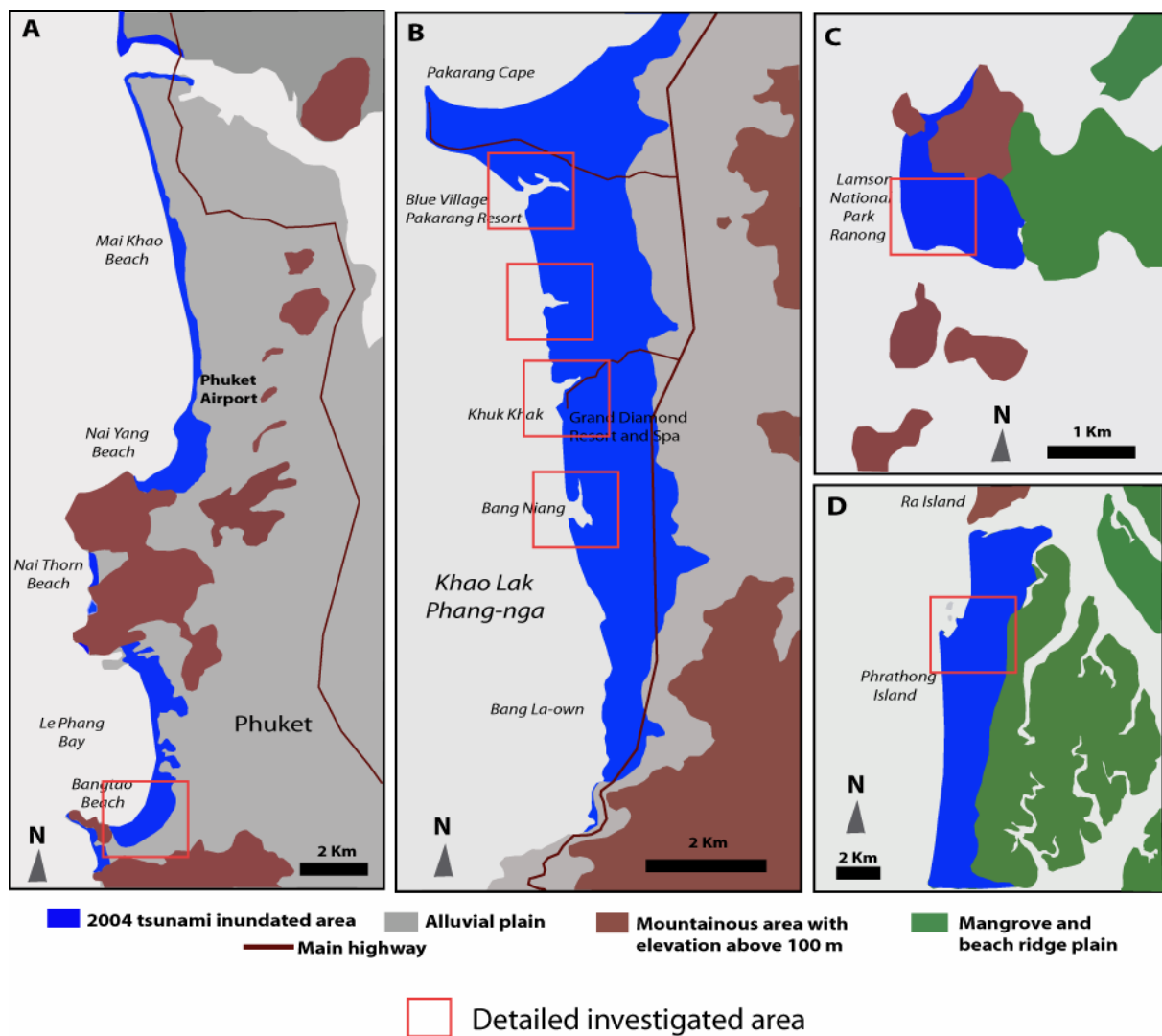
การสำรวจเพื่อติดตามการฟื้นฟูสภาพธรณีวิทยาและกายภาพมีความจำเป็นและความสำคัญในการที่จะประเมินผลว่าโดยกระบวนการทางธรรมชาติเองมีการฟื้นฟูและกลับคืนมาของสภาพธรณีวิทยาและกายภาพโดยใช้ระยะเวลาเท่าใด ผู้วิจัยและคณะได้ทำการสำรวจพื้นที่และติดตามการเปลี่ยนแปลงตลอดจนสำรวจหาพื้นที่ที่คาดว่าจะพบหลักฐานทางธรณีวิทยาของตะกอนสีนํ้าในอดีตก่อนเดือนหลังจากเหตุการณ์ การดำเนินงานเป็นไปด้วยความยากลำบากในการเข้าพื้นที่ในบางแห่ง โดยเฉพาะบนเกาะที่ยังมีผู้คนอาศัยอยู่ไม่มาก แต่ผลที่ได้รับจากการสำรวจนั้นเป็นสิ่งที่เกินความคาดหมายของทีมงานเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามในบทนี้จะได้อธิบายขั้นตอนการดำเนินงานอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

๒.๒ พื้นที่สำรวจตะกอนสีนํ้าบริเวณกว้าง

การกำหนดพื้นที่สำรวจและวัดระดับหน้าหาดรวมถึงเก็บตะกอนสีนํ้าได้อ้างอิงจากแผนที่แสดงน้ำทะเลท่วมจากสีนํ้า (inundation map) ที่ดำเนินการโดยทีมสำรวจจากภาควิชาธรณีวิทยา เมื่อปี ๒๕๔๘ โดยทำการเก็บตัวอย่างตะกอนสีนํ้าแบบสุ่มเก็บจากทั้งหมดมากกว่า ๒๕ ตำแหน่งกระจายตัวอย่างทั่วไปในพื้นที่ (ดังแผนที่ในรูป ๒.๑) อย่างไรก็ตาม คณะทำงานได้กำหนดพื้นที่ระดับรายละเอียดเพื่อเก็บตัวอย่างตะกอนอย่างเป็นระบบ ใน ๔ พื้นที่ (ดังรูปที่ ๒.๒)



รูป ๒.๑ แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตะกอนสีนามิตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามัน (จุดสีแดง) (แผนที่ดัดแปลงจาก Choowong และคณะ ปี ๒๐๐๘ วารสาร Terra Nova)



รูป ๒.๒ แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างโดยละเอียด (A) พื้นที่หาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต (B) พื้นที่แหลมวัดระดับการเปลี่ยนแปลงชายหาดตั้งแต่แหลมปะการังถึงเขาหลัก (C) พื้นที่อุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง และ (D) พื้นที่เกาะพระทอง จังหวัดพังงา (ภาพดัดแปลงจาก Choowong และคณะ ปี ๒๐๐๘ วารสาร Terra Nova)

๒.๓ การสำรวจภาคสนาม

จากการประเมินผลความเสียหายของพื้นที่ที่ถูกสึนามิกัดเซาะในบริเวณหน้าหาดพบว่า บริเวณชายหาดตั้งแต่แหลมปะการังลงไปถึงบริเวณบ้านเขาหลัก จังหวัดพังงา เป็นพื้นที่ที่ได้รับ ความเสียหายเชิงพื้นที่มากที่สุด ฉะนั้นการติดตามการเปลี่ยนแปลงบริเวณหน้าหาด เพื่อวัด อัตราการฟื้นตัวทั้งในแนวระนาบและแนวระดับเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การได้มาซึ่งตัวเลขที่ได้ จากการสำรวจที่ถูกต้องแม่นยำอย่างต่อเนื่องทุก ๓ เดือน และนำผลที่ได้ไปประเมินอัตราการ ฟื้นตัวทำให้ได้ผลการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของการฟื้นตัวที่ถูกต้องแม่นยำตามมา

การวัดระดับชายหาดได้ใช้อุปกรณ์กล้องสำรวจวัดระดับดิจิทัล (Digital survey camera) ยี่ห้อ Sokkia โดยได้ทำการวางแนววัดระดับในพื้นที่ปากคลอง ๔ พื้นที่ (ดูแผนที่ ๒.๒ (B) ประกอบ) คือ

- ๑) ปากคลองบริเวณที่ตั้งบลูเลจ ปะการัง รีสอร์ท
- ๒) ปากคลองบริเวณตอนเหนือของไซไฟเทล เมจิก ลากูน รีสอร์ท
- ๓) ปากคลองคึกคัก บ้านคึกคัก
- ๔) ปากคลองบางเนียง บ้านบางเนียง

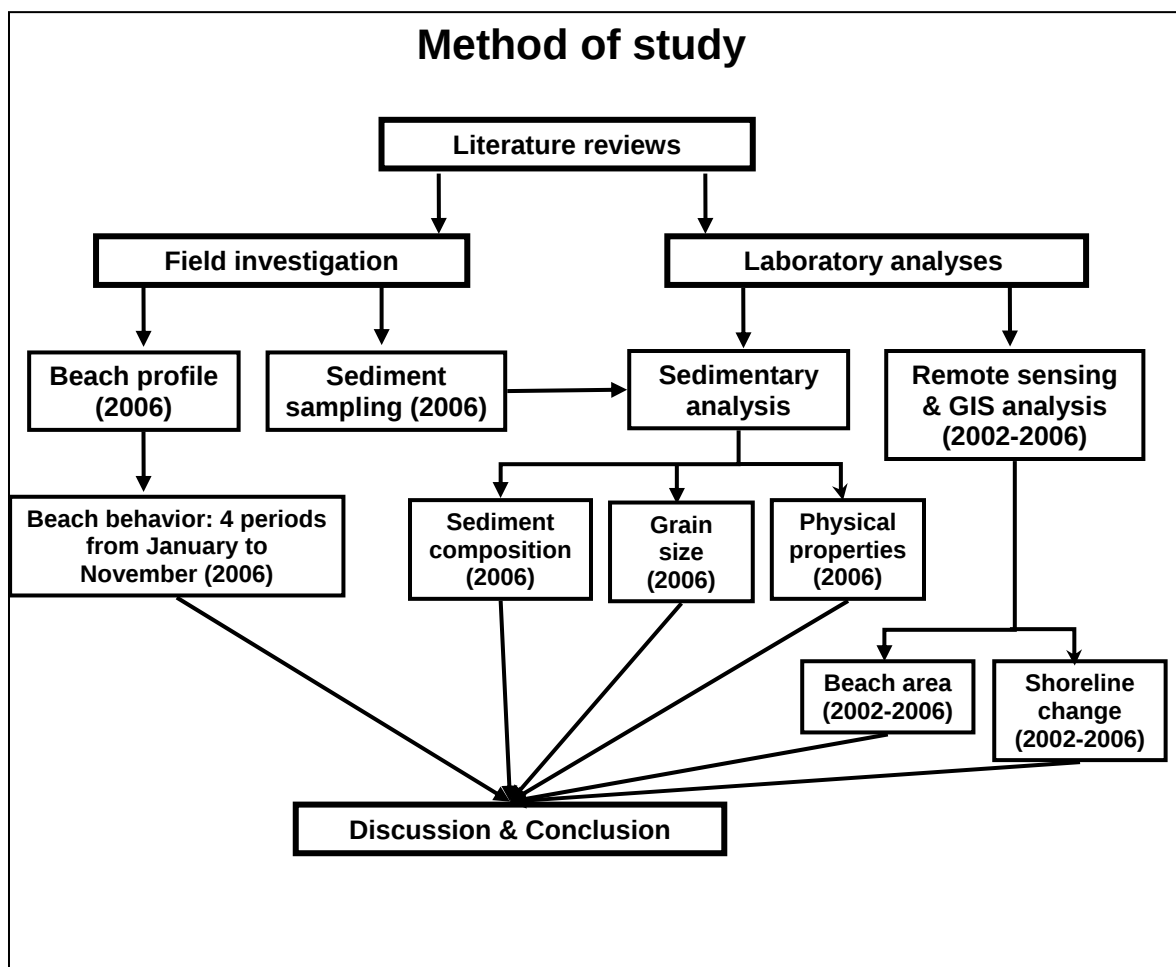
ในแต่ละพื้นที่ได้ออกแบบแนวการวัดระดับที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและ การวางตัวของแนวชายฝั่ง การวัดระดับได้กระทำในช่วงเวลาที่น้ำทะเลลดลงต่ำสุดเพื่อให้ได้ ข้อมูลในการคำนวณมุมเอียงเท (shoreface slope) ของหน้าหาดได้อย่างแม่นยำที่สุด และใน การวัดระดับทุกครั้งได้กำหนดจุดอ้างอิงเดียวกัน (reference point) เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการ คำนวณระยะทางและมุมเอียงเท ช่วงเวลาของการวัดระดับชายหาดได้กระทำประมาณทุก ๓ เดือนของปี ๒๕๔๙ โดยมีจุดประสงค์อีกประการเพื่อเปรียบเทียบอัตราการฟื้นตัวและอัตราการ หมุนเวียนตะกอนในรอบปีว่าในแต่ละฤดูกาลมีการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ทั้งแนวระนาบและแนว ระดับต่างกันอย่างไร



รูป ๒.๓ การวัดระดับหน้าหาดโดยใช้กล้องวัดระดับ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงษ์)

ข้อมูลโทรสัมผัสที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการติดตามการฟื้นสภาพชายฝั่งในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสึนามิ ซึ่งได้มีรายงานที่ได้รับการตีพิมพ์หลายฉบับได้แสดงข้อมูลเปรียบเทียบก่อนและหลังเกิดเหตุของพื้นที่ได้รับความเสียหายโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม และเนื่องจากในพื้นที่ศึกษานี้ยังไม่มีเคยมีรายงานเกี่ยวกับการติดตามการฟื้นตัวของชายฝั่งจากการกัดเซาะมาก่อน ขั้นตอนแรกของงานวิจัยในส่วนนี้จึงต้องเริ่มจากการศึกษาวิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการติดตามการฟื้นสภาพทางชายฝั่งทะเลจากงานวิจัยต่างๆ ในสาขาทางด้านการกัดเซาะชายฝั่งจากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อที่จะได้เลือกวิธีที่เหมาะสมนำมาปรับใช้ให้ได้ผลดีกับลักษณะทางพื้นที่บริเวณพื้นที่ศึกษาครั้งนี้โดยจะใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามนำมาวิเคราะห์ร่วมกัน

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้รวบรวมมาตั้งแต่ปี พ.ศ. ๒๕๔๕ - ๒๕๔๙ เพื่อศึกษาดูการฟื้นสภาพของชายฝั่งโดยเฉพาะในบริเวณชายหาดโดยข้อมูลโทรสัมผัสทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงในเชิงพื้นที่ และในส่วนของการเก็บข้อมูลจากภาคสนามจะประกอบด้วยการวัดระดับชายหาด และการเก็บตะกอนพื้นผิวชายหาด โดยการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบทุกๆ สามเดือนในช่วงปี ๒๕๔๙ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของชายฝั่งในแต่ละฤดูกาลหลังจากที่ชายฝั่งทะเลที่ได้รับผลกระทบได้มีการฟื้นสภาพบ้างแล้ว ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยแสดงเป็นแผนภูมิรูปภาพในรูปที่ ๒.๔



รูป ๒.๔ ขั้นตอนในการดำเนินการประเมินการฟื้นฟูสภาพธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะจากสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)

การเก็บข้อมูลภาคสนามของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การวัดระดับชายหาด และการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวบริเวณชายหาดซึ่งพื้นที่ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างข้อมูลอยู่ในบริเวณที่ที่เคยได้รับผลกระทบจากการกัดเซาะของสึนามิอย่างรุนแรง และได้มีการฟื้นตัวของชายหาดแล้วประมาณร้อยละ ๗๐ ในวันที่เริ่มทำการสำรวจเก็บข้อมูล

๒.๓.๑ การวัดระดับชายหาด (Beach profiling)

การวัดระดับชายหาด คือ การวัดลักษณะรูปร่างของภูมิประเทศในแนวทิศทางตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดระดับชายหาดที่เป็นระบบแน่นอน โดยมีการบันทึกข้อมูลอย่างสม่ำเสมอในหลายๆ ช่วงเวลาจะเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำมาใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลซึ่งอาจเกิดการสะสมตัว (ชายฝั่งทะเลงอกออกไป) หรืออาจเกิดการกัดเซาะ (ชายฝั่งทะเลถอยร่นเข้ามา) และใช้ในการติดตามการฟื้นตัวของชายฝั่งหลังเกิด

เหตุพิบัติภัยรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ชายฝั่ง เช่น หลังเหตุการณ์พายุหรือหลังเหตุการณ์สึนามิ เป็นต้น โดยข้อมูลจะสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของพื้นที่ชายฝั่งทะเลในบริเวณนั้นว่าเป็นชายฝั่งแบบสะสมตัว ชายฝั่งคงที่ หรือชายฝั่งแบบกัดเซาะ ซึ่งจะดูได้จากข้อมูลการวัดระดับชายหาด เช่น ในรอบ ๑๐ ปี ลักษณะของชายฝั่งทะเลมีการสะสมตัวหรือกัดเซาะ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใดซึ่งการเก็บข้อมูลในระยะยาวอย่างต่อเนื่องจะทำให้เห็นพัฒนาการหรือ วัฏจักรวงจรของชายฝั่งทะเลในพื้นที่นั้นๆ และสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการสะสมตัว หรือการกัดเซาะของพื้นที่ชายฝั่งในบริเวณนั้นๆ ได้ด้วย ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการคิดวางแผนการพัฒนาการใช้ที่ดินแถบชายฝั่งทะเลในบริเวณนั้นได้ด้วย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำเอาเทคนิควิธีการวัดระดับชายหาดจากหลายวิธีที่กระทำกันอยู่ในแวดวงการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ทางทะเล และด้านธรณีสัณฐานวิทยา มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ศึกษาในบริเวณแหลมปะการัง-เขาหลัก จ.พังงา วิธีการวัดระดับชายฝั่งทะเลที่นิยมใช้กันทั่วไปโดยในขั้นแรกต้องมีการกำหนดจุดอ้างอิงซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในงานวัดระดับทุกประเภท โดยทั่วไปจุดอ้างอิงจะอยู่หลังพื้นที่ชายหาดโดยจะอยู่บนแผ่นดิน เป็นจุดที่มั่นคง แข็งแรงและไม่มีการเคลื่อนย้าย เช่น อาจเป็นเสาปูน อนุสาวรีย์ หรือสิ่งปลูกสร้างที่มีความมั่นคง การวัดระดับชายหาดจะต้องเริ่มจากจุดอ้างอิงทุกครั้งเพื่อความถูกต้องของข้อมูล แล้วเริ่มวัดไปในทิศทางสู่ทะเลให้เป็นเส้นตรงตั้งฉากกับชายฝั่ง โดยจะทำการบันทึกข้อมูลทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนความลาดชันของพื้นที่ และหยุดบันทึกข้อมูลเมื่อลงไปถึงระดับน้ำทะเลที่มีความลึกประมาณ ๕๐ เซนติเมตร ดังรูป ๒.๕ การวัดระดับชายหาดในงานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลในบริเวณพื้นที่เดิมทั้งหมด ๔ ครั้ง ในรอบปี พ.ศ. ๒๕๔๙ และช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลจะเลือกช่วงที่น้ำทะเลลงต่ำสุดเพื่อให้ได้พื้นที่ของชายหาดในบริเวณระดับน้ำลงต่ำสุดด้วย ซึ่งในบริเวณพื้นที่ศึกษานี้ระดับความแตกต่างของน้ำขึ้น-น้ำลง เท่ากับ ๑.๕๕ เมตร โดยในบางพื้นที่ที่ชายหาดมีความลาดชันน้อยเช่นที่ บูลิวเลจปะการังรีสอร์ท ระยะทางในแนวราบของเขตระดับน้ำขึ้นสูงสุดกับระดับน้ำลงต่ำสุดมีระยะทางต่างกันประมาณ ๑๐๐ เมตร ดังนั้นหากทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาน้ำขึ้นสูงสุด ข้อมูลในแนวระดับที่แสดงถึงลักษณะของภูมิประเทศบริเวณใต้เขตนํ้าขึ้นสูงสุดจะหายไปเป็นระยะทางในแนวราบถึง ๑๐๐ เมตร



รูป ๒.๕ ภาพแสดงวิธีการวัดระดับชายหาดและการทำภาพตัดขวางของปากคลองในบริเวณพื้นที่ศึกษาโดยทำการวัดระดับและเก็บตะกอนบริเวณหน้าหาดไปพร้อมกัน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช)

๒.๓.๒ การเก็บตัวอย่างตะกอนหน้าหาดและการวิเคราะห์ (Sediment sample collection and analysis)

พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยลักษณะทางธรณีสัณฐานที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่ง การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัณฐานที่เกิดขึ้นบ่อยในบริเวณนี้คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของตะกอนชายหาดในแต่ละบริเวณจะมีลักษณะบางประการที่ทำให้หาดแต่ละหาดมีความแตกต่างกัน สิ่งนั้นคือลักษณะของเนื้อตะกอน (texture) ตะกอนชายหาดและส่วนประกอบของทรายที่ชายหาดนั้น ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงแหล่งของตะกอนที่มีอยู่ในบริเวณพื้นที่นั้นๆ ลักษณะของเนื้อตะกอนชายหาดในบริเวณขนานกับแนวชายฝั่งและในบริเวณตั้งฉากกับแนวชายฝั่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่พาตะกอนเหล่านั้นมาสะสมตัว และบอกถึงความคงที่อยู่ตัวหรือไม่อยู่ตัวในบริเวณ ชายหาดส่วนนอก (foreshore) และ หาดบริเวณใกล้ชายฝั่ง (nearshore zones)

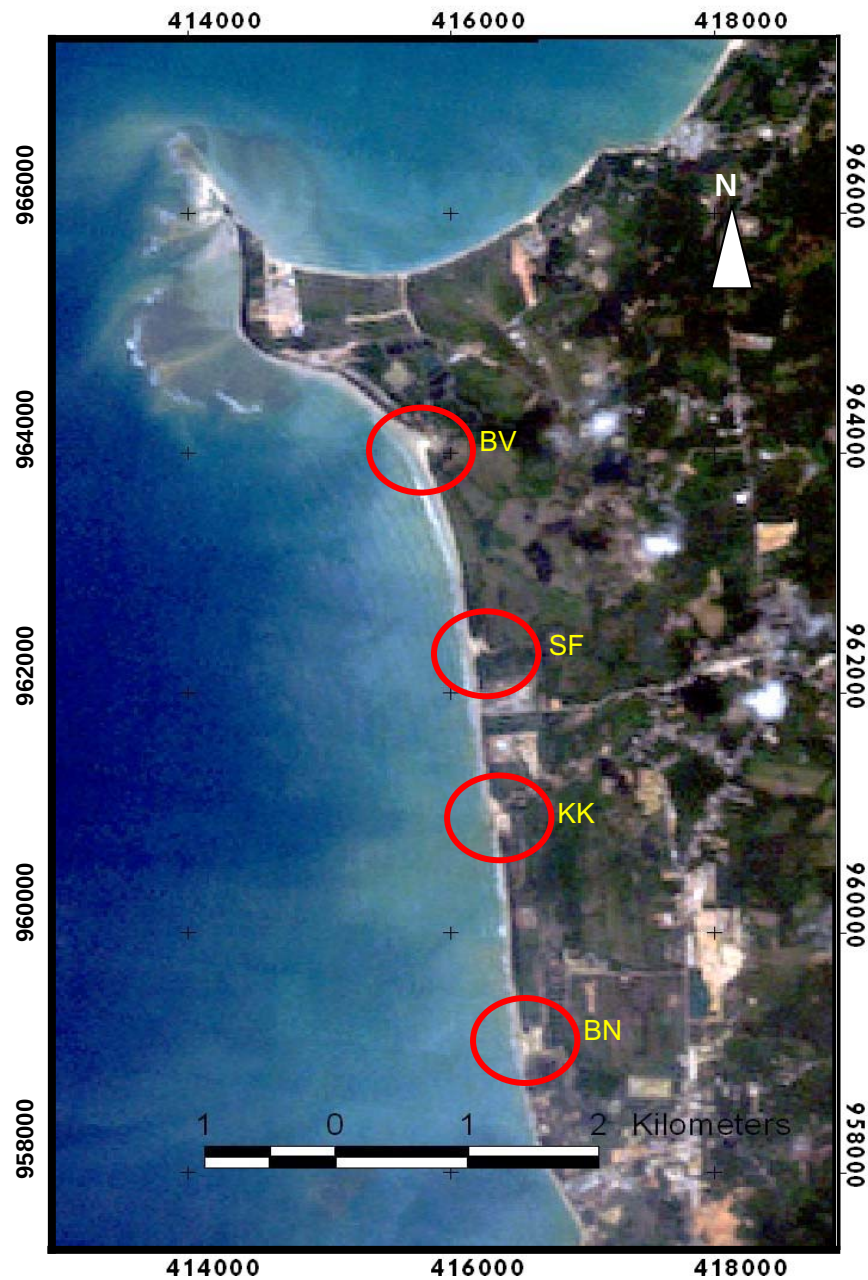
ตะกอนพื้นผิวบริเวณชายหาดสามารถใช้เป็นข้อมูลที่แสดงถึงพลังงานของตัวกลางในบริเวณนั้นเช่นเดียวกับการบ่งชี้กระบวนการและการเคลื่อนตัวของตะกอนในระยะยาวได้ เช่น เส้นทางเคลื่อนที่ของตะกอนในงานวิจัยนี้จะเก็บตะกอนพื้นผิวชายหาดในพื้นที่เดียวกับที่ทำการวัดระดับชายหาด โดยจะเก็บในแนวเดียวกับแนวที่วัดระดับทุกๆ ๒๐ เมตร จากจุดอ้างอิง

เดียวกัน และจุดที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะฐานที่เด่นชัดเช่น ยอดสันทราย (crest of the ridge) และจะเก็บตัวอย่างด้วย ดังรูป ๒.๖

ในการวิจัยครั้งนี้พื้นที่ศึกษาในการวัดระดับชายหาดและการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวชายหาด แบ่งออกเป็น ๔ พื้นที่ระหว่างแหลมปะการังถึงเขาหลัก จ.พังงา โดยเป็นพื้นที่ใกล้บริเวณปากคลองซึ่งถูกการกัดเซาะอย่างรุนแรงจากสึนามิ (รูป ๒.๗) ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลภาคสนามแบ่งออกเป็น ๔ ช่วงดังแสดงในตาราง ๒.๑



รูป ๒.๖ รูปภาพแสดงการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวชายหาดจากจุดอ้างอิงบนฝั่งไปจนถึงแนวระดับน้ำทะเลลดลงต่ำสุด (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์ และ สุเมธ พันธุวงศ์ราช)



รูป ๒.๗ ภาพจากดาวเทียม LANDSAT-5 แสดงพื้นที่วัดระดับชายหาดและเก็บตะกอนพื้นผิว
ชายหาด (ในวงกลม) บริเวณตอนเหนือของบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) โซฟีเทลเม
จิกลาญรีสอร์ท (SF) คลองคึกคัก (KK) และบ้านบางเนียง (BN) (บันทึกภาพก่อน
เหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี) (ภาพโดย สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช)

ตาราง ๒.๑ แสดงสถานที่และวันเวลาในการวัดระดับชายหาดและการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นผิวชายหาดในงานวิจัยนี้

พื้นที่สำรวจ	วันที่ทำการเก็บข้อมูล			
	ครั้งแรก	ครั้งที่สอง	ครั้งที่สาม	ครั้งที่สี่
บลูวิลเลจ ปะการังรีสอร์ท	20-21/01/2006	11/05/2006	12/08/2006	07/11/2006
โซฟีเทลเมจิกลาгуนรีสอร์ท	20/01/2006	03/06/2006	14/08/2006	09/11/2006
คลองคึกคัก	21/01/2006	10/05/2006	13/08/2006	08/11/2006
บ้านบางเนียง	07/02/2006	10/05/2006	14/08/2006	10/11/2006

๒.๓.๓ การวิเคราะห์ตะกอนพื้นผิวชายหาด

หลังจากทำการเก็บตัวอย่างตะกอนมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างตะกอนเหล่านั้นในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างตะกอนทั้งหมด ๒๘๘ ตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างทั้งหมดสี่ครั้งในรอบปี ๒๕๔๙ โดยผลของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจะนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับลักษณะเฉพาะของตะกอนพื้นผิวชายหาดในสี่พื้นที่ที่ทำการศึกษาวิธีการในการวิเคราะห์ตะกอนพื้นผิวชายหาดในห้องปฏิบัติการแบ่งออกเป็น ๓ ขั้นตอนดังต่อไปนี้

๑. การวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวขนาดของเม็ดตะกอน (Grain-size analysis)

การวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวขนาดของเม็ดตะกอนในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การคำนวณหาค่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดตะกอนและค่าทางสถิติอื่นๆ ของตะกอนใช้วิธี moment of method ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการคำนวณค่าทางสถิติต่างๆ เพื่อใช้จำแนกประเภทของการสะสมตัวของตะกอนที่ต่างกันไป เครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของตะกอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีดังต่อไปนี้ ตะแกรงคัดขนาด (sieve mesh) เครื่องคัดขนาด (sieve shaker) เครื่องชั่งน้ำหนัก (weight measurement) และตู้อบ (oven)

ก. ขั้นตอนในการวิเคราะห์การคั้ขนาดของตะกอน

๑. อบตัวอย่างตะกอนให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ ๘๐ องศาเซลเซียส ประมาณ ๕ ถึง ๖ ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากตะกอน
๒. ผสมตัวอย่างตะกอนที่แห้งแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำตัวอย่างตะกอนไปชั่งน้ำหนัก โดยปริมาณของตะกอนที่จะใช้หาค่าการคั้ขนาดของเม็ดตะกอนขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดตะกอน เช่น ตะกอนทรายขนาดหยาบ (coarse grain) ใช้ ๕๐๐ กรัม ตะกอนทรายขนาดกลาง (medium grain) ใช้ ๒๐๐ กรัม ตะกอนทรายขนาดละเอียด (fine grain) ใช้ ๑๐๐ กรัม
๓. เตรียมตะแกรงคั้ขนาด (sieve mesh) เบอร์ ๕ ๑๐ ๑๘ ๓๕ ๖๐ ๑๒๐ และ ๒๓๐ ตามขนาดมาตรฐานของ (A.S.T.M.)
๔. ใส่ตัวอย่างตะกอนที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในตะแกรงคั้ขนาดที่เลือก จากนั้นนำตะแกรงไปวางบนเครื่องคั้ขนาดใช้เวลา ๑๐ นาที
๕. นำตัวอย่างตะกอนในตะแกรงแต่ละอันที่คั้ขนาดแล้วใส่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้โดยแยกตามตะแกรงแต่ละเบอร์
๖. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างตะกอนในแต่ละบีกเกอร์และจดบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางบันทึกข้อมูล รูป ๒.๑๑
๗. การคำนวณหาค่าตัวแปรทางสถิติโดยใช้ตารางในรูป ๒.๑๒



รูป ๒.๘ การเตรียมตัวอย่างตะกอนที่เก็บได้จากบริเวณหน้าหาดที่ถูกกัดเซาะจากสึนามีก่อน
นำเข้าสู่อบแห้งเพื่อการวิเคราะห์ขนาดตะกอนโดย sieving test (ภาพโดย สุเมธ พันธุ
วงศ์ราช)



รูป ๒.๙ รูปภาพแสดงการอบตัวอย่างตะกอนภายในตู้อบที่อุณหภูมิ ๘๐ องศาเซลเซียส โดยใช้ เวลาประมาณ ๕-๖ ชั่วโมงเพื่อให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างตะกอนทั้งหมด (ภาพโดย สุเมธ พันธวงศ์รัช)



รูป ๒.๑๐ รูปภาพแสดง ตะแกรงคัดขนาด (sieve mesh) และเครื่องคัดขนาด (sieve shaker) รูป (A) และเครื่องชั่งน้ำหนัก (weight measurement) รูป (B) (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)

ข. การคำนวณหาค่าตัวแปรทางสถิติ

เนื่องจากตัวอย่างตะกอนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีเป็นจำนวน ๒๘๘ ตัวอย่าง วิธีที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าตัวแปรทางสถิติจึงเป็นวิธี method of moments ซึ่งเหมาะกับการคำนวณที่ใช้ตัวอย่างจำนวนมากโดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

ขั้นแรกทำการคำนวณค่าน้ำหนักของตัวอย่างที่คัดขนาดแล้วโดยกรอกข้อมูลลงในตารางค่าน้ำหนักที่เหลือ (รูป ๒.๑๑) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักตะกอนทั้งหมด และช่องน้ำหนักสะสมซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักตะกอนทั้งหมดเช่นเดียวกัน จากนั้นใส่ค่าน้ำหนักของตัวอย่างตะกอนแต่ละขนาดลงในคอลัมน์ ๓ รูป ๒.๑๒

ขั้นตอนต่อไปคูณค่าน้ำหนักของตะกอนแต่ละขนาด (W ในคอลัมน์ ๓) ด้วยค่า midpoint (D ในคอลัมน์ ๒) แล้วใส่ผลที่ได้ ($D \times W$) ลงในคอลัมน์ ๔ จากนั้นหาผลรวม ของค่าตัวแปรในคอลัมน์ ๓ และ ๔ แล้วหารผลรวมของ ($D \times W$) ด้วย W จะได้ moment ที่ ๑ ซึ่งเท่ากับค่า mean

ขั้นตอนต่อไป นำค่า mean ที่ได้ลบด้วยค่า midpoint (D ในคอลัมน์ ๒) แล้วใส่ผลลัพธ์ลงในคอลัมน์ ๕ ซึ่งจะเป็นค่า midpoint deviation ($D - M$) นำค่า midpoint deviation ไปยกกำลัง ๒, ๓, และ ๔ แล้วใส่ค่าที่ได้ลงในช่องที่ ๖, ๗, และ ๘ ตามลำดับ

ขั้นตอนต่อไปให้นำค่า W ในคอลัมน์ที่ ๓ คูณด้วยค่าที่ได้ในช่องที่ ๖, ๗, และ ๘ ตามลำดับ แล้วใส่ค่าที่ได้ลงในคอลัมน์ที่ ๙, ๑๐, และ ๑๑ ตามลำดับ ต่อจากนั้นหารค่าผลรวมของคอลัมน์ที่ ๙ ด้วยค่าผลรวมของคอลัมน์ที่ ๓ (W จาก คอลัมน์ที่ ๓) จะได้ค่าโมเมนต์ที่ ๒ ซึ่งคือค่า variance ต่อจากนั้นให้นำค่า moment ที่ ๒ (variance) มาหารค่ารากที่สองจะได้เป็นค่า moment ที่ ๓ ซึ่งคือค่า standard deviation

Report on sieve
analysis

Area
Profile
Date

Sample Number	Sample Weight	Screen Mesh Number	Particle Size	Weight Retained	Weight Percent	Cumulative Weight %	Remarks
		# 5	4 mm				
		# 10	2 mm				
		# 18	1 mm				
		# 35	500 μ m				
		# 60	250 μ m				
		# 120	125 μ m				
		# 230	63 μ m				
		tray					
		Total					
		Sieve loss					
					100	100	

รูป ๒.๑๑ แสดงตารางที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของเม็ดตะกอนที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว

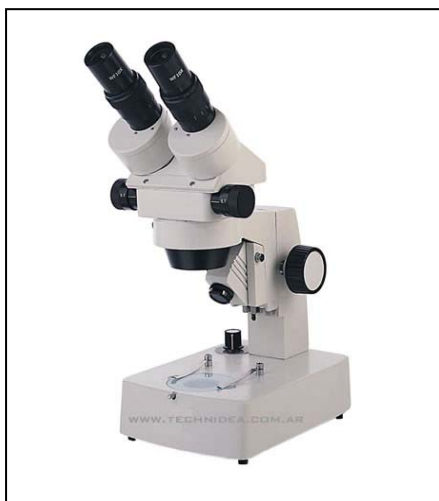
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Class interval (mm)	D Midpoint (mm)	W Weight (g)	D × W Product	D - M Midpoint deviation	(D - M) ²	(D - M) ³	(D - M) ⁴	W(D - M) ²	W(D - M) ³	W(D - M) ⁴
1-2	1.5									
0.5-1	0.75									
0.25-0.5	0.375									
0.125-0.25	0.1875									
0.0625-0.125	0.938									
pan	0.031*									

	Moment	Standard notation	Notation used in grain-size calculation	Calculation	Answer	Statistic
Eqn 1	m_1	$\sum x/n$	$\sum(D \times W)/\sum W$	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	mean (M)
Eqn 2	m_2	$\sum(x - \bar{x})^2/(n - 1)$	$\sum W(D - M)^2/\sum W$	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	variance
Eqn 3			$\sqrt{m_2}$	= $\sqrt{\quad}$	= $\quad$	standard deviation
Eqn 4	m_3	$\sum(x - \bar{x})^3/(n - 1)$	$\sum W(D - M)^3/\sum W$	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	
Eqn 5			$m_3/m_2^{3/2}$	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	skewness
Eqn 6	m_4	$\sum(x - \bar{x})^4/(n - 1)$	$\sum W(D - M)^4/\sum W$	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	
Eqn 7			m_4/m_2^2	= $\frac{\quad}{\quad}$	= $\quad$	kurtosis

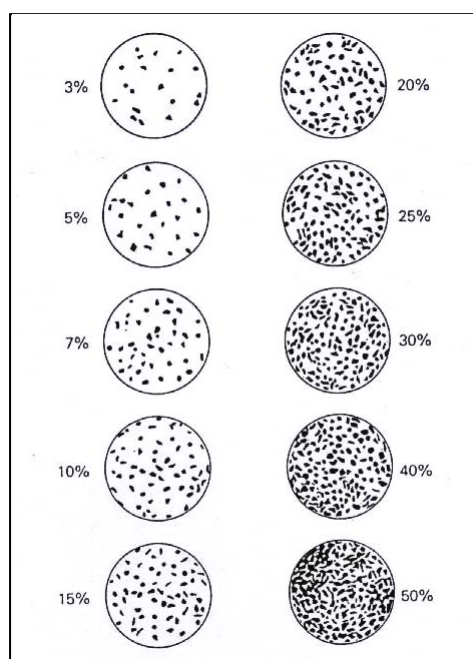
รูป ๒.๑๒ รูปแสดงตารางคำนวณหาค่าตัวแปรทางสถิติของเม็ดตะกอนที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว
(จาก Fritz and Moore, 1988)

๒. การวิเคราะห์หาส่วนประกอบของตะกอน

ส่วนประกอบของตะกอนพื้นผิวชายหาดทำการตัดแยกปริมาณภายใต้กล้องไมโครสโคป (รูป ๒.๑๓) โดยเปรียบเทียบกับแผนภูมิ standard chart of sediment's percentage composition (รูป ๒.๑๔)



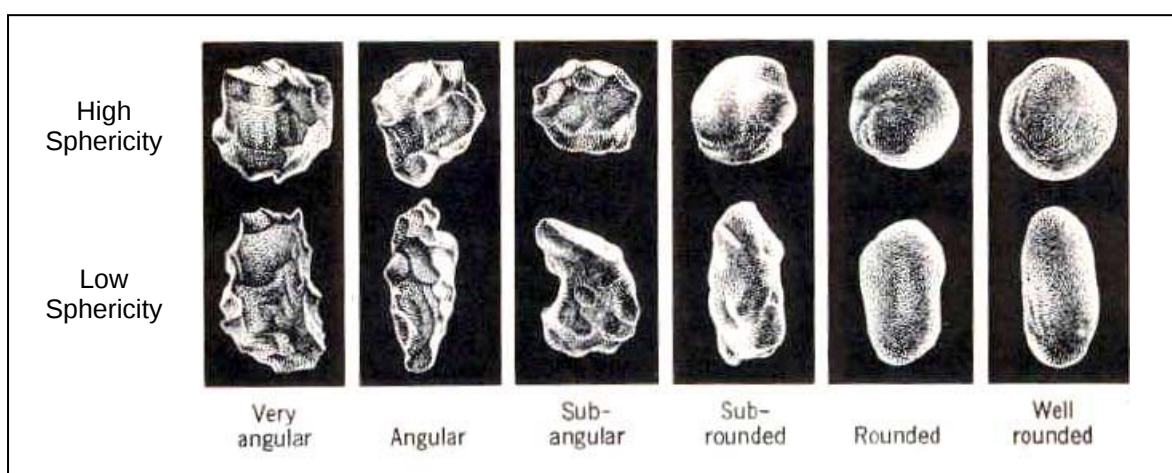
รูป ๒.๑๓ รูปภาพแสดงชนิดกล้องไมโครสโคปที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบตะกอน



รูป ๒.๑๔ แผนภูมิที่ใช้ในการประเมินส่วนประกอบของตะกอนในงานวิจัยนี้ (จาก Fritz and Moore, 1988)

๓. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของตะกอนคือ ความกลมมน และรูปร่างของเม็ดตะกอน ความกลมมนและรูปร่างเป็นลักษณะทางกายภาพของเม็ดตะกอนซึ่งสามารถใช้เป็นบ่งบอกถึงระยะทางจากแหล่งกำเนิดและความรุนแรงของตัวกลางที่พาตะกอนมา โดยการวิเคราะห์จะดูจากลักษณะรูปร่างของเม็ดตะกอนแล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปร่างมาตรฐานที่ใช้เป็นรูปภาพเปรียบเทียบ เช่น รูปภาพของ (Krumbein, 1941; Powers, 1953; Pettijohn, 1957; Barrett, 1980) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ของ Powers (1953) (รูป ๒.๑๕)



รูป ๒.๑๕ รูปภาพแผนภูมิที่ใช้ในการประเมินลักษณะทางกายภาพของเม็ดตะกอนในการวิจัยนี้ (ดัดแปลงจาก Powers, 1953)

๒.๔ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม (Remote sensing and GIS analysis)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้งหมด ๑๒ ช่วงเวลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. ๒๕๔๕ - ๒๕๔๙ (ตาราง ๒.๒) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียมทั้งหมด ๔ ดวง คือ IKONOS, SPOT-5, ASTER และ LANDSAT-5 TM ซึ่งข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมมีความละเอียดของจุดภาพ (Pixel resolution) แตกต่างกันไปดังตาราง ๒.๓

ตาราง ๒.๒ ข้อมูลรายละเอียดภาพจากดาวเทียมที่ใช้ในการวิจัย

วันที่	ดาวเทียม	เวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล (ประเทศไทย)	ช่วงเวลาน้ำขึ้น-ลง*	แหล่งที่มาของ ข้อมูล
15/11/2545	ASTER	-	น้ำลง	NASA**
13/01/2546	IKONOS	11:11:49 AM	น้ำลง	CRISP
01/03/2547	LANDSAT-5 TM	10:24:29 AM	น้ำลง	GISTDA
09/09/2547	LANDSAT-5 TM	10:29:09 AM	น้ำลง	GISTDA
29/12/2547	IKONOS	10:53:46 AM	-	GISTDA
30/12/2547	LANDSAT-5 TM	10:31:23 AM	-	GISTDA
31/12/2547	ASTER	-	-	NASA**
16/02/2548	LANDSAT-5 TM	10:32:03 AM	น้ำลง	GISTDA
05/04/2548	LANDSAT-5 TM	10:32:34 AM	น้ำขึ้น	GISTDA
29/06/2548	SPOT-5	11:13:26 AM	น้ำลง	GISTDA
16/03/2549	SPOT-5	11:11:30 AM	น้ำขึ้น	GISTDA
26/11/2549	SPOT-5	11:07:50 AM	น้ำขึ้น	GISTDA

ช่วงเวลาน้ำขึ้น-ลง* = เทียบกับตารางมาตรฐาน น้ำขึ้นน้ำลง ที่อำเภอทับละมุ จังหวัดพังงา ของ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

CRISP= Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing National University of
Singapore

GISTDA= Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public
Organization) (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การ
มหาชน))

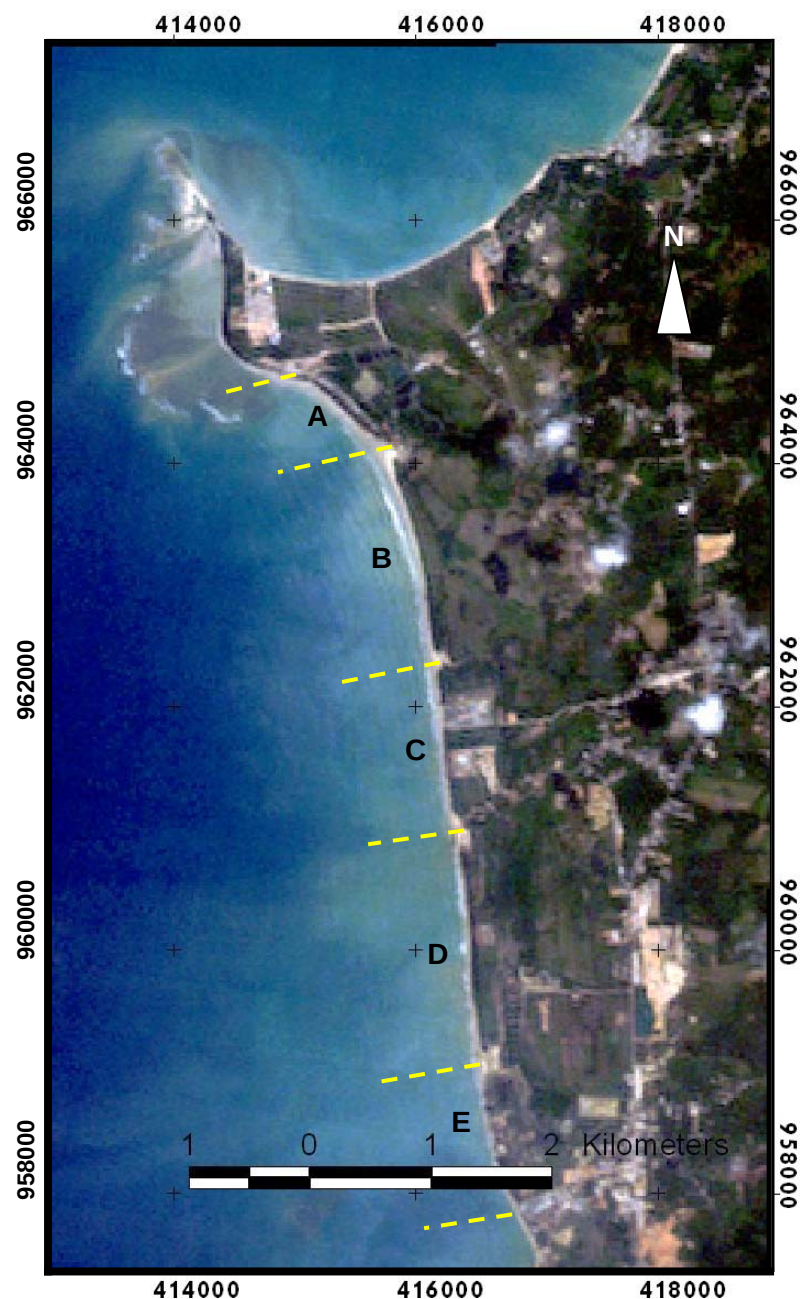
NASA** = NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team

ตาราง ๒.๓ ความละเอียดจุดภาพ (Pixel resolution) ของข้อมูลภาพจากดาวเทียม

ดาวเทียม	ความละเอียดจุดภาพ (เมตร)
IKONOS	1
SPOT-5	2.5
ASTER	15
LANDSAT-5 TM	30

ข้อมูลภาพจากดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่ง จากดาวเทียมหลายดวง ซึ่งบันทึกข้อมูลมาจากช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการปรับแก้ข้อมูลเชิงเรขาคณิต (Geometrical correction) เพื่อแก้ค่าความบิดเบี้ยวของภาพซึ่งเกิดจากค่าพารามิเตอร์ และความแตกต่างของเซนเซอร์ของดาวเทียมแต่ละดวงที่ต่างกันให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันก่อนที่จะนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกัน การปรับแก้ข้อมูลเชิงเรขาคณิตหรือการทำ Geometric Correction เป็นการปรับแก้ค่าพิกัดเชิงภูมิศาสตร์เพื่อให้เข้าสู่ระบบ UTM หรือระบบที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการปรับแก้ข้อมูลให้อยู่ในระบบพิกัด Universal Transverse Mercator Projection โดยใช้หมุดควบคุม WGS 84 หลังจากทำการปรับแก้ความเพี้ยนของข้อมูลแล้ว ข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้งหมดจะนำมาให้ค่าพิกัดโดยใช้วิธี First order nearest neighbor methods และการถ่ายข้อมูลพิกัดของภาพจะใช้วิธี Least square regression methods

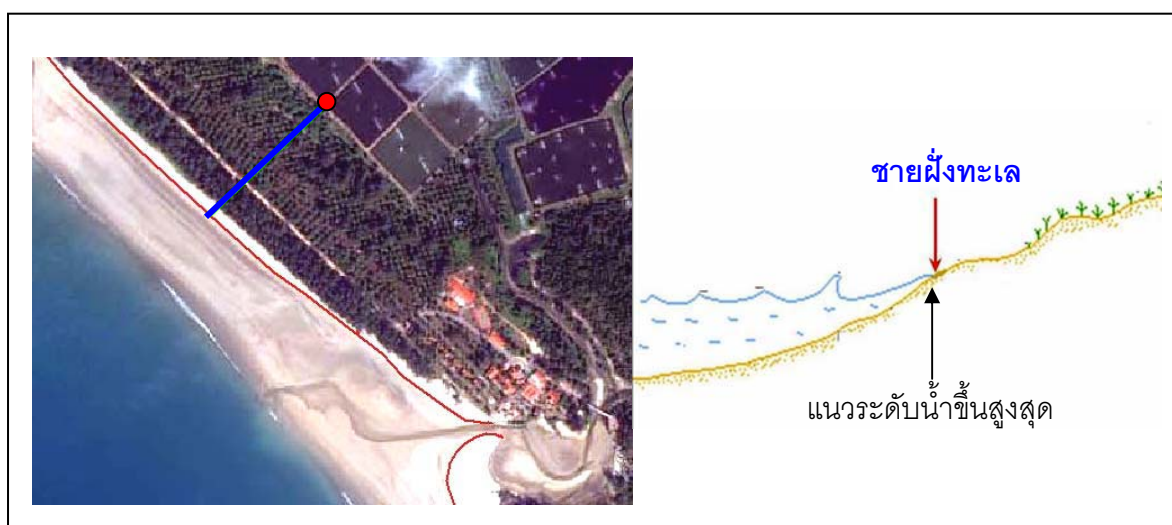
การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของแนวชายฝั่งทะเลที่เกิดจากสึนามิในงานวิจัยนี้ จะใช้แนวชายฝั่งที่ได้จากการแปลโดยใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม IKONOS ก่อนเกิดเหตุการณ์สึนามิเป็นเส้นแนวชายฝั่งอ้างอิงเพราะเป็นดาวเทียมที่ให้ข้อมูลความละเอียดของจุดภาพสูงที่สุด (๑ เมตร/ ๑ จุดภาพ) เปรียบเทียบกับข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยแนวชายฝั่งทะเลจะถูกแบ่งออกเป็น ๕ พื้นที่ โดยใช้ร่องน้ำธรรมชาติที่มีทางออกสู่ทะเลเป็นตัวแบ่งแนวขอบเขต (รูป ๒.๑๖)



รูป ๒.๑๖ ภาพจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM แสดงพื้นที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งโดยละเอียด โดยเริ่มจากทางตอนใต้ของแหลมปะการังลงมาจนถึง บลูวิลเลจเมจิกปะการังรีสอร์ท (A) พื้นที่ที่สองตอนเหนือของโซพิเทลเมจิกลากูนรีสอร์ท (B) พื้นที่ที่สามทางตอนเหนือของคลองคึกคัก (C) พื้นที่สี่ตอนใต้ของคลองคึกคัก (D) พื้นที่ห้าทางตอนใต้ของร่องน้ำธรรมชาติที่บ้านบางเนียง (E) (ภาพโดย สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช)

๒.๕ การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลและพื้นที่ชายหาด

แนวชายฝั่งทะเลที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากการแปลข้อมูลภาพจากดาวเทียมโดยจะใช้แนวระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุดเป็นตัวกำหนดแนวชายฝั่งทะเลซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลในระดับสากลที่นิยมใช้ระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด (High Water Level) เป็นตัวกำหนดแนวชายฝั่ง (รูป ๒.๑๗) โดยแนวชายฝั่งที่ใช้เป็นเส้นอ้างอิงในการวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงใช้แนวชายฝั่งที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียม IKONOS ก่อนเกิดเหตุการณ์สึนามิ

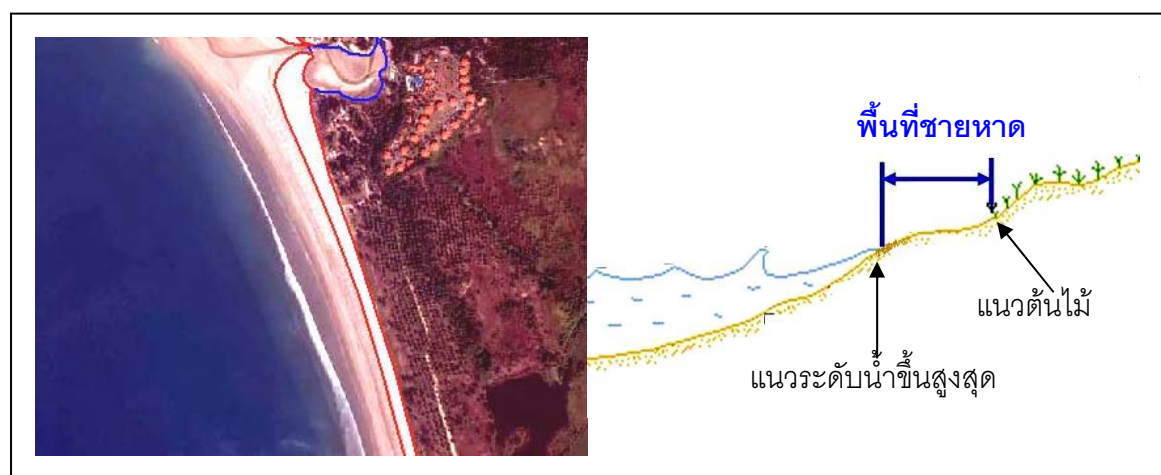


รูป ๒.๑๗ เส้นแนวชายฝั่ง (สีแดง) ที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียมโดยใช้แนวระดับน้ำขึ้นสูงสุดเป็นตัวกำหนดขอบเขตซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม IKONOS ซึ่งบันทึกภาพก่อนเหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)

หลังจากที่ได้แนวชายฝั่งจากการแปลภาพจากดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลาแล้ว จะใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มาวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวชายฝั่งในแต่ละช่วงเวลาโดยจะกำหนดจุดอ้างอิงขึ้นมาอยู่หลังแนวชายฝั่งเพื่อใช้วัดระยะทางจากชายฝั่งถึงจุดอ้างอิง (จุดสีแดงในรูป ๒.๕) ต่อจากนั้นจะลากเส้นตั้งฉากระหว่างจุดอ้างอิงกับเส้นแนวชายฝั่งที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียมในแต่ละช่วงเวลา (เส้นสีน้ำเงินในรูป ๒.๕) ความยาวของเส้นตั้งฉากที่แตกต่างกันคือระยะตำแหน่งของชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะสามารถเทียบได้กับเส้นแนวชายฝั่งอ้างอิงที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียม IKONOS ก่อนเกิดเหตุการณ์สึนามิ

สำหรับการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายหาดหลังเหตุการณ์สึนามิ จะทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ของชายหาดในแต่ละช่วงเวลาแล้วนำมาคำนวณเปรียบเทียบหาความ

แตกต่างของพื้นที่ชายหาดที่ในแต่ละช่วงเวลา ขอบเขตของพื้นที่ชายหาดจะใช้แนวต้นไม้ด้านนอกสุดกับแนวระดับน้ำสูงสุดเป็นขอบเขตของพื้นที่ชายหาด (รูป ๒.๑๘)



รูป ๒.๑๘ ขอบเขตของพื้นที่ชายหาด (เส้นสีแดง) ที่ได้จากการแปลภาพจากดาวเทียมโดยใช้แนวระดับน้ำขึ้นสูงสุดและแนวต้นไม้เป็นตัวกำหนดขอบเขต ช้อนทับบนภาพจากดาวเทียม IKONOS ซึ่งบันทึกภาพก่อนเหตุการณ์สึนามิ ๑ ปี (ภาพโดย สุเมธ พันธุ์วรราช)

๒.๖ การสำรวจตะกอนสึนามิบนบกโดยละเอียด

ตะกอนใหม่ที่สะสมตัวโดยสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ จัดว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการศึกษารายละเอียดทางตะกอนวิทยาเพื่อให้เป็นข้อมูลต้นแบบของการสำรวจหาตะกอนสึนามิในอดีต การเก็บตัวอย่างตะกอนสึนามิของโครงการได้ดำเนินมาตั้งแต่หลังเกิดเหตุการณ์โดยทำการเก็บข้อมูลหลายรูปแบบ เช่น ข้อมูลการกระจายตัวของตะกอนในบริเวณกว้าง เก็บตัวอย่างตะกอนเฉพาะพื้นที่ การขุดเจาะตะกอนและหลุมทดสอบระดับลึกโดยทำการขุดตะกอนตามแนววัดระดับเพื่อให้สัมพันธ์กับระดับความสูงหรือการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศพร้อมกับตำแหน่งพิกัดภูมิศาสตร์โดยละเอียด

ในการดำเนินงานของโครงการ ได้ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ และตะกอนที่คาดว่าจะเป็สึนามิในอดีตได้มากกว่า ๑,๐๐๐ ตัวอย่าง ตัวอย่างตะกอนใหม่ที่สะสมตัวหลังจากสึนามิในบริเวณหน้าหาดมากกว่า ๓๐๐ ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บอย่างเป็นระบบและแบบสุ่มได้นำมาวิเคราะห์ในเรื่องตะกอนวิทยาทั้งหมด



รูป ๒.๑๙ (บนซ้าย) การขุดร่องสำรวจเพื่อศึกษาตะกอนที่สะสมตัวโดยสึนามิปี ๒๕๔๗ ในบริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต (บนขวา) ศึกษาชั้นตะกอนสึนามิจากร่องสำรวจ (ล่างซ้าย) การขุดร่องสำรวจยาวกว่า ๓ เมตร บริเวณแหลมสน จังหวัดระนอง และ (ล่างขวา) การปาดหน้าตัดตะกอนชายหาดเพื่อศึกษาตะกอนวิทยาบริเวณแหลมปะการัง จังหวัดพังงา (ภาพโดย สุเมธ พันธุวงศ์ราช)

๒.๖.๑ การเก็บตัวอย่างตะกอนและการวิเคราะห์

การเก็บตะกอนสึนามิ

วิธีการเก็บตัวอย่างตะกอนสึนามิมีหลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่และวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ โดยทั่วไปการเก็บตะกอนสึนามิเป็นบริเวณกว้างจะทำการเก็บตัวอย่างจากชั้นตะกอนทั้งหมด (bulk sample) โดยไม่ได้คำนึงถึงโครงสร้างทางตะกอนวิทยา หรือการจำแนกชั้นตะกอนจากคุณสมบัติทางโครงสร้างตะกอน การเก็บ bulk sample นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ขนาดตะกอนโดยทั่วไป ส่วนการเก็บตัวอย่างโดยละเอียดจะทำการเก็บตัวอย่างจากแต่ละชั้นของการสะสมตัว (layer to layer) ซึ่งเป็นวิธีการเก็บเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ เช่น เพื่อวิเคราะห์ขนาด ความรุนแรงของการพัดพา รูปแบบและทิศทางของการพัดพา ทั้งนี้การเก็บ

ตัวอย่างวิธีการนี้จะต้องควบคู่ไปกับการวัดระดับภูมิประเทศอย่างละเอียด รวมถึงการวางแผนการขุดตัวอย่างที่เป็นระบบ ดังในกรณีหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต หาดแหลมสน จังหวัดระนอง เกาะพระทองและเกาะคอเขา จังหวัดพังงา



รูป ๒.๒๐ การเก็บตัวอย่างตะกอนสีนํ้ามโดยละเอียดแต่ละชั้นการสะสมตัว (layer to layer) โดยบรรจุตัวอย่างลงในหลอดพลาสติกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและเพื่อรักษาสภาพตะกอนให้เป็นไปตามธรรมชาติมากที่สุด ตัวอย่างดังกล่าวจะใช้ในการวิเคราะห์ขนาดโดยวิธี Settling tube analysis (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

การคัดลอกชั้นตะกอน

การคัดลอกชั้นการสะสมตัวของตะกอนจากหน้าผั่งหรือหน้าตัดชั้นตะกอนจริงในภาคสนามเป็นอีกวิธีที่ใช้กันในสากล เพื่อเก็บตัวอย่างโครงสร้างตะกอนที่สามารถจำแนกได้ด้วยตาเปล่า หรือแม้กระทั่งโครงสร้างที่อาจจะยากในการจำแนกในภาคสนาม แต่เมื่อทำการเก็บตัวอย่างโดยวิธีคัดลอก (peel technique) แล้วก็จะสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ในระดับรายละเอียด วิธีการนี้เริ่มจากต้องทำการปรับหน้าตัดของชั้นตะกอนให้อยู่ในแนวตั้งและมีหน้าตัดที่เรียบ สิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือ ต้องคงสภาพการเรียงตัวของเม็ดตะกอนให้ได้มากที่สุด ไม่ให้มีรอย

ชุดจากการปาดหน้าตัด เมื่อได้หน้าตัดที่เรียบแล้ว ก็ทำการพ่นกาวชนิดสเปรย์ ในการทำงานครั้งนี้ได้ทดลองใช้กาวหลากหลายชนิดและผลสรุปคือ การชนิดพ่นที่มีอัตราการแข็งตัวที่ไม่รวดเร็วมากนัก คือ ประมาณ ๒๐ นาที จะเป็นชนิดที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บรักษาสภาพชั้นตะกอนและตัวอย่างการคัดลอกที่ได้จะมีความหนาของเม็دتะกอนประมาณ ๒ ถึง ๓ มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอที่จะป้องกันการขยับตัวของเม็دتะกอนได้

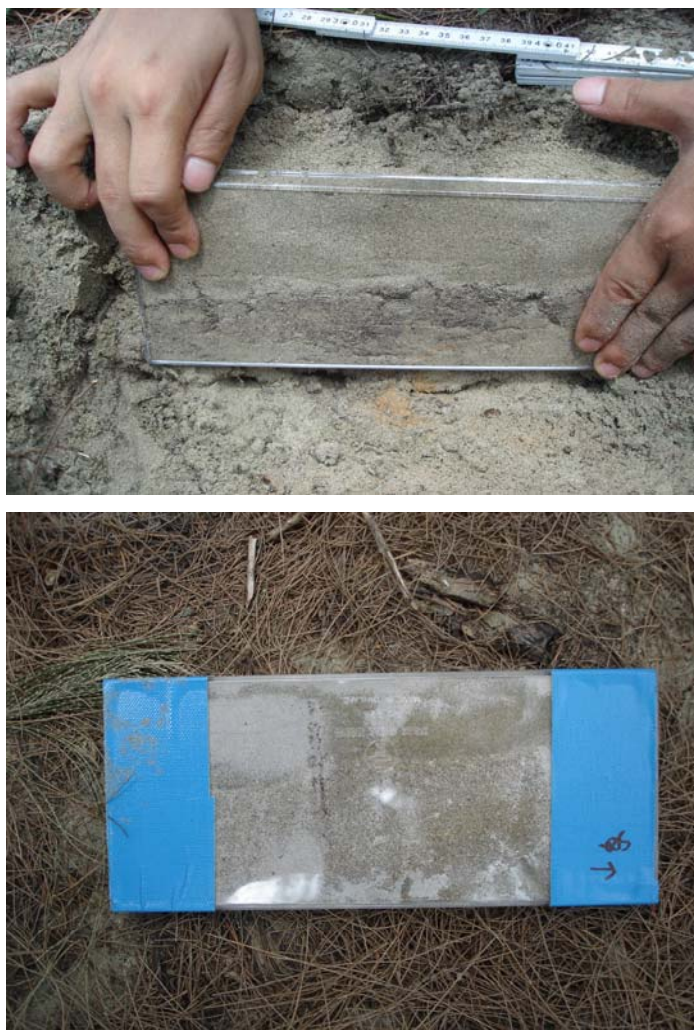


รูป ๒.๒๑ การคัดลอกตะกอนจากหน้าตัดหลุมทดสอบ (peel technique) ตัวอย่างจากบริเวณแหลมสน จังหวัดระนอง เพื่อศึกษาการกระจายตัวของชั้นตะกอนสีนํ้ามึนแนวตั้งจากกับชายหาด (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

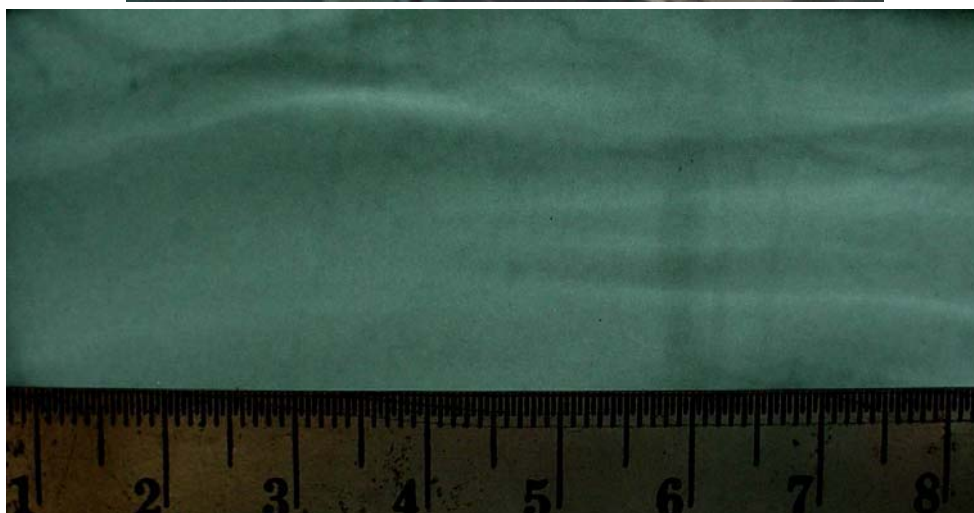
การเก็บตะกอนเพื่อการเอ็กซ์เรย์

ในสภาพตะกอนบางแห่งที่มีความต่อเนื่องของโครงสร้างตะกอนที่ไม่ชัดเจน หรือสามารถระบุได้ถึงโครงสร้างตะกอนบ้างแต่ยากที่จะสังเกตเห็นด้วยตาเปล่า การประยุกต์เอาวิธีการเอ็กซ์เรย์ชั้นตะกอนดังกล่าว ก็มีความจำเป็นอย่างยิ่ง และจากการทดลองของทีมงานพบว่า ต้องทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้กล่องพลาสติกที่มีความหนาพอดีที่รังสีเอ็กซ์จะสามารถทะลุผ่านไปได้ โดยผลการฉายรังสีจะถูกล้างออกมาในรูปแบบแผ่นฟิล์ม (ดังเช่น เอ็กซ์เรย์ทางการแพทย์) การประยุกต์ใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ทางการแพทย์มาใช้ในโครงการก็จัดได้ว่าเป็นการ

ทดลองทางวิทยาศาสตร์และประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกในเมืองไทย และยังเป็นการช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการฉายรังสี โดยไม่จำเป็นต้องจัดซื้ออุปกรณ์เอ็กซ์เรย์



รูป ๒.๒๒ (บน) วิธีการเก็บตัวอย่างตะกอนสีนามีในกล่องพลาสติกจากหน้าตัดชั้นตะกอนในภาคสนาม (ล่าง) ตัวอย่างที่บรรจุใส่กล่องแล้วทำการแพ็คเพื่อป้องกันการกระเทือนและการปนเปื้อนเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการเอ็กซ์เรย์ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๒.๒๓ (บน) เครื่องมือเอ็กซเรย์ทางการแพทย์ที่ประยุกต์ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของตะกอนสีนํ้ามิ (ล่าง) ตัวอย่างผลที่ได้จากการเอ็กซเรย์ตะกอนสีนํ้ามิแสดงริ้วคลื่นที่เกิดจากการพัดพาโดยกระแสนํ้าจากสีนํ้ามิ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

๒.๖.๒ การวิเคราะห์ขนาดตะกอนสีนามิโดยวิธี Setting tube

ตะกอนสีนามิที่เก็บได้จะทำการแบ่งเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ อาทิ ขนาด องค์ประกอบทางกายภาพ โดยการวิเคราะห์ขนาดตะกอนที่มีช่วงอยู่ระหว่างทรายละเอียดถึง ทรายหยาบ (fine to coarse sand) จะใช้การวิเคราะห์แบบตะแกรงคัดขนาดจากตัวอย่างที่ได้ที่เป็น bulk sample ส่วนตัวอย่างที่เก็บโดยวิธี layer to layer จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีให้มีการ ตกจมในหลอดที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (settling tube) (ดังรูป ๒.๒๔) และอีกวิธีที่ได้นำมาใช้ใน โครงการคือ การวิเคราะห์ขนาดตะกอนที่เล็กกว่าทรายละเอียด จะใช้วิธี laser granulometrical analysis ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในระดับสากลแต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง



รูป ๒.๒๔ อุปกรณ์วิเคราะห์ขนาดตะกอนโดยวิธี Settling tube (สองรูปบน) ท่อพลาสติกเพื่อ หยอดตัวอย่างตะกอนสีนามิ และ (สองรูปล่าง) แสดงระบบประมวลผลคอมพิวเตอร์และ ซอฟแวร์สำหรับคำนวณขนาดและเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

๒.๖.๓ การกำหนดอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔

องค์ประกอบในตะกอนสีนามิในอดีตที่เป็นอินทรีย์วัตถุจะทำการคัดแยกเพื่อวิเคราะห์หาอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔ และวิธี AMS เพื่อกำหนดอายุการสะสมตัวที่ชัดเจนโดยผลการวิเคราะห์จะมีช่วงค่าความผิดพลาดไม่มากและเป็นวิธีที่มีความเชื่อถือในระดับสากล

อย่างไรก็ตามการคัดแยกองค์ประกอบที่เป็นอินทรีย์วัตถุก่อนทำการวิเคราะห์อายุเป็นสิ่งสำคัญและต้องใช้ประสบการณ์ในการคัดแยกสูง สิ่งสำคัญอีกประการคือ ต้องไม่ให้มีการปนเปื้อนของคาร์บอนจากภายนอกเข้าสู่ตัวอย่างและต้องป้องกันการสลายตัวของคาร์บอนในตัวอย่างให้ดีที่สุด ในปัจจุบันการกำหนดอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔ สามารถกระทำได้ในประเทศไทย แต่วิธี AMS ต้องอาศัยห้องปฏิบัติการในต่างประเทศซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงมาก

๒.๗ การสำรวจภูมิประเทศ ตะกอนและสิ่งมีชีวิตใต้น้ำทะเล

ด้วยความร่วมมือจากคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัยคาตาเนีย ประเทศอิตาลี การสำรวจภูมิประเทศใต้น้ำโดยใช้เครื่องมือหยั่งธรณีฟิสิกส์แบบเสียงสะท้อน (echo sounder) ได้กระทำในบริเวณชายหาดเขาหลักถึงแหลมปะการัง จังหวัดพังงา แผนที่แสดงเส้นชั้นความสูงของพื้นทะเลในบริเวณดังกล่าวได้ถูกจัดทำขึ้นในโครงการนี้ในมาตราส่วนที่ละเอียด คือ มีช่วงชั้นความสูง ๑ เมตร หรือหากต้องการช่วงชั้นความสูงที่ละเอียดกว่า ก็สามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งความลึกที่ได้เพราะแนวการลาก echo sounder ของโครงการใช้ระยะห่างแต่ละแนวประมาณ ๕๐๐ เมตร ซึ่งจัดได้ว่าละเอียดมาก

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยร่วมจากอิตาลียังได้เก็บตัวอย่างตะกอนในทะเล ชากปะการังและสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาและบรรพชีวินวิทยาด้วย ดังจะเห็นจากเอกสารวิชาการของ Benzoni และคณะ (๒๐๐๖) ซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการดำเนินการ โดยในรายงานฉบับนี้จะแสดงผลเฉพาะเรื่องการสร้างแผนที่ภูมิประเทศใต้ทะเลซึ่งได้เผยแพร่แล้วอย่างเป็นทางการในวารสาร Polish Journal of Environmental Studies เมื่อต้นปี ๒๕๕๒ (Di Geronimo et al., 2009)

บทที่ ๓

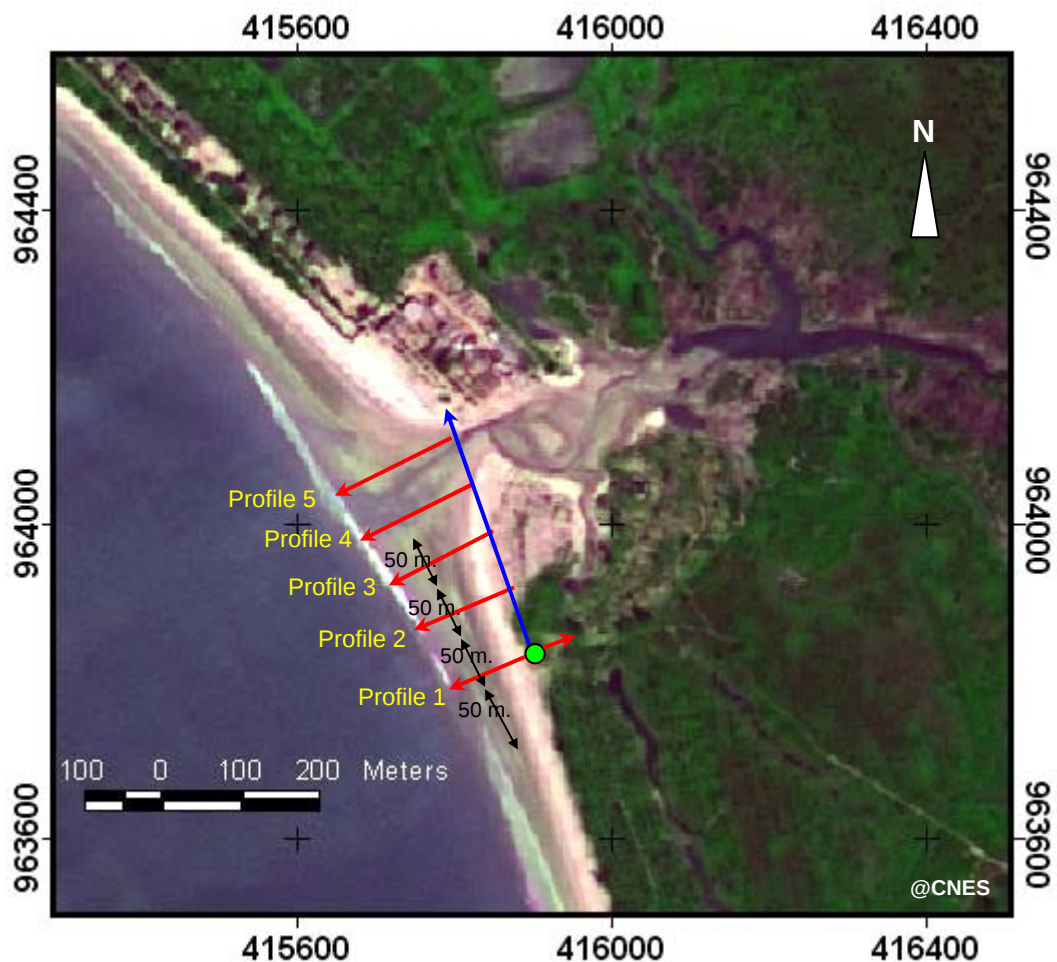
การฟื้นฟูสภาพชายฝั่งทะเลที่ถูกกัดเซาะหลังจากสึนามิ

ในบทนี้ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้มาจากวิทยานิพนธ์ของนาย สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช และบทความเผยแพร่โดยผู้วิจัยและคณะ (Choowong *et al.*, 2009 วารสาร Geomorphology)

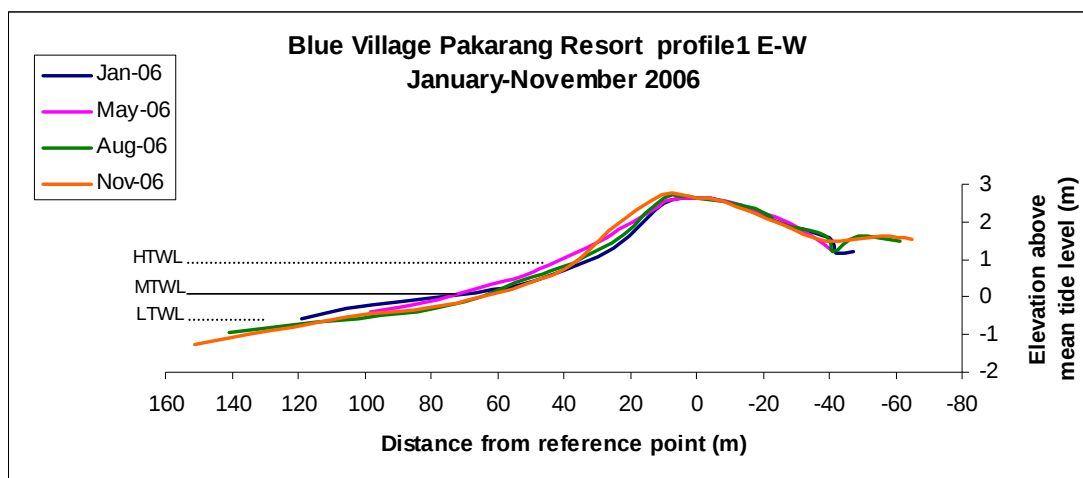
๓.๑ การฟื้นฟูสภาพหน้าหาด

พื้นที่บลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV)

บลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ตั้งอยู่ประมาณ ๑ กิโลเมตร จากปลายแหลมปะการังซึ่งเป็นพื้นที่หนึ่งที่มีรายงานความเสียหายทางกายภาพโดยเฉพาะการสูญเสียแนวชายหาดจากการกัดเซาะโดยสึนามิ แนวการสำรวจวัดระดับการฟื้นฟูพื้นที่เป็นดังรูปที่ ๓.๑



รูป ๓.๑ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สึนามิ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง



รูป ๓.๒ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙

ผลการวัดระดับชายหาดในบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) จะขอกกล่าวถึงแนวการวัดระดับชายหาดแนวที่ ๑ เนื่องจากเป็นแนวที่อยู่ทางตอนใต้ของคลองซึ่งอยู่ใกล้จากการทำกิจกรรมของมนุษย์ทางตอนเหนือของคลองมากที่สุด ผลจากการวิเคราะห์การวัดระดับชายหาดแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงปี ๒๕๔๙ โดยในช่วงแรกของการสำรวจในเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม ๒๕๔๙ ตรงส่วนกลางของบริเวณ foreshore แสดงให้เห็นว่ามีการสะสมตัวของตะกอนทรายเพิ่มขึ้นในแนวดิ่งหลังจากนั้นในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคม ๒๕๔๙ บริเวณ foreshore มีการลดระดับลงในแนวดิ่งจากการที่ตะกอนทรายถูกกัดเซาะในขณะที่ตรงส่วนสันทรายของหาดมีความสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และความลาดชันของ foreshore เพิ่มขึ้นจากช่วงเดือนมกราคม จากนั้นในช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ บริเวณ foreshore และสันทรายของหาด (beach ridge) มีการสะสมตัวของตะกอนทรายในแนวดิ่งเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นว่าบริเวณ foreshore มีทั้งการสะสมตัวและการกัดเซาะเล็กน้อย เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงในแนวระนาบของชายฝั่งซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสมดุลของการกัดเซาะและการสะสมตัว จึงกล่าวได้ว่าชายฝั่งในบริเวณนี้มีแนวโน้มที่จะเป็นชายฝั่งแบบคงสภาพที่มีความสมดุลในด้านของการกัดเซาะและการสะสมตัว โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในแนวระนาบในช่วงปี ๒๕๔๙ เท่ากับ ± 1 ถึง ๕ เมตร

ตาราง ๓.๑ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณบลูวิลเลจปะการัง
รีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙

Period Area	BV	
	Horizontal* (m)	Vertical** (m)
January	37	1.825
May	46	1.825
August	39	1.925
November	40	2.025
Average	40.5	1.9

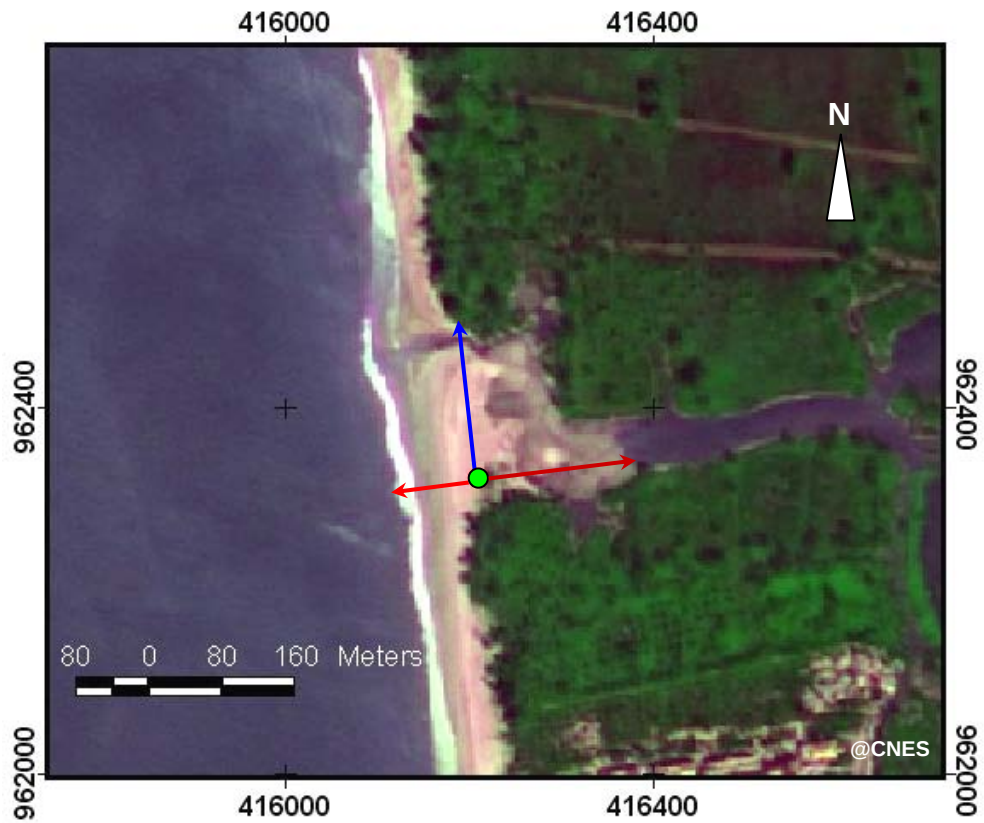
*Horizontal = ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(distance from Reference point to Mean High Tide Level)

**Vertical = ความสูงของสันทรายของหาดจากระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(elevation of Beach ridge above Mean High Tide Level)

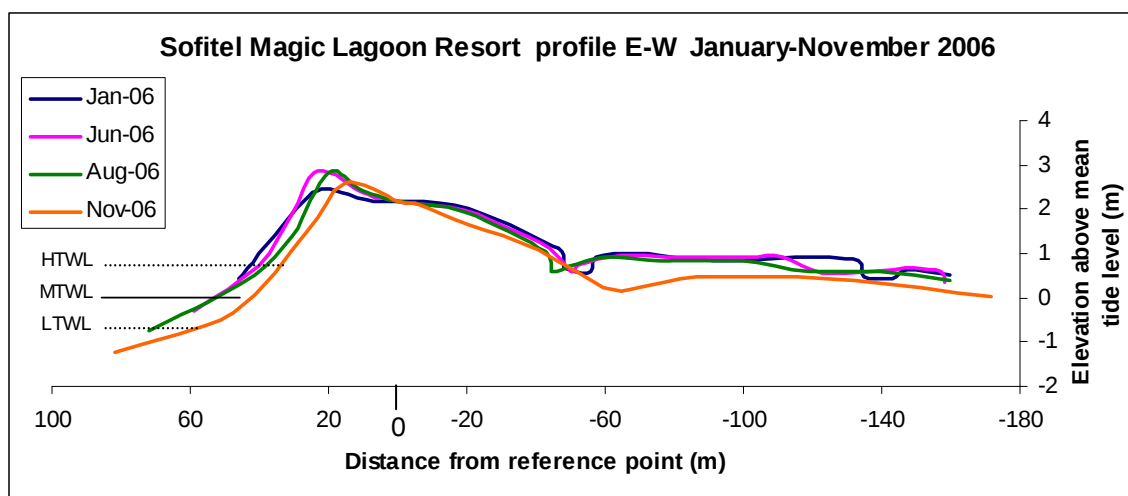
ตาราง ๓.๒ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณบลูวิลเลจ
ปะการังรีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙

เดือน	มุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore (องศา)
มกราคม	4.5
พฤษภาคม	2.5
สิงหาคม	4
พฤศจิกายน	3

พื้นที่โซฟิเทล เมจิก ลากูน รีสอร์ท (SF)



รูป ๓.๓ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณโซฟิเทลเมจิกลากูนรีสอร์ท (SF) ซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์ สึนามิ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และ เส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง



รูป ๓.๔ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณโซฟีเทลเมจิกลาagoonรีสอร์ท (SF) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙

ผลจากการวัดระดับชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิกลาagoonรีสอร์ท (SF) แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายน ๒๕๔๙ รูปร่างของกราฟบริเวณ foreshore ที่ได้จากการวัดระดับมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนฤดูจากฤดูร้อนเป็นฤดูฝน ตะกอนทรายบริเวณ foreshore ได้ถูกกัดเซาะเข้าและร่นถอยเข้ามาในแผ่นดินในขณะที่สันทรายของหาดมีความสูงมากขึ้นจากการสะสมตัวที่เพิ่มขึ้นของตะกอนทรายทำให้รูปร่างของบริเวณ foreshore เมื่อดูจากกราฟ ช่วงเดือนมิถุนายนจะมีความลาดชันมากขึ้นกว่าเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ต่อมาในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ การกัดเซาะที่บริเวณ foreshore ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่ความสูงของสันทรายของหาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่อจากนั้นช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ การกัดเซาะยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่บริเวณ foreshore ทำให้พื้นที่ของชายหาดลดลง แนวชายฝั่งถอยร่นเข้าไปในแผ่นดินและร่องน้ำบริเวณหลังสันทรายของหาดถูกกัดเซาะลึกและกว้างขึ้นกว่าเดิมเมื่อเทียบกับเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ จากกราฟการวัดระดับชายหาดในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ ชายฝั่งบริเวณนี้เกิดการกัดเซาะทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบที่บริเวณ foreshore และ backshore ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวชายฝั่งในแนวระนาบตลอดช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงการกัดเซาะที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ชายฝั่งถูกกัดเซาะเข้าไปในแผ่นดินถึง ๑๐ เมตร อย่างไรก็ตามนี้เป็นเพียงผลจากการเก็บข้อมูลภาคสนามเพียงแค่ช่วงเวลาปีเดียวเท่านั้น จึงไม่อาจนำมาใช้สรุปได้ว่าชายฝั่งบริเวณนี้จะเกิดการกัดเซาะออกไปเรื่อยๆ หากจะทำการชี้ชัดว่าเป็นชายฝั่งแบบโดนกัดเซาะตลอดเวลาหรือไม่นั้นต้องมีการเก็บ

ข้อมูลอย่างต่อเนื่องในระยะยาวอย่างน้อย ๑๐ ปีขึ้นไปเนื่องจากข้อมูลในระยะยาวจะทำให้เห็นถึง วัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแต่ละพื้นที่นั้นๆ ซึ่งในแต่ละช่วงปีอาจเป็นช่วงของการกัดเซาะหรือช่วงของการสะสมตัวที่ต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องดูข้อมูลในระยะยาวที่จะทำให้เห็นถึงแนวโน้มส่วนใหญ่ของการเปลี่ยนแปลง

ตาราง ๓.๓ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณโซฟีเทลเมจิกลา กูณ รีส์ออร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙

Period Area	SF	
	Horizontal* (m)	Vertical** (m)
January	43	1.675
June	40	2.075
August	37	2.075
November	33	1.825

*Horizontal = ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด

(distance from Reference point to Mean High Tide Level)

**Vertical = ความสูงของสันทรายของหาดจากระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด

(elevation of Beach ridge above Mean High Tide Level)

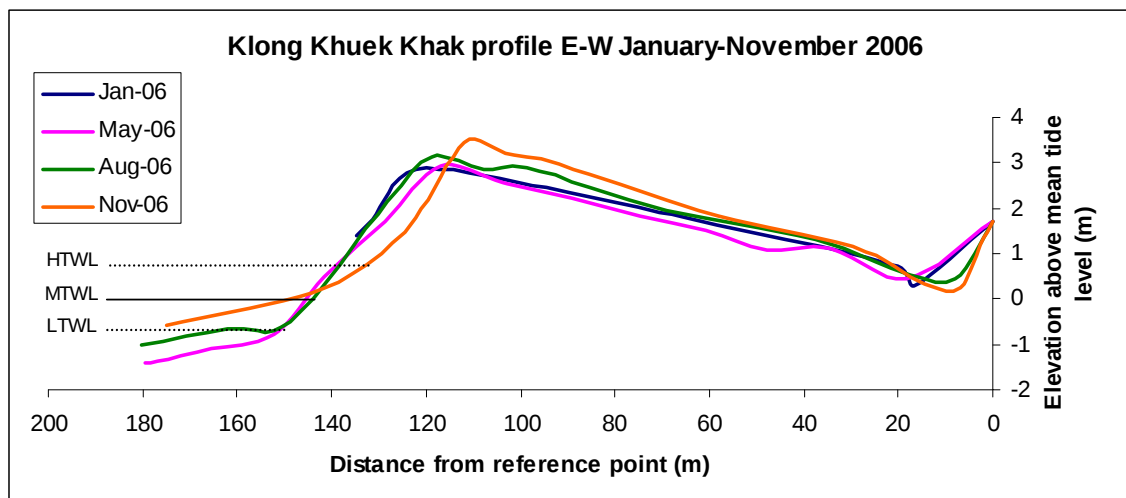
ตาราง ๓.๔ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณโซฟีเทลเมจิกลา กูณ รีส์ออร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙

เดือน	มุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore (องศา)
มกราคม	2.5
มิถุนายน	4.5
สิงหาคม	5
พฤศจิกายน	4

พื้นที่คลองคึกคัก (KK)



รูป ๓.๕ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งจากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณคลองคึกคัก (KK) ซ้อนทับบนภาพจากดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สึนามิ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง



รูป ๓.๖ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณคลองคึกคัก (KK) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙

ผลจากการวัดระดับชายหาดบริเวณคลองคึกคักในช่วงแรกระหว่างเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงการกัดเซาะบริเวณ foreshore ซึ่งสังเกตได้จากการถอยร่นเข้ามาในแผ่นดินของสันทรายของหาดอันเนื่องมาจากการเริ่มเข้าสู่ฤดูฝนในช่วงเดือนพฤษภาคม หลังจากนั้นช่วงเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคม ๒๕๔๙ สันทรายของหาดมีความสูงเพิ่มขึ้นและความลาดชันที่บริเวณ foreshore ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะที่พื้นที่บริเวณ backshore ก็มีการสะสมตัวของตะกอนสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีตะกอน washover ที่เกิดจากคลื่นลมทะเลในช่วงที่มีพายุลมแรงพัดเอาตะกอนหน้าหาดเข้ามาสะสมตัวที่บริเวณหลังแนวสันทรายของหาด ซึ่งกระบวนการพัดพาตะกอนจากหน้าหาดเข้าฝั่งโดยพายุ (overwash) ในพื้นที่บริเวณนี้จะพัดเอาตะกอนเข้ามาสู่แผ่นดินในระยะทางไม่เกิน ๑๐๐ เมตร วัดจากชายฝั่งทะเล ต่อจากนั้นช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ พื้นที่บริเวณ foreshore แสดงให้เห็นถึงร่องรอยจากการกัดเซาะของคลื่นลมทะเลในช่วงฤดูฝนอย่างชัดเจน โดยที่สันทรายของหาดมีการสะสมตัวของตะกอนสูงขึ้นกว่าเดิมและความลาดชันของหาดบริเวณ foreshore มีความชันเพิ่มมากขึ้น และพื้นที่บริเวณ backshore มีตะกอนจำพวก washover สะสมตัวเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่สูงขึ้นกว่าเดิม สรุปได้ว่าในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ ชายฝั่งทะเลบริเวณคลองคึกคัก แสดงให้เห็นถึงการปรับตัวในแนวดิ่งและแนวระนาบที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล ซึ่งเป็นการปรับตัวตามวัฏจักรของชายฝั่งทะเลที่เป็นชายฝั่งปกติคงสภาพคือมีการสะสมตัวในช่วงฤดูที่คลื่นลมทะเลสงบและมีการกัดเซาะในฤดูมรสุมคลื่นลมแรง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระนาบชายฝั่งบริเวณคลองคึกคัก

เกิดการกัดเซาะในปี ๒๕๔๙ เข้ามาในแผ่นดิน ๘ เมตร อย่างไรก็ตามในขณะที่บริเวณ foreshore เกิดการกัดเซาะ สันทรายของหาดมีตะกอนสะสมตัวเพิ่มมากขึ้นโดยเป็นตะกอนที่มาจาก การกัดเซาะบริเวณ foreshore การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เป็นพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของการปรับตัวของชายฝั่งทะเลที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนของฤดูกาลซึ่งมีอิทธิพลกับคลื่นลมในทะเล หลังจากฤดูมรสุมหยุดลงคลื่นในทะเลจะอ่อนกำลังลงอันเป็นผลให้ความลาดชันของหาดบริเวณ foreshore ลดลงซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟของการวัดระดับชายหาดในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ที่มีความลาดชันน้อย

ตาราง ๓.๕ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙

Period Area	KK	
	Horizontal* (m)	Vertical** (m)
January	140	2.075
May	139	2.155
August	138	2.375
November	132	2.925

*Horizontal = ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(distance from Reference point to Mean High Tide Level)

**Vertical = ความสูงของสันทรายของหาดจากระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(elevation of Beach ridge above Mean High Tide Level)

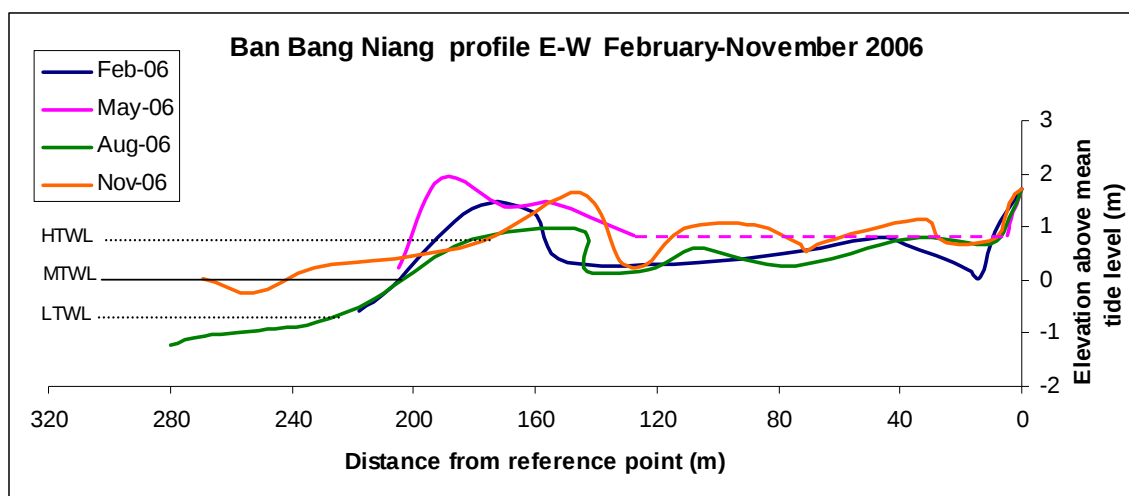
ตาราง ๓.๖ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙

เดือน	มุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore (องศา)
มกราคม	6.2
พฤษภาคม	5.5
สิงหาคม	6.5
พฤศจิกายน	9

พื้นที่บ้านบางเนียง (BN)



รูป ๓.๗ แนววัดระดับชายหาด (beach profile) ตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล และแนวการทำภาพตัดขวาง (cross section) ของคลองบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ช้อนทับบนภาพถ่ายดาวเทียม SPOT-5 รับสัญญาณภาพ ๒ ปีหลังจากเหตุการณ์สึนามิ จุดสีเขียวแสดงตำแหน่งจุดอ้างอิง เส้นสีแดงแสดงแนววัดระดับชายหาด และเส้นสีน้ำเงินแสดงแนวการทำภาพตัดขวางของคลอง



รูป ๓.๘ กราฟผลการวัดระดับชายหาด (beach profile) บริเวณบ้านบางเนียง (BN) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแนวระดับและแนวระนาบของชายฝั่งในรอบปี ๒๕๔๙

ผลจากการวิเคราะห์ การวัดระดับชายหาดบริเวณบ้านบางเนียง ในช่วงแรกของการเก็บข้อมูลเดือนกุมภาพันธ์ ๒๕๔๙ กราฟการวัดระดับชายหาดแสดงให้เห็นว่าบริเวณ foreshore มีความลาดชันมาก ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ บริเวณ foreshore มีการสะสมตัวของตะกอนเพิ่มมากขึ้นและมีความชันมากขึ้นด้วย สันทรายของหาดก็มีความสูงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ผลจากการสะสมตัวที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ที่บริเวณปากคลองมีตะกอนสะสมตัวเพิ่มขึ้นด้วยโดยตะกอนมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลสูงสุด ดังนั้นน้ำในคลองจึงไม่สามารถไหลออกสู่ทะเลได้ตั้งช่วงเวลาปกติ เมื่อมีน้ำไหลมาจากในแผ่นดินน้ำที่ไม่สามารถไหลออกสู่ทะเลได้จึงไหลท่วมออกทางตลิ่งทั้งสองฝั่งด้านข้าง เกิดเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ขึ้นคล้ายลากูนที่บริเวณ backshore จากรูป ๔.๘ หลังจากนั้นในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคม ๒๕๔๙ ตะกอนบริเวณ foreshore และสันทรายของหาดเดิมถูกกัดเซาะออกไปจนหมด แอ่งน้ำที่เคยมีช่วงเดือนพฤษภาคมจึงหายไป เพราะน้ำสามารถไหลออกสู่ทะเลได้ตามปกติ ต่อมาช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ สันทรายของหาดมีความสูงเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเกิดการสะสมตัวของตะกอนทรายเพิ่มขึ้นที่บริเวณ foreshore และพื้นที่น้ำท่วมถึงหลังบริเวณ backshore ก็มีการสะสมตัวของตะกอนทรายในแนวตั้งเพิ่มขึ้นด้วย สรุปการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลบริเวณบ้านบางเนียงตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ มีความสมดุลของการกัดเซาะและการสะสมตัวของตะกอนทรายให้เห็นที่บริเวณปากคลอง ดังนั้นพฤติกรรมของชายหาดในบริเวณนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นปกติของชายหาดที่มีทั้งการกัดเซาะและการสะสมตัวในรอบปีอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงในแนวระนาบของชายฝั่งทะเล บริเวณบ้านบางเนียงเกิดการกัดเซาะของชายฝั่งในปี ๒๕๔๙ วัดได้ ๑๘ เมตร อย่างไรก็ตามในขณะที่

สันทรายของหาดถอยร่นเข้ามาในแผ่นดินอันเนื่องจากการกัดเซาะที่บริเวณ foreshore ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน ๒๕๔๙ พบว่าได้แนวระดับน้ำสูงสุด HTWL มีการสะสมตัวของตะกอนทรายเพิ่มมากขึ้นจนอยู่เหนือระดับน้ำปานกลาง MTWL โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ พบว่ามีตะกอนสะสมตัวในช่วงระดับน้ำปานกลาง MTWL ถึงระดับน้ำสูงสุด HTWL เพิ่มขึ้นมากซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าในช่วงเดือนต่อๆ ไปน่าจะเป็นช่วงเวลาของการสะสมตัวของชายฝั่งทะเลในบริเวณนี้เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่คลื่นลมทะเลอ่อนกำลังลง

ตาราง ๓.๗ การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในแนวระดับและแนวระนาบบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๔๙

Period Area	BN	
	Horizontal* (m)	Vertical** (m)
February	192	0.715
May	201	1.145
August	180	0.205
November	174	0.905

*Horizontal = ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(distance from Reference point to Mean High Tide Level)

**Vertical = ความสูงของสันทรายของหาดจากระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยสูงสุด
(elevation of Beach ridge above Mean High Tide Level)

ตาราง ๓.๘ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore บริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๔๙

เดือน	มุมเอียงเทของชายหาดบริเวณ foreshore (องศา)
กุมภาพันธ์	3
พฤษภาคม	6
สิงหาคม	1
พฤศจิกายน	1.5

*Horizontal = distance from Reference point to Mean High Tide Level

**Vertical = elevation of Beach ridge above Mean High Tide Level

๓.๒ ผลการวิเคราะห์ตะกอนใหม่บริเวณหน้าหาดรายพื้นที่

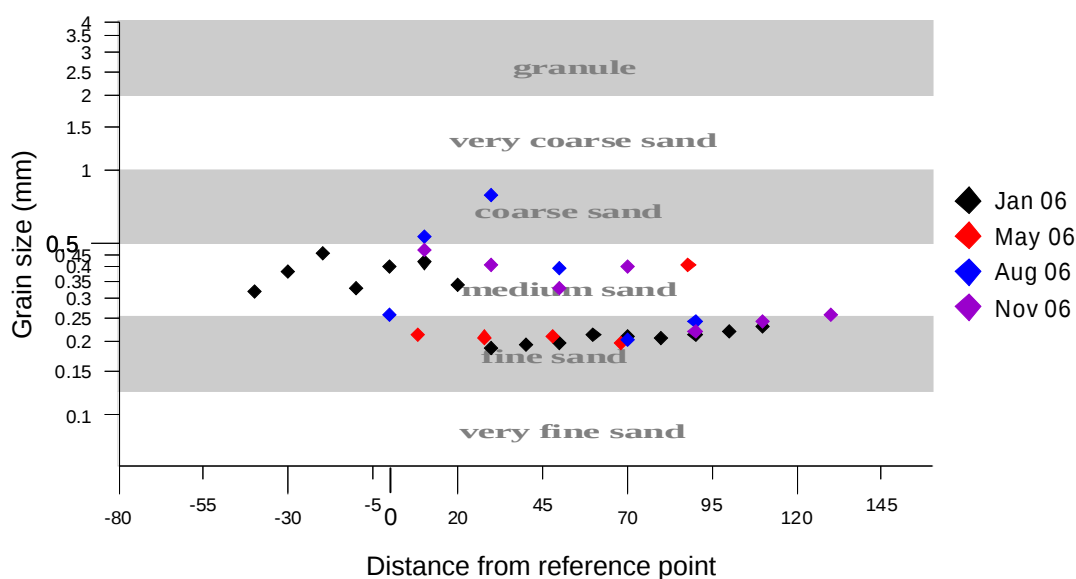
(Result of post-tsunami sediment analysis)

ผลการวิเคราะห์ทางตะกอนวิทยาของตะกอนพื้นผิวชายหาดในที่นี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอน ส่วนประกอบของตะกอน และคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดตะกอน โดยจะกล่าวแยกเป็นแต่ละพื้นที่ตั้งแต่ทางตอนเหนือลงมาถึงตอนใต้ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ ๒ คือ บริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) โซฟีเทลเมจิกลาгуนรีสอร์ท (SF) คลองคึกคัก (KK) และบ้านบางเนียง (BN)

บลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท (BV)

การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอน (Grain size analysis)

ขนาดของเม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีขนาด fine - medium sand รูป ๓.๙



รูป ๓.๙ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV)

ปี ๒๕๔๙

ตาราง ๓.๙ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบลูวิลเลจ
ปะการังรีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙

Period	Size (mm)	Size comparable
January	0.258	fine sand
May	0.246	decrease
August	0.403	increase
November	0.333	decrease

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ในปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความต่างของขนาดเม็ดตะกอนที่ไม่เท่ากันในแต่ละฤดูกาล ในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนอยู่ในช่วงของ fine sand โดยมีขนาด ๐.๒๕๘ มม. ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนลดลงเล็กน้อยเหลือ ๐.๒๔๖ มม. หลังจากนั้นในช่วงฤดูฝนเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น ๐.๔๐๓ มม. และลดขนาดลงเหลือ ๐.๓๓๓ มม. ในช่วงเดือนพฤศจิกายนหลังจากหมดฤดูมรสุม

ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of beach sediment)

ส่วนประกอบของตะกอนทรายชายหาดประกอบด้วย แร่ควอร์ต ๖๐ % เศษซากเปลือกหอยและปะการัง ๓๕ % และแร่อื่นๆ ๕ % จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในแต่ละช่วงฤดูที่ต่างกันดังตาราง ๓.๑๐ ปริมาณของแร่ควอร์ตมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเดือนพฤษภาคมในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของเศษซากเปลือกหอยและปะการังสังเกตเห็นได้ชัดเจนตลอดช่วงปี ๒๕๔๙ ในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีปริมาณ ๔๘.๑๓ % ขณะที่ปริมาณของเศษซากเปลือกหอยและปะการังมี ๓๔.๓๘ % ต่อมาในช่วงเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีปริมาณเพิ่มขึ้น ๗.๐๘ % ขณะที่ปริมาณของเศษซากเปลือกหอยและปะการังลดลง ๕.๓๘ % หลังจากนั้นในช่วงเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีปริมาณลดลงอีก ๑๐.๐๓ % ขณะที่ปริมาณของเศษซากเปลือกหอยและปะการังเพิ่มขึ้น ๑๓ % และในช่วงสิ้นฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน แร่ควอร์ตมีปริมาณลดลงเล็กน้อย ๐.๓๑ % ขณะที่ปริมาณของเศษซากเปลือกหอยและปะการังลดลง ๕.๕๗ %

ตาราง ๓.๑๐ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอน
ชายหาดบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท (BV) ปี ๒๕๔๙

Month	Quartz %	Bio clast %
January	58.13	34.38
May	65.20	29.00
August	55.17	42.00
November	54.86	36.43

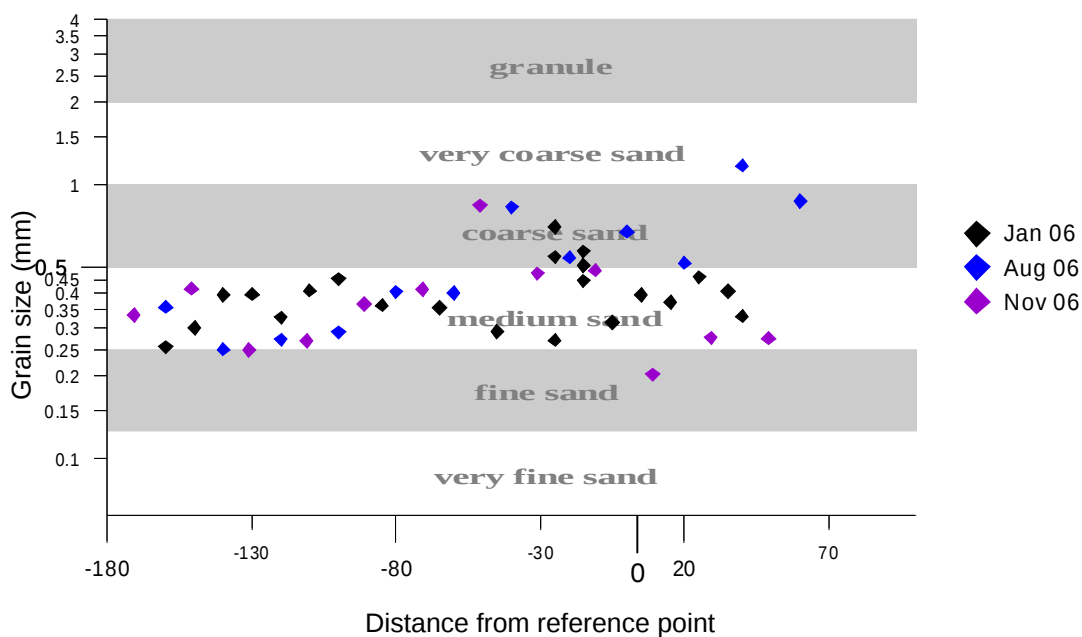
คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดตะกอน (Physical properties)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทรายชายหาดบริเวณบลูวิลเลจปะการังรีสอร์ท ในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่มีความกลมมน (roundness) แบบ sub-angular ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่เพิ่งแตกออกมาจากหินต้นกำเนิดเมื่อไม่นานมานี้ และถูกพัดพามาไม่ไกลจากหินต้นกำเนิดมากนัก ส่วนรูปร่างของเม็ดตะกอน (sphericity) เป็นแบบ high sphericity แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่ถูกขัดถูและเสียดสีด้วยตัวกลางที่มีพลังงานรุนแรงซึ่งมักเกิดได้ในบริเวณ swash zone หน้าหาด

โซฟีเทล เมจิก ลากูน รีสอร์ท (SF)

การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอน (Grain size analysis)

ขนาดของเม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีขนาด medium sand ดูรูป ๓.๑๐



รูป ๓.๑๐ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิกลากูนรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙

ตาราง ๓.๑๑ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิกลากูนรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙

Period	Size (mm)	Size comparable
January	0.403	medium sand
June	no data	no data
August	0.549	increase
November	0.384	decrease

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนบริเวณโซฟีเทลเมจิกลาญรีสอร์ท (SF) ในปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความต่างของขนาดเม็ดตะกอนที่ไม่เท่ากันในแต่ละฤดูกาล ในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนอยู่ในช่วงของ medium sand โดยมีขนาดเม็ดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ ๐.๔๐๓ มม. ต่อมาระหว่างช่วงฤดูฝนในเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น ๐.๕๔๙ มม. หลังจากนั้นได้ลดขนาดลงอีกครั้งเหลือ ๐.๓๘๔ มม. ในช่วงสิ้นฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน

ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of beach sediment)

ส่วนประกอบของตะกอนทรายชายหาดประกอบด้วยแร่ควอร์ต ๖๐ % เศษซากเปลือกหอยและปะการัง ๓๕ % และแร่อื่นๆ ๕ % จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในแต่ละช่วงฤดูที่ต่างกันดังตาราง ๓.๑๒ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังสามารถสังเกตได้ชัดเจนตลอดปี ๒๕๔๙ ในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีจำนวน ๔๖.๕ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวน ๔๐ % ต่อมาในช่วงฤดูมรสุมเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ๔.๙๒ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวนลดลง ๔.๑๗ % และในช่วงสิ้นฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอีก ๓.๕๘ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวนเพิ่มขึ้นอีก ๕.๙๒ %

ตาราง ๓.๑๒ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอนชายหาดบริเวณโซฟีเทลเมจิกลาญรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙

Month	Quartz %	Bioclast %
January	56.5	40
June	no data	no data
August	61.42	35.83
November	65	29.92

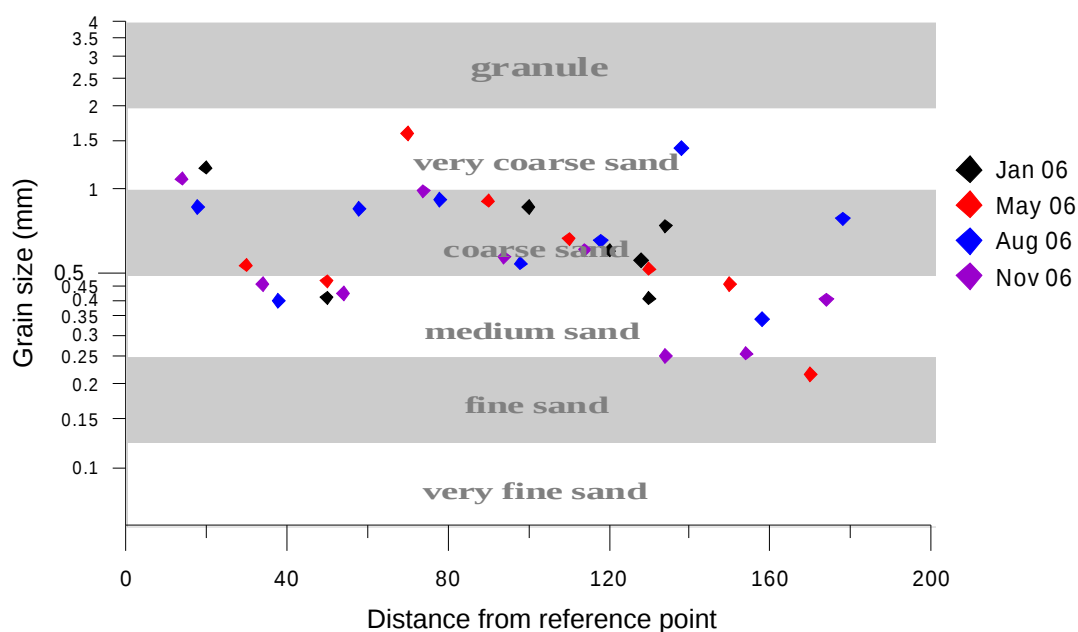
คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดตะกอน (Physical properties)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทรายชายหาดบริเวณโซพิเทลเม จิกลาญรีสอร์ท (SF) ปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่มีความกลมมน (roundness) แบบ sub-angular ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่เพิ่งแตกออกมาจากหินต้นกำเนิดเมื่อไม่นานมานี้ และถูกพัดพามาไม่ไกลจากหินต้นกำเนิดมากนัก ส่วนรูปร่างของเม็ดตะกอน (sphericity) เป็นแบบ high sphericity แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่ถูกขัดถูและเสียดสีด้วยตัวกลางที่มีพลังงานรุนแรงซึ่งมักเกิดได้ในบริเวณ swash zone หน้าหาด

คลองคึกคัก (KK)

การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอน (Grain size analysis)

ขนาดของเม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีขนาด coarse sand ดูรูป ๓.๑๑



รูป ๓.๑๑ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙

ตาราง ๓.๑๓ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๔๙

Period	Size (mm)	Size comparable
January	0.682	coarse sand
May	0.669	decrease
August	0.751	increase
November	0.561	decrease

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนบริเวณคลองคึกคัก (KK) ในปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความต่างของขนาดเม็ดตะกอนที่ไม่เท่ากันในแต่ละฤดูกาล ในช่วงเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนอยู่ในช่วงของ coarse sand โดยมีขนาดเม็ดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ ๐.๖๘๒ มม. ต่อมาเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนลดลงเล็กน้อยเหลือ ๐.๖๖๙ มม. จากนั้นช่วงฤดูฝนในเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น ๐.๗๕๑ มม. และลดลงเหลือ ๐.๕๖๑ ในช่วงสิ้นฤดูฝนเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙

ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of beach sediment)

ส่วนประกอบของตะกอนทรายชายหาดประกอบด้วยแร่ควอร์ต ๖๐ % เศษซากเปลือกหอยและปะการัง ๓๕ % และแร่อื่นๆ ๕ % จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในแต่ละช่วงฤดูที่ต่างกันดังตาราง ๓.๑๔ แร่ควอร์ตมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเล็กน้อยในขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในช่วงต้นฤดูฝนเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ ในช่วงแรกของการเก็บข้อมูลเดือนมกราคม ๒๕๔๙ ปริมาณของแร่ควอร์ตเท่ากับ ๖๒.๘๖ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีปริมาณ ๒๓.๕๗ % ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ ปริมาณของแร่ควอร์ตลดลง ๑.๖๑ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคม ๑๒.๘ % จากนั้นในเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ ปริมาณของแร่ควอร์ตเพิ่มขึ้น ๓.๕๗ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีปริมาณลดลง ๒.๒๖ % ในช่วงท้ายของฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ ปริมาณของแร่ควอร์ตเพิ่มขึ้นอีก ๒ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีปริมาณลดลงอีก ๓.๓๓ %

ตาราง ๓.๑๔ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังใน
ตะกอนชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๕๙

Month	Quartz %	Bioclast %
January	62.86	23.57
May	61.25	36.38
August	65.00	34.11
November	67.00	30.78

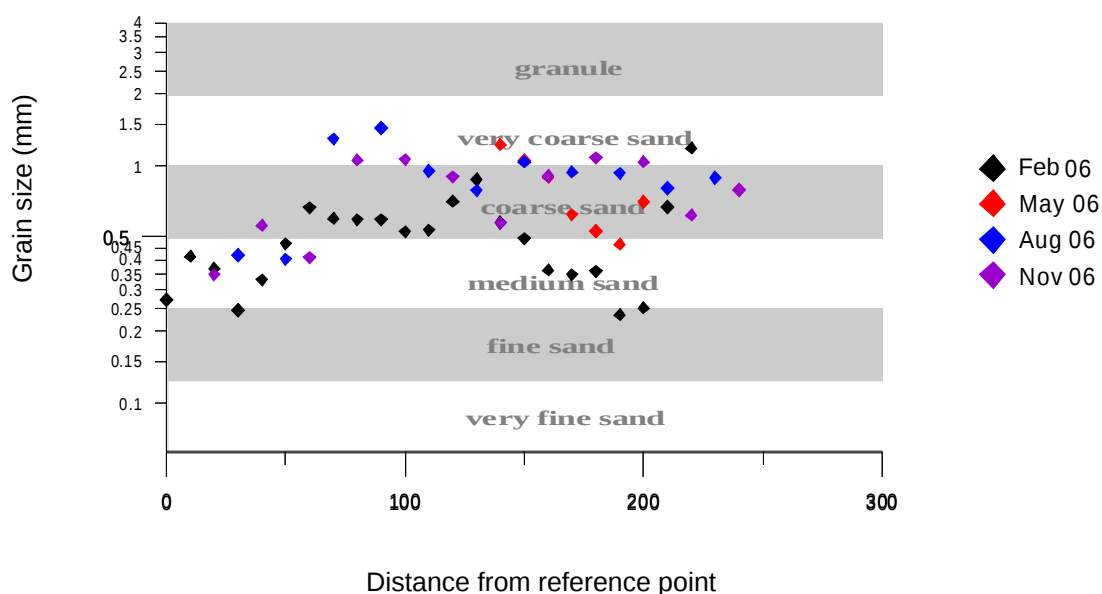
คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดตะกอน (Physical properties)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทรายชายหาดบริเวณคลองคึกคัก (KK) ปี ๒๕๕๙ แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่มีความกลมมน (roundness) แบบ sub-angular ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่เพิ่งแตกออกมาจากหินต้นกำเนิดเมื่อไม่นานมานี้และถูกพัดพา มาไม่ไกลจากหินต้นกำเนิดมากนัก ส่วนรูปร่างของเม็ดตะกอน (sphericity) เป็นแบบ high sphericity แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่ถูกขัดถูและเสียดสีด้วยตัวกลางที่มีพลังงานรุนแรงซึ่งมัก เกิดได้ในบริเวณ swash zone หน้าหาด

บ้านบางเหียง (BN)

การวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอน (Grain size analysis)

ขนาดของเม็ดตะกอนส่วนใหญ่มีขนาด coarse-very coarse sand ดูรูป ๓.๑๒



รูป ๓.๑๒ ผลการวิเคราะห์ขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบ้านบางเหียง (BN) ปี
๒๕๕๙

ตาราง ๓.๑๕ การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนพื้นผิวชายหาดบริเวณบ้านบาง
เนียง (BN) ปี ๒๕๔๙

Period	Size (mm)	Size comparable
February	0.507	coarse sand
May	0.783	increase
August	0.899	increase
November	0.777	decrease

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดตะกอนบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ในปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความต่างของขนาดเม็ดตะกอนที่ไม่เท่ากันในแต่ละฤดูกาล ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนชายหาดอยู่ในช่วงของ coarse sand มีขนาด ๐.๕๐๗ มม. ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น ๐.๗๘๓ มม. จากนั้นในช่วงฤดูฝนเดือนสิงหาคม ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นอีกเป็น ๐.๘๙๙ มม. และในช่วงสิ้นฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ ขนาดของเม็ดตะกอนลดลงเหลือ ๐.๗๗๗ มม.

ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of beach sediment)

ส่วนประกอบของตะกอนทรายชายหาดประกอบด้วยแร่ควอร์ต ๖๐ % เศษซากเปลือกหอยและปะการัง ๓๕ % และแร่อื่นๆ ๕ % จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในแต่ละช่วงฤดูที่ต่างกันดังตาราง ๓.๑๖ ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ๒๕๔๙ จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตเท่ากับ ๖๓.๔๘ % ในขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีปริมาณ ๓๒.๔๘ % ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ๒๕๔๙ จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตเพิ่มขึ้นจากเดิม ๓.๒๔ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวนลดลง ๐.๙๑ % จากนั้นในเดือนสิงหาคม จำนวนปริมาณของแร่ควอร์ตลดลงจากเดิม ๖.๑๗ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวนเพิ่มขึ้น ๔.๙ % และในช่วงสิ้นฤดูมรสุมเดือนพฤศจิกายน ๒๕๔๙ แร่ควอร์ตมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม ๗.๓๗ % ขณะที่เศษซากเปลือกหอยและปะการังมีจำนวนลดลง ๘.๙๓ %

ตาราง ๓.๑๖ ปริมาณเฉลี่ยของแร่ควอร์ตและเศษซากเปลือกหอยและปะการังในตะกอน
ชายหาดบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๕๙

Month	Quartz %	Bioclast %
February	63.48	32.48
May	66.71	32.29
August	60.55	37.18
November	67.92	28.25

คุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดตะกอน (Physical properties)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทรายชายหาดบริเวณบ้านบางเนียง (BN) ปี ๒๕๕๙ แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่มีความกลมมน (roundness) แบบ sub-angular ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่เพิ่งแตกออกมาจากหินต้นกำเนิดเมื่อไม่นานมานี้และถูกพัดพามาไม่ไกลจากหินต้นกำเนิดมากนัก ส่วนรูปร่างของเม็ดตะกอน (sphericity) เป็นแบบ high sphericity แสดงให้เห็นว่าเป็นตะกอนที่ถูกขัดถูและเสียดสีด้วยตัวกลางที่มีพลังงานรุนแรงซึ่งมักเกิดได้ในบริเวณ swash zone หน้าหาด

บทที่ ๔

การสำรวจตะกอนสึนามิที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ และสึนามิในอดีต

๔.๑ ข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สึนามิปี ๒๕๔๗ ที่ร่องรอยไว้

๔.๑.๑ ร่องรอยทางธรณีสัณฐานวิทยา

สึนามิเมื่อวันที่ ๒๖ ธันวาคม ๒๕๔๗ ได้ทิ้งร่องรอยทางธรณีวิทยาและธรณีสัณฐานวิทยาที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง นอกเหนือไปจากได้สร้างความเสียหายแก่ชีวิต และทรัพย์สิน เป็นจำนวนมากแล้ว ยังสร้างความเสียหายต่อทรัพยากรชายฝั่ง ทรัพยากรทางธรณีวิทยาและสภาพภูมิประเทศชายฝั่ง โดยเฉพาะการสูญเสียพื้นที่จากการกัดเซาะบริเวณหน้าหาดอย่างรุนแรงและรวดเร็วในพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามัน จากการประเมินสภาพความเสียหายแล้ว จังหวัดพังงาได้รับความสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งมากที่สุด ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่บันทึกภาพก่อนและหลังเหตุการณ์ได้เผยแพร่ออกมาจากหลายหน่วยงาน แต่การวิเคราะห์เชิงลึกในทางธรณีวิทยายังมีไม่มากนัก

สึนามิ สร้างความเสียหายทางธรณีวิทยากายภาพ โดยเฉพาะการกัดเซาะบริเวณชายฝั่งในพื้นที่จังหวัดต่างๆ ซึ่งหลายหน่วยงานได้รายงานถึงความเสียหายเชิงพื้นที่ที่มีตัวเลขเปิดเผยออกมาแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งผู้วิจัยและคณะมีความเห็นว่า การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ในเรื่องการกัดเซาะชายฝั่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระมัดระวังเรื่องตัวแปรทางกายภาพและเรื่องของระยะเวลา ในที่นี้หมายถึง เวลาของการเปรียบเทียบเพื่อประเมินหาพื้นที่สูญหายจากสึนามิไม่ว่าจะใช้ข้อมูลจากระยะไกล เช่น ช่วงเวลาในการบันทึกภาพถ่ายจากดาวเทียม หรือรูปถ่ายทางอากาศ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินเชิงพื้นที่ แต่อย่างน้อยที่สุด การเปรียบเทียบเชิงพื้นที่ก่อนและหลังเกิดสึนามิ ก็ทำให้เราสามารถระบุตำแหน่งพื้นที่เสียหายได้

ข้อมูลระยะไกลที่จัดได้ว่าเป็นข้อมูลที่สามารถได้มาด้วยความรวดเร็วมากที่สุด คือ ข้อมูลการบันทึกภาพจากดาวเทียมที่โคจรรอบวงโคจรของโลก ซึ่งแม้ว่าจะไม่ได้บันทึกภาพในขณะที่เกิดและหลังเหตุการณ์โดยทันที แต่ก็สามารถนำมาประยุกต์ในการประเมินตำแหน่งของพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะชายฝั่งได้ จากข้อมูลดาวเทียมที่เปิดเผยออกมาหลังเหตุการณ์สึนามิ ดาวเทียมที่บันทึกภาพสึนามิได้ในจังหวัดที่โคจรผ่านประเทศไทย คือ ดาวเทียมสปอาร์ท (SPOT) ซึ่งสามารถบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของสึนามิได้ในอ่าวพังงา ส่วนดาวเทียมดวงอื่นที่โคจรมาในช่วงสึนามิ คือ ดาวเทียมอิโคนอส (IKONOS) ซึ่งสามารถบันทึกภาพได้ในประเทศศรีลังกา ซึ่งจากรอบวงโคจรของดาวเทียมต่างๆ ที่จะย้อนกลับมาโคจรและบันทึกภาพพื้นที่ในเมืองไทยได้เร็วที่สุดก็คือ ดาวเทียมอิโคนอส ที่สามารถโคจรกลับมาบันทึกภาพในพื้นที่ประเทศไทยได้ในวันที่ ๒๙ ธันวาคม ๒๕๔๗ และจากข้อมูลในหลายหน่วยงานภาพจากดาวเทียมอิโคนอส ที่บันทึกก่อนสึนามิ ในบริเวณตำแหน่งเดียวกัน ก็คือเมื่อวันที่ ๑๓ มกราคม ๒๕๔๖ ที่ได้ถูกนำมา

เปรียบเทียบเชิงพื้นที่ก่อนและหลังสึนามิ ด้วยความแตกต่างกันในเรื่องของเวลาการบันทึกภาพ ทำให้การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และการคำนวณพื้นที่สูญหายเป็นไปได้ไม่มากนัก

๔.๑.๒ ร่องรอยทางตะกอนวิทยา

ทุกพื้นที่ที่น้ำทะเลจากสึนามิได้ท่วมเข้าไปในแผ่นดิน มักพบการสะสมตัวของตะกอนใหม่ปิดทับพื้นผิวเดิมเป็นบริเวณกว้าง และบางแห่งพบการสะสมตัวของตะกอนใหม่เข้าไปในแผ่นดินจากหน้าชายหาดถึง ๗๐๐ เมตร ร่องรอยทางตะกอนวิทยา (sedimentological clue) ที่สำคัญมากที่สุดที่ยืนยันว่าเป็นตะกอนใหม่ซึ่งเกิดจากการพัดพามาโดยสึนามิ คือ รูปแบบของตะกอนบนพื้นผิว (surface sedimentary pattern) อันได้แก่ โครงสร้างและรูปร่างของตะกอนที่เป็นริ้วคลื่น (ripple structure) และโครงสร้างที่เป็นเนินทราย (dune structure) ที่แสดงทิศทางการพัดพาทั้งเข้าไปในแผ่นดิน (landward) และพัดพาออกฝั่งทะเล (seaward) รูปแบบ ขนาด และความหนาของตะกอนใหม่ที่ถูกพัดพาจากสึนามิ มีความหลากหลายแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

๔.๒ ผลการวิเคราะห์ทางตะกอนวิทยาของตะกอนสึนามิ

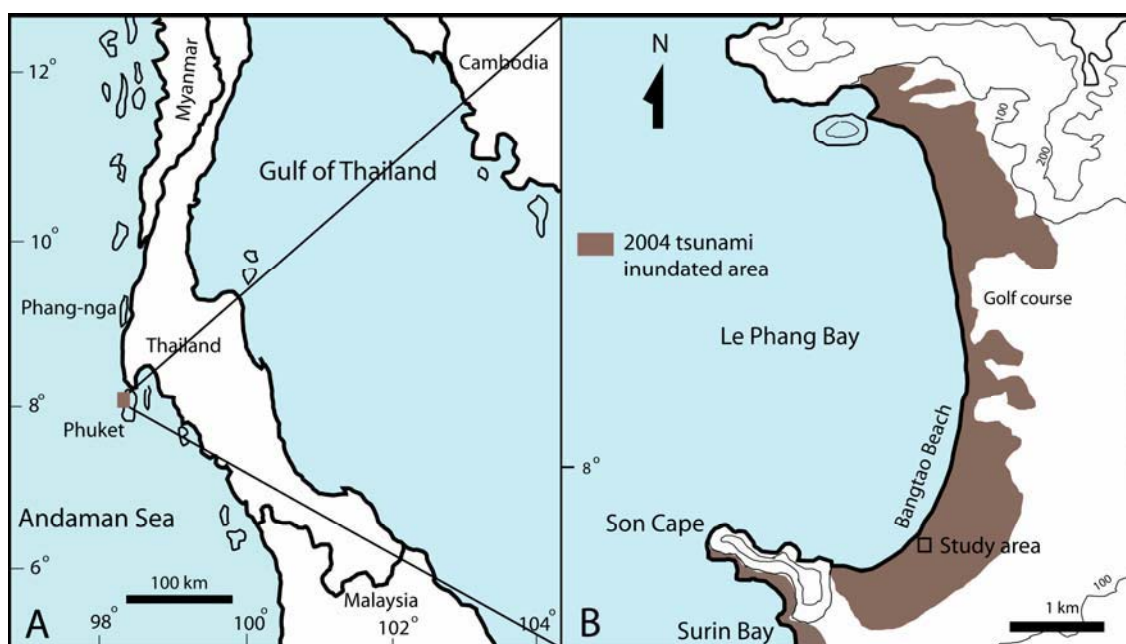
๔.๒.๑ หาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต

หาดบางเทาตั้งอยู่ทางตอนใต้ของอ่าวเลพัง โดยรูปร่างของอ่าวมีความโค้งไม่มากและความชันตั้งแต่หน้าหาดลงไปในทะเลมีไม่มากนัก พบแนวโขดหินหรือฟืดปะการังปรากฏอยู่บริเวณตอนกลางของอ่าวห่างจากชายหาดปัจจุบันประมาณ ๑ กิโลเมตร ซึ่งการที่ภูมิประเทศได้นำตอนกลางมีความสูงมากกว่าตอนเหนือและตอนใต้ของอ่าว ทำให้เมื่อสึนามิเคลื่อนตัวเข้าสู่อ่าวได้มีการเบี่ยงเบนทิศทางเข้าปะทะไปในทางทิศเหนือและทางใต้ หลักฐานหนึ่งที่ยืนยันทิศทางการเข้าปะทะของสึนามิได้เป็นอย่างดี คือ ลักษณะปรากฏของตะกอนที่พบบริเวณหาดบางเทาทางตอนใต้ ซึ่งพบเป็นเนินทรายและสันทรายที่มีรูปร่างเป็นรอยริ้วคลื่น (dunes and ripple sands) ทั้งแสดงทิศทางการพัดพาเข้าสู่แผ่นดิน (landward) และออกสู่ทะเล (seaward)

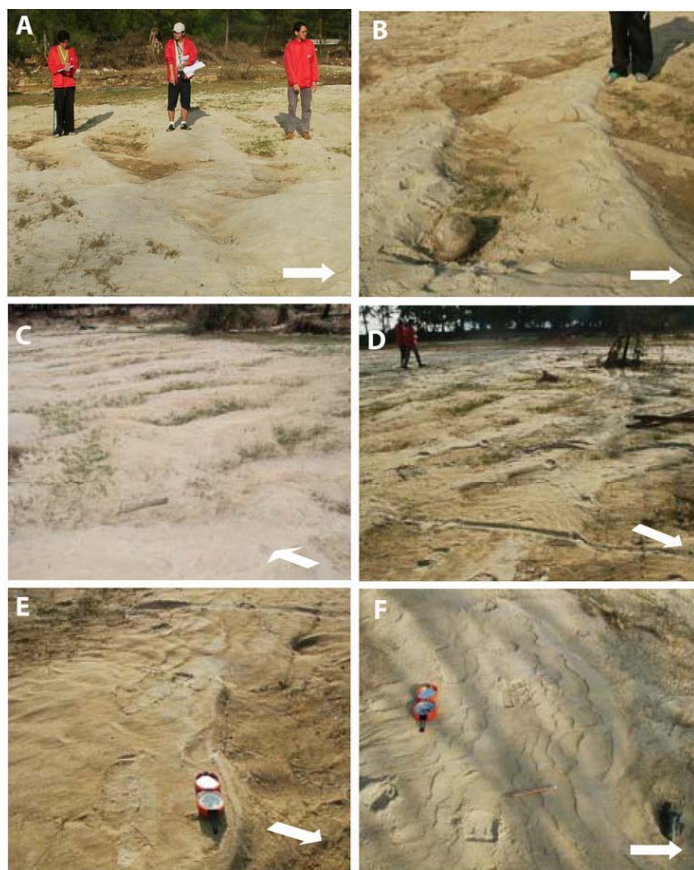
ลักษณะปรากฏทางพื้นผิวที่สำคัญของตะกอนสึนามิที่หาดบางเทา คือ ขนาด รูปร่าง และทิศทางการพัดพา ซึ่งจากหลักฐานทางตะกอนวิทยาเหล่านี้จัดได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์แหล่งที่มาของตะกอน และความเร็วที่สึนามิพัดพาตะกอนเข้ามาปะทะชายฝั่งบริเวณนี้ รูปร่างของการเกิดโครงสร้างตะกอนหากเปรียบเทียบตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ตั้งแต่บริเวณหน้าหาดเข้าไปในแผ่นดิน จะพบว่า มีความสัมพันธ์ในเรื่องของขนาดลักษณะปรากฏทางพื้นผิว (dimension of surface sedimentary structure) กับระยะทางจากหน้าหาด โดยมีการลดขนาดลงเมื่อเข้าสู่แผ่นดิน จากลักษณะปรากฏที่เป็น เนินทราย (dunes) เปลี่ยนเป็นแนวริ้วรอยคลื่น (ripple sands) นอกจากนี้ยังพบว่า มีการพัฒนาแนวริ้วรอยคลื่นบนสันของเนินทราย (ripple sands on dunes) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความรุนแรงของคลื่นลดลง

เรื่อย ๆ ในระยะทางไม่มากนักจากหน้าหาดเพราะพบลักษณะชั้นทับของตะกอนทั้งสองรูปแบบในระยะทางประมาณ ๑๕๐ เมตรจากชายหาดปัจจุบัน

ปริมาณตะกอนที่ถูกสึนามิพัดพาเข้ามาสะสมตัวในแผ่นดินไม่ได้มาจากแหล่งตะกอนหน้าหาดแหล่งเดียว แต่จากลักษณะทางกายภาพของตะกอนพบว่า มีการนำตะกอนจากบริเวณปากคลอง (inlet/outlet sediments) เข้ามาสะสมตัวด้วย นอกจากนี้ ทิศทางการพัดพาที่เห็นได้จากทิศทางการวางตัวของริ้วรอยคลื่นแสดงให้เห็นว่า การพัดพาตะกอนเข้าสู่แผ่นดินเป็นไปในทิศทางหลักทิศทางเดียว (uni-directional landward movement) ในขณะที่ทิศทางการวางตัวของริ้วคลื่นขณะน้ำทะเลถอยร่นพบในหลายทิศทาง (multi-directional movements) ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่า พลังงานในการพัดพาตะกอนขณะน้ำทะเลถอยร่นได้ลดลงเป็นลักษณะการไหลแบบเอื้อย (laminar flow) มีความแรงไม่มากส่วนทิศทางถูกควบคุมและสัมพันธ์กับลักษณะความสูงต่ำของภูมิประเทศ (topographical control) ซึ่งพบการพัดพาในหลายทิศทาง และบางแห่งพบเป็นการไหลออกทะเลแบบน้ำวน เช่น ที่บริเวณบ้านน้ำเค็ม และภูมิประเทศบนพื้นผิวได้ถูกกัดเซาะ (eroded surface) มีความเป็นไปได้ว่าเกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรงโดยสึนามิที่เคลื่อนตัวในทิศทางเข้าฝั่งที่มีความเร็วสูงกว่าขณะที่น้ำทะเลถอยร่น ทำให้ต้องระมัดระวังในการวิเคราะห์พื้นผิวภูมิประเทศที่ถูกกัดเซาะว่า น่าจะเกิดจากทิศทางการเคลื่อนตัวของสึนามิเข้าหาฝั่งมากกว่าขณะน้ำทะเลถอยร่น



รูป ๔.๑ แผนที่แสดงตำแหน่งพื้นที่สำรวจตะกอนสึนามิระดับรายละเอียดบริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต พื้นที่สีน้ำตาลในแผนที่ B แสดงพื้นที่ที่ถูกน้ำทะเลท่วมถึงจากสึนามิ (ภาพดัดแปลงจาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๘ วารสาร Marine Geology)



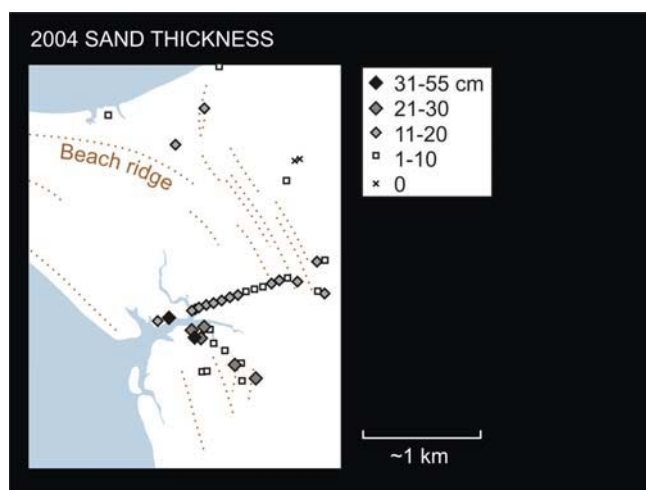
รูป ๔.๒ โครงสร้างตะกอนบนพื้นผิว บริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ต แสดงให้เห็นการทิศทางการพัดพาขณะสึนามิเคลื่อนตัวเข้าหาแผ่นดินได้เป็นอย่างดี โครงสร้างตะกอนดังกล่าวจัดว่าเป็นข้อมูลทางธรณีวิทยาที่สำคัญมากเพราะโครงสร้างบนพื้นผิวตะกอนมักจะถูกทำลายไปทันทีหลังการสะสมตัว ในระดับสากลมีการรายงานการค้นพบโครงสร้างตะกอนพื้นผิวไม่มากนัก โครงสร้างตะกอนบนพื้นผิวที่เห็นได้ชัดเจนประกอบด้วย เนินทรายรูปร่างสมมาตรและไม่สมมาตรแสดงทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (symmetrical and asymmetrical landward dunes) (รูป A, B และ C) ริวคลื่นแสดงทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (landward ripple) (รูป D และ E) ริวคลื่นแสดงทิศทางออกสู่ทะเลปิดทับบนเนินทราย (seaward ripple on dune) (รูป F) ลูกศรสีขาวแสดงทิศทางเข้าสู่แผ่นดิน (รูปดัดแปลงจาก Choowong และคณะ ปี ๒๐๐๘ วารสาร Marine Geology)

๔.๒.๒ แหล่มปะการังถึงเขาหลัก จังหวัดพังงา

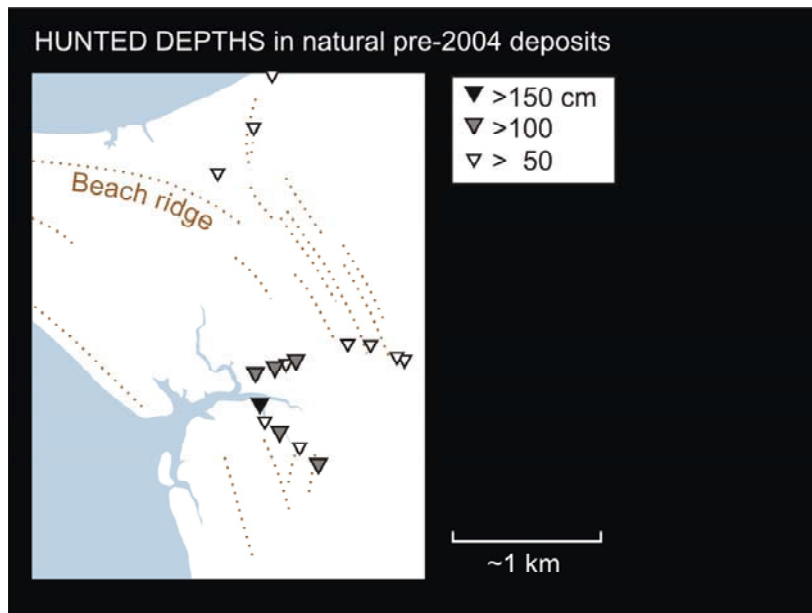
พื้นที่เก็บตัวอย่างตะกอนสีนามีจากหล่มปะการังถึงบริเวณบ้านเขาหลัก จังหวัดพังงา แบ่งเป็นพื้นที่ย่อย คือ บริเวณคลองด้านหลังบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท บ้านคึกคัก และบ้านบางเนียง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่พบตะกอนสีนามีแผ่กระจายทั่วบริเวณในหลายทิศทาง จากลักษณะภูมิประเทศในแถบนี้พบว่าเป็นที่ราบต่ำมีความสูงไม่มากจากระดับน้ำทะเลปานกลาง คือ สูงประมาณ ๑ ถึง ๒ เมตร และมีภูเขาที่น้อยอยู่ด้านถนนสุขุมวิท (ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข ๔) ด้วยลักษณะภูมิประเทศที่ต่ำและมีเขากั้นด้านตะวันออกทำให้พบการสะสมตัวของตะกอนสีนามีที่แสดงทิศทางทั้งเข้าสู่แผ่นดิน (landward) และออกสู่ทะเล (seaward) ตะกอนสีนามีที่พบส่วนใหญ่มีขนาดทรายและมีความหนาแตกต่างกัน ความหนามากที่สุดของตะกอนที่พบบนพื้นผิวที่ราบลุ่มประมาณ ๑๐ เซนติเมตรและความหนาลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นไปในแผ่นดิน

บลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท

บริเวณปากคลองแห่งนี้เป็นพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะจากสีนามีอย่างมาก จัดได้ว่าเป็นพื้นที่เสียหายระดับต้นๆ ในเชิงพื้นที่ของจังหวัดพังงา ตะกอนบริเวณหน้าหาดที่ถูกพัดพาหายไปคาดว่าบางส่วนได้ถูกนำขึ้นไปสะสมตัวใหม่เข้าไปในแผ่นดิน ในการสำรวจตะกอนสีนามีในบริเวณนี้พบว่า ตะกอนสีนามีมีการกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง และลักษณะการสะสมตัว อาทิ ความหนาของชั้นสะสมตัวจะขึ้นอยู่กับระยะทางจากหน้าหาด และสภาพภูมิประเทศที่เป็นแนวคลองหรือร่องน้ำ สิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งคือ ตะกอนสีนามีในพื้นที่นี้มีขนาดตะกอนที่แตกต่างกันไม่มากนักและมีความต่อเนื่องของการสะสมตัวแสดงถึงความต่อเนื่องของกระแสน้ำที่พัดพาตะกอนมาสะสมตัวในพื้นที่นี้ ที่มสำรวจได้ทำการขุดหลุมทดสอบระดับลึกและได้ติดตามการกระจายตัวของตะกอนสีนามี พร้อมทั้งสำรวจหาความเป็นไปได้ที่จะพบตะกอนสีนามีในอดีตไปพร้อมกัน



รูป ๔.๓ แผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจและความหนาของตะกอนสีนามีปี ๒๕๔๗ ในพื้นที่ด้านหลังบลูวิลเลจ ปะการัง รีสอร์ท จังหวัดพังงา (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเทอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน)



รูป ๔.๔ ระดับความลึกของการขุดหลุมทดสอบในพื้นที่ซึ่งพบชั้นสะสมตัวที่เป็นตะกอนทรายธรรมชาติและพบชั้นปะการังในระดับความลึกประมาณ ๑๒๐ เซนติเมตร (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเตอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน)



รูป ๔.๕ การขุดสำรวจตามคลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพบตะกอนสีนํ้ามิในอดีตโดยการปาดชั้นตะกอน เพื่อจำแนกชนิดการสะสมตัวที่เป็นธรรมชาติและตะกอนที่ได้จากการขุดเหมืองเก่า (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเตอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน)



รูป ๔.๖ ชั้นตะกอนสีน้ำตาลปี ๒๕๕๗ สะสมตัวอยู่ด้านบนชั้นตะกอนดินโคลนโดยเห็นความแตกต่างทางกายภาพ เช่น สี ขนาดตะกอน และรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนด้านบนกับด้านล่างที่เป็นตะกอนดินโคลนชัดเจน ซึ่งเป็นอีกรูปแบบการสะสมตัวที่จะใช้เป็นตัวแบบในการตามหาตะกอนสีน้ำตาลในอดีต (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๗ (ซ้าย) ชั้นตะกอนสีน้ำตาลปี ๒๕๕๗ ที่พบในบริเวณคลองด้านหลังบลูวิลเลจ ปะการังรีสอร์ท (ขวา) ภาพหน้าตัดชั้นตะกอนเดิมที่ทีมสำรวจทำการขุดเพื่อค้นหาตะกอนสีน้ำตาลในอดีตบริเวณเดียวกัน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

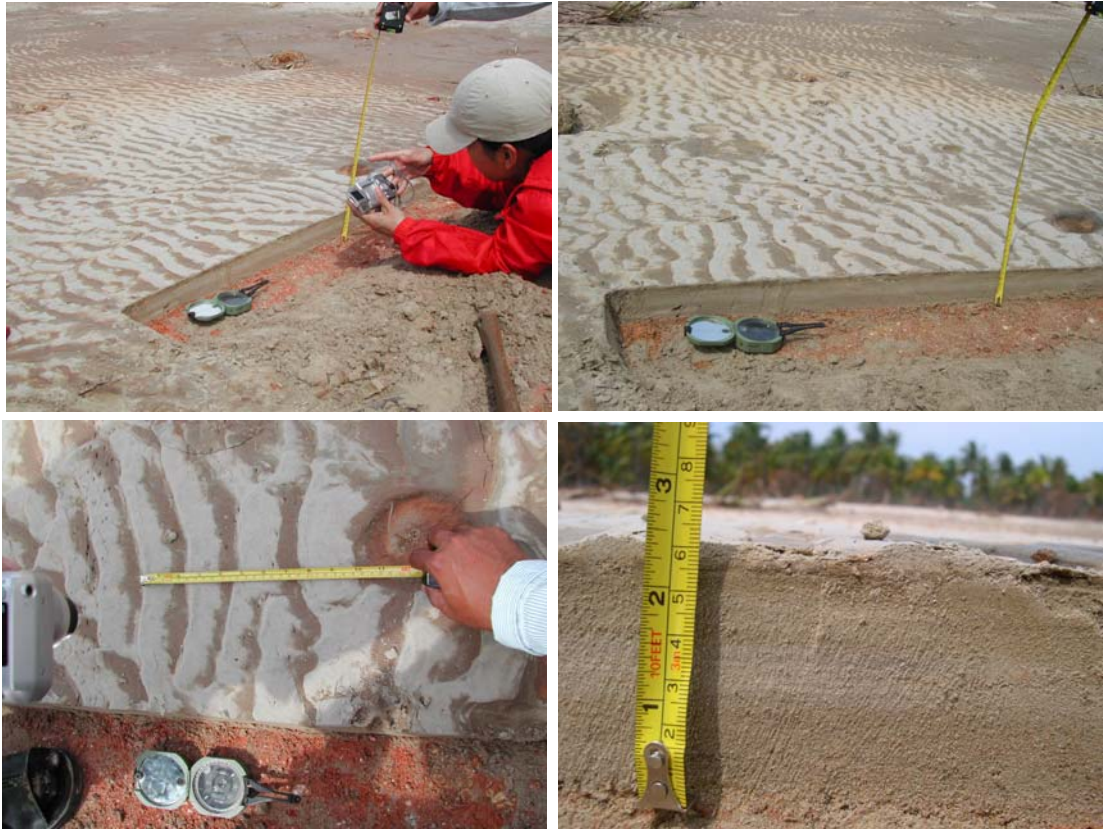
บ้านบางเนียง

โครงสร้างตะกอนที่พบในบริเวณนี้มีความหลากหลายในรูปแบบซึ่งบ่งบอกความรุนแรงของสึนามิได้จากลักษณะปรากฏบนพื้นผิวเหล่านี้ เช่น ลักษณะรอยริ้วคลื่นที่เป็นแนวสันตรง (straight-crested ripple sand) และที่เป็นสันโค้งรูปวงรี (catenary and linguoid-crested ripple sand) สามารถใช้เป็นหลักฐานที่แสดงความแตกต่างของความเร็วสึนามิได้ โดยในบริเวณใกล้เคียงกันที่พบรูปแบบโครงสร้างตะกอนพื้นผิวทั้งสามรูปแบบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเร็วของสึนามิที่ทำให้เกิดรูปแบบโครงสร้างที่เป็นสันโค้งรูปวงรีจะมีมากกว่า ทั้งนี้คงต้องพิจารณาองค์ประกอบทางกายภาพอื่นๆ ด้วย เช่น ลักษณะความสูงต่ำของภูมิประเทศ หรือแม้กระทั่งความสูงต่ำของพื้นที่เพียงไม่กี่เซนติเมตรก็เป็นตัวแปรที่จะทำให้เกิดโครงสร้างตะกอนในหลายรูปแบบได้

ภาพที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม (รูป ๔.๘) ในช่วงวันที่ ๓ ถึง ๙ มกราคม ๒๕๔๘ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมพอดีที่โครงสร้างตะกอนเหล่านี้ยังคงสภาพอยู่ทั้งบนพื้นผิวและในร่องของลำดับชั้นตะกอน ทางคณะสำรวจได้ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนโดยการขุดผนังตะกอนเป็นแนวร่องยาว (trench) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดตะกอนที่สัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นผิว อย่างไรก็ตามจากข้อสังเกตในภาคสนามจะไม่พบการแสดงรายละเอียดภายในโครงสร้างตะกอน (internal sedimentary structures) มากนัก ซึ่งทางคณะทำงานจะได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงระดับขนาดเม็ดตะกอนต่อไป (grain by grain analysis) เพื่อที่จะให้เห็นโครงสร้างภายในของตะกอนสึนามิชัดเจนขึ้น



รูป ๔.๘ รวมภาพลักษณะปรากฏบนพื้นผิวของตะกอนสีนํ้าที่เป็รอยริ้วคลื่นแสดงทิศทางการพัดพาออกสู่ทะเล (seaward slightly straight-crested ripple sand) (สองภาพบนสุด) และโครงสร้างตะกอนที่เกิดจากการตกหรือกระแทกของวัตถุที่ลอยมากับน้ำทะเล (tool or bounce mark) (ภาพกลางและล่าง) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่เกิดรอยริ้วคลื่นและวัตถุบางตำแหน่งได้รับกวนการสร้างตัวของรีย้วยคลื่น (ภาพโดย ดร. วิชัย จุฑะโกสิทร์กานนท์)



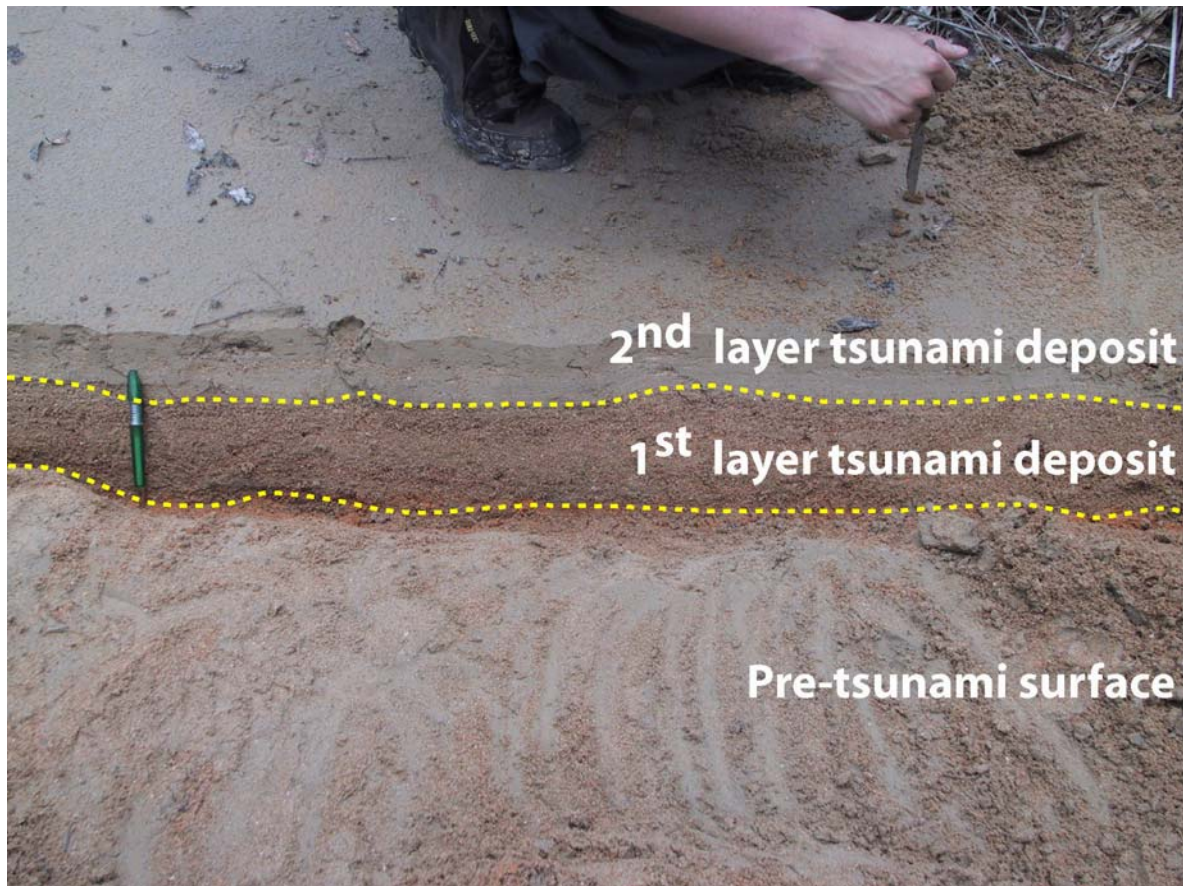
รูป ๔.๙ ประมวลภาพการศึกษาชั้นตะกอนโดยการขุดแนวร่องสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่าง (trench) เป็นแนวยาวเพื่อให้ครอบคลุมโครงสร้างตะกอนในแนวระนาบ จากรูปจะเห็นว่าตะกอนสีนํ้ามึในบริเวณบ้านบางเนียงนี้มีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ ๖ เซนติเมตร ที่วัดในตำแหน่งประมาณ ๕๐๐ เมตร ห่างแนวชายฝั่งทะเลปัจจุบัน ตะกอนสีนํ้ามึที่พบมีขนาดตั้งแต่ทรายละเอียดถึงทรายขนาดปานกลางเป็นส่วนใหญ่ ด้านบนของชั้นตะกอนทรายพบตะกอนขนาดโคลนหนาประมาณ ๑ ถึง ๒ มิลลิเมตร ปิดทับอยู่ซึ่งจะสังเกตได้จากสีเทาเข้มที่อยู่ระหว่างชั้นรื้อรอยคลื่น (ภาพโดย ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว และ ดร. วิชัย จุฑะโกสสิทธิ์กานนท์)



รูป ๔.๑๐ โครงสร้างตะกอนที่เป็นริ้วรอยคลื่นรูปแบบโค้ง (linguoid-crested ripple sands) ที่พบได้ทั่วไปในบริเวณนี้และยังเห็นร่องรอยคราบการตกผลึกของเกลือ (salt crystallization) ในแอ่งของริ้วรอยคลื่นอยู่ด้านบนสุดเหนือชั้นตะกอนโคลน รูปแบบโครงสร้างตะกอนลักษณะนี้บ่งบอกความแตกต่างในเรื่องความเร็วของสึนามิ และความสูงของระดับน้ำทะเล (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๑๑ ภาพตัดขวางแสดงหน้าตัดชั้นตะกอน จะเห็นว่า ตะกอนมีการัดขนาดจากใหญ่ขึ้น
ไปเล็ก (normal grading) และในบางพื้นที่พบการสะสมตัวเป็นสองชั้นที่มีชุดการัด
ขนาดสองชุด (double-layered normal grading) การขุดร่องสำรวจและการทำ
รายละเอียดชั้นตะกอนสีนํ้ามในระดัปลังสร้างตะกอนจะช่วยให้สามารถประมาณ
ความเร็วและเปรียบเทียบความรุนแรงของสีนํ้ามได้
(ภาพโดย ดร. วิชัย จุฑะโกสิทร์กานนท์)



รูป ๔.๑๒ ลักษณะตะกอนสึนามิที่แสดงการสะสมตัวสองชั้น (double-layered tsunami deposits) ที่พบบริเวณแกรนด์ ไดมอนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา บ้านบางเนียง โดยชุดตะกอนทั้งสองชั้นแสดงการค้ำขนาดตะกอนจากหยาบขึ้นไปละเอียดด้านบน (normal grading) อย่างไรก็ตามโครงสร้างภายในของตะกอนแต่ละชั้นปรากฏไม่ชัดเจนนัก แต่พอสรุปได้ว่า มีการสะสมจากพัดพาโดยสึนามิอย่างน้อยสองครั้งในบริเวณนี้ (ข้อมูลวิเคราะห์บางส่วนจาก Choowong และคณะ ปี ค.ศ. ๒๐๐๗ วารสาร Journal of coastal research ฉบับที่ ๒๓ หมายเลข ๕ ภาพโดย ดร. นาโอมิ มูราโกชิ มหาวิทยาลัยชินชิว ญี่ปุ่น)

๔.๒.๓ เกาะคอเขา จังหวัดพังงา

เกาะคอเขาตั้งอยู่ตอนเหนือของบ้านน้ำเค็ม จังหวัดพังงา สภาพภูมิประเทศของเกาะคอเขาฝั่งด้านตะวันตกเป็นที่ราบลุ่มสลับกับแนวสันทราย โดยมีแนวป่าชายเลนอยู่ทางด้านตะวันออกของเกาะบ่งบอกถึงการปรับสภาพแวดล้อมจากพื้นที่ที่มีอิทธิพลจากคลื่นลมมาก (wave-dominated coast) เป็นพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง (tide-dominated coast) ภายหลังจากมีพัฒนาการของแนวสันดอนทราย อย่างไรก็ตาม พื้นที่บนเกาะคอเขานี้ได้เคยมีประวัติการทำเหมืองแร่ดีบุกและร่องรอยการทำเหมืองแร่ที่เป็นกองมูลดิน หรือขุมเหมืองก็ยังพบเห็นได้โดยทั่วไปบนเกาะ นอกจากนี้ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ ๒ ได้มีการบอกเล่าว่า เกาะคอเขาเคยเป็นพื้นที่พำนักของทหารต่างชาติ และได้เคยมีการปรับพื้นที่บางส่วนให้เป็นสนามบิน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางภูมิศาสตร์ของเกาะคอเขาอย่างมาก ฉะนั้นการเลือกพื้นที่สำรวจตะกอนสีนํ้าและสีนํ้าในอดีตบนเกาะคอเขาต้องพิจารณาพื้นที่ที่ไม่เคยมีประวัติการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่อย่างละเอียด ซึ่งพื้นที่หนึ่งที่ทีมสำรวจได้พิจารณาเลือก คือ ทางตอนเหนือของเกาะ บริเวณบ้านนอกนา ซึ่งโดยภูมิศาสตร์แล้วน่าจะเป็นพื้นที่ที่ตะกอนสีนํ้าไม่ว่าจะเป็นสีนํ้าเมื่อปี ๒๕๔๗ หรือสีนํ้าในอดีตน่าจะถูกรักษาสภาพไว้ได้เป็นอย่างดี



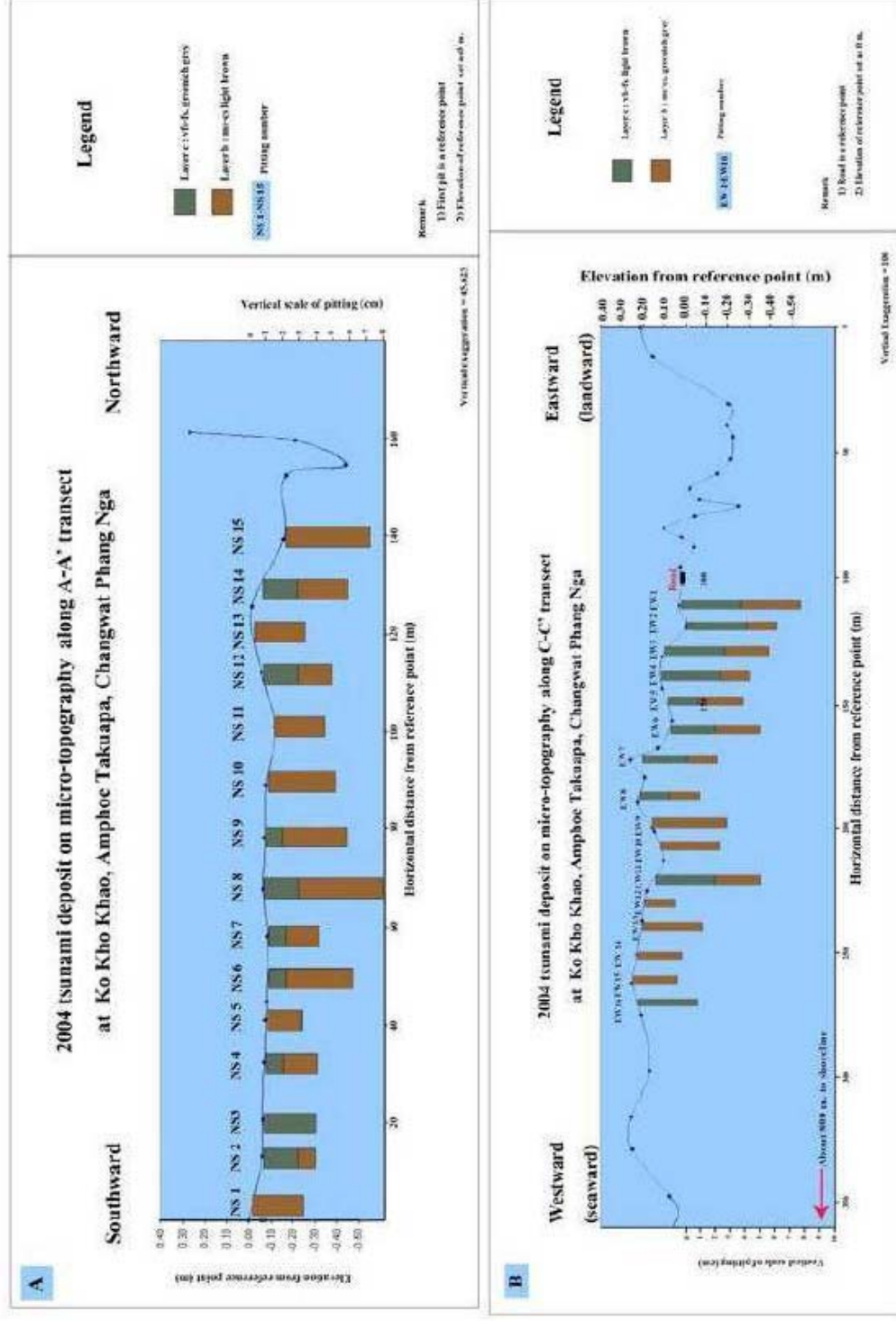
รูป ๔.๑๓ แผนที่แสดงตำแหน่งจุดสำรวจตะกอนสีนํ้าอย่างเป็นระบบตามแนวสำรวจจากบริเวณบ้านนอกนา เกาะคอเขา จังหวัดพังงา (ภาพจาก Jitranoon ปี ๒๐๐๖)



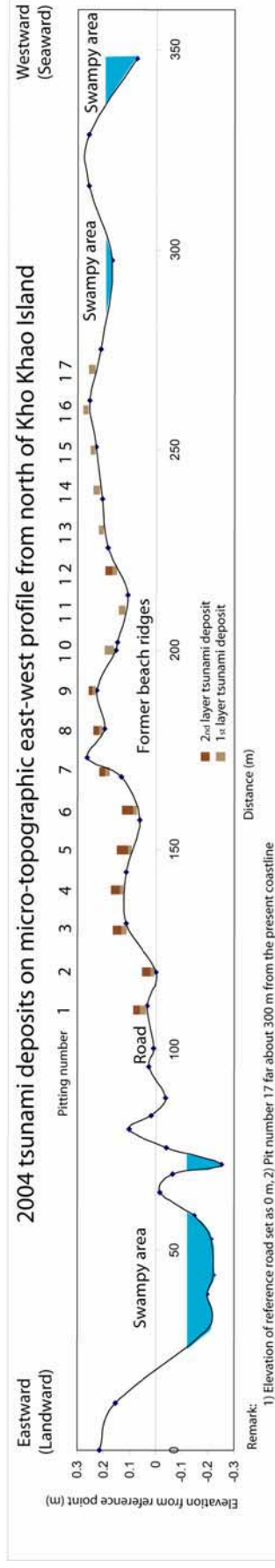
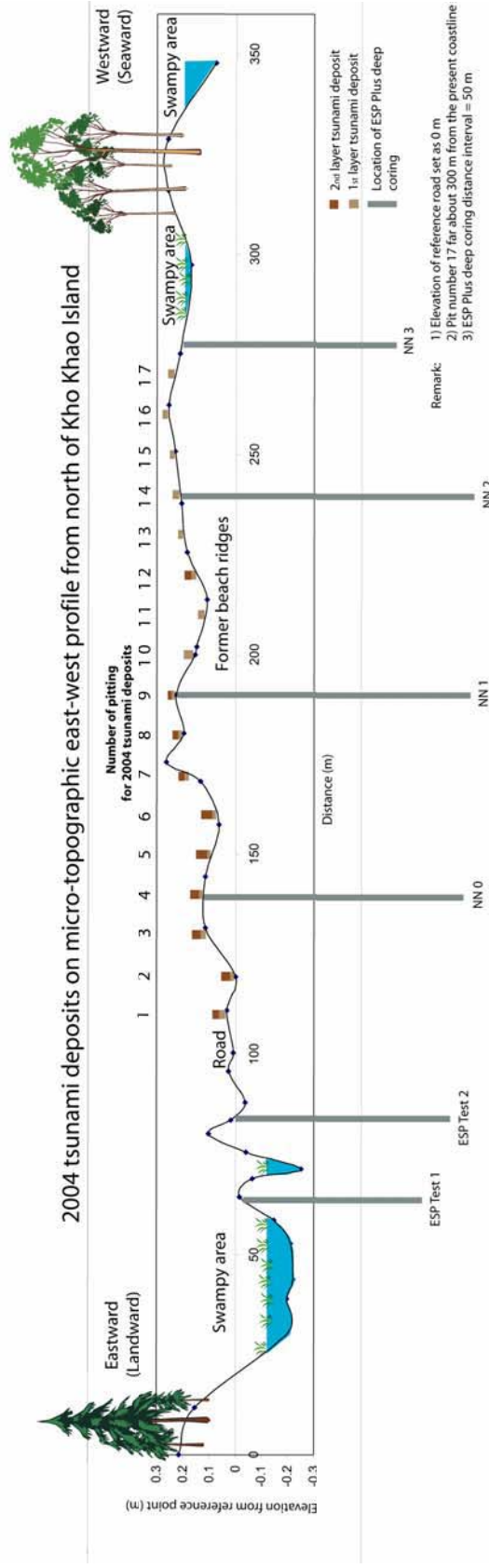
รูป ๔.๑๔ ตำแหน่งแนวสำรวจตะกอนสีนามิตอนเหนือของเกาะคอเขา ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศเป็นสันทรายสลับที่ลุ่มต่ำ ดังเห็นในรูปถ่ายทางอากาศ (ภาพจาก Jitranoon ปี ๒๐๐๖)

ผลการสำรวจและเปรียบเทียบลักษณะความเป็นไปได้ที่จะพบตะกอนสีนามิในอดีตจากเกาะคอเขา ที่มงานพบชั้นตะกอนทรายที่มีขนาดเล็กแทรกสลับกับชั้นตะกอนทรายที่มีขนาดใหญ่และเป็นทรายจากการสะสมตัวตามภาวะปกติ แต่ลักษณะการกระจายตัวของชั้นตะกอนทรายขนาดเล็กก็ไม่ได้ต่อเนื่องในทุกหลุมทดสอบ อย่างไรก็ตาม ที่มงานก็ได้ตั้งเป็นสมมติฐานไว้ว่า ชั้นตะกอนทรายขนาดเล็กนี้อาจจะเกิดจากการสะสมตัวในภาวะปกติ หรืออาจจะเกิดจากการพัดพาท่วมข้ามมากับน้ำทะเลจากพายุ หรือ อาจจะมาจากสีนามิ ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้จะได้นำไปเป็นแบบในการวิเคราะห์ชนิดของการสะสมตัวที่อาจจะเกิดจากสีนามิในพื้นที่อื่นๆ ต่อไป

นอกจากแนวสำรวจทางด้านเหนือของเกาะแล้ว คณะสำรวจได้ทำการสุ่มเจาะสำรวจโดยวางตำแหน่งการขุดไว้ครอบคลุมเกาะคอเขาในหลายๆ ตำแหน่งพบลักษณะตะกอนที่เกิดจากการขุดเหมือนตึกบุกแล้วนำมาถมเป็นเนินทำให้บางครั้งอาจจะมองได้ว่าเป็นเนินสันทราย (beach ridge) หรือเนินทรายลมหอบ (sand dune) ซึ่งหากไม่พิจารณาธรรมชาติของการสะสมตัวในทั้งสองชนิดกรณีนี้แล้ว จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการแปลความหมายชั้นการสะสมตัวได้ จะเห็นว่า ข้อมูลประวัติการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการช่วยยืนยันว่า พื้นที่ใดมีการปรับหรือเปลี่ยนแปลงไป



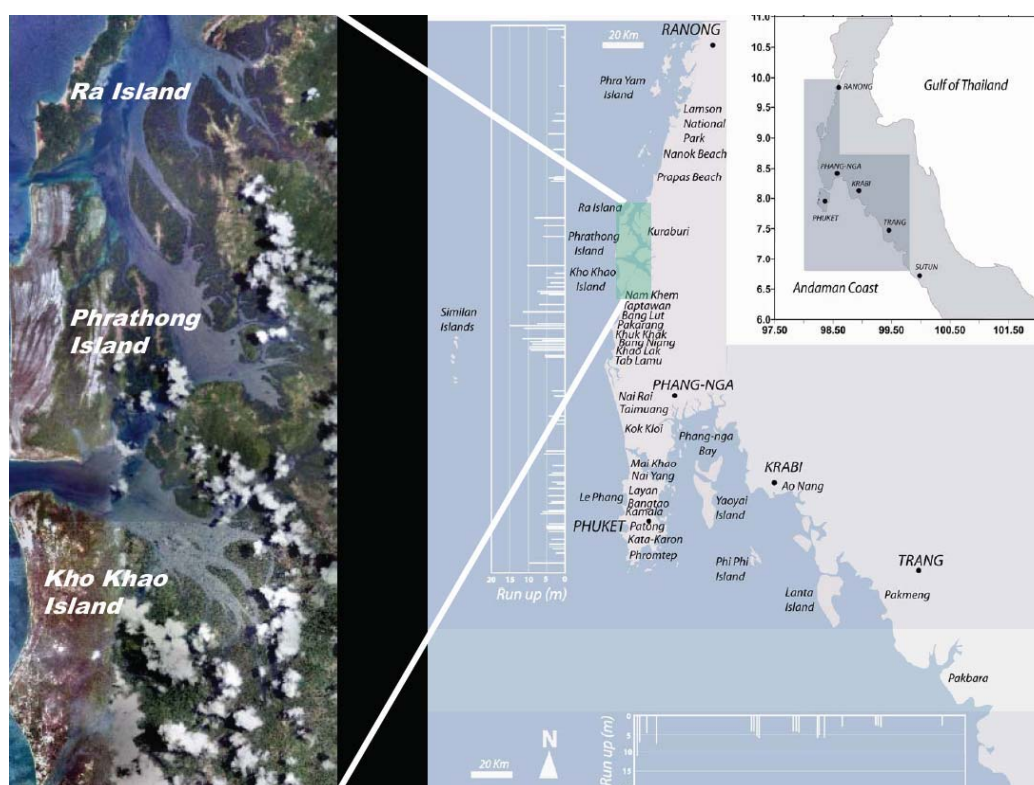
รูป ๔.๑๕ แผนภาพแสดงการเทียบเคียงชั้นตะกอนสีน้ำเงินเมื่อปี ๒๕๔๗ และชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายปกติที่ได้จากการขุดหลุมทดสอบ (ภาพจาก Jitranon ปี ๒๐๐๖)



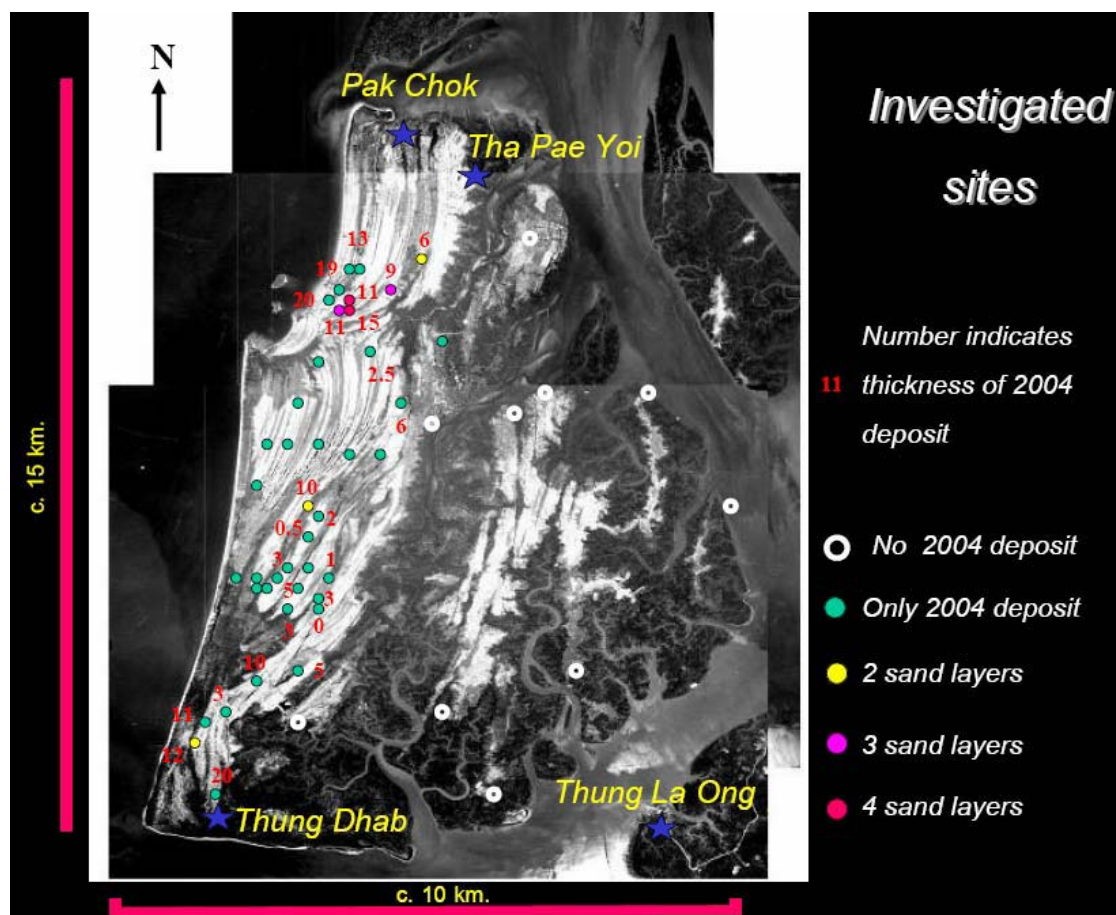
รูป ๔.๑๖ แผนภาพแสดงการเทียบเคียงชั้นตะกอนสีน้ำเงินเมื่อปี ๒๕๔๗ และชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายปกติที่ได้จากเครื่องเจาะตะกอนแบบ กระแทก (ESP Plus) (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ฐาวัชร)

๔.๒.๔ เกาะพระทอง จังหวัดพังงา

ตะกอนสีนํามีที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ บนเกาะพระทอง จังหวัดพังงา ได้มีการสำรวจและบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายทีมด้วยกัน จากการสำรวจโดยทีมงานจากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า ตะกอนสีนํามีกระจายตัวเป็นบริเวณไม่กว้างมาก กล่าวคือ ระยะทางการสะสมตัวและการนำพาตะกอนไปสะสมตัวโดยสีนํามีเมื่อปี ๒๕๔๗ จะไม่สัมพันธ์กับระยะทางที่น้ำทะเลท่วมถึงเข้าไปในแผ่นดิน (inundation limit) ตะกอนสีนํามีที่พบแสดงถึงความสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศหรือความสูงต่ำระหว่างพื้นที่ที่เป็นสันทรายและพื้นที่ที่เป็นที่ลุ่มระหว่างสันทราย ในพื้นที่ลุ่มระหว่างแนวสันทราย (swale) ไม่ว่าจะเป็นที่ลุ่มที่มีน้ำขัง (wet swale) หรือที่ลุ่มที่น้ำแห้งแล้ว (dry swale) จะเป็นพื้นที่ที่ตักตะกอนสีนํามีได้เป็นอย่างดี ทีมงานพบชั้นการสะสมตัวที่ต่อเนื่องและมีความหนาของชั้นสีนํามีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การสะสมตัวของตะกอนสีนํามีในบริเวณแนวสันทราย (ridge)



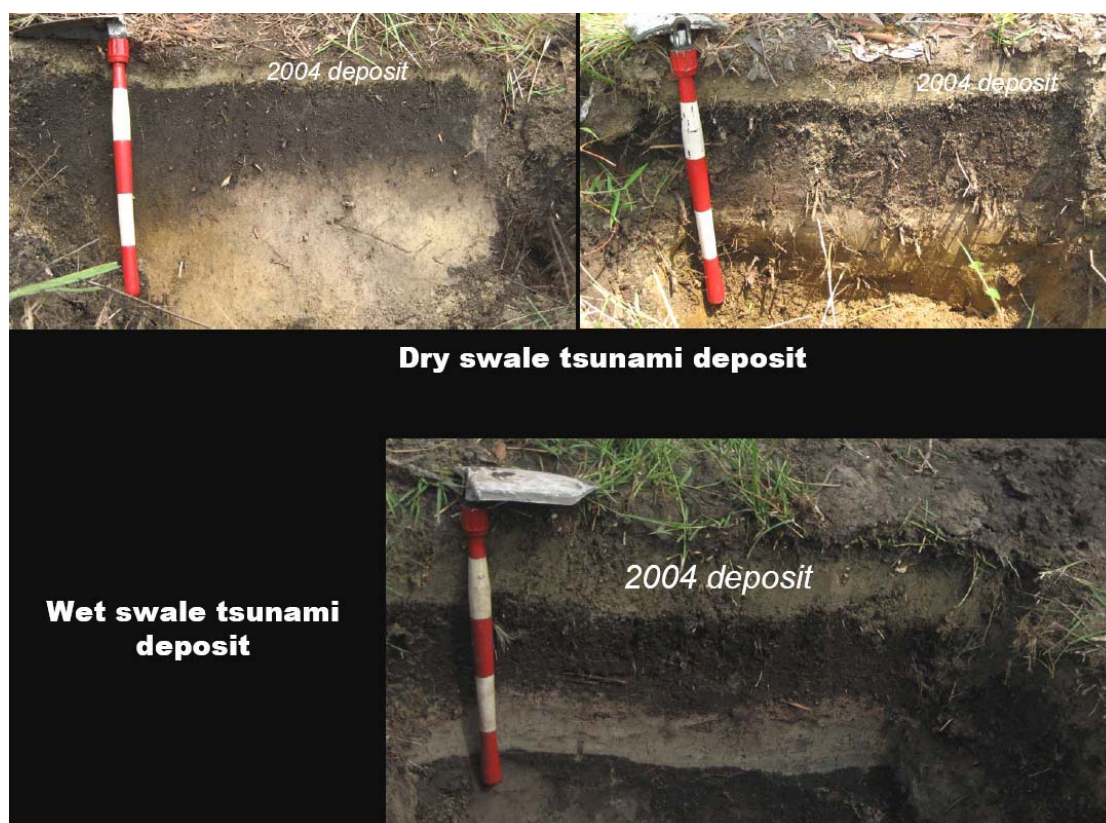
รูป ๔.๑๗ (ซ้าย) ภาพดาวเทียมแสดงสภาพภูมิประเทศบนเกาะพระทองและเกาะคอเขา จังหวัดพังงา และ (ขวา) แผนที่แสดงพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสีนํามีพร้อมระดับความสูงสีนํามีเมื่อปี ๒๕๔๗ และตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเกาะพระทอง เกาะคอเขา (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๑๘ แผนที่แสดงตำแหน่งการขุดและเจาะสำรวจตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ และตะกอนสึนามิในอดีตบนเกาะพระทองซ้อนทับบนรูปถ่ายทางอากาศ หมายเลขสีแดงแสดงความหนาของตะกอนสึนามิที่สะสมตัวเมื่อปี ๒๕๔๗ และวงกลมสีต่างๆ แสดงชั้นตะกอนทรายที่คาดว่าจะเป็นชั้นตะกอนที่เกิดจากสึนามิในอดีตแทรกสลับหรืออยู่ระหว่างชั้นดิน (ภาพจาก ดร. เครือวัลย์ จันทรแก้ว ปรับปรุงเพิ่มเติมข้อมูลโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



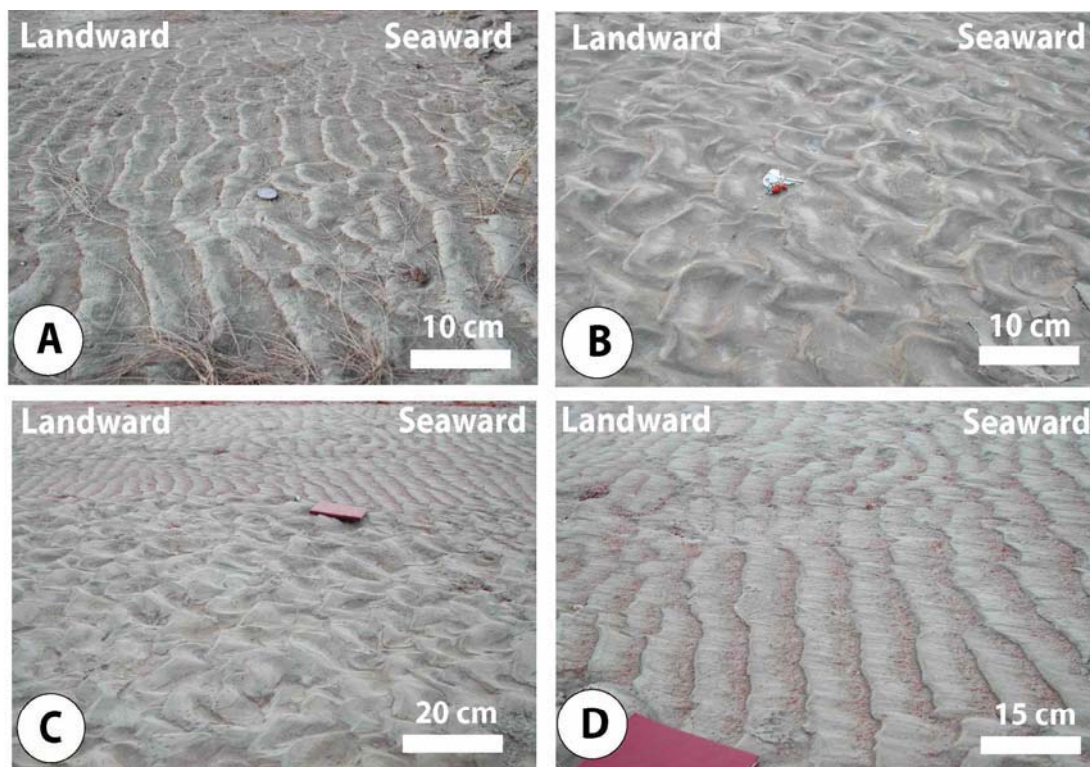
รูป ๔.๑๙ ภาพแสดงลักษณะภูมิประเทศชนิดต่างๆ ที่ทีมงานเลือกในการสำรวจตะกอนสีนามี (รูปบน) ภูมิประเทศแบบที่ลุ่มต่ำหลังแนวสันทรายที่มีความชื้นแฉะในบางช่วงเวลาในรอบปี (wet swale) โดยส่วนใหญ่จะต่ำจากแนวสันทรายประมาณ ๑ เมตร (รูปล่าง) แสดงสภาพภูมิประเทศที่เป็นที่ลุ่มต่ำที่ไม่มีน้ำขัง (dry swale) โดยทั้งสองชนิดของภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ลุ่มต่ำระหว่างแนวสันทรายนี้ (swale) จะพบตะกอนสีนามีปี ๒๕๔๗ กระจายตัวอยู่เสมอแต่ด้วยความหนาที่แตกต่างกันไปตามระยะทางจากหน้าหาดปัจจุบัน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



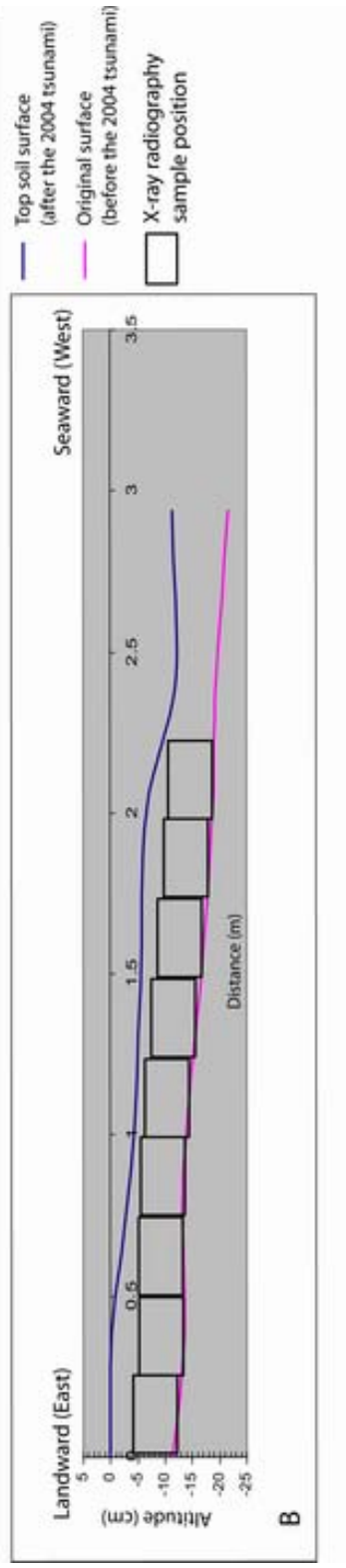
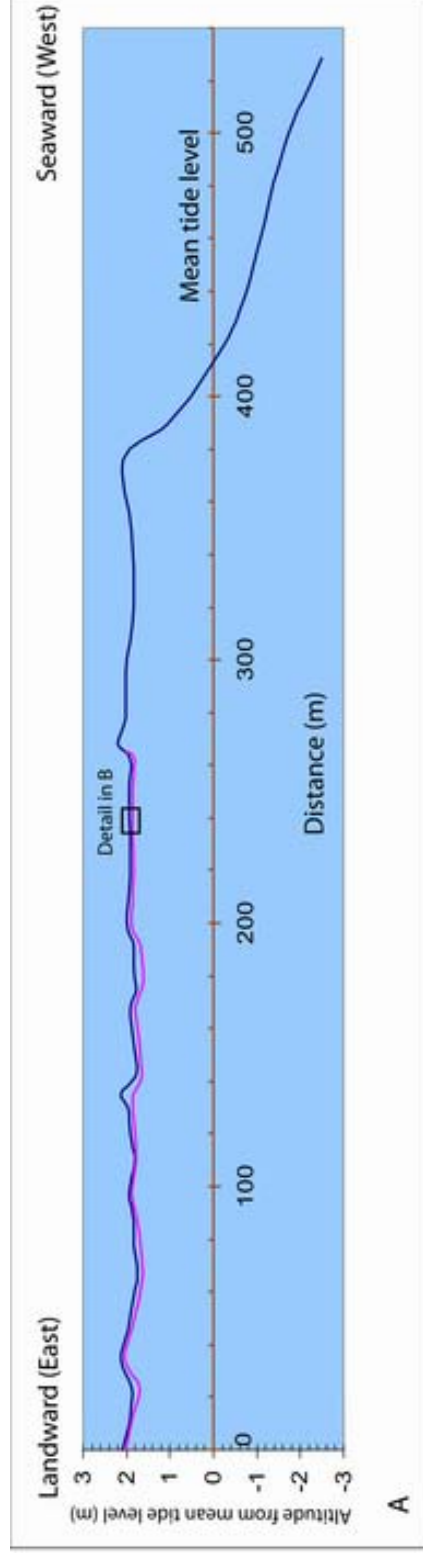
รูป ๔.๒๐ ภาพถ่ายจากภาคสนามแสดงลักษณะปรากฏที่พบของตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ ทั้งใน
ภูมิประเทศแบบ wet swale และ dry swale (รูปบนซ้ายและขวา) และแสดงชั้น
ตะกอนทรายที่คาดว่าเป็นสึนามิในอดีตอยู่ใต้ชั้นตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ และชั้นดิน
ธรรมชาติ (รูปล่าง) ที่พบในสภาพภูมิประเทศแบบ wet swale
(ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

๔.๒.๕ อุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง

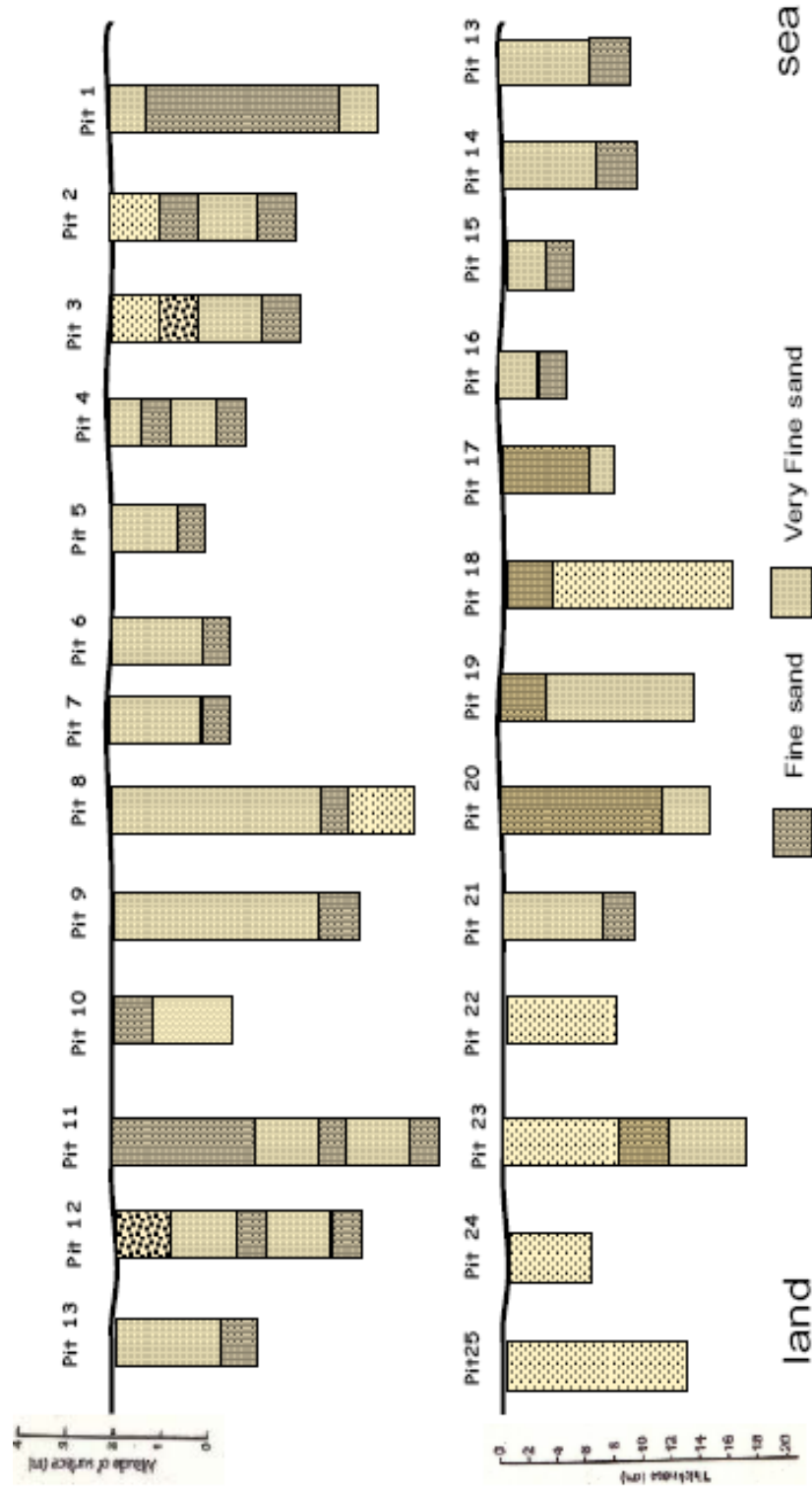
อุทยานแห่งชาติแหลมสนก็เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่คณะผู้วิจัยได้พบการสะสมตัวของ
ตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ ที่สมบูรณ์ กล่าวคือ พบโครงสร้างพื้นผิวตะกอนเป็นแบบรอยริ้วคลื่น
(ripple bedform) รูปแบบต่างๆ และพื้นที่นี้ได้มีการวางแนวชุดสำรวจอย่างละเอียด พร้อมเก็บ
ตัวอย่างตะกอนอย่างเป็นระบบเพื่อเอ็กซ์เรย์วิเคราะห์รูปแบบการสะสมตัวและเพื่อประเมินชนิด
ของกระแสน้ำที่เกิดจากสึนามิ ในพื้นที่นี้เอง ผู้วิจัยและคณะสำรวจประสบความสำเร็จในการ
จำแนกชนิดการไหลของกระแสน้ำโดยได้เผยแพร่แล้วในวารสาร Terra Nova และผลการ
วิเคราะห์ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการหลายครั้งซึ่งเป็นการค้นพบครั้งสำคัญในศาสตร์
ตะกอนวิทยาสึนามิ



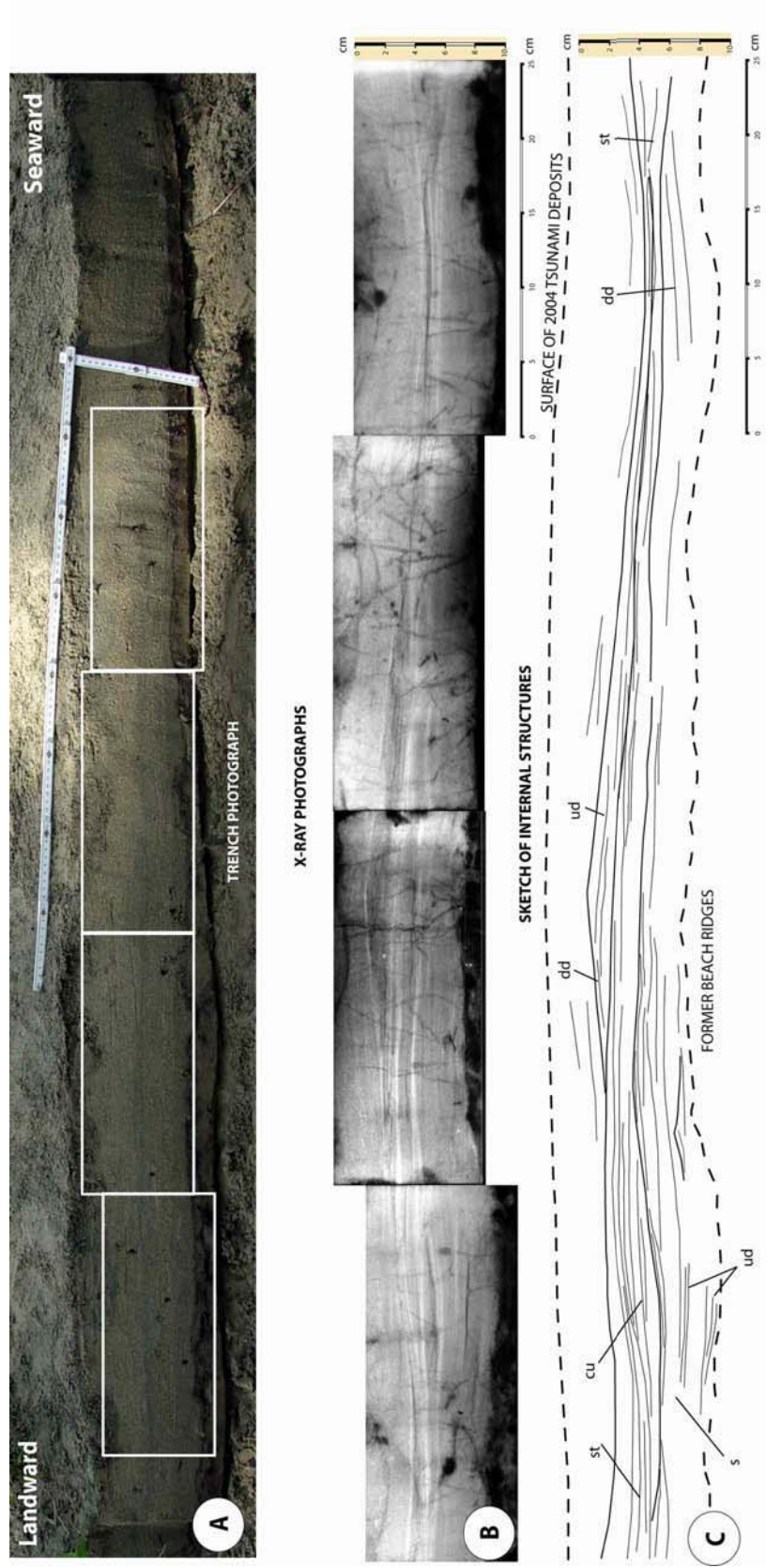
รูป ๔.๒๑ โครงสร้างพื้นผิวของตะกอนคลื่นที่บันทึกได้จากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง โดยพบเป็นลักษณะรอยริ้วคลื่นชนิดต่างๆ คือ (A) slightly straight-crested, (B) linguoid crested, (C) straight-crested และ linguoid-crested, และ (D) straight-crested ripple (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์ และ ดร. วิชัย จุฑะโกสิตธิ์กานนท์ จาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๘ เผยแพร่ในวารสาร Terra Nova)



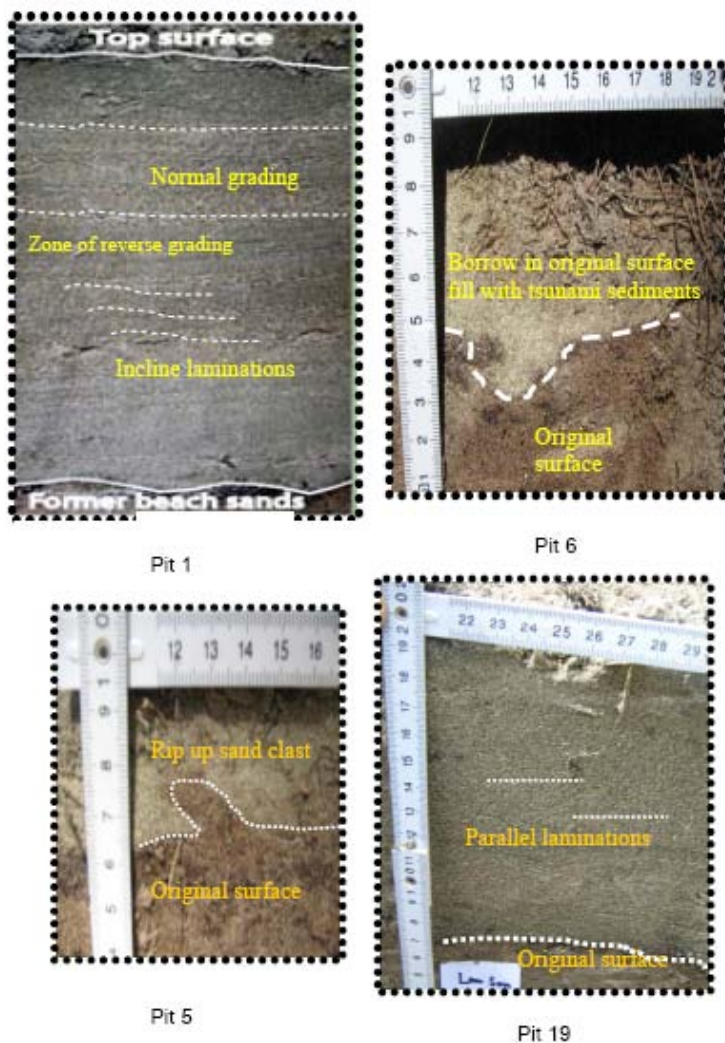
รูป ๔.๒๒ แนวการสำรวจและวัดระดับพื้นที่อย่างละเอียดจากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง (รูปบน) แสดงสภาพความสูงต่ำของพื้นที่เก็บตัวอย่าง (สีน้ำเงิน) และความหนาของตะกอนสีน้ำเงินปี ๒๕๔๗ (แสดงโดยสีชมพู) (รูปล่างแสดง) ตำแหน่งเก็บตะกอนเพื่อเอ็กซ์เรย์วิเคราะห์โครงสร้างภายในของตะกอน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๒๓ แสดงชั้นตะกอนที่ได้จากหลุมทดสอบตามแนวร่องสำรวจ (trench) จากอุทยานแห่งชาติแหลมสน จังหวัดระนอง หมายเลขหลุมเจาะเริ่มจากบริเวณด้านตะวันตกที่ใกล้ชายฝั่งทะเล (seaward) และหมายเลขหลุมจะเพิ่มขึ้นไปในทิศตะวันออก (landward) (ภาพจาก Wongkok ปี ๒๐๐๖)



รูป ๔.๒๔ ผลการเอกซเรย์โครงสร้างภายในของตะกอนสีน้ำเงินปี ๒๕๔๗ โดยรูปแบบแสดงตำแหน่งและลักษณะชั้นตะกอนจริงจากร่องสำรวจพร้อมตำแหน่งเก็บตัวอย่าง (รูปกลาง) ผลการเอกซเรย์โดยสามารถเห็นลักษณะการพัฒนาโดยการกระแสจากสีน้ำเงินปีเป็นชนิด supercritical flow และภาพล่างแสดงภาพสเก็ตโครงสร้างตะกอนทั้งหมดแบ่งออกเป็นลักษณะการสะสมตัวที่เป็น antidune (จาก Choowong และคณะปี ๒๐๐๘ เผยแพร่ในวารสาร Terra Nova)



รูป ๔.๒๕ ลักษณะการสะสมตัวของตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗ จากหลุมทดสอบต่างๆ แสดงรูปแบบการสะสมตัวและโครงสร้างตะกอนที่แตกต่างกัน (รูปบนซ้าย) แสดงลักษณะการสะสมตัวของตะกอนที่มีการคัดขนาดเล็กลงไปขนาดใหญ่ด้านบน (reverse grading) และการสะสมตัวแบบปกติที่มีการคัดขนาดตะกอนจากใหญ่ขึ้นไปเล็กด้านบน (normal grading) (รูปบนขวา) ตะกอนสึนามิเข้าไปสะสมตัวในรูที่เกิดจากรากต้นไม้ที่ถูกถอนออกไปโดยแรงจากสึนามิ (รูปล่างซ้าย) แสดงชั้นตะกอนเดิมมีการถูกดึงขึ้นมาด้านบนจากระแสการพัดพาของสึนามิ (rip-up) และ (รูปล่างขวา) แสดงลักษณะการวางตัวของชั้นตะกอนสึนามิแบบขนานไปกับสภาพพื้นที่และกระแสการพัดพา (parallel lamination) (ภาพจาก Wongkok ปี ๒๐๐๖)

๔.๓ ผลการสำรวจและวิเคราะห์ตะกอนสีนามิในอดีต

๔.๓.๑ หาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

จากการศึกษาภาพถ่ายทางอากาศ และการวิเคราะห์สภาพภูมิประเทศบริเวณชายหาดภูเก็ตที่เคยได้รับผลกระทบจากสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ คณะทำงานจึงเริ่มสำรวจอย่างละเอียดในพื้นที่ลุ่มต่ำบริเวณด้านหลัง (ด้านตะวันออก) ของชายหาดกมลา โดยการใช้พลั่วสนามในการขุดหลุมทดสอบเพื่อดูลักษณะตะกอนเบื้องต้นในพื้นที่ การขุดเจาะด้วยเครื่องมือเจาะตะกอนแบบมือหมุน (hand auger) และแบบกระแทก (piston core) ทำให้สามารถเจาะสำรวจตะกอนอย่างต่อเนื่องได้ในระดับลึกประมาณ ๔ ถึง ๕ เมตร พื้นที่บริเวณที่ลุ่มต่ำนั้นมีตะกอนดินโคลนเป็นส่วนใหญ่



รูป ๔.๒๖ สภาพพื้นที่ลุ่มต่ำบริเวณด้านตะวันออกของหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต คณะทำงานเลือก
 ลุ่มเจาะตัวอย่างตะกอนบริเวณนี้บนพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า ถ้าในกรณีที่มีสึนามิ
 เกิดขึ้นในอดีต ตะกอนที่ถูกพามาโดยสึนามินั้นอาจถูกทับถมในบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำนี้
 พื้นที่นี้เป็นที่โล่งไม่มีกิจกรรมของมนุษย์และอยู่ห่างจากชายฝั่งปัจจุบันพอสมควร
 (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๒๗ สภาพหลุมขุด
ทดสอบเพื่อศึกษาชั้น
ตะกอนในเบื้องต้น
บริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำหลัง
หาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



รูป ๔.๒๘ การเจาะสำรวจตะกอนโดยใช้เครื่องเจาะตะกอนแบบหมุน (hand auger) เพื่อสุ่ม
ตัวอย่างพื้นที่และดูความเป็นไปได้ที่อาจจะพบชั้นตะกอนทรายแทรกสลับกับตะกอน
ดินโคลน (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

บทวิเคราะห์จากการเจาะสำรวจหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

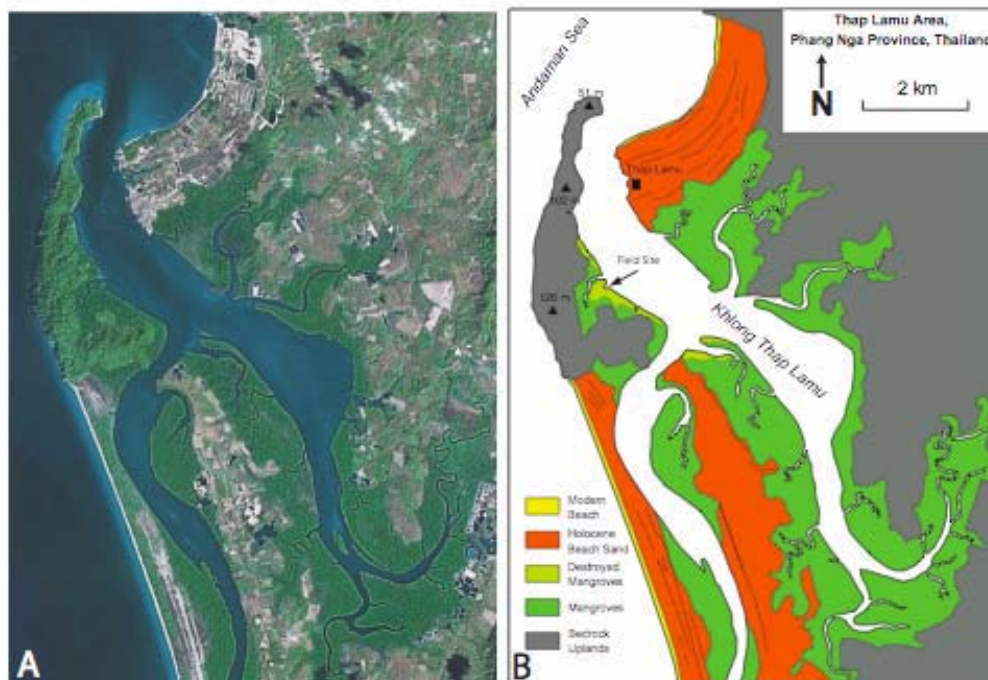
ผลการเจาะสำรวจตะกอนในภาคสนามพบว่า มีตะกอนทรายชั้นบางๆแทรกอยู่ในตะกอนโคลนดินเหนียวหลายชั้น ณ ระดับความลึกต่างๆ (รูป ๔.๒๙) ในเบื้องต้นคณะวิจัยได้ให้สมมติฐานว่า ตะกอนทรายเหล่านี้ อาจจะถูกพัดพามาจากตะกอนทรายเดิมที่ได้จากการทำเหมืองดีบุกเก่าในบริเวณใกล้เคียงในช่วงฤดูฝน อย่างไรก็ตาม เพื่อพิสูจน์สมมติฐานนี้ คณะทำงานจึงเก็บตัวอย่างตะกอนไปศึกษาในห้องทดลองปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาซากสิ่งมีชีวิตที่เคยอาศัยอยู่ในทะเลและอาจถูกพัดพาขึ้นมาพร้อมกับตะกอนทราย ผลจากการศึกษาพบความเป็นไปได้ว่า ชั้นตะกอนทรายเหล่านี้ น่าจะมาจากสึนามิที่เกิดขึ้นก่อนปี ๒๕๔๗ (เรียกชั้นเหล่านี้ว่า candidate for the pre 2004 tsunami deposits) หรือไม่อาจเกิดจากการพัดพาโดยธรรมชาติโดยคลื่นลมที่แรงกว่าปกติที่พาน้ำทะเลท่วมเข้ามาพร้อมตะกอนในขณะที่ชายหาดเดิมอยู่ใกล้ๆ กับที่ลุ่มต่ำหลังแนวสันทราย



รูป ๔.๒๙ ภาพตัดขวางชั้นตะกอนบริเวณที่ลุ่มต่ำด้านหลังหาดกมลา ชั้นตะกอนสีเหลืองแสดงตะกอนขนาดทรายเป็นหย่อมๆ แทรกสลับกับชั้นดินเหนียวโคลนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพโดย Dr. Brady Rhodes)

๔.๓.๒ ปากน้ำคลองทับละมุ จังหวัดพังงา

พื้นที่นี้เป็นส่วนหนึ่งที่ผู้วิจัยได้ร่วมศึกษากับคณะอาจารย์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย สเตต ฟูลเลตัน นำทีมโดย ศาสตราจารย์ ดร. เบรตต์ โรด และ รองศาสตราจารย์ ดร. แมททิว เคอร์บี้ โดยทีมงานได้วางแผนไว้ว่า ควรจะต้องลองขุดเจาะสำรวจตะกอนสีนามิในบริเวณที่เป็นป่าชายเลนด้วย ซึ่งพื้นที่เป้าหมายเมื่อพิจารณาจากสภาพความเป็นไปได้หากสีนามิในอดีตเข้าปะทะ คือ บริเวณป่าชายเลน ท่าเรือทับละมุ (รูป ๔.๓๐) พื้นที่นี้เป็นร่องน้ำใหญ่ที่เชื่อมบกกับทะเล และตำแหน่งที่ผู้วิจัยและคณะเลือกก็คือ บริเวณด้านใต้ของปากแม่น้ำที่หากดูผลกระทบจากสีนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ แล้ว ยังคงเหลือร่องรอยป่าชายเลนที่ล้มระเนระนาดอยู่ให้เห็นโดยทั่วไป บางต้นโดนถอนรากถอนโคนออกไปเลยก็มี นอกจากนี้ยังพบเศษก้อนปะการังขนาดตั้งแต่เล็ก ๆ ไปจนถึงประมาณหนึ่งฟุต กระจายอยู่บริเวณหาดตะกอนทรายก่อนเข้าพื้นที่ที่เจาะสำรวจ (รูป ๔.๓๑)



รูป ๔.๓๐ (ซ้าย) ภาพดาวเทียมแสดงสภาพภูมิประเทศบริเวณบ้านทับละมุ และ (ขวา) แผนที่แสดงสภาพธรณีสัณฐานวิทยาและพื้นที่สำรวจในรายละเอียด (ภาพจาก Rhodes และคณะปี ๒๐๐๖)



รูป ๔.๓๑ ก้อนปะการังที่ถูกพัดพาจาก
สึนามิปี ๒๕๔๗ กระจายกระจาย
ตลอดแนวป่าชายเลนทับละมุ
(ภาพโดย Dr. Brady Rhodes)

การสุ่มเจาะตะกอนเพื่อดูชนิดตะกอนโดยใช้เครื่องเจาะขนาดเล็ก (soil probe) และ
เครื่องเจาะแบบหมุน (gauge core) ซึ่งเก็บตะกอนได้ในระดับความลึก ๑ เมตร และในที่สุดทีม
สำรวจก็วางแผนขุดและเจาะกันจริงจัง โดยการวางแผนการเก็บตัวอย่างให้ตั้งฉากกับสภาพ
ชายฝั่ง โดยให้ระยะทางระหว่างหลุมเจาะประมาณ ๕๐ เมตร ในพื้นที่ที่เราคาดว่าจะได้หลุม
เจาะอย่างน้อยสัก ๕ หลุมที่สามารถได้ตัวอย่างในระดับลึกที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และเราก็
ประสบความสำเร็จ ด้วยการเจาะโดยเครื่องเจาะตะกอนแบบกระแทก (piston core) (รูป ๔.๓๒)



รูป ๔.๓๒ การเจาะตะกอนโดยเครื่องมือเจาะ
แบบกระแทก (piston core) ซึ่งเก็บ
ตะกอนได้อย่างต่อเนื่องถึงระดับ
ความลึกกว่า ๕ เมตร
(ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์)

การขุดโดยใช้พลั่วสนามเป็นวิธีการทำจำเป็นในกรณีที่เราต้องการเห็นภาพตัดขวางชั้นตะกอนจากหลุมขุดทดสอบ และผลการขุดหลุมทดสอบในพื้นที่ที่ได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากการเจาะแบบกระแทกแล้ว พบชั้นการสะสมตัวของซากปะการังแทรกสลับกับชั้นดินโคลนอย่างต่อเนื่องในทุกหลุมเจาะสำรวจ ซึ่งคำถามสำคัญคือ ชั้นซากปะการังมาได้อย่างไร

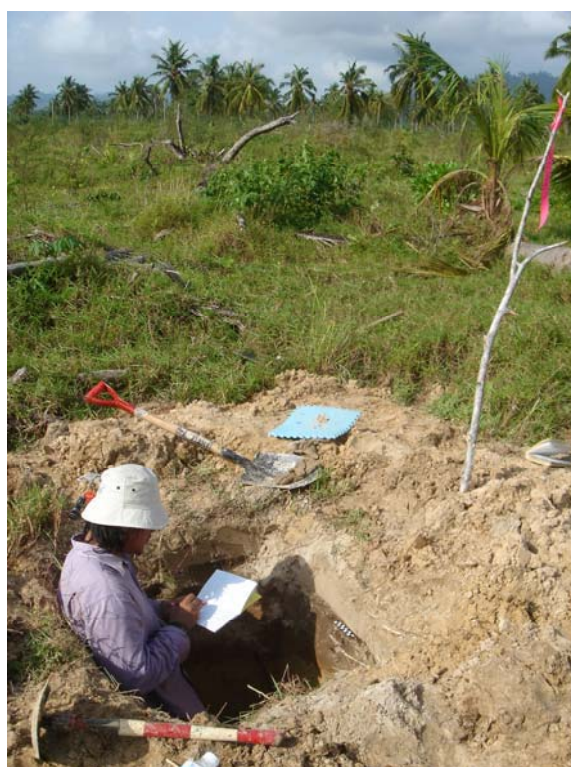


รูป ๔.๓๓ รศ.ดร.ปัญญา จารุศิริ ในขณะที่ขุดหลุมทดสอบเพื่อให้เห็นชั้นการสะสมตัวของตะกอนในพื้นที่ทับละมุ (ภาพโดย ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว)

ความคิดเห็นที่สำคัญในระหว่างการสำรวจ คือ ชั้นปะการังปนกรวดที่พบ อาจจะเป็นการสะสมตัวในภาวะปกติโดยสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงชั้นลงของระดับน้ำทะเลในสมัยโฮโลซีน (สมัยโฮโลซีน จัดเป็นสมัยที่มีอายุน้อยที่สุดในทางธรณีวิทยา คือ อายุตั้งแต่ 10,000 ปีมาจนถึงปัจจุบัน) ซึ่งจากงานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลในพื้นที่อ่าวไทย พบว่าในช่วงประมาณตอนกลางสมัยโฮโลซีน ระดับน้ำทะเลขึ้นสูงจากระดับปัจจุบันเกือบ 4 เมตร ยังไม่มีข้อมูลทางฝั่งทะเลอันดามัน โดยเฉพาะฝั่งอันดามันนี้เคยมีผู้เสนอแนะว่า เป็นชายฝั่งที่มีการขยับชั้นลงอันเนื่องมาจากธรณีแปรสัณฐานยุคใหม่ อย่างไรก็ตามชั้นซากปะการังที่พบแทรกสลับกับชั้นดินโคลน ก็ไม่สามารถปฏิเสธได้ว่า ไม่ได้มาจากสึนามิ คณะสำรวจจึงตกลงกันเรียกว่าเป็นชั้น candidate for the pre 2004 tsunami deposit ซึ่งผลการหาอายุชั้นซากปะการังพบว่ามีอายุอยู่ระหว่าง ๓,๘๑๐ ถึง ๒,๗๒๐ ปี ซึ่งเป็นอายุที่เก่ามาก เทียบได้กับยุคก่อนประวัติศาสตร์ของประเทศไทย ซึ่งในต่างประเทศก็พบชั้นตะกอนสึนามิที่มีอายุเก่าประมาณนี้ในหลายพื้นที่เช่นกัน

๔.๓.๓ เกาะพระทอง จังหวัดพังงา

คณะสำรวจที่ประกอบไปด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านตะกอนสีนํ้าจากสหรัฐอเมริกา และประเทศในแถบมหาสมุทรอินเดียพร้อมกับผู้วิจัยและคณะจากประเทศไทย ได้ร่วมเจาะสำรวจในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต และพื้นที่บางส่วนของจังหวัดพังงา โดยเน้นในพื้นที่ที่มีผู้คนอาศัยอยู่ แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่เป็นที่พอใจ เพราะอายุตะกอนสีนํ้าที่ได้จากพื้นที่ทับละมุ แสดงอายุสีนํ้าในอดีตที่แก่มาก คือ สองพันกว่าปีมาแล้ว ซึ่งก็ยังไม่แน่ใจว่า ช่วงเวลาระหว่างสองพันกว่าปีมาจนถึงก่อนวันที่ ๒๖ ธันวาคม ๒๕๔๗ เคยมีสีนํ้าเกิดขึ้นมาที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยหรือไม่ ถ้าการสำรวจเป็นไปอย่างครบถ้วนทุกพื้นที่แล้วไม่พบหลักฐานอื่นๆ อีก ก็อาจจะสรุปได้ว่า สีนํ้านั้นนานๆ จะเกิดสักครั้ง แต่เรายังสำรวจไม่ครบทุกพื้นที่ ฉะนั้น ทีมสำรวจก็ต้องเลือกพื้นที่อื่นๆ ต่อไป หากไม่พบตะกอนสีนํ้าในอดีตในที่ที่มีผู้คนอาศัยอยู่ก็ต้องลองหาพื้นที่ที่ยังคงสภาพภูมิประเทศเดิมๆ ไว้ได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด หนึ่งในพื้นที่ที่พบนี คือ บนเกาะต่างๆ ที่ยังไม่มีใครไปทำกิจกรรมอะไรบนเกาะนั้น แต่ก็ไม่ใช่ว่าจะละเลยพื้นที่อื่นๆ ก่อนขึ้นสำรวจบนเกาะทีมสำรวจได้ทำการขุดหลุมทดสอบในพื้นที่แถบเขาหลัก แลหมปะการัง ของจังหวัดพังงา บางแห่งก็พบชั้นเศษปะการังแทรกสลับกับทรายชายหาดซึ่งก็เป็นอีกหลักฐานที่น่าสนใจเพราะเราพบชั้นเศษปะการังมาตั้งแต่ที่ทับละมุ



รูป ๔.๓๔ สภาพหลุมทดสอบและการบันทึกรายละเอียดตะกอนที่พัดพาจากสีนํ้าในบริเวณ
แหลมปะการัง จังหวัดพังงา (ภาพโดย ผศ.ดร. ฐาสินี เจริญจิตต์)

พื้นที่หนึ่งที่ทีมสำรวจได้ค้นพบหลักฐานทางตะกอนวิทยาที่สำคัญ คือ เกาะพระทอง ตั้งอยู่ระหว่างอำเภอดงขี้เหล็ก กับอำเภอดงขี้เหล็ก จังหวัดพังงา เป็นเกาะที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลอนคลื่น คือ มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปัจจุบันไม่มาก เกาะพระทอง เกือบทั้งเกาะเป็นทรายสีขาว ตรงกลางเกาะมีร่องรอยการขุดเหมือนตึกบัก้างแต่ไม่มาก

การขุดเจาะสำรวจบนเกาะกระทำในพื้นที่ที่เป็นที่ลุ่มต่ำทั้งที่ปัจจุบันบางแห่งน้ำแห้งแล้ว และบางแห่งก็ยังมีน้ำขังอยู่ โดยใช้ประสบการณ์ที่สำรวจตะกอนสีนามิปี ๒๕๔๗ ที่ว่า น้ำทะเลจากสีนามิไปถึงไหน ตะกอนก็มีโอกาสไปได้ไกลเท่านั้น เครื่องเจาะตะกอนแบบหมุนชนิดที่สามารถเจาะตะกอนในน้ำได้ถูกนำมาช่วยในการเจาะสำรวจโดยเจาะได้ทั้งหมดประมาณ ๓๐ กว่าหลุม กระจายตัวอยู่ในพื้นที่ที่ถูกน้ำทะเลจากสีนามิ ปี ๒๕๔๗ ท่วมถึง พบชั้นการสะสมตัวของตะกอนทรายแทรกสลับในชั้นดินโคลนในหลายๆ ตำแหน่ง จนมาถึงที่ลุ่มต่ำอยู่ระหว่างแนวสันทราย ห่างจากหน้าหาดปัจจุบันประมาณ ๔๐๐ เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศเหมาะสมเป็นอย่างมากที่จะดักตะกอนทรายจากการพัดพามาโดยสีนามิ (Jankaew และคณะ ปี ๒๐๐๗) จนได้พบกับหลักฐานสำคัญที่บ่งชี้ว่า สีนามิเคยเกิดขึ้นในประเทศไทย และประสบความสำเร็จได้รับการเผยแพร่ในวารสาร Nature เมื่อเดือนตุลาคม ปี ๒๕๕๑ ที่ผ่านมา (Jankaew et al., 2008)



รูป ๔.๓๕ ชั้นตะกอนทรายสีขาวและทรายสีน้ำตาลแดงพบบนเกาะพระทอง เกิดจากการสะสมตัวจากกระบวนการทำงานของแม่น้ำและทะเลตั้งแต่สมัยไพลสโตซีน มีอายุการสะสมตัวมานานมากกว่าหมื่นปี (ภาพโดย รศ.ดร. มนต์รี ขวัญษ์)



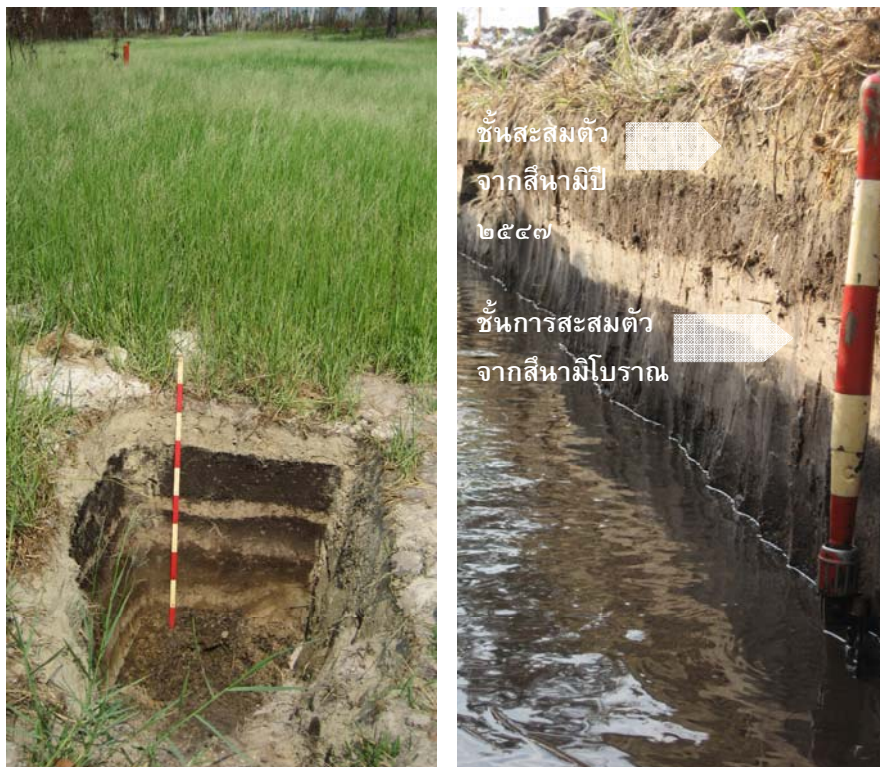
รูป ๔.๓๖ การขุดร่องสำรวจหาตะกอนสีนามิในอดีตบริเวณที่ลุ่มต่ำหลังแนวสันทรายบนเกาะพระทองเมื่อเดือนเมษายน ๒๕๕๐ (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๓๗ สภาพภูมิประเทศและธรณีสัณฐานวิทยาบนเกาะพระทองที่เป็นสันทรายสลับกับพื้นที่ลุ่มต่ำ พบหลักฐานทางตะกอนวิทยาของสีนามิโบราณสะสมตัวในที่ลุ่มต่ำ (บริเวณจุดสีแดง) (ภาพถ่ายเทียมจาก PointAsia.com ดัดแปลงโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๓๘ เจาะสำรวจตะกอนแม่ในพื้นที่ลุ่มต่ำที่มีน้ำขังด้านหลังแนวสันทราย (ภาพ ดร. ไบรอัน แอทวอร์เทอร์ กำลังสำรวจพื้นที่ บันทึกลงโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)



รูป ๔.๓๙ (ภาพซ้าย) ชั้นตะกอนทรายแทรกสลับระหว่างชั้นดินโดยชั้นทรายสีเทาด้านบนสุด เป็นชั้นตะกอนสึนามิเมื่อปี ๒๕๕๗ และ (ภาพขวา) ชั้นตะกอนสึนามิโบราณที่มีอายุ ราว ๖๐๐ ปี (สีขาวและแดงบนพลั่วสนามและไม้วัดมาตราส่วน มีความยาว ๑๐ เซนติเมตร) (ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

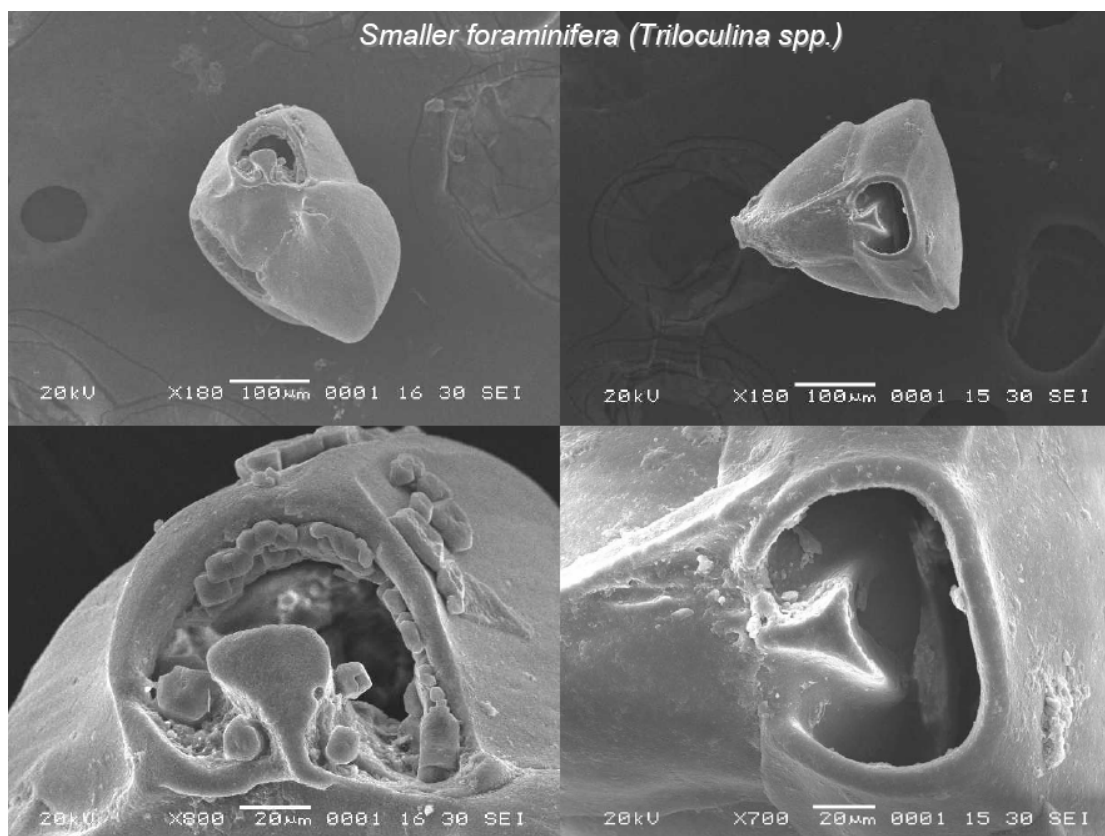


รูป ๔.๔๐ ประมวลภาพชั้นตะกอนสึนามิโบราณที่ขุดสำรวจพบบนเกาะพระทอง จังหวัดพังงา
(ภาพโดย รศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์)

๔.๓.๔ ผลการวิเคราะห์ซากสิ่งมีชีวิต

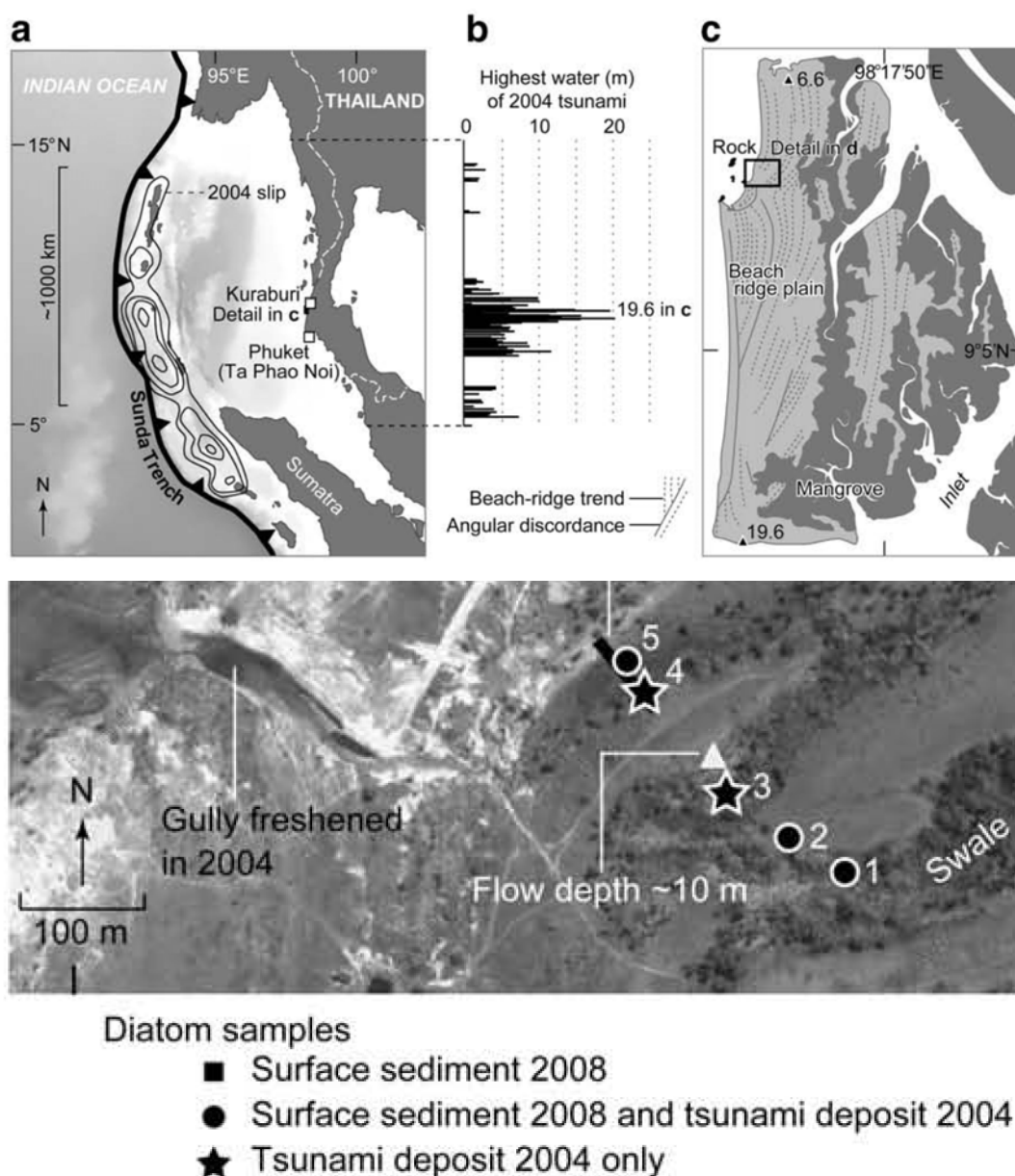
ฟอแรมมินิเฟอรา

ผลการวิเคราะห์ซากฟอแรมมินิเฟอราขนาดเล็ก (smaller foraminifera) ที่พบในชั้นตะกอนสีนํ้ามันในอดีตจากเกาะพระทอง จังหวัดพังงา ประกอบด้วยสกุล *Cibicides lobatulus*, *Elphidium* sp., *Globigerina* sp., *Hanzawaia concentrica*, *Planispirinella exigua*, *Quinqueloculina* sp., *Triloculina schreiberiana*, *Triloculina tricarinata*, *Triloculina trigonula*, A spinose rotaliid (microforaminifera?), A corroded rotaliid test., และออสตราคอดาที่พบคือ *Hemicytheridea* cf. *portjacksonensis*

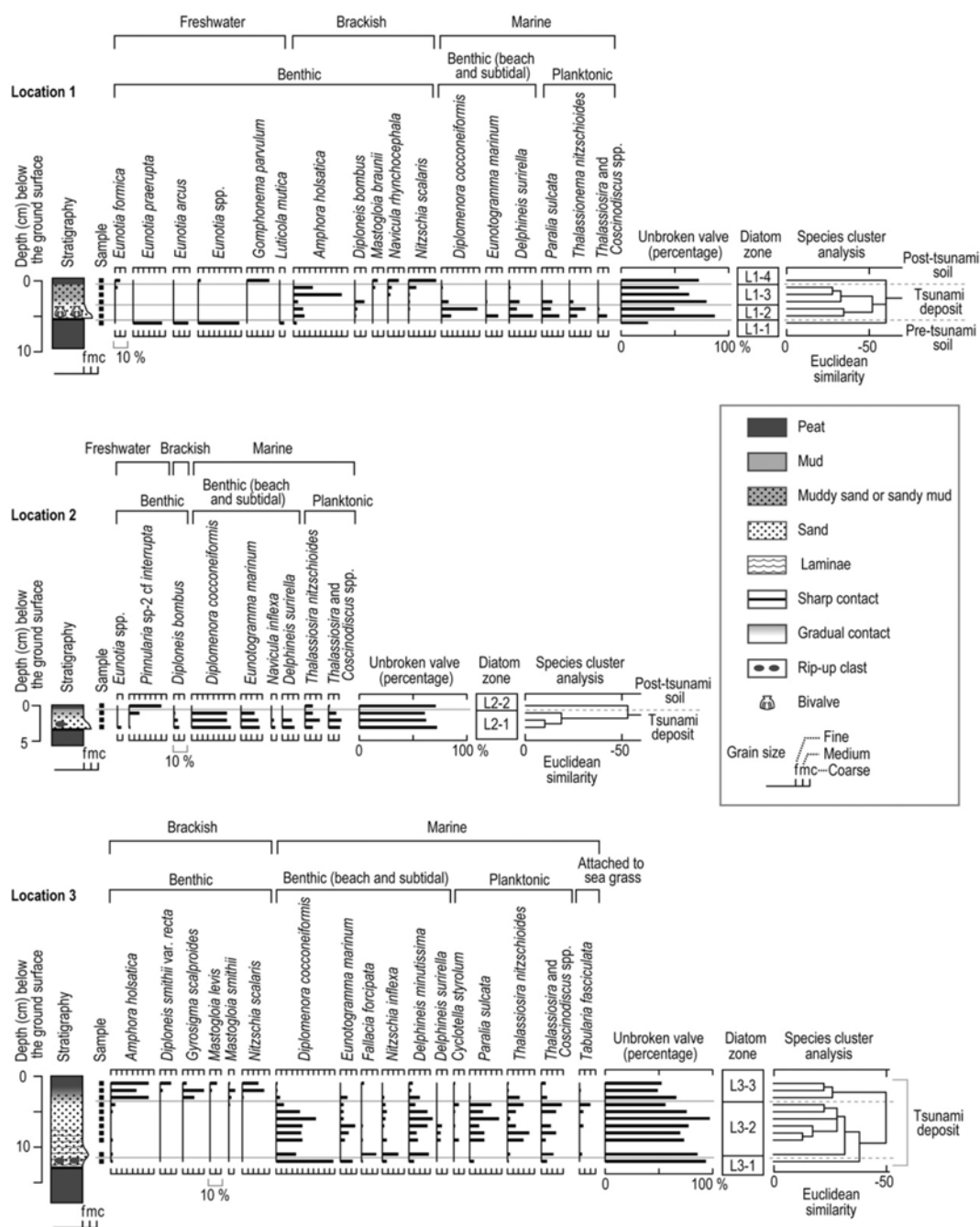


รูป ๔.๔๑ ภาพจาก Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงฟอแรมมินิเฟอราที่พบในตะกอนสีนํ้ามันในอดีตจากเกาะพระทอง จังหวัดพังงา (วิเคราะห์โดย ผศ.ดร. จุฬาสินี เจริญจิตติรัตน์)

ไดอะตอมในตะกอนสึนามิปี ๒๕๔๗



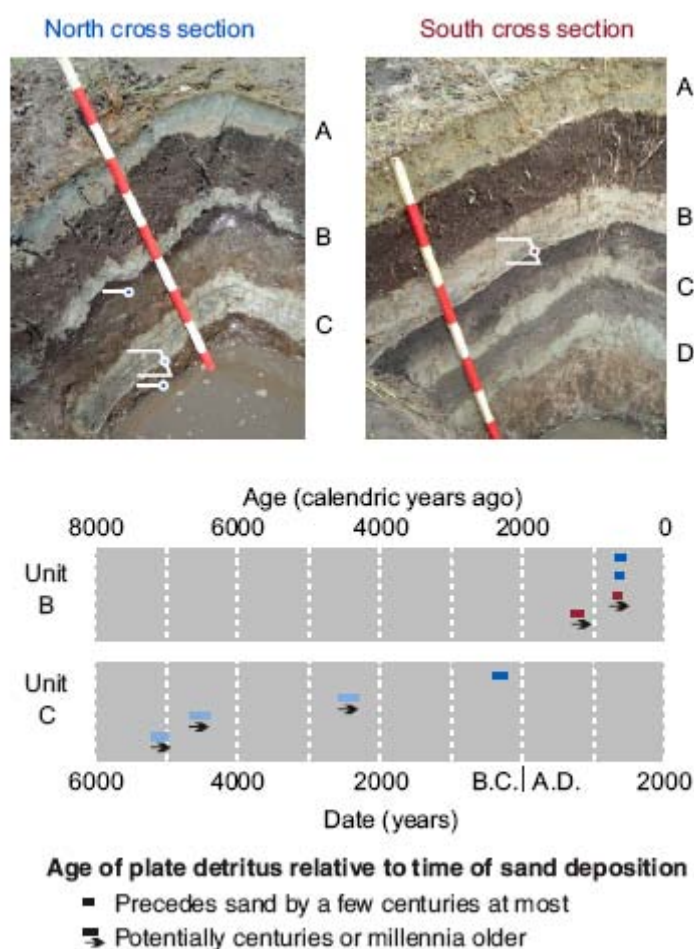
รูป ๔.๔๒ ตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างตะกอนสึนามิเพื่อศึกษาซากชีวิตไดอะตอมบนเกาะพระทอง วิเคราะห์โดย ดร. ยูกิ ซาโวะ จากกรมทรัพยากรธรณี ประเทศญี่ปุ่น หนึ่งในทีมงานที่ร่วมทำงานกับผู้วิจัยและคณะจากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยพบว่า ไดอะตอมมาจากหลายแหล่ง ได้แก่ จากพื้นทะเลลึก จากหาดทราย จากคลองน้ำกร่อย ซึ่งพบว่า ไดอะตอมจากน้ำทะเลลึกมีเปอร์เซ็นต์มากที่สุด ผลงานวิเคราะห์ไดอะตอมได้เผยแพร่แล้วในวารสาร *Marine Micropaleontology* เมื่อปลายปี ๒๕๕๒ ที่ผ่านมา (ภาพจาก Sawai *et al.*, 2009)



รูป ๔.๔๓ ผลการวิเคราะห์ชนิดพันธุ์ของซากชีวิตไดอะตอมในตะกอนสึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ จากบริเวณเกาะพระทอง (ภาพจาก Sawai *et al.*, 2009)

๔.๓.๕ ผลวิเคราะห์อายุชั้นตะกอนสีนํ้ามิโดยวิธีคาร์บอน ๑๔

ตัวอย่างซากสิ่งมีชีวิตประกอบด้วย ซากพืชที่พบในชั้นตะกอนสีนํ้ามิในอดีต ซากพืชที่พบในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นทรายสีนํ้ามิกับชั้นดิน ได้ถูกนำไปวิเคราะห์หาอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔ ในหลายๆ ห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวอย่างเดียวกัน เพื่อประเมินผลความถูกต้องของการวิเคราะห์ จากผลการกำหนดอายุได้ทราบอายุชั้นตะกอนทรายที่เป็นการสะสมตัวจากสีนํ้ามิในอดีต ดังแสดงในรูป ๔.๔๔



รูป ๔.๔๔ ผลการกำหนดอายุชั้นตะกอนสีนํ้ามิในอดีตจากเกาะพระทอง (ภาพโดย ดร. ไบรอัน แอทวอเทอร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน)

บทที่ ๕

สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ

๕.๑ บทสรุปเชิงวิชาการ

๕.๑.๑ การประเมินผลการฟื้นฟูสภาพทางกายภาพ

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชายหาดทั้งในแนวระนาบและแนวตั้งในช่วงปี ๒๕๔๙ แสดงให้เห็นว่าชายฝั่งในบริเวณที่ถูกกัดเซาะจากสึนามิ เป็นชายฝั่งแบบคงสภาพมีความสมดุลกันในเรื่องของการสะสมตัวและการกัดเซาะ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ขนาดของเม็ดตะกอนชายหาดในพื้นที่โครงการ คือ บริเวณตอนใต้แหลมปะการัง จนถึงบ้านเขาหลัก จังหวัดพังงา จะมีขนาดตั้งแต่ทรายหยาบจากทางตอนใต้ที่บริเวณบ้านบางเนียงและลดขนาดลงจนถึงทรายละเอียดทางตอนเหนือที่บลูวิลเลจ ปะการังรีสอร์ท ส่วนประกอบของตะกอนประกอบด้วย แร่ควอร์ตซ์ ๖๐ % เศษหอยและเศษปะการัง ๓๕ % และส่วนประกอบอื่นๆ ๕ % และจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโทรมัสส์และข้อมูลการสำรวจภาคสนามพบว่าแนวชายฝั่งและพื้นที่ชายหาดส่วนใหญ่ได้ฟื้นตัวกลับมาเกือบเท่าเดิมก่อนเกิดเหตุการณ์สึนามิแล้ว แต่พื้นที่ในบริเวณที่เป็นทางน้ำเข้า/ออกที่ติดกับทะเล (ยกเว้นที่บ้านบางเนียง) ยังไม่ฟื้นตัว โดยยังคงสภาพเหมือนเดิมหลังเกิดเหตุสึนามิ โดยสรุปแล้วจากการศึกษาจนถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๔๙ พื้นที่ที่ถูกกัดเซาะจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อปี ๒๕๔๗ ได้ฟื้นสภาพกลับมาแล้ว ประมาณ ๙๐ เปอร์เซ็นต์

๕.๑.๒ การสำรวจตะกอนสึนามิในอดีต

จากการสำรวจอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน คณะทำงานมั่นใจว่าพบหลักฐานทางธรณีวิทยาที่บ่งชี้ว่าเกิดจากสึนามิโบราณแล้ว โดยหลักฐานสำคัญคือ ชั้นการสะสมตัวของตะกอนสึนามิโบราณ (paleotsunami deposit) บนเกาะพระทอง โดยพบชั้นตะกอนทรายแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินกระจายตัวอยู่ทั่วไปในแอ่งที่ลุ่มต่ำ โดยมีชั้นตะกอนทรายแทรกสลับชั้นดินจำนวนสามชั้น การกำหนดอายุโดยวิธีคาร์บอน ๑๔ (Carbon-14 and AMS) พบว่า ชั้นบนสุดของตะกอนสึนามิโบราณมีอายุราว ๖๐๐ ปี มาแล้ว ซึ่งหากเทียบจากประวัติศาสตร์ของชาติไทย ก็จัดได้ว่าเป็นสึนามิโบราณที่เกิดขึ้นระหว่างตอนปลายสมัยสุโขทัยถึงอยุธยาตอนต้น การค้นพบครั้งนี้ได้ทำให้เรามั่นใจว่า สึนามิเคยเกิดขึ้นในประเทศไทยมาแล้วแน่นอน แต่ด้วยช่วงคาบอายุการเกิดซ้ำเท่าใดนั้น ยังเป็นคำตอบที่ต้องตามรอยกันต่อไป ด้วยเหตุผลที่ว่า เราคงต้องสำรวจและครอบคลุมทุกพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลอันดามันเพื่อให้มั่นใจว่า ในช่วงระหว่าง ๖๐๐ ปีมาจนถึงปี ๒๕๔๗ เคยมีสึนามิเกิดขึ้นหรือไม่ หากเราพบหลักฐานที่บ่งชี้ชัดเจนว่าเคยมีสึนามิเกิดขึ้นระหว่างนั้น เราอาจจะได้ช่วงความถี่ของการเกิดสึนามิได้ชัดเจนมากขึ้น การคำนวณหรือ

การคาดการณ์ว่าสึนามิจะเกิดขึ้นเมื่อใดในอนาคตนั้นก็อาจจะเป็นไปได้มากขึ้นเช่นกัน สำหรับความเกี่ยวเนื่องกันของตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวที่ก่อให้เกิดสึนามิในอดีตนั้นก็ก็เป็นอีกประเด็นที่ต้องรอผลการสำรวจประวัติสึนามิให้ชัดเจนก่อนว่าพบที่ไหนบ้าง ซึ่งหากเราได้ข้อมูลเพียงพอที่จะสืบหาตำแหน่งของการเกิดแผ่นดินไหวได้ก็จะเป็นกุญแจสำคัญในการประเมินพื้นที่ความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวในทะเลซึ่งอาจจะเป็นพื้นที่ใกล้ๆ บริเวณชายฝั่งทะเลอันดามันของเราเองก็เป็นได้

ความเกี่ยวพันของพิบัติภัยโดยเฉพาะแผ่นดินไหวและสึนามิ กับประวัติศาสตร์ของประเทศก็เป็นอีกประเด็นที่น่าจะต้องมีการวิเคราะห์และสืบหา การล่มสลายของชุมชนโบราณหลายๆ แห่ง รวมถึงการย้ายแหล่งที่อยู่อาศัย เป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งหากพบหลักฐานหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพิบัติภัยทางธรณีวิทยานี้ การสืบค้นจากจารึกประวัติศาสตร์อย่างจริงจังโดยการวิเคราะห์ข้อความในจารึกต่างๆ อย่างละเอียดจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้การวิเคราะห์ประวัติศาสตร์เป็นไปอย่างดียิ่ง ซึ่งจะเป็นการบูรณาการศาสตร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อการตามรอยประวัติศาสตร์พิบัติภัยของชาติต่อไปในอนาคต

๕.๒ ผลผลิตของโครงการ

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการต่อเนื่องจากโครงการวิจัยเมื่อปี ๒๕๕๑ เป็นต้นมา การเผยแพร่ผลงานในเชิงวิชาการเป็นไปในหลายรูปแบบ ซึ่งจะขอสรุปตามหัวข้อผลผลิตจากโครงการ ดังต่อไปนี้

๕.๒.๑ ผลผลิตในเรื่องการผลิตบัณฑิตและมหาบัณฑิตของโครงการ

๑. วิทยานิพนธ์ เรื่อง *"Shoreline changes after 26 December 2004 tsunami from Khao Lak, Changwat Phang-nga"* โดย Phuntuwongraj, S., 2007

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สมบัติ อยู่เมือง และ ผศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์
ผลการสอบวิทยานิพนธ์ = ดีมาก

๒. Senior Project title *"Distribution of benthic foraminifers in the 2004 tsunami sediment from Changwat Ranong, Phang-nga, and Phuket, Thailand"* โดย Techaprittinan, T., 2007

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ฐาสินี เจริญจิตติรัตน์ และ ผศ.ดร. มนตรี ชูวงศ์

๓. Senior Project title “*Sedimentary structures of the 26 December 2004 tsunami deposits from Lamson National Park, Changwat Ranong*” โดย Wongkok, P., 2006

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. จุาสินี เจริญฐิติรัตน์ และ ผศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๔. Senior Project title “*Preliminary investigation for Paleotsunami deposit at Ko Kho Khao, Amphoe Takuapa, Changwat Phang-Nga*” โดย Jittranoon, W., 2006

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว และ ผศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๕. Senior Project title “*Grain Size Analysis of Paleotsunami Sediments at Ko Phra Thong, Amphoe Takuapa, Changwat Phang Nga*” by Phonsit, T., 2008

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เครือวัลย์ จันทร์แก้ว และ ผศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๖. Senior Project title “*A comparative study of physical and chemical properties of 2004 tsunami sediments from Lamson National Park, Ranong*” by Nudam, C., 2008

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๗. Senior Project title “*A Preliminary Investigation of Unusual Deposits at Tai Muang Area, Changwat Phang-nga*” by Fukphun, J., 2008

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์ และ ดร. วิชัย จุฑะโกสิทธ์กานนท์

๘. Senior Project title “*Comparison in Physical Properties of Post Tsunami Beach Sediment Between 2008 and 2006 at Khao Lak Area, Changwat Phang-nga*” by Kanchanapatomporn, S., 2008.

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๙. Senior Project title “*2004 Tsunami Movement from Sedimentological Evidence and Satellite Images at Pakarang Cape, Changwat Phang Nga*” by Montrisatit, P., 2008.

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๑๐. Senior Project title “*Benthic Forams in 2004 Tsunami Sediments of Koh Pra Thong Changwat Phang Nga*” by Hunyek, W., 2008

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. จุฬาสีณีย์ เจริญจิตติรัตน์ และ รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๑๑. Senior Project title “Physical characteristics of typhoon Gay’s deposits in the southern part of Changwat Prachuap Khiri Khan” by Kitpanich, H., 2009.

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๑๒. Senior Project title “Coastal Geomorphology Changes at Talumpuk Cape, Changwat Nakhon Si Thammarat” by Anuphongpaiboon, N., 2009.

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๑๓. Senior Project title “Physical characteristics of storm deposits at Panang Tak Bay Changwat Chumphorn” by Khongsri, D., 2009.

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มนต์รี ชูวงศ์

๕.๒.๒ ผลผลิตในรูปแบบการประชุมวิชาการ

๑. Phantuwongraj, S., **Choowong, M.**, and Chutakositkanon, V. 2008. Possible Storm Deposits from Surat Thani and Nakhon Si Thammarat Provinces, the Southern Peninsular Thailand. In M. Choowong and T. Thitimakorn (eds.), Proceedings of the International Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes, Bangkok, Thailand, p. 395-399

๕.๒.๓ ผลผลิตในรูปแบบเอกสารวิชาการในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

๑. **Choowong, M.**, Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitirat, T., Phantuwongraj, S., Wongkok, P., Choowong, A., Subsayjun, R., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P 2008. Flow conditions of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, inferred from capping bedforms and sedimentary structures”. Terra Nova, 20, 141-149.

บทความนี้ได้ทำการเผยแพร่ข้อมูลการวิเคราะห์ตะกอนสึนามิปี 2547 ในวารสารวิชาการชื่อ Terra Nova ที่เป็นวารสารทางธรณีวิทยาเผยแพร่โดย European

Geosciences Union มีค่า ISI Impact factor (2008) = 1.899 โดยเป็นผู้เขียนหลัก และได้รับชื่อแหล่งทุนคือ Thailand Research Fund ใน acknowledgements

๒. Jankaew, K., Atwater, B.F., Sawai, Y., **Choowong, M.**, Charoentitirat, T., Martin, E.
“Ancestral tsunamis in Thailand”. *Nature*, Vol. 455, 1228-1231

บทความนี้เป็นการเผยแพร่ข้อมูลผลการศึกษาระยะก่อนสิ้นนามีในอดีตจากพื้นที่เกาะพระทอง โดยเป็น co-authors ในบทความวิชาการที่เผยแพร่ในวารสาร *Nature* มีค่า ISI Impact factor (2008) = 31.434 และได้รับชื่อแหล่งทุนคือ Thailand Research Fund ที่ให้ทุนวิจัยแก่หัวหน้าโครงการ (M.C. = Montri Choowong) ใน acknowledgements

๓. **Choowong, M.**, Phantuwongraj, S., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V.,
Yumuang, S., and Charusiri, P. 2009. Beach recovery after 2004 Indian Ocean tsunami from Phang-nga, Thailand”. *Geomorphology*, Volume 104, Issue 3-4, 134-142.

บทความนี้ได้เผยแพร่ข้อมูลผลการติดตามการฟื้นฟูสภาพชายหาดบริเวณแหลมปะการังถึงเขาหลัก ซึ่งขณะนี้ทางวารสาร *Geomorphology* มีค่า ISI Impact factor (2008) = 2.339 ได้ตอบรับและได้ตีพิมพ์เรียบร้อยแล้วเมื่อเดือนมีนาคม 2552

๔. Di Geronimo, I., **Choowong, M.**, and Phantuwongraj, S., 2009. Geomorphology and superficial bottom sediments of Khao Lak coastal area (SW Thailand). *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 18, No.1, 111-121.

บทความนี้ได้เผยแพร่ข้อมูลผลการติดตามการฟื้นฟูสภาพใต้ทะเลบริเวณแหลมปะการังถึงเขาหลัก ซึ่งได้เผยแพร่ในวารสาร *Polish Journal of Environmental Studies* มีค่า ISI Impact Factor (2008) 0.963 เมื่อต้นปี 2552 โดยได้รับคำขอบคุณ Thailand Research Fund ไว้ใน acknowledgements เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

เอกสารอ้างอิง

- Barrett, P. J. 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology* 27 : 291-303.
- Benzoni, F., Basso D., Giacccone, T., Pessani, D., Cappelletti F.S., Leonardi R., Galli P., Choowong M., Di Geronimo S., Robba E, 2006, "Post-tsunami condition of a coral reef in Laem Pakarang (Andaman Sea, Thailand)", *Proc. of International Society for Reef Studies European Meeting* (poster)
- Brady Rhodes, Kruawun Jankaew, Matthew Kirby, Jennifer Schmidt, and Montri Choowong., 2006, "A Possible Paleotsunami Deposit at Thap Lamu, Southern, Thailand", *Proc. of AGU Fall Meeting 2006*, 11–15 December 2006, Monday–Friday (abstract).
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., and Kanjanapayont, P., 2007, " Erosion and deposition by the 2004 Indian ocean tsunami in Phuket and Phang-nga Provinces, Thailand. ", *Journal of Coastal Research.*, Vol. 23, Issue 5, p. 1270-1276.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanchanapayont, P., and Phantu Wongraj, S., 2008. "2004 Indian Ocean Tsunami Inflow and Outflow at, Phuket, Thailand". *Marine Geology*, 248, 3-4, p.179-192.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitirat, T., Phantu Wongraj, S., Wongkok, P., Choowong, A., Subsayjun, R., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P 2008. Flow conditions of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, inferred from capping bedforms and sedimentary structures". *Terra Nova*, 20, 141-149.
- Choowong, M., Phantu Wongraj, S., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V., Yumuang, S., and Charusiri, P., 2009. Beach recovery after 2004 Indian Ocean tsunami from Phang-nga, Thailand". *Geomorphology*, 104, 134-142
- Di Geronimo, I., Choowong, M., and Phantu Wongraj, S., 2009. Geomorphology and superficial bottom sediments of Khao Lak coastal area (SW Thailand). *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 18, No.1, 111-121.
- Fritz, W. J., and Moore, J. N. 1988. Basics of physical stratigraphy and sedimentology. USA: John Wiley and Sons.
- Jankaew, K., Choowong, M., Charoentitirat, T., et al., 2007. The pre 2004 tsunami deposits in Thailand. *AGU meeting, May 2007*, Mexico (abstract).
- Jankaew, K., Atwater, B.F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, E., Prendergast, A., 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, Vol. 455, 1228-1231
- Jittranoon, W., 2006. Preliminary investigation for Paleotsunami deposit at Ko Kho Khao, Amphoe Takuapa, Changwat Phang-Nga. Unpublished Senior Project, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Krumbein, W. C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 11 : 64-72.
- Phantu Wongraj, S., 2006. Shoreline changes after 26 December 2004 tsunami from Khao Lak, Changwat Phang-nga. Unpublished Master Thesis, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Pettijohn, F. J. 1957. Sedimentary rocks. 2nd ed. New York: Harper & Bros.

- Powers, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology.*, 23 : 117-119.
- Sawai, Y., Jankaew, K., Prendergast, A., Martin, E.B., Choowong, M., and Charoentitirat, T., 2009. Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean tsunami at Phrathong Island, Thailand. *Marine Micropaleontology*, 73, 70-79
- Wongkok, P., 2006. Sedimentary structures of the 26 December 2004 tsunami deposits from Lamson National Park, Changwat Ranong”. Unpublished Senior Project, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้จากโครงการ

Flow conditions of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, inferred from capping bedforms and sedimentary structures

Montri Choowong,¹ Naomi Murakoshi,² Ken-ichiro Hisada,³ Thasinee Charoentitirat,¹ Punya Charusiri,¹ Sumet Phantuwongraj,¹ Prawpan Wongkok,¹ Alongkorn Choowong,⁴ Rittirong Subsajjun,⁴ Vichai Chutakositkanon,¹ Kruawan Jankaew¹ and Pitsanupong Kanjanapayont¹

¹Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand; ²Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto 390-8621, Japan; ³Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan; ⁴Maesot Hospital, Maesot, Tak 63110, Thailand

ABSTRACT

The 2004 Indian Ocean tsunami deposited a sheet of sand with surficial bedforms at the Andaman coast of Thailand. Here we show the recognition of bedforms and the key internal sedimentary structures as criteria of the tsunami supercritical flow condition. The presence of well-preserved capping bedforms implied a dominant tsunami inflow. Sets of internal sedimentary structures including parallel lamination, seaward and landward inclined-laminations, and downstream dipping laminae indicated antidune structures that were generated by a supercritical flow current in a depositional stage during the

inflow. A set of seaward dipping cross-laminations containing sand with mud drape on the surface of one depositional layer are a unique indication of an outflow structure. A majority of deposits show normal grading, but in some areas, localized reverse grading was also observed. The recognition of these capping bedforms and determination of the internal sedimentary structures provides new key criteria to help derive a better understanding of tsunami flow conditions.

Terra Nova, 20, 141–149, 2008

Introduction

Sedimentary structures have been fairly well documented in the extensive tsunami studies undertaken over the past few decades (e.g. Atwater, 1987, 1992; Bourgeois *et al.*, 1988; Dawson *et al.*, 1988; Long *et al.*, 1989; Atwater and Yamaguchi, 1991; Minoura and Nakaya, 1991; Atwater and Moore, 1992; Bryant *et al.*, 1992; Atwater *et al.*, 1995; Hindson *et al.*, 1996; Bondevik *et al.*, 1997; Clague *et al.*, 2000; Goff *et al.*, 2000; Moore, 2000; Bryant, 2001). Sedimentary structures clearly reflect the different conditions within the tsunami flow and have the potential to record the flow parameters of the waves that created them. This article summarizes our work in tsunami sedimentology, where we aimed to analyse the pattern of flows from the places where capping bedforms and internal sedimentary structures were well-preserved along the Andaman coast of Thailand.

The occurrence of 2004 tsunami deposits has been most commonly reported from the beach zones in India (Chadha *et al.*, 2005; Nagendra *et al.*, 2005; Singarasubramanian *et al.*, 2006; Bahlburg and Weiss, 2007), Sri Lanka (Goff *et al.*, 2006), Malaysia (Hawkes *et al.*, 2007) and Thailand (Szcucinski *et al.*, 2005, 2006; Choowong *et al.*, 2007a; Hawkes *et al.*, 2007; Hori *et al.*, 2007; Umitsu *et al.*, 2007), in swale between beach ridges (Jankaew *et al.*, 2007), and on top of mangrove mud (Rhodes *et al.*, 2007). The completion of deposition that is capable of indicating the flow conditions also depends on the topographical configuration of the former surface below the 2004 deposits. The observation of tsunami deposits immediately after the event provided us an opportunity to understand better the flow conditions, especially from capping bedforms. We also established a typical stratigraphy of the 2004 tsunami deposited within different depositional environments such as flat beach plains and in irregular topographies like wet swale in between beach ridges.

Objectives and methods

While making a regional field survey of the 2004 Indian Ocean tsunami

damages, capping bedforms were documented and trenches were dug to describe internal sedimentary structures. Flow depths were measured together with tsunami inundation. Run-up varied from place to place, and reached a maximum level of about 15 m above the ground surface (Fig. 1).

The stratigraphy of tsunami deposits was examined in several places (see location of investigated sites in Fig. 1), including not only where the coastal topography is very flat area (i.e. Bangtao, Phuket and Lamson, Ranong), but also at (a) the sites where the narrow beach plain is dominant and inundation was limited by inland hills (Khao Lak) and (b) in dry- and wet-swales between beach ridges (Phrathong Island).

Basically, systematic transect lines with a 10-m interval between pits were made. Long trenches were dug, and after cleaning pit walls, layer to layer samples were collected in small plastic tubes for grain size measurement by a settling tube. Statistical calculations based on moment method were made using the software drop.exe developed by Kumon and Makino (2000). Bulk samples from each unit were also collected for sieve analysis.

To understand the detailed sedimentary structures and the distribu-

Correspondence: Montri Choowong, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phrayathai, Bangkok 10330, Thailand. Tel.: 66 2 218 5445; fax: 66 2 218 5464; e-mail: monkeng@hotmail.com

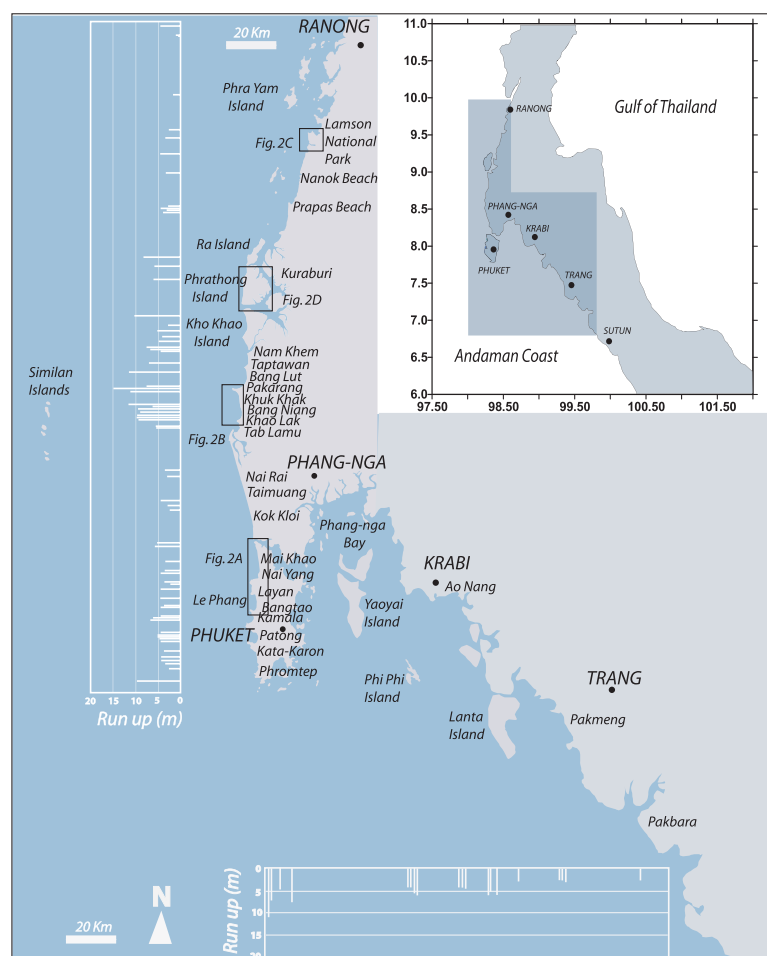


Fig. 1 Tsunami run-ups along the Andaman coast of Thailand with the name and locations where the detailed studies of tsunami deposits mentioned in this paper were surveyed.

tion of individual units of sand sheets, X-ray radiographs were examined. For sample collection, the box sampling method (e.g. Suzuki, 1984; Nanayama and Shigeno, 2006) and peel techniques were specially applied in selected places, such as at Lamson, Ranong, where the internal sedimentary structures were clearly observed. Sand samples for X-ray were put into plastic boxes (2 cm thick, 25 cm long and 10 cm wide). At Lamson, a long pit was dug, and four continuous box samples (total of 1 m long) were collected for X-ray analysis to test the lateral extension of sedimentary structures. Undisturbed box samples were scanned and filmed using different frequencies of X-ray irradiation. Several radiographic parameters were investigated and the most appropriate settings to detect internal sedimentary structure were found to be 68 kV,

5.0 mA, 200 mA and 0.025 s with a 100 cm instrument height from box sample.

Results

Inundation and general distribution of tsunami deposits

The 2004 tsunami inundated to a considerably variable range of distances from the coastline (Fig. 2). The maximum distance of tsunami flooded was as far as 3 km inland along much of the low-lying coastal plains of Pakarang Cape, Phang-nga, where the water continued to flow landward until ultimately stopped by inland hills. Significant inland inundation distances also occurred in areas where mangrove-lined tidal channels are located behind a series of beach ridges (e.g. Lamson). The 2004

tsunami sand sheet extended up to 1 km inland, almost at the end of the inundation limit in some places.

Capping bedforms

A few days after the event, various dimensions of capping landward-oriented dunes and ripple bedforms clearly indicated different inflow current velocities. A transition of dunes and ripples occurred within a limited distance (about 200 m from the coastline), for example at Bangtao, Phuket (Fig. 3A,B). Some small landward-oriented and seaward-oriented ripples were superimposed on the surfaces of landward-oriented bedforms. At Khao Lak, Phang-nga and Lamson, Ranong, capping bedforms with the leeside facing landward are good indicators of tsunami inflow currents (Fig. 3C–F). Interestingly, different types of ripples, even in one continuous crest, were recognized, which indicated a lateral variation within one flow depth (Fig. 3D). The wave lengths of bedforms decreased further inland revealing the decrease in tsunami inflow, followed by ponding and then slow outflow. The slow outflow seems to have essentially only influenced the sedimentary structures by disturbing the surface of landward-oriented inflow bedforms. Suspended particles probably settled during the slow outflow or at the latest stage of the inflow, whenever the flow velocity was low enough.

Internal sedimentary structures

Sedimentary structures from the 2004 Indian Ocean tsunami deposits from the almost flat surface of former soil at Phuket, Phang-nga and Ranong include, in general, parallel laminae, cross-lamination, rip-up mud and sand clasts. Normal grading is common but some reverse gradings were locally recognized. Tsunami deposits in wet swale at Phrathong Island, which showed a seaward-oriented cross lamina set, is our first new discovery indicating the outflow depositional characteristics of the 2004 deposit (Fig. 4).

Interestingly, the results of the X-ray radiographs from the 2004 tsunami deposits at Lamson, Ranong, revealed sets of internal structures representing antidune structures

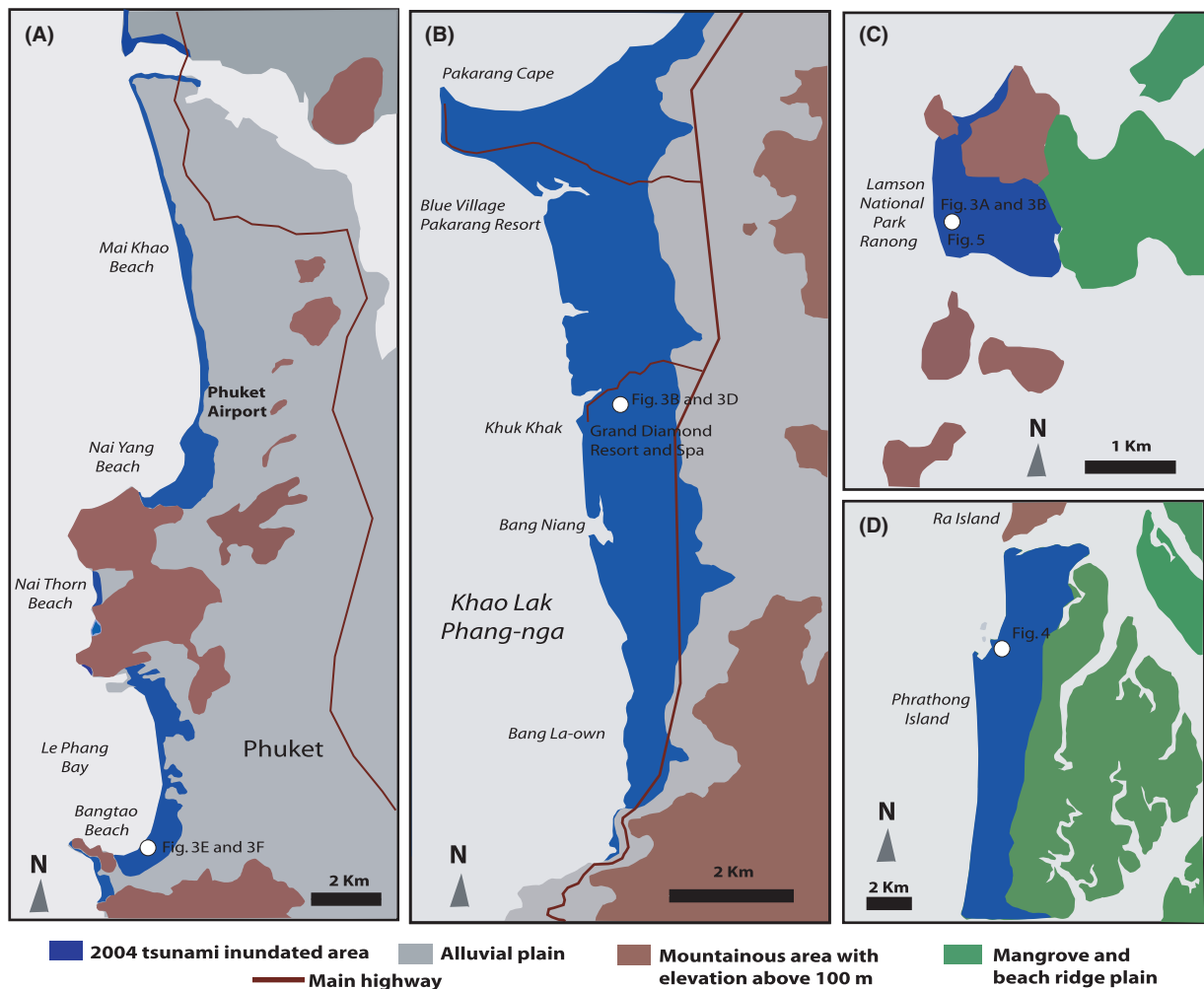


Fig. 2 Inundation map from north of Phuket (A), Khao Lak, Phang-nga (B), Kho Khao and Phrathong islands (C) and Lamson, Ranong (D).

(Fig. 5A,B). Each set of internal structures was characterized by an upstream dipping laminae, downstream dipping laminae, a structureless part of trough fill, and convex-upward laminae with a trough-shaped base (Fig. 5C). The occurrence of antidune structures is the second new discovery reported here for the 2004 tsunami deposits that indicates a tsunami supercritical flow condition.

Typical stratigraphy and sediment properties of 2004 tsunami deposits

At Lamson, Ranong, one continuous unit of tsunami deposit showed several multiple normal gradings and a local reverse grading without a sharp contact among the layers. The mean grain size ranged from very fine to medium sand (Fig. 6A). Two distin-

guishable layers at Grand Diamond Resort and Spa, Khao Lak, Phang-nga showed normal grading with mean grain sizes slightly decreasing from medium sand to fine sand fining up (Fig. 6B). At Bangtao, Phuket, the tsunami deposit contains two typical units of inflow separated by a visible sharp contact between the layers. The mean grain size of the upper unit was slightly larger than the lower one indicating different flow energies between the tsunami wave trains that stuck at Bangtao (Fig. 6C). In general, the mean grain size of tsunami deposits along the Andaman coast varied from fine to medium sand. The deposit tends to decrease in grain size upwards and landward, and is poorly sorted with some shell fragments and organic materials. Table 1 summarizes the observed characteris-

tics of the 2004 Indian Ocean tsunami deposits from the representative sites at Bangtao, Khao Lak, Phrathong Island, and Lamson.

Discussion

We define the meaning of unit and layer used herein this paper. A unit of tsunami deposit means an accumulation consisting of a single or more layers. A layer presents a single normal or reverse grading. Units are separated by erosional surface with a sharp contact between layers.

Flow conditions inferred from capping bedforms

The capping bedforms of the 2004 Indian Ocean tsunami deposits at Phuket, Phang-nga and Ranong,

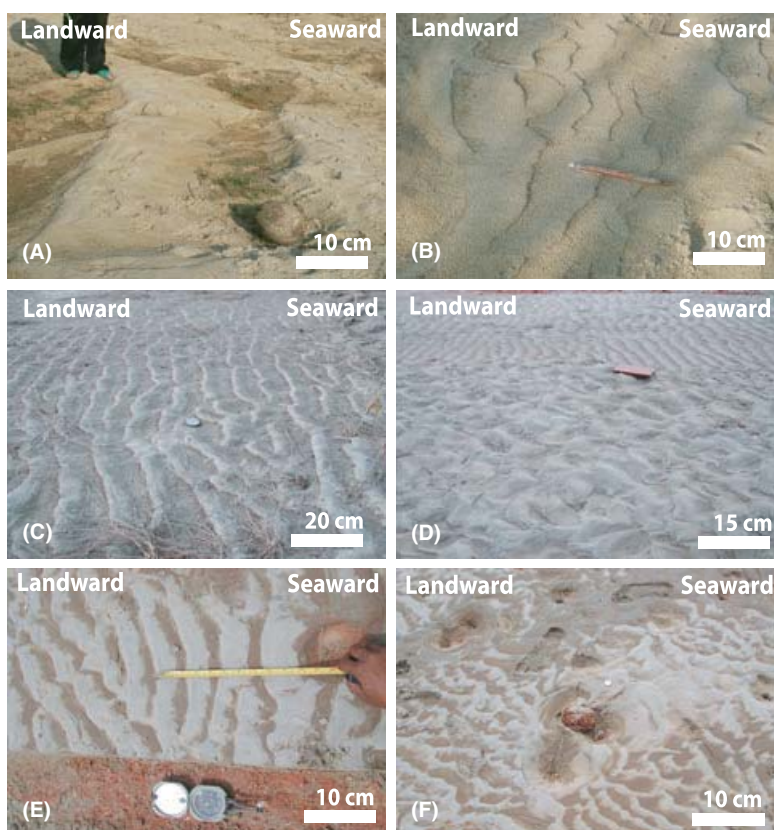


Fig. 3 Capping bedforms showing a landward dune (A) and seaward ripple on dune (B) from Phuket; straight and slightly sinuous-crested ripples on one continuous crest from Lamson, Ranong (C and D) and at Khao Lak, Phang-nga (E and F).

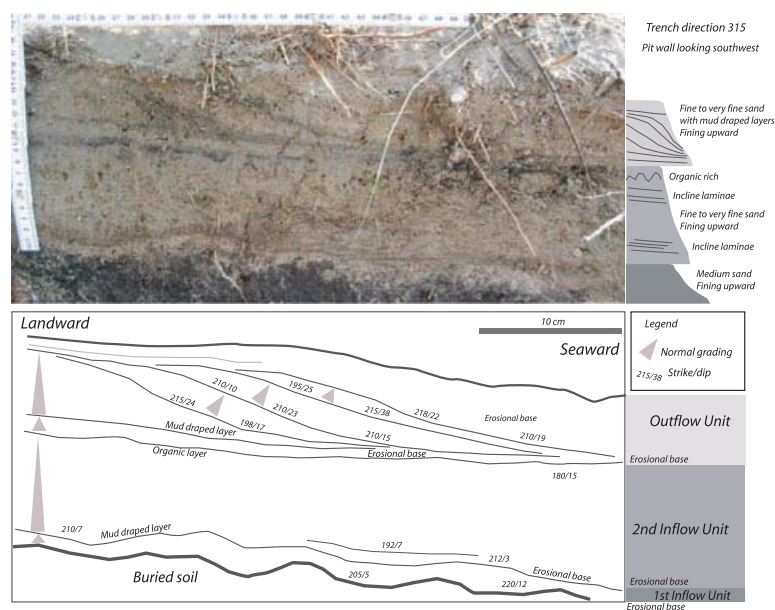


Fig. 4 Set of seaward cross-laminations with mud drapes indicating tsunami outflow from Phrathong Island, Phang-nga.

revealed a broadly similar pattern of tsunami inflow conditions. At Bang-tao, Phuket, eyewitnesses and photograph records suggest that at least three tsunami inflows hit the area, followed by ponding water and a slow outflow, in agreement with the sedimentological study of Choowong *et al.* (2007b). Thin layers of silt and mud can be found on the top of normally graded tsunami sand units, but were uncommon within the 2004 tsunami sand sheet in the flat areas we observed. Only a few millimetres of mud layers coating the top of the final bedforms were observed in some local areas (e.g. Kamala Beach, Phuket), and they were deposited probably during slow outflow or stagnant water (Choowong *et al.*, 2007a). However, thin layers of mud drape mixed with organic patches were well recognized within the wet swale environment at Phrathong Island.

Sedimentary structures of supercritical flow

Internal sedimentary structures of tsunami deposits have been used extensively to infer flow directions (e.g. Fujiwara *et al.*, 2003; Panegina *et al.*, 2003; Nelson *et al.*, 2004; Cisternas *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2005; Moore *et al.*, 2006; Nanayama and Shigeno, 2006; Jaffe and Gelfenbaum, 2007). Sharp contacts between layers of normal grading deposits are good criteria to separate inflow and outflow units (e.g. Nanayama *et al.*, 2000).

Sets of sedimentary structures representing antidune were recognized at Lamson, Ranong. These lamina sets are quite similar to both those recognized in the flume experiment (Alexander *et al.*, 2001) using supercritical water flows over aggrading sand beds and those observed on modern and ancient washover fans (Barwis and Hayes, 1985). We infer that the lamina sets of sedimentary structures detected from Lamson are of an antidune structure and represent the deposition during supercritical flow conditions.

The application of internal sedimentary structures of tsunami deposits as a criterion for distinguishing them from the other deposits is very limited (e.g. Dawson *et al.*, 1996; Nanayama *et al.*, 2000; Bryant, 2001; Witter *et al.*, 2001; Bussert and Aber-

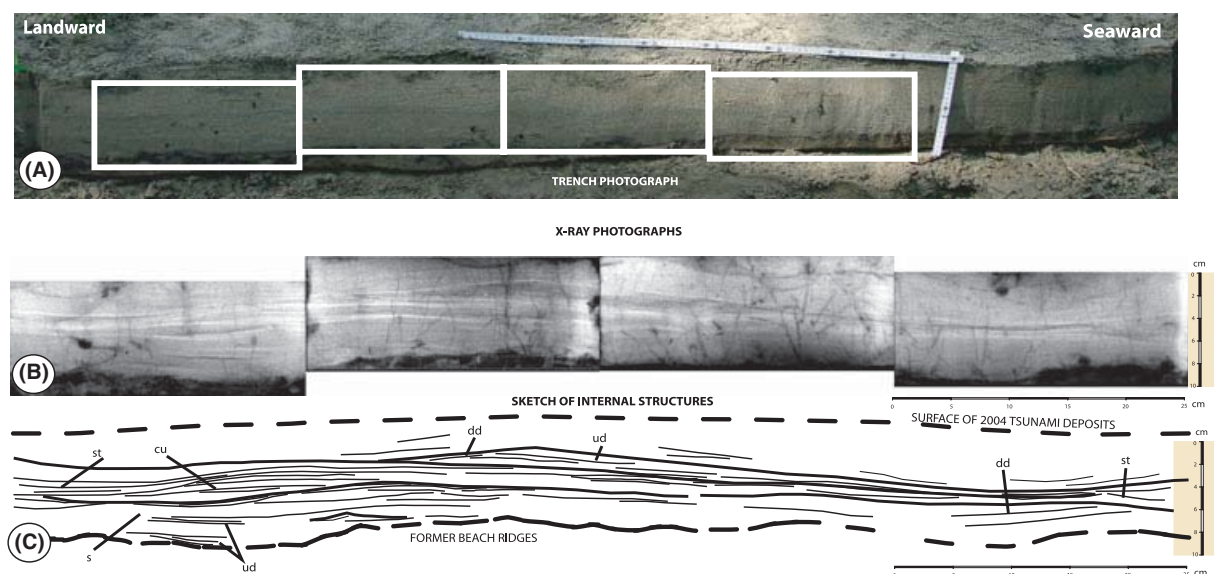


Fig. 5 (A) Shows the pit wall where the continuous box samples (indicated in white squares) were collected for X-ray radiography. (B) Mosaic X-ray radiographs exhibit the sedimentary structure of an antidune. (C) Detail sedimentary structures of the antidune including upstream dipping laminae (ud), downstream dipping laminae (dd), structureless part of the trough fill (s), convex-upward laminae with a trough-shaped base (cu), and symmetrical filling laminae and upstream dipping laminae (st).

han, 2004; Goff *et al.*, 2004; Tuttle *et al.*, 2004; Dawson and Stewart, 2007; Morton *et al.*, 2007). This is because tsunami and other deposits contain some similarities of sedimentary structures and unique characteristic structures that have never been described. Antidune-like structures have rarely been observed as a diagnostic criterion of the pre Holocene tsunami deposits (e.g. Murakoshi and Masuda, 1991; Fujino *et al.*, 2006). Our findings of antidune structures in 2004 tsunami deposit suggest that they may be an additional sedimentological clue that would confirm supercritical flow conditions of the tsunami current.

High concentration inflow inferred by reverse grading

Reverse grading is common in numerous kinds of sedimentary deposits including beach foreshore and berm overwash laminations (e.g. Clifton, 1969; Fisher, 1971; Schwartz, 1975; Leatherman *et al.*, 1977), foresets of eolian and subaqueous dunes (Bagnold, 1941; Inman *et al.*, 1966; Hunter, 1976), and basal parts of some coarse grained turbidites (Sanders, 1965; Walker, 1975), but is very rare in tsunami deposits (Morton *et al.*, 2007). Apart from normal grading,

which are common in the 2004 tsunami deposits, reverse grading has been reported from the north of Pakarang Cape, Phang-nga (Higman *et al.*, 2006). In this study, reverse grading was also detected from several pit walls at Lamson, Ranong. Reverse grading occurs because of a high grain concentration and mutual collisions among grains within a traction carpet or grain flow (Hand, 1997). Thus, reverse grading in tsunami deposits indicates a very high grain concentration within the tsunami flow, and was possibly formed at the initial stages of inundation at a low water depth.

Conclusion

The preservation of capping bedforms of the 2004 Indian Ocean tsunami deposit can be used clearly to infer the energy and direction of the tsunami flow, but a determination of the exact level of the flow depth that generated them has never been made. To date, the thickness and mean grain size of tsunami deposits have been used to estimate the flow surface velocity (e.g. Jaffe and Gelfenbaum, 2007), whereas the dimension of bedforms has been applied to estimate the near bottom threshold velocity (Choowong *et al.*, 2007b). The estimation of flow depth

in relation to the setting time and velocity of sediment particles within a flow is still challenging because of the difficulty in estimating the grain concentration within a tsunami flow. However, the sedimentary analysis of this study confirms that a tsunami with supercritical flow conditions played a major role in the creation of large capping bedforms and a thick deposition of one sand unit. The capping bedforms imply a very high flow velocity and they could have well preserved, if the velocity had decreased rapidly when the flow depth reached a maximum level. Short ponding time after the tsunami reached its maximum run-up could provide sufficient time for fine particles to settle down, for example, in case of Bangtao, Phuket, but not necessarily in places where the tsunami flooded over the area with no return flow, such as at Lamson, Ranong. Unlike the Bangtao and Lamson cases, the deposition in the wet swale of Phrathong Island shows a clear preservation of both tsunami inflow and outflow. The low topography of the swale acted as a good sediment trap. Sedimentary structures within swale imply a turbulent flow at the first hit followed by ponding and slowly draining off along the topographic low lying areas of swale. The

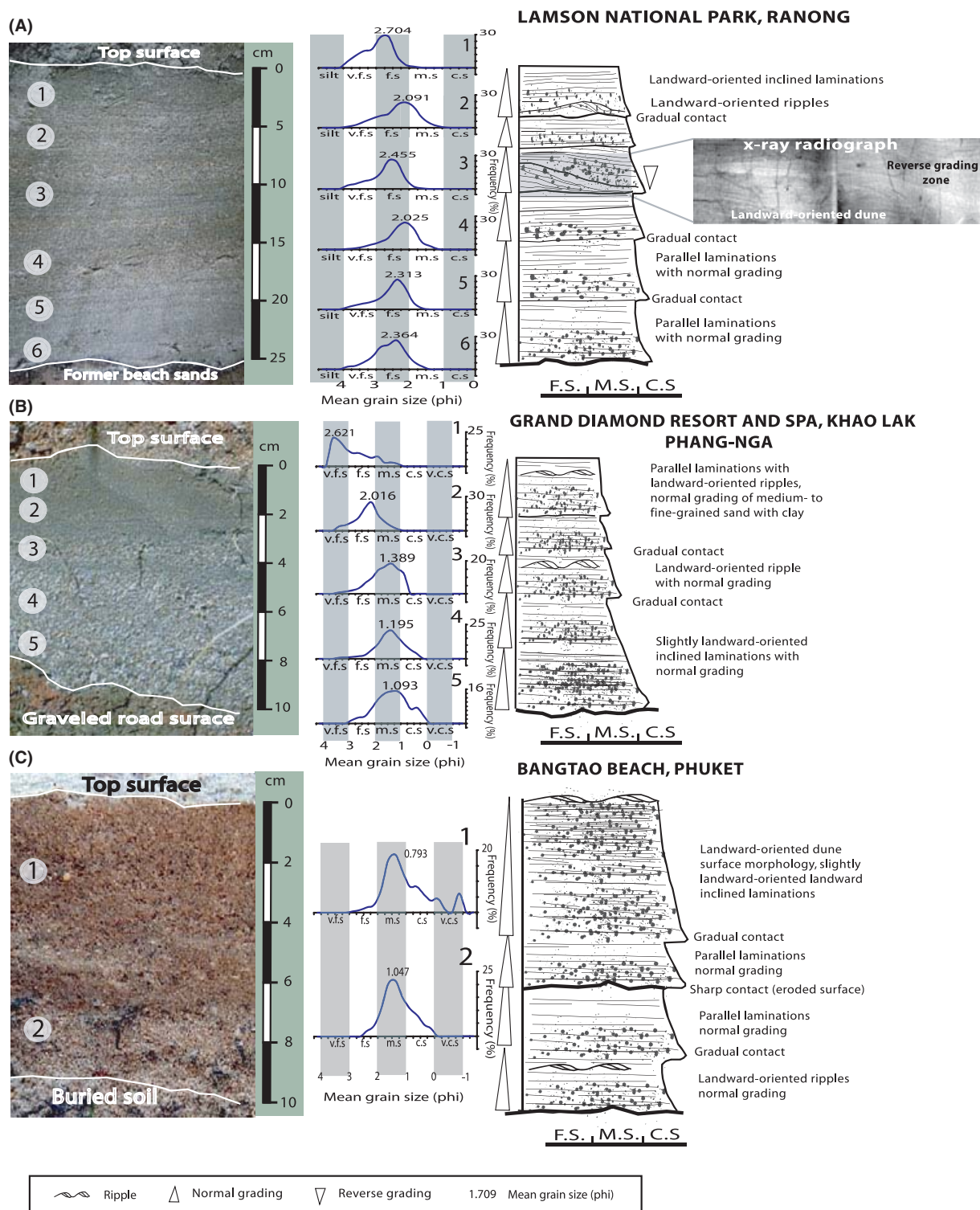


Fig. 6 Tsunami stratigraphy at Lamson, Ranong (A), Khao Lak, Phang-nga (B) and Bangtao, Phuket (C). Circle with numbers in the photographs on the left indicate where layer to layer samples were collected for grain size analysis by setting tube (results are in middle column). Handsome sketches on the right were drawn upon peel samples. Normal grading with gradual contact between layers is common (A and B), except in the part of the landward-inclined trough where reverse grading was recognized at Lamson (see X-ray radiograph in A). Sharp contact is an indicator to separate units of inflow, as in case of Bangtao (C).

Table 1 Summary and comparison of the 2004 Indian Ocean tsunami depositional features in flat- and irregular-topography from Bangtao, Lamson, Phrathong and Khao Lak.

Depositional features	Irregular topography		
	Flat topography	Phrathong Island, Phang-nga	
	Bangtao, Phuket	Lamson, Ranong	Khao Lak, Phang-nga
<i>Transect scale (hundreds of metres)</i>			
Cross shore geometry of the deposits	Landward thinning, local thickening related to micro-topography	Overall landward thinning	Landward thinning, local thickening related to swale topography
Landward limit of the deposit (m)	200	300–400	800–1000
Inundation limit (km)	1.0–1.2	0.8–1.5	1.5–2.0
<i>Trench and pit scale (m)</i>			
Bedforms	Dune and ripple with leeside faced landward	Ripples with leeside facing landward	Ripples with leeside faced landward and seaward
Surface mud layer	No mud cap at surface	Thin mud cap layer at surface (1–2 mm)	Thin mud cap layer at surface (2–3 mm)
Grain size	Medium to coarse sand	Medium to very fine sand to silt	Medium to fine sand
Sorting	Poorly sorted	Moderately sorted	Poorly sorted
Event deposit thickness	0.1–25 cm (46 pits)	0.1–25 cm (24 pits)	0.5–18 cm (10 pits)
Grading and number of layers	A unit with a fining-upward trend overall, composed of graded parts, 2–3 multiple normally graded layers	A unit with a fining-upward trend overall, composed of graded parts, 2–4 multiple normally graded layers with some reversely graded layers	A unit with a fining-upward trend overall, composed of graded parts, 2–3 multiple normally graded layers
Internal sedimentary structures	Parallel laminae, landward-and seaward-inclined laminae, sharp contact between layers	Upstream dipping laminae, downstream dipping laminae, structureless part of trough fill, and convex-upward laminae with trough-shaped base	Parallel laminae, seaward-inclined laminae, sharp contact between layers
	Some rip-up mud and sand clasts	Some rip-up sand clasts	Some rip-up mud clasts
Rip-up clasts	Sharp contact above buried soil, local erosion	Sharp contact above organic rich sand	Sharp contact above organic rich soil
Basal contact			
Compositions	Quartz common, few shell fragments	Quartz common, few shell and heavy minerals	Quartz common, few coral and shell fragments

analysis of the 2004 tsunami deposits in this paper helps to improve our understanding of the depositional characteristics in different landforms and flow conditions. We propose that the recognition of the 2004 tsunami deposits outlined here can be successfully applied as a key criterion for distinguishing the pre-2004 tsunami deposits and other storm deposits along this Andaman coast.

Acknowledgements

We thank the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) for sponsorship as a Ronpaku scholarship to the first author. The Thailand Research Fund and Chulalongkorn University provided financial support during fieldwork. This manuscript benefited from the critical and constructive comments from Prof. Brian Pratt, Dr. Junko Komatsubara, and an anonymous reviewer. Thanks are also extended to the associate editor, Prof. Vincenzo Pascucci and to the editor, Prof. Max Coleman, for a thorough review that greatly improved the manuscript.

References

- Alexander, J., Bridge, J.S., Cheel, J.R. and Leclair, S.F., 2001. Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggradating sand beds. *Sedimentology*, **48**, 133–152.
- Atwater, B.F., 1987. Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington state. *Science*, **236**, 942–944.
- Atwater, B.F., 1992. Geologic evidence for earthquakes during the past 2000 years along the Copalis River, southern coastal Washington. *J. Geophys. Res.*, **97**, 1901–1919.
- Atwater, B.F. and Moore, A.L., 1992. A tsunami about 1000 years ago in Puget Sound, Washington. *Science*, **258**, 1614–1617.
- Atwater, B.F. and Yamaguchi, D.K., 1991. Sudden, probably coseismic submergence of Holocene trees and grass in coastal Washington State. *Geology*, **19**, 706–709.
- Atwater, B.F., Nelson, A.R., Clague, J.J. *et al.*, 1995. Summary of coastal geologic evidence for past great earthquakes at the Cascadia subduction zone. *Earthquake Spectra*, **11**, 1–18.
- Bagnold, R.A., 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 265 p.
- Bahlburg, H. and Weiss, R., 2007. Sedimentology of the December 26, 2004, Sumatra tsunami deposits in eastern India (Tamil Nadu) and Kenya. *Int. J. Earth Sci.*, **96**, 1195–1209.
- Barwis, H.J. and Hayes, O.M., 1985. Antidunes on modern and ancient washover fans. *J. Sediment. Petrol.*, **55**, 907–916.
- Bondevik, S., Svenden, J.I. and Mangerud, J., 1997. Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunami in shallow marine basins and coastal lakes, western Norway. *Sedimentology*, **44**, 1115–1131.
- Bourgeois, J., Hansen, T.A., Wiberg, P.L. and Kauffman, E.J., 1988. A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas. *Science*, **241**, 567–570.
- Bryant, E.A., 2001. *Tsunami. The Under-rated Hazard*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Bryant, E.A., Young, R.W. and Price, D.M., 1992. Evidence of tsunami sedimentation on the southeastern coast of Australia. *Geology*, **100**, 753–765.
- Bussert, R. and Aberhan, M., 2004. Storms and tsunamis: evidence of event sedimentation in the Late Jurassic Tendaguru Beds of southeastern Tanzania. *J. Afr. Earth Sci.*, **39**, 549–555.
- Chadha, R.K., Latha, G., Yeh, H., Peterson, C. and Katada, T., 2005. The tsunami of the great Sumatra earthquake of M 9.0 on 26 December 2004—Impact on the east coast of India. *Curr. Sci.*, **88**, 1297–1301.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K. *et al.*, 2007a. Erosion and deposition by the 2004 Indian Ocean tsunami in Phuket and Phang-nga Provinces, Thailand. *J. Coast. Res.*, **23**, 1270–1276.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K. *et al.*, 2007b. 2004 Indian Ocean tsunami inflow and outflow at Phuket, Thailand. *Mar. Geol.*, doi: 10.1016/j.margeo.2007.10.011.
- Cisternas, M., Atwater, B.F., Torrejon, F. *et al.*, 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, **437**, 404–407.
- Clague, J.J., Bobrowsky, T.P. and Hutchinson, I., 2000. A review of geological records of large tsunamis at Vancouver Island, British Columbia, and implications for hazard. *Quatern. Sci. Rev.*, **19**, 849–863.
- Clifton, H.E., 1969. Beach lamination: nature and origin. *Mar. Geol.*, **7**, 553–559.
- Dawson, A.G. and Stewart, I., 2007. Tsunami deposits in the geological record. *Sediment. Geol.*, **200**, 166–183.
- Dawson, A.G., Long, D. and Smith, D.E., 1988. The Storegga slides: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Mar. Geol.*, **82**, 271–276.
- Dawson, A.G., Shi, S., Dawson, S., Takahashi, T. and Shuto, N., 1996. Coastal sedimentation associated with the June 2nd and 3rd, 1994 tsunami in Rajegwesi, Java. *Quatern. Sci. Rev.*, **15**, 901–912.
- Fisher, R.V., 1971. Features of coarse-grained, high concentration fluids and their deposits. *J. Sediment. Petrol.*, **41**, 916–927.
- Fujino, F., Matsuda, F., Tagomori, F. and Matsumoto, D., 2006. Structure and depositional processes of a gravelly tsunami deposit in shallow marine setting in Lower Cretaceous Miyoko Group, Japan. *Sediment. Geol.*, **187**, 127–138.
- Fujiwara, O., Kamataki, T. and Tamura, T., 2003. Grain-size distribution of tsunami deposits reflecting the tsunami waveform; an example from a Holocene drowned valley on the southern Boso Peninsula, East Japan. *Quatern. Res.*, **42**, 68–81.
- Goff, J.R., Rouse, H.L., Jones, L.L. *et al.*, 2000. Evidence for an earthquake and tsunami about 3100–3400 yr ago, and other catastrophic saltwater inundations recorded in a coastal lagoon, New Zealand. *Mar. Geol.*, **170**, 231–249.
- Goff, J.R., McFadgen, B.G. and Chague-Goff, C., 2004. Sedimentary differences between the 2002 Easter storm and the 15th-century Okoropunga tsunami, southeastern North Island, New Zealand. *Mar. Geol.*, **204**, 235–250.
- Goff, J., Liu, P., Higman, B., Morton, R. *et al.*, 2006. Sri Lanka Field Survey after the December 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra*, **22**, 155–172.
- Hand, M.B., 1997. Inverse grading resulting from coarse-sediment transport lag. *J. Sediment. Res.*, **67**, 124–129.
- Hawkes, A., Bird, M., Cowie, S. *et al.*, 2007. Sediments deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami along the Malaysia-Thailand Peninsula. *Mar. Geol.*, **242**, 169–190.
- Higman, B., Maxcia, C., Lynett, P. and Alam, S., 2006. Horizontal and vertical grading in a tsunami deposit. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **87**, 52.
- Hindson, R.A., Andrade, C. and Dawson, A.G., 1996. Sedimentary processes associated with the tsunami generated by the 1755 Lisbon earthquake on the Algarve coast, Portugal. *Phys. Chem. Earth*, **21**, 57–63.
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawattikul, N. and Patanakoanog, B., 2007. Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: an example of two transects along the western coast of Thailand. *Mar. Geol.*, **239**, 163–172.
- Hunter, R.E., 1976. Comparisons of eolian and subaqueous sand-flow cross-strata. *AAPG Bull.*, **60**, 683–684.
- Inman, D.L., Ewing, G.C. and Corliss, J.B., 1966. Coastal sand dunes of Guerrero Negro, Baja, California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **77**, 787–802.

- Jaffe, E.B. and Gelfenbaum, G., 2007. A simple model for calculating tsunami flow speed from tsunami deposits. *Sediment. Geol.*, **200**, 347–361.
- Jankaew, K., Choowong, M., Charoentitirat, T. et al., 2007. A pre-2004 tsunami deposit in Thailand. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **88**, 23.
- Kumon, F. and Makino, K., 2000. Improvement of settling tube grain-size analysis by a new program written in Visual Basic. *J. Sedimentol. Soc. Jpn*, **50**, 27–32 (in Japanese).
- Leatherman, S.P., Williams, A.T. and Fisher, J.S., 1977. Overwash sedimentation associated with a large-scale north-easter. *Mar. Geol.*, **24**, 107–121.
- Long, D., Smith, D.E. and Dawson, A.G., 1989. A Holocene tsunami deposit in eastern Scotland; Late Quaternary sea-level changes and crustal movements in the British Isles. *J. Quatern. Sci.*, **4**, 61–66.
- Minoura, K. and Nakaya, S., 1991. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from Northeast Japan. *J. Geol.*, **99**, 265–287.
- Moore, A.L., 2000. Landward fining in onshore gravel as evidence for a late Pleistocene tsunami on Molokai, Hawaii. *Geology*, **28**, 247–250.
- Moore, A., Nishimura, Y., Gelfenbaum, G., Kamataki, T. and Triyono, R., 2006. Sedimentary deposits of the 26 December 2004 tsunami on the northwest coast of Aceh, Indonesia; The 2004 Great Sumatra earthquake and tsunamis. *Earth Planets Space*, **58**, 253–258.
- Morton, A.R., Gelfenbaum, G. and Jaffe, E.B., 2007. Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sediment. Geol.*, **200**, 184–207.
- Murakoshi, N. and Masuda, F., 1991. A depositional model for a flood–tidal delta and washover sands in the late Pleistocene paleo-Tokyo Bay, Japan. In: *Clastic Tidal Sedimentology* (D.G. Smith, G.E. Reinson, B.A. Zaitlin and R.A. Rahmani, eds), *Can. Soc. Petrol. Geol. Mem.*, **16**, 219–226.
- Nagendra, R., Kamalak Kamman, B.V., Sajith, C., Sen, G., Reddy, A.N. and Srinivasulu, S., 2005. A record of foraminiferal assemblage in tsunami sediments along Nagappattinam coast, Tamil Nadu. *Curr. Sci.*, **89**, 1947–1952.
- Nanayama, F. and Shigeno, K., 2006. Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido. *Sediment. Geol.*, **187**, 139–158.
- Nanayama, F., Shigeno, K., Satake, K. et al., 2000. Sedimentary differences between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwestern Hokkaido, northern Japan. *Sediment. Geol.*, **135**, 255–264.
- Nelson, A.R., Asquith, A.C. and Grant, W.C., 2004. Great earthquakes and tsunamis of the past 2000 years at the Salmon River estuary, central Oregon coast, USA. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**, 1276–1292.
- Panegina, T.K., Bourgeois, J., Bazanova, I.V. and Braitseva, O.A., 2003. A millennial scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia. *Quatern. Res.*, **59**, 26–47.
- Rhodes, B., Jankaew, K. and Kirby, M., 2007. Mangroves, coral, and the search for a paleotsunami deposit along the Andaman coast of Thailand. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **88**, 23.
- Sanders, J.E., 1965. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms. In: *Primary Sedimentary Structures and their Hydrodynamic Interpretation* (G.V. Middleton, ed.), *SEPM Spec. Publ.*, **12**, 192–219.
- Schwartz, R.K., 1975. *Nature and Genesis of Some Washover Deposits*, Vol. **61**. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Eng. Research Center, Tech. Mem., 69 p.
- Singarasubramanian, S.R., Mukesh, M.V., Manoharan, K., Murugan, S., Bakkairaj, D. and Peter, A.J., 2006. Sediment characteristics of the M 9 tsunami event between Rameswaram and Thoothukudi, Gulf of Mannar, southeast coast of India. *Sci. Tsunami Hazards*, **25**, 160–172.
- Suzuki, K., 1984. *Making a Directional Thin Section from Undisturbed Unconsolidated Deposit*, Vol. **4**. Technical Report, Dep. of Geosciences, Univ. Tsukuba, 125–131.
- Szczucinski, W., Niedzielski, P., Rachlewicz, G. et al., 2005. Contamination of tsunami sediments in a coastal zone inundated by the 26 December 2004 tsunami in Thailand. *Environ. Geol.*, **49**, 321–331.
- Szczucinski, W., Chaimanee, N., Niedzielski, P. et al., 2006. Environmental and geological impacts of the 26 December 2004 Tsunami in coastal zone of Thailand—overview of short and long-term effects. *Pol. J. Environ. Stud.*, **15**, 793–810.
- Tuttle, M.P., Ruffman, A., Anderson, T. and Jeter, H., 2004. Distinguishing tsunami and storm deposits in eastern North America: the 1929 Grand Banks tsunami versus the 1991 Halloween storm. *Seismol. Res. Lett.*, **75**, 117–131.
- Umitsu, M., Tanavud, C. and Patanakonog, B., 2007. Effects of landforms on tsunami flow in the plains of Banda Aceh, Indonesia, and Nam Khem, Thailand. *Mar. Geol.*, **242**, 141–153.
- Walker, R., 1975. Generalized facies models for resedimented conglomerates of turbidite association. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**, 737–748.
- Williams, H.F., Hutchinson, I. and Nelson, A.R., 2005. Multiple sources for late-Holocene tsunamis at Discovery Bay, Washington State, USA. *Holocene*, **15**, 60–73.
- Witter, R.C., Kelsey, H.M. and Hemphill-Haley, E., 2001. Pacific storms, El Nino and tsunamis; competing mechanisms for sand deposition in a coastal marsh, Euchre Creek, Oregon. *J. Coast. Res.*, **17**, 563–583.

Received 20 June 2007; revised version accepted 23 January 2008

LETTERS

Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand

Kruawun Jankaew¹, Brian F. Atwater², Yuki Sawai³, Montri Choowong¹, Thasinee Charoentitirat¹, Maria E. Martin⁴ & Amy Prendergast⁵

Recent centuries provide no precedent for the 2004 Indian Ocean tsunami, either on the coasts it devastated or within its source area. The tsunami claimed nearly all of its victims on shores that had gone 200 years or more without a tsunami disaster¹. The associated earthquake of magnitude 9.2 defied a Sumatra–Andaman catalogue that contains no nineteenth-century or twentieth-century earthquake larger than magnitude 7.9 (ref. 2). The tsunami and the earthquake together resulted from a fault rupture 1,500 km long that expended centuries' worth of plate convergence^{2–5}. Here, using sedimentary evidence for tsunamis⁶, we identify probable precedents for the 2004 tsunami at a grassy beach-ridge plain 125 km north of Phuket. The 2004 tsunami, running 2 km across this plain, coated the ridges and intervening swales with a sheet of sand commonly 5–20 cm thick. The peaty soils of two marshy swales preserve the remains of several earlier sand sheets less than 2,800 years old. If responsible for the youngest of these pre-2004 sand sheets, the most recent full-size predecessor to the 2004 tsunami occurred about 550–700 years ago.

The 2004 Indian Ocean tsunami, cresting higher in Thailand than it did anywhere else east of Sumatra (Fig. 1b), rose as much as 20 m above sea level on Phra Thong Island⁷. The main wave, as observed from a hill on the island's western shore (H, Fig. 1c), formed a relentless flood that rose stepwise to heights above treetops⁸. The tsunami ran more than 2 km inland across a Holocene plain composed of grassy beach ridges and intervening tree-lined swales.

The flooding at Phra Thong, as on other Thai coastal plains^{9,10}, produced local erosion and widespread deposition. The tsunami reamed out several drainages previously cut across beach ridges as much as 300 m inland (Fig. 1c, e, and Supplementary Fig. 1). In addition, it coated most of the island's western half with a sheet of sand (Fig. 1d). This sheet is locally lineated with sand streaks that extend inland from the spoil piles of tin miners (Fig. 1e and Supplementary Fig. 1). Its mean particle size ranges from medium to very fine on a transect across the northern part of the island¹¹. Horizontal bedding is common, as is overall upward fining to coarse silt.

Building on a previous reconnaissance¹², we sought pre-2004 sand sheets at Phra Thong by digging pits and augering holes into ridges and swales at more than 150 sites (Fig. 1d (dots) and Supplementary Table 1). At 20 of these sites we found pre-2004 sand interbedded with the peaty soils of swales that hold standing water most of the year (Fig. 1d, red dots). We found no pre-2004 sand beds in the quartz-sand soils of the ridges or in the slightly organic soils of swales that are merely damp.

We traced pre-2004 beds across each of two marshy swales near a place where the 2004 tsunami reportedly flowed about 10 m deep

(Figs 1e and 2a, and Supplementary Fig. 3a). These swales formed about 2,500 years ago (bark and shell dates; Fig. 2b, c), when the area's relative sea level was probably within 1–2 m of its present position¹³. Because beaches have built the island westwards, the more westerly of the swales (X) postdates its neighbour (Y). We assembled stratigraphic cross-sections from correlated pits, from auger borings and from a trench 35 m long, estimated particle size in the field, inferred a preliminary chronology from radiocarbon dating of individual plant remains and shells (Figs 2c and 3, and Supplementary Table 2), and made diatom analyses (Supplementary Figs 4 and 5).

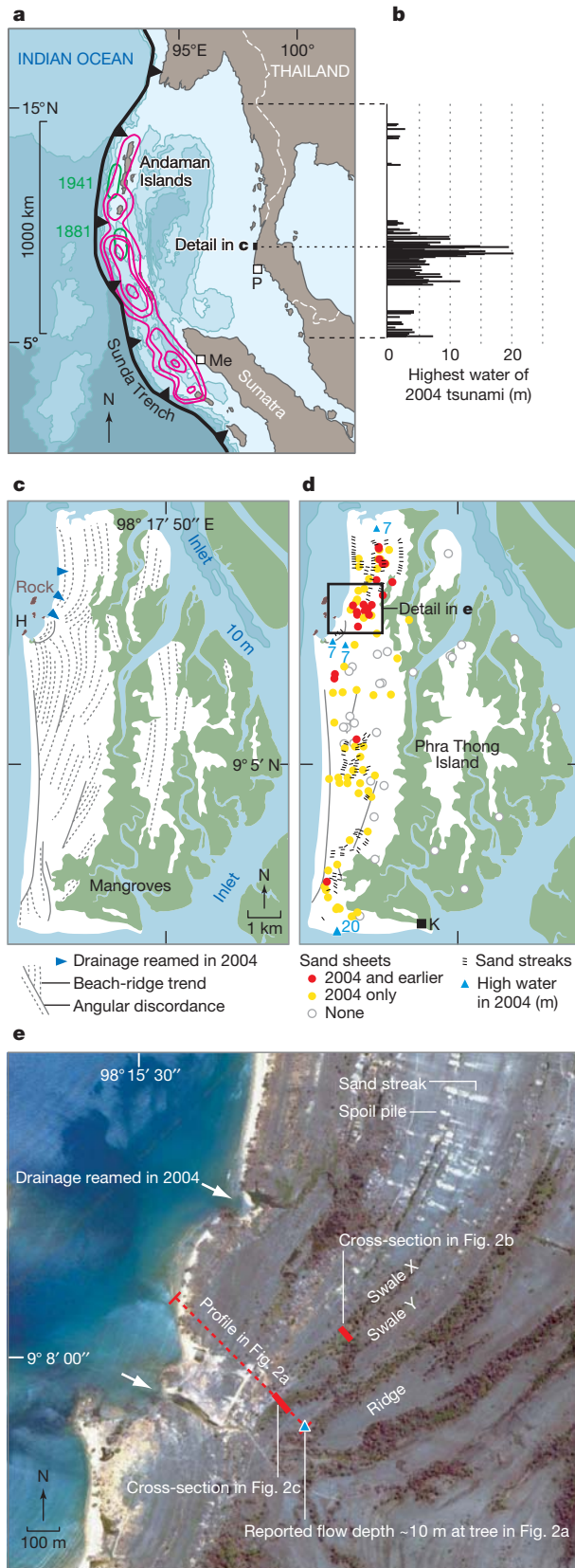
Peaty soil in swale X contains two sand sheets (B and C in Fig. 2b, d) that resemble the overlying 2004 deposit. Sheet C, the earlier, is commonly 10 cm thick. Coarse to very coarse sand forms a discontinuous basal layer that fills pre-existing pockets in the underlying soil. The rest of sheet C consists of very fine sand and coarse silt that contains horizontal laminae defined most visibly by leaf fragments (Fig. 3c). The entire sheet formed after 2,200–2,400 sidereal years ago, the age of an isolated piece of bark in the uppermost 1 cm of the underlying buried soil. Leaf fragments within the sheet gave ages that conflict with one another and that exceed the bark age by thousands of years (Fig. 3c). Sheet B, commonly 5 cm thick, typically fines upwards from fine sand to sandy silt. It conformably overlies peaty soil that contains a horizon of bark fragments in its uppermost 1 cm. Three of these fragments, collected separately, yielded ages between 530 ± 40 and 570 ± 40 radiocarbon years before AD 1950 (^{14}C yr BP; Fig. 3b). If scarcely younger than these fragments, sheet B was deposited about 550–700 sidereal years ago (Supplementary Table 2).

Three pre-2004 sand sheets alternate with peaty soil in swale Y (Fig. 2c, e). All three are similar in thickness to the overlying 2004 sand sheet, and all extend preferentially up the swale's seaward side. All were formed after the swale ceased holding an intertidal flat that is marked by non-abraded molluscan shells 2,500–2,800 sidereal years old (Fig. 2c and Supplementary Table 2). The lowest two sheets, otherwise undated and thus left uncorrelated with swale X, consist mainly of very fine to fine sand. They lack sedimentary structures, probably because of bioturbation that blurs their contacts with the soils beneath (Fig. 2e). The highest pre-2004 sheet (B) retains a sharp base and tabular shape that extend the full length of the trench (Fig. 2f). This sheet typically fines upwards from basal fine or medium sand to parallel-laminated very fine sand that abounds in leaf fragments (Fig. 3a). It probably correlates with sheet B of swale X because each is the youngest pre-2004 sand sheet in its swale and because the leaf fragments in swale Y yielded ages too young for correlation with sheet C (Fig. 3a, c).

Although the 2004 sand sheet abounds in brackish and marine diatoms, the earlier sand sheets in swales X and Y lack diatoms of

¹Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Phatumwan, Bangkok 10330, Thailand. ²US Geological Survey at Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, Washington 98195-1310, USA. ³Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Site C7 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan. ⁴Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Box 351310, Seattle, Washington 98195-1310, USA. ⁵Geoscience Australia, GPO Box 378, Canberra, Australian Capital Territory 2601, Australia.

any kind (Supplementary Figs 4 and 5). Marine and brackish-water diatoms aid in identifying tsunami deposits on temperate shores¹⁴. Perhaps their opaline silica valves do not last long in tropical warmth; in experiments, the dissolution of diatoms increases with temperature¹⁵.



Preservation is also a problem for the sand sheets themselves. The pre-2004 sheets are distinct and sharply bounded where the swale soil is peaty, blurred by gradational contacts where the soil is just slightly organic, and totally absent in the sandy soils of beach-ridge crests. The 2004 tsunami deposit is already headed towards this fate: in wet swales it has a protective cap of organic matter as much as 5 cm thick, whereas on ridge crests it lacks any cover other than ejecta from burrows that tap the underlying sandy soil. Sheet B, if truly correlative between swales X and Y, initially spanned the intervening beach ridge for a total shore-normal length of no less than 100 m (Fig. 1e).

Although sand sheets can record intense storms that drive waves over or through sandy beach berms¹⁶, the geographic setting limits Phra Thong's exposure to such storms. Less than 10° from the Equator, this part of Thailand fringes the belt where the Coriolis minimum limits cyclonic winds¹⁷. Scores of twentieth-century cyclones originated in Indian Ocean waters to its west, but all these moved towards India, Bangladesh or Myanmar¹⁸ without producing a known storm surge in Thailand¹⁹. Tropical cyclones do strike Thailand from its Pacific side. However, such a storm loses strength during its overland crossing to the Indian Ocean (an example is given in Supplementary Fig. 6), and its anticlockwise winds can pile the sea against Thailand's west coast only in the storm's trailing-left quadrant.

Phra Thong's setting also disfavours sand-sheet deposition by river or wind. Tidal inlets separate the island from the nearest rivers (Fig. 1c). Aeolian dunes obscure little, if any, of the island's delicate striping by beach ridges and swales (Fig. 1e and Supplementary Fig. 1).

Chronology provides three further reasons to ascribe the pre-2004 sand sheets to tsunamis. First, the middle Holocene ages of the leaf fragments from sheet C (Fig. 3) imply scour into long-buried deposits beneath tidal inlets. The 2004 tsunami showed capacity for such scour by knocking down mangroves along an inner part of the inlet that bounds Phra Thong Island on the south (at K in Fig. 1d). Second, the sand sheets represent infrequent events: the soil between sheets C and B spans 1,500–1,850 years, although it may contain the bioturbated remains of an intervening sheet (Supplementary Fig. 2c); and the interval between sheet B and the 2004 tsunami lasted nearly 550–700 years (ranges computed from calibrated ages in Supplementary Table 2). These time intervals are in the broad range of deductive estimates for the recurrence of giant earthquakes in the Sumatra-Andaman source region of the 2004 tsunami^{2–5}. Third, sheet B, if little younger than AD 1300–1450 (Supplementary Table 2), may correlate with tsunami and earthquake evidence elsewhere. The youngest widespread pre-2004 sand sheet on a beach-ridge plain at Meulaboh, Sumatra (Fig. 1a, Me) overlies plant detritus dated to AD 1290–1400 (ref. 20). Two coral fragments on a marine terrace in the Andaman Islands gave ages in the range AD 1200–1650 (ref. 21). However, in accounts from Ibn Battuta (journey, AD 1325–1354)²² and the great Ming armadas (voyages, AD 1405–1433)²³, we found no written evidence for a sheet-B tsunami on Sumatran and Sri Lankan shores that the 2004 tsunami would overrun.

Figure 1 | Setting. **a**, Northern Sunda Trench and vicinity. Red lines show a modelled fault slip during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake³ at 5 (outer contour), 10, 15 and 20 m. Green lines show pre-2004 rupture areas^{2,26}. Bathymetry is shaded at 1-km intervals. Me, Meulaboh; P, Phuket. **b**, Heights of the 2004 tsunami on the eastern rim of the Indian Ocean^{7,27–30}. The tallest bars for Thailand obscure dozens of height measurements below local maxima. **c**, Landforms of Phra Thong Island. White areas denote beach ridge plains (examples in **e** and Supplementary Fig. 1). The lines of angular discordance (repeated for reference in **d**) probably record shoreline retreat. H, Hornbill Hill. **d**, Tsunami deposits on Phra Thong Island. K, knocked-down mangroves along southern inlet. The 2004 tsunami heights are maxima in metres above sea level (ref. 7 and Supplementary Fig. 1). **e**, Area of stratigraphic evidence shown in Figs 2 and 3. Post-tsunami image, probably taken early in 2005, from PointAsia.com. Trees and shrubs (dark green) delineate some of the swales.

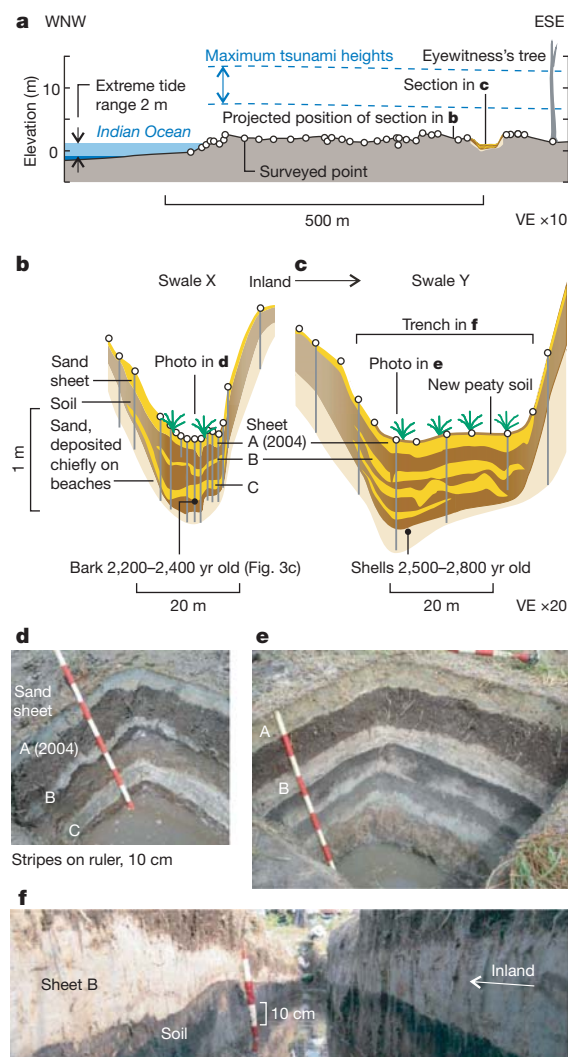


Figure 2 | Cross-sectional shape of sand sheets. **a**, Topographic profile along the line in Fig. 1e. VE, vertical exaggeration. Maximum tsunami heights are from an eyewitness in the indicated tree (Fig. 1e and Supplementary Fig. 3a) and from a post-tsunami survey 1 km to the southwest (Fig. 1d and Supplementary Fig. 1b). **b**, **c**, Cross-sections in swales X (**b**) and Y (**c**) from inferred correlation between pits and auger borings (vertical grey lines). Soil peaty in swales (dark brown) and sandy on ridges (light brown). Ages are from Supplementary Table 2. **d**, **e**, Sand sheets alternate with dark peaty soils on the walls of pits in swales X (**d**) and Y (**e**). **f**, Lateral continuity of sand sheet B exposed in trench.

What tsunami sources might Phra Thong's pre-2004 sand sheets represent? Too little is known about the sheets' landward extent on the island, let alone their potential correlates on other Indian Ocean shores, to require full-size predecessors to the 2004 Sumatra–Andaman earthquake. However, the sheets probably required ruptures larger than that of 1881 (Fig. 1a); no sand sheet from the 1881 tsunami, which crested less than 1 m high on Indian tide gauges²⁴, is evident at Phra Thong Island in fibrous peaty soils that the 2004 tsunami failed to incise while covering them with sand (Fig. 2d and Supplementary Fig. 3c–g). The pre-2004 sheets may also require Sunda Trench earthquakes larger than magnitude 8.5 if, as estimated from numerical simulations³, such earthquakes would spawn Thai tsunamis only a few metres high—barely high enough to invade Phra Thong's beach-ridge plain (Fig. 2a).

Sand sheets of Phra Thong Island thus forewarn of infrequent catastrophe. They are already providing public officials and coastal residents with tangible evidence that the 2004 tsunami was not the first of its kind (Supplementary Fig. 7). Still to be determined is

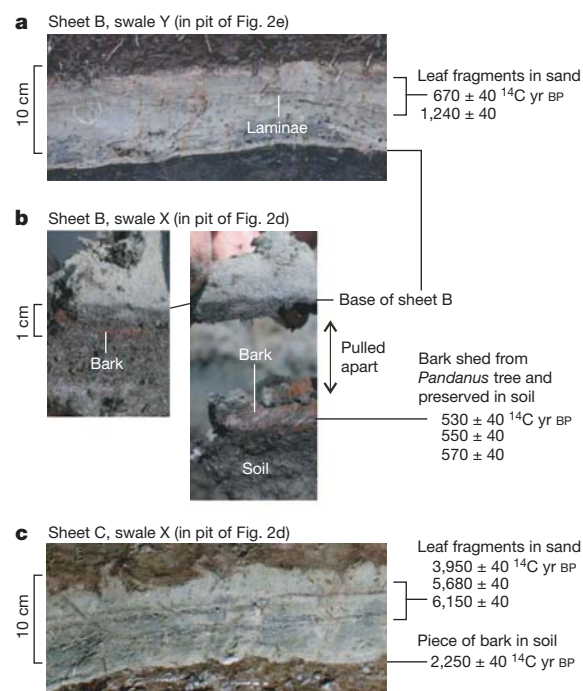


Figure 3 | Parallel laminae and radiocarbon ages. **a**, **b**, Indistinct horizontal laminae in sheet B are highlighted by leaf fragments. The two fragments dated yielded ages that differ from one another by about 600 radiocarbon years (**a**). The younger of these ages overlaps with ages on detrital tree-trunk bark in the highest part of the underlying soil (**b**). **c**, Leaf-fragments from laminae in sheet C yielded widely scattered ages thousands of years greater than that of bark in the underlying soil, all sampled within the same pit (Fig. 2d).

whether centuries dependably separate such outsize tsunamis of Sumatra–Andaman source, and whether these recur often enough to dominate Thailand's probabilistic tsunami hazard. Tsunamis without precedent in written history may threaten Indian Ocean shores that face other parts of the Sunda Trench and the Makran subduction zone^{24,25}. It can be hoped that natural warnings from recent geological history will help avert surprises from these additional tsunami sources.

METHODS SUMMARY

Landforms in Fig. 1c were traced from 1:50,000-scale aerial photographs taken in 1999 and from post-tsunami satellite images at PointAsia.com and Google Earth. In Fig. 2a the levelling had a closure error of 10 cm, and the tide levels refer to the Khura Buri gauge, 16 km northeast of Phra Thong. Diatom separation and analyses are described in Supplementary Figs 4 and 5. A separate suite of samples from sheet B yielded rare foraminiferal tests, all well preserved, that we do not interpret because of possible laboratory contamination with tests from the 2004 deposit. The radiocarbon age ranges reported in sidereal years span the 95% confidence interval from counting and calibration statistics (Supplementary Table 2).

Received 6 March; accepted 27 August 2008.

- Dominey-Howes, D., Cummins, P. & Burbidge, D. Historic records of teletsunamis in the Indian Ocean and insights from numerical modeling. *Nat. Hazards* **42**, 1–17 (2007).
- Bilham, R., Engdahl, R., Feldl, N. & Satyabala, S. P. Partial and complete rupture of the Indo-Andaman Plate boundary 1847–2004. *Seismol. Res. Lett.* **76**, 299–311 (2005).
- Lovholt, F. *et al.* Earthquake related tsunami hazard along the western coast of Thailand. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **6**, 979–997 (2006).
- Stein, S. & Okal, E. A. Ultralong period seismic study of the December 2004 Indian Ocean earthquake and implications for regional tectonics and the subduction process. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **97**, S279–S295 (2007).
- Chlieh, M. *et al.* Coseismic slip and afterslip of the great M_w 9.15 Sumatra–Andaman earthquake of 2004. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **97**, S152–S173 (2007).
- Bourgeois, J. in *The Sea* Vol. 15 (eds Bernard, E. N. & Robinson, A. R.) (Harvard Univ. Press, in the press).

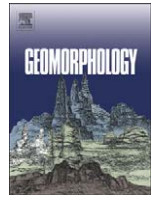
7. Tsuji, Y. *et al.* The 2004 Indian tsunami in Thailand; surveyed runup heights and tide gauge records. *Earth Planets Space* **58**, 223–232 (2006).
8. Lyall, K. *Out of the Blue: Facing the Tsunami* (Australian Broadcasting Corporation, 2006).
9. Hori, K. *et al.* Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits; an example of two transects along the western coast of Thailand. *Mar. Geol.* **239**, 163–172 (2007).
10. Choowong, M. *et al.* 2004 Indian Ocean tsunami inflow and outflow at Phuket, Thailand. *Mar. Geol.* **248**, 179–192 (2008).
11. Fujino, S. *et al.* in *Tsunamiites—Features and Implications* (eds Shiki, T., Tsuji, Y., Minoura, K. & Yamazaki, T.) 123–132 (Elsevier, 2008).
12. Fujino, S. *et al.* in *Proc. Int. Symp. on Restoration Program from Giant Earthquakes and Tsunamis* (ed. Kato, T.) 115–121 (Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2008).
13. Horton, B. P. *et al.* Holocene sea levels and palaeoenvironments, Malay–Thai Peninsula, Southeast Asia. *Holocene* **15**, 1199–1213 (2005).
14. Hemphill-Haley, E. Diatoms as an aid in identifying late-Holocene tsunami deposits. *Holocene* **6**, 439–448 (1996).
15. Kamatani, A. Dissolution rates of silica from diatoms decomposing at various temperatures. *Mar. Biol.* **68**, 91–96 (1982).
16. Donnelly, J. P., Butler, J., Roll, S., Wengren, M. & Webb, T. III. A backbarrier overwash record of intense storms from Brigantine, New Jersey. *Mar. Geol.* **210**, 107–121 (2004).
17. Gray, W. M. in *Storms* Vol. 1 (eds Pilke, R. J. & Pilke, R. S.) 145–163 (Routledge, 2000).
18. Pant, G. B. & Rupa Kumar, K. *Climates of South Asia* 320 (John Wiley & Sons, Chichester, England, 1997).
19. Murty, T. S. & Flather, R. A. Impact of storm surges in the Bay of Bengal. *J. Coast. Res.* **12** (Spec. Iss.), 149–161 (1994).
20. Monecke, K. *et al.* A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature* doi:10.1038/nature07374 (this issue).
21. Rajendran, K. *et al.* Age estimates of coastal terraces in the Andaman and Nicobar Islands and their tectonic implications. *Tectonophysics* **455**, 53–60 (2008).
22. Ibn Battuta. *The Travels of Ibn Battūta, A.D. 1325–1354* vol. 4 (transl. Gibb, H. A. R.) (Hakluyt Society, 1994).
23. Dreyer, E. L. *Zheng He: China and the oceans in the early Ming dynasty 1405–1433* (Pearson Longman, 2007).
24. Okal, E. A. & Synolakis, C. E. Far-field tsunami hazard from mega-thrust earthquakes in the Indian Ocean. *Geophys. J. Int.* **172**, 995–1015 (2008).
25. Heidarzadeh, M. *et al.* Historical tsunami in the Makran Subduction Zone off the southern coasts of Iran and Pakistan and results of numerical modeling. *Ocean Eng.* **35**, 774–786 (2008).
26. Ortiz, M. & Bilham, R. Source area and rupture parameters of the 31 December 1881 $M_w = 7.9$ Car Nicobar earthquake estimated from tsunamis recorded in the Bay of Bengal. *J. Geophys. Res.* **108** (B4) 2215, doi:10.1029/2002JB001941 (2003).
27. Satake, K. *et al.* Tsunami heights and damage along the Myanmar coast from the December 2004 Sumatra–Andaman earthquake. *Earth Planets Space* **58**, 243–252 (2006).
28. Siripong, A. Andaman seacoast of Thailand field survey after the December 2004 Indian Ocean tsunami. *Earthq. Spectra* **22**, 187–202 (2006).
29. Choi, B. H. Analysis and modeling of the distribution functions of runup heights of the December 26, 2004 earthquake tsunami in the Indian Ocean. (http://wave.skku.ac.kr/tsunami_survey_data/KEERC.report.pdf).
30. Hawkes, A. D. *et al.* Sediments deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami along the Malaysia–Thailand Peninsula; Quaternary land–ocean interactions; sea-level change, sediments and tsunami. *Mar. Geol.* **242**, 169–190 (2007).

Supplementary Information is linked to the online version of the paper at www.nature.com/nature.

Acknowledgements We thank B. Korsakun for logistical help; C. Tongjeen for permission for digging; V. Chutakositkanon, V. Jittanoon, T. Machado, T. Napradit, S. Pailoplee, S. Phantuwongraj, N. Rajeshwara Rao, S. Srinivasalu, P. Surakiatchai and A. Weerahong for contributions to Phra Thong field and laboratory work; Y. Fujii for providing bathymetric data; and S. Bondevik, M. Cisternas, H. Kelsey, A. Meltzner, K. Sieh, M. Tuttle and J. Woodruff for reviews. This report evolved from surveys supported by the Ministry of Natural Resources and Environment (Thailand), the National Science Foundation (USA), and the US Agency for International Development (participants are listed in Supplementary Table 3). Additional funding was provided by the Japan Society for the Promotion of Science (to Y.S.), the Thailand Research Fund (to M.C.), and Chulalongkorn University (through P. Charusiri).

Author Contributions All authors participated in the fieldwork, led by K.J. (Supplementary Table 1). B.A. prepared most of the manuscript. Y.S. analysed the diatoms and prepared several of the figures.

Author Information Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints. Correspondence and requests for materials should be addressed to K.J. (kjankaew@yahoo.co.uk).



Beach recovery after 2004 Indian Ocean tsunami from Phang-nga, Thailand

Montri Choowong^{*}, Sumet Phantu Wongraj, Thasinee Charoentitirat, Vichai Chutakositkanon, Sombat Yumuang, Punya Charusiri

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 February 2008

Received in revised form 18 August 2008

Accepted 19 August 2008

Available online 28 August 2008

Keywords:

2004 Indian Ocean tsunami

Beach recovery

Accommodation space

Storm surge

Khao Lak

ABSTRACT

The 2004 Indian Ocean tsunami devastated the coastal areas along the Andaman western coast of Thailand and left unique physical evidence of its impact, including the erosional landforms of the pre-tsunami topography. Here we show the results from monitoring the natural recovery of beach areas at Khuk Khak and Bang Niang tidal channels of Khao Lak area, Phang-nga, Thailand. A series of satellite images before and after the tsunami event was employed for calculating the beach area and locating the position of the changed shoreline. Field surveys to follow-up the development of the post-tsunami beach area were conducted from 2005 to 2007 and the yearly beach profile was measured in 2006. As a result, the scoured beach areas where the tidal channel inlets were located underwent continuous recovery. The return of post-tsunami sediments within the beach zone was either achieved by normal wind and wave processes or during the storm surges in the rainy season. Post-2004 beach sediments were derived mainly from near offshore sources. The present situation of the beach zone has almost completed reversion back to the equilibrium stage and this has occurred within 2 years after the tsunami event. We suggest these results provide a better understanding of the geomorphological process involved in beach recovery after severe erosion such as by tsunami events.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The 2004 Indian Ocean tsunami, triggered by the Mw 9.1–9.3 Sumatra–Andaman earthquake (Lay et al., 2005; Okal and Titov, 2007), devastated the coastal areas of the Indian Ocean countries. The tsunami extended across the Indian Ocean to damage the beach area of the Andaman coast of Thailand and left behind unique physical evidence of its impact, made up of the vast areas of erosional landforms of the pre-tsunami topography. In particular, the beach zone between the Pakarang Cape and the Khao Lak, Phang-nga province, was one of the severely affected areas in Thailand. The morphology of beach zone changed suddenly and the extensive scoured features remained both on the beach and in the embayment of tidal channels. The position of the normal coastline was shifted inland causing the lowering of beach elevation and the loss of beach sediments. Clearly, tidal inlet/outlets and the banks of the channels were opened wider to a distance of about 1 km inland (e.g. Choowong et al., 2007; Fagherazzi and Du, 2007). Thus, the monitoring of the beach and tidal zones during the natural recovery of the beach area after the tsunami event until the beach returned to a normal situation

is essential to better understand the geomorphological beach recovery process following severe erosion.

A considerable and diverse array of satellite images displaying the aerial comparison of the beach zones before and after the tsunami were quickly published a few days after the 26th December 2004, including images detected by the IKONOS satellite during the event from Sri Lanka, and after the event from Indonesia and Khao Lak area of Phang-nga, Thailand (e.g., CRISP, 2004; GISTDA, 2005; NASA, 2005). Thereafter, the scoured features from beach zone both generated by the tsunami inflows and the outflows have been reported from India (Chadha et al., 2005), Sri Lanka (Papadopoulos et al., 2006), Indonesia (Moore et al., 2006; Meilianda et al., 2007), Myanmar (Satake et al., 2006), and Thailand (Matsutomi et al., 2005; Szczucinski et al., 2005; Hori et al., 2007; Umitsu et al., 2007; Choowong et al., 2007, 2008a,b). To date, only a few reports on the detailed analysis of the erosional patterns within the scoured beach zone have been published, e.g. Indonesia (Meilianda et al., 2007) and Thailand (Fagherazzi and Du, 2007).

1.1. Study areas

In this paper, we selected the tidal inlet/outlet at Khuk Khak and Bang Niang to monitor the episodic changes of geomorphological landforms after the 2004 tsunami incisions (Fig. 1). Here, we show the systematic monitoring, and especially the spatial changes, in the beach area using a series of satellite images from 2002 to 2007.

^{*} Corresponding author. Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phrayathai, Bangkok, 10330, Thailand. Tel.: +66 2 2185445; fax: +66 2 2185464.

E-mail address: monkeng@hotmail.com (M. Choowong).

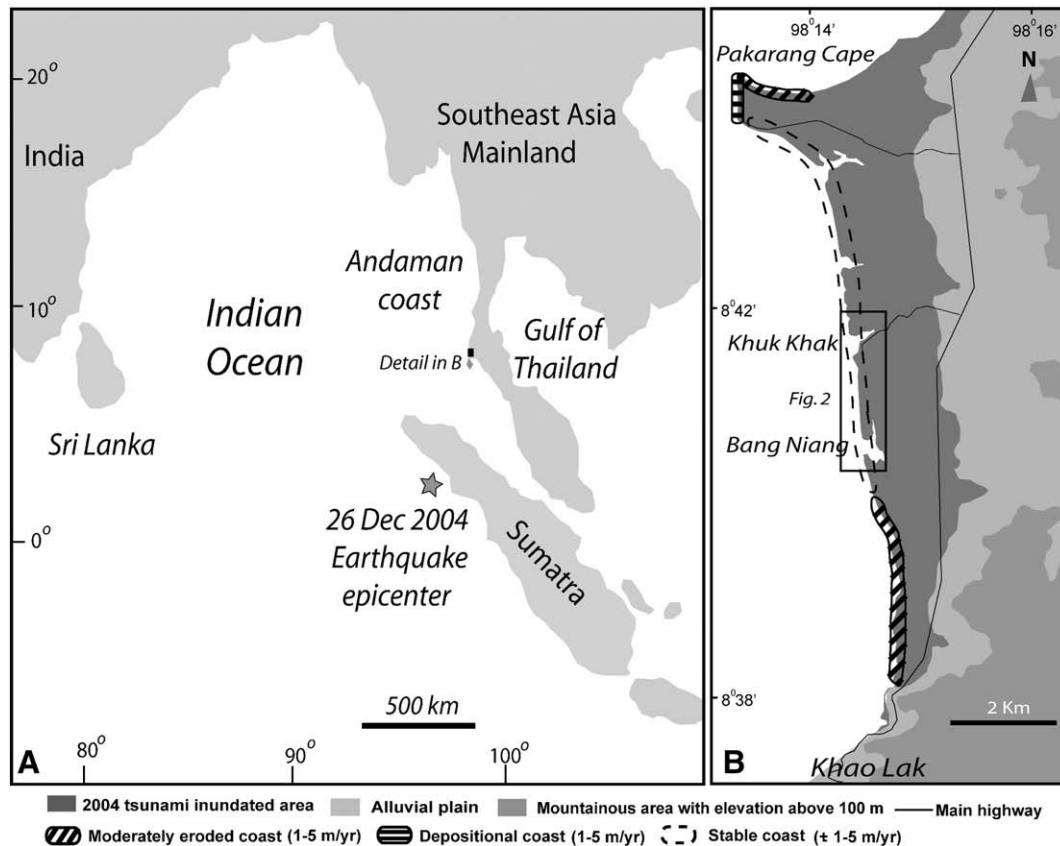


Fig. 1. Index maps of the area. (A) a regional map showing the 26th December 2004 earthquake epicenter and (B) close-up map showing 2004 tsunami inundation area and pre-tsunami coastal change characteristics (modified from Sinsakul et al., 2003) along Khao Lak to Pakarang Cape of Phang-nga, Thailand. The study areas, Khuk Khak and Bang Niang tidal channels, are indicated by the black square inset.

The hypothesis was made that these two opened inlet/outlet tidal channels provided a large accommodation space after the 2004 event and, therefore, beach sediments could be returned to maintain the equilibrium profile (e.g. Dean, 1991) within the beach zone. Spatial and temporal distributions of the beach areas and the rate of sediment returned were also tested. Field surveys to recognize the episodic changes of beach behavior have been made since 2005. The measurement of beach profiles was done throughout 2006. Additionally, surface sediments from the beach zone were characterized to document the yearly depositional cycle in 2006.

The area of beach recovery we evaluated in this paper extends from the south of Pakarang Cape to Khuk Khak, Bang Niang and Khao Lak beaches, on the western side of the Thailand peninsula. Khuk Khak and Bang Niang beaches are located between Pakarang Cape and Khao Lak in the Phang-nga province (8° 41' north, 98° 14' east). The coastal area from Pakarang Cape to Khao Lak has previously been classified into three types based on its erosional and accretional characteristics (Sinsakul et al., 2003) (Fig. 1B). Firstly, the coastal area from the southern part of Pakarang Cape, extending to where the tidal channel in the south is located, was characterized as a depositional coast with an accretion rate of 1–5 m/year. Secondly, the next southward area from the first tidal channel down to Bang Niang beach was defined as a stable coast with a depositional rate of ± 1 m/year. Lastly, the area extending from Bang Niang beach to Khao Lak beach was identified as a moderately eroded coast with an erosional rate of 1–5 m/year. The two tidal channels we focused on in this study thus appeared to represent a depositional and stable coast before the tsunami event and became the most seriously eroded zone after the 2004 tsunami.

1.2. Climate and tidal conditions

The coastal area we investigated is located in a tropical climate with generally three seasons. The rainy season, from mid-May to November, is characterized by moderate to heavy rain. The southwest winds usually generate moderate waves about 0.3–1.5 m high. Conversely, during November to mid-February, the northeast monsoon presents a reversal of air movement and the waves are generally small with a height of lower than 2 m. The longshore current commonly flows from the south to the north. However, during the monsoon wind, wave heights of more than 5 m can be generated. Tides are semidiurnal with two high and low tides in 1 day, with an average tidal range of 1.55 m.

2. Materials and methods

2.1. Satellite images

A series of satellite images was used to analyze the gross change in shoreline position and beach area. We followed the most commonly used proxy for shoreline position, that is the high water line (HWL), as proposed in the literature (e.g. Stafford, 1971; Dolan et al., 1980; Leatherman, 1983; Anders and Byrnes, 1991; Crowell et al., 1991; Morton, 1991). In addition, to quantify the spatial distribution of the beach area and its changes, both the seaward and landward beach margins were digitized. The line of the high tide water mark and the edge of trees were used as the limiting boundary of the beach area. Satellite images from 2002 to 2007 at different time records were employed to estimate the spatial changes of the positions of coastline and

Table 1
Series of satellite images used in this paper

Date	Satellite	Acquisition time (Thai)	Tidal time ^a	Source
15/11/2002	ASTER	N/A	Low tide	NASA ^b
13/1/2003	IKONOS	11:11:49 AM	Low tide	CRISP ^c
1/3/2004	LANDSAT-5 TM	10:24:29 AM	Low tide	GISTDA
9/9/2004	LANDSAT-5 TM	10:29:09 AM	Low tide	GISTDA
29/12/2004	IKONOS	10:53:46 AM	N/A	GISTDA
30/12/2004	LANDSAT-5 TM	10:31:23 AM	N/A	GISTDA
31/12/2004	ASTER	N/A	N/A	NASA ^b
16/2/2005	LANDSAT-5 TM	10:32:03 AM	Low tide	GISTDA
5/4/2005	LANDSAT-5 TM	10:32:34 AM	High tide	GISTDA
29/6/2005	SPOT-5	11:13:26 AM	Low tide	GISTDA
16/3/2006	SPOT-5	11:11:30 AM	High tide	GISTDA
26/11/2006	SPOT-5	11:07:50 AM	High tide	GISTDA

N/A = Not Available.

^a Tidal time compares with the nearest tides table at Ao Tab Lamu station, Phang-nga province.

^b NASA = NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team. Data published at <http://observe.arc.nasa.gov/nasa/exhibits/tsunami/>.

^c CRISP published at <http://www.crisp.nus.edu.sg/tsunami/tsunami.html>.

for the precise calculation of the eroded areas from the 2004 tsunami event within the foreshore and the backshore zones (Table 1). All satellite images were processed by Erdas Imagine 8.7 software and then ArcView 3.2a was utilized to calculate the beach area and to identify the morphological changes before and after the tsunami event.

2.2. Beach profiling and sediment sampling

We conducted a detailed field survey in early 2005 to map the regional morphological features in beach and tidal channel zones and then followed this with a yearly measurement of beach profiles, and sampling of beach sediment in 2006.

2.2.1. Beach profiling

An accurate time series of beach profile measurements is essential for any method used to decipher the shoreline erosion and accretion trends and also for tracking beach recovery after storms or severe events like a tsunami. Beach profiles were measured both perpendicular and parallel to the coastline with a normal 5 m interval between the surveyed points. Supplementary surveyed points were also measured in places where the micro-topography was investigated. The measurements of the vertical and lateral beach profiles and the angle of beach face and slope were carried out on four separate occasions throughout 2006 for our two investigated areas. The measurement of the beach profile was made in January (for Khuk Khak) and February (for Bang Niang), and in May, August and November for both localities, which represents the winter, summer, and rainy seasons, respectively. Local time series of water level during the measurement were also recorded for the conversion of profile levels to the level of mean tide.

2.2.2. Beach sediment sampling

Although any given beach can display a large range of sizes and shapes, we expected that each beach would be characterized by a particular texture and composition. Textural trends alongshore and cross-shore are indicative of the depositional energy and the stability or instability of the foreshore and nearshore zones (Larson et al., 1997). Surface sediments provide information about the energy of the environment as well as the long-term processes and movement of materials.

Surface samples of beach sediments were collected systematically and shallow pits were dug along the surveyed profiles. The bulk samples were grabbed within a 10 cm depth with a 20 m interval

between pits. Likewise, the surface beach sediments were sampled on four occasions in 2006, similar to the times when the profiles were measured. Grain sizes were analyzed by a sieving method and the calculation of statistical parameters was based on the moment method (Folk and Ward, 1957). We also described the stratigraphy of the post-2004 beach deposits along the north–south profile of Khuk Khak area. The five representative stratigraphies were documented and the bulk samples of one depositional event were kept for analyzing the vertical distribution of grain size diameters. The aim of analyzing these stratigraphies was to elucidate the typical depositional sequences that likely represent the formation of a new beach as sand spit to the north alongshore. The sedimentary structures within the individual depositional event were also carefully observed and recorded as part of the stratigraphical correlation to distinguish the normal beach formation from storm process.

3. Results

3.1. Position of the coastline

The positions of pre-tsunami coastlines, measured from a series of satellite images during 2002 to 2004, show the equilibrium cycle on the beach zone at Khuk Khak and Bang Niang areas (Fig. 2A). Changes in the shoreline positions before the 2004 tsunami event were mainly responses to the seasonal change with a rate of deposition and accretion of ± 1 –5 m/year (Sinsakul et al., 2003). Three days after the 2004 tsunami, the position of coastline had changed, as indicated by traces of high tide and flood scour at the open tidal inlet (Fagherazzi and Du, 2007). The calculated change in position of the coastline

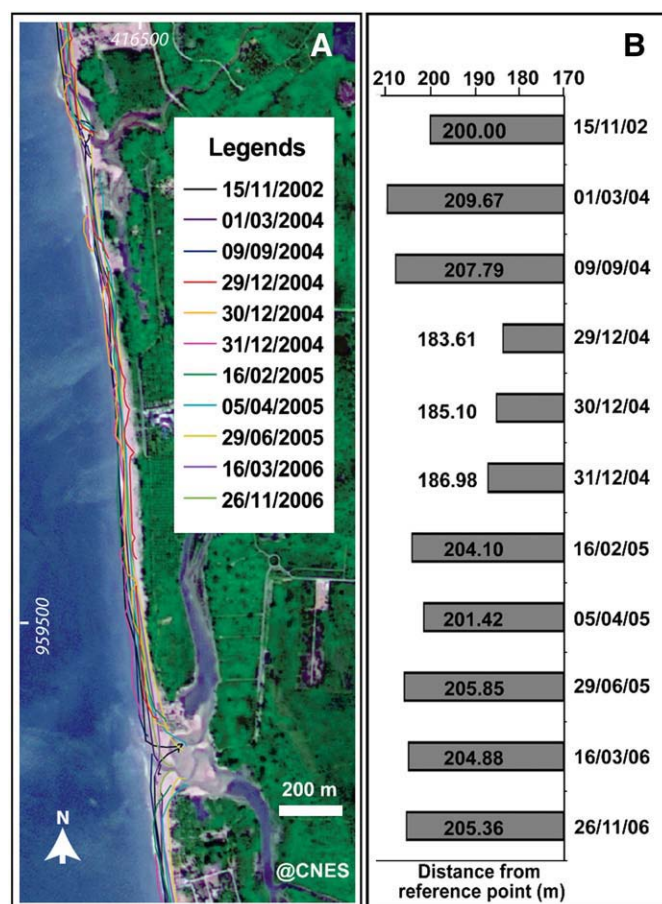


Fig. 2. (A) Series of shoreline positions overlain on SPOT-5 taken on November 2006 and (B) a diagram showing the positions of the shoreline changed from 2002–2006.

showed that it was moved 24.18 m inland. At the bottom of the tidal inlet, the sediments had almost disappeared. The low elevation of the remaining sediments was possibly due to deposition during the slow outflow following the tsunami (Choowong et al., 2008a). As a result, the widening of tidal inlet/outlet and channel banks produced a large accommodation space (Coe et al., 2003). This condition will have likely favored the trapping of new sediments with a likely faster rate of deposition than what we would have expected for a stable beach zone (Fig. 3B).

After the 2004 tsunami, the recovery of beach sediments rapidly prograded seaward, with a spatial accretionary distance of 20.49 m calculated from January to February 2005 (Fig. 2B). A rapid deposition within the first 2 months after the 2004 tsunami revealed that coastal process had played a dominant role in recovery of the beach areas and returned sediments back into a large accommodation space of the opened tidal channel. Thereafter, the rate of accretion slightly decreased and tended to become stabilized by November 2006 (Fig. 2). In conclusion, the average distance of the mean high tide shoreline to the reference point before the 2004 tsunami was 205.82 m, and this was reduced to 183.61 m by tsunami-induced erosion. However, within 2 years, which is by November 2006, the distance had returned to 204.32 m and has remained stable since then to date, leading us to conclude that the morphology of beach zone at Khuk Khak and Bang Niang areas had recovered by November 2006.

3.2. Calculation of beach area

The total beach area extending from Khuk Khak to Bang Niang before the 2004 tsunami was 86,660 m², as measured on November

2002 (Fig. 3A and E). The area decreased slightly to 72,680 m² in March and 70,560 m² in September 2004, which indicated the normal seasonal change within the equilibrium cycle of beach zone erosion and accretion. After the 2004 tsunami the beach area was reduced by essentially two thirds, to 23,790 m², compared to the pre-tsunami beach area on September 2004 (Fig. 3B and E). Thereafter, the beach area increased rapidly to 66,860 m² in 2 months (February 2005) and to 98,180 m² by November 2006 (Fig. 3C, D, and E). Interestingly, a number of beach areas calculated in November 2006 were slightly higher than the average area before the 2004 tsunami (Fig. 3E). Regardless, this situation of beach deposits again suggested that the beach area from Khuk Khak to Bang Niang was completely recovered.

3.3. Change in coastal landforms

The formation of sand spit in the Khuk Khak area from 2005 to 2006 showed a trend of deposition towards the north which reflected the northward longshore drift that dominates in this area (Fig. 4A to E). The position of the inlet at Khuk Khak was also shifted northwards along the direction of the spit growth, presumably mainly due to the influence of the dominant alongshore current. In the rainy season, small washover fans were found superimposed on the surface of the backshore slope some 100 m inland from the coastline (Fig. 4F). The traces of high-energy deposits were also recognized within the stratigraphy of the sand spit at Khuk Khak. In contrast, the formation of beach at Bang Niang area was characterized by a beach barrier with a flood tidal delta. The position of the channel bed at Bang Niang was changed laterally throughout 2006 due to meandering of the tidal channel. We observed at Bang Niang during a storm event in May

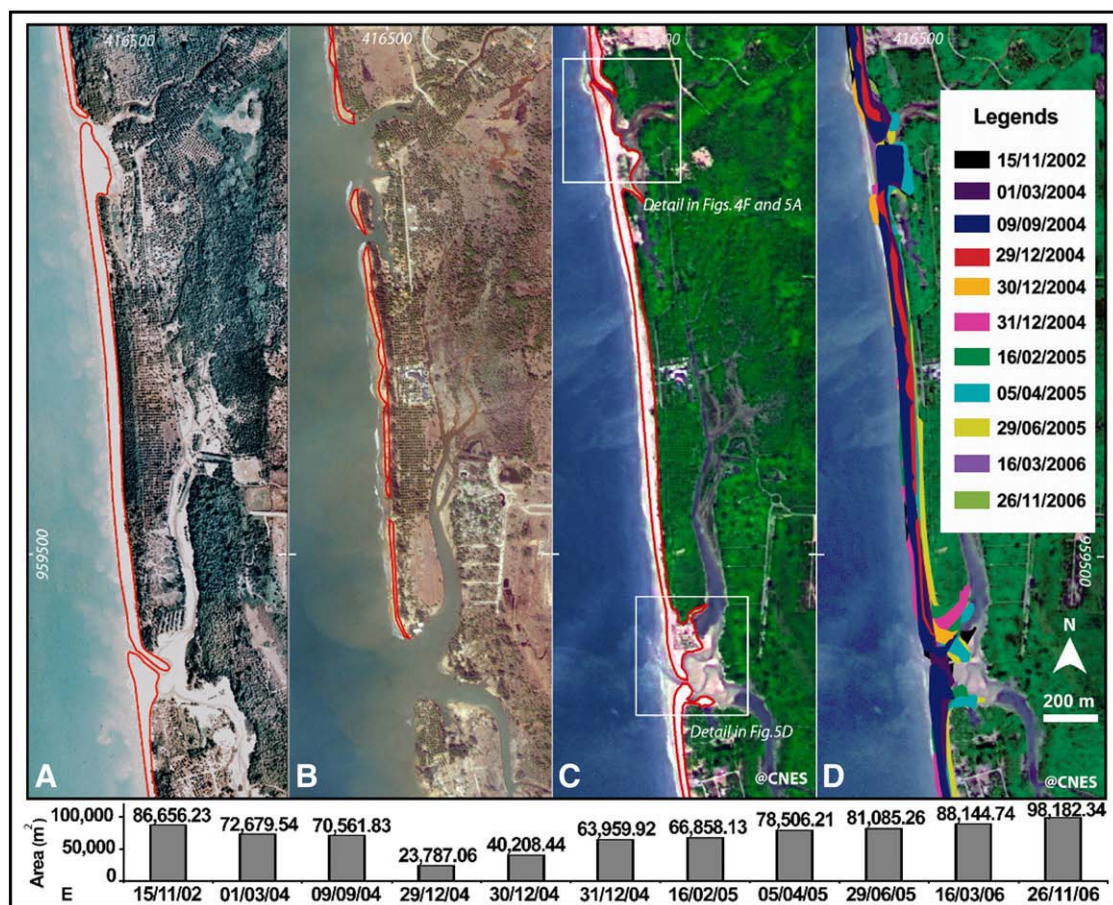


Fig. 3. Satellite images showing the pre-, syn- and post-tsunami beach area changes; (A) from aerial-photo taken in 2003, (B) from IKONOS taken on 29th December 2004, and (C) SPOT-5 taken on November 2006. (D) Series of beach area from 2002–2006 overlain on SPOT-5 taken on November 2006. (E) Diagram showing the beach area changes from 2002–2006.

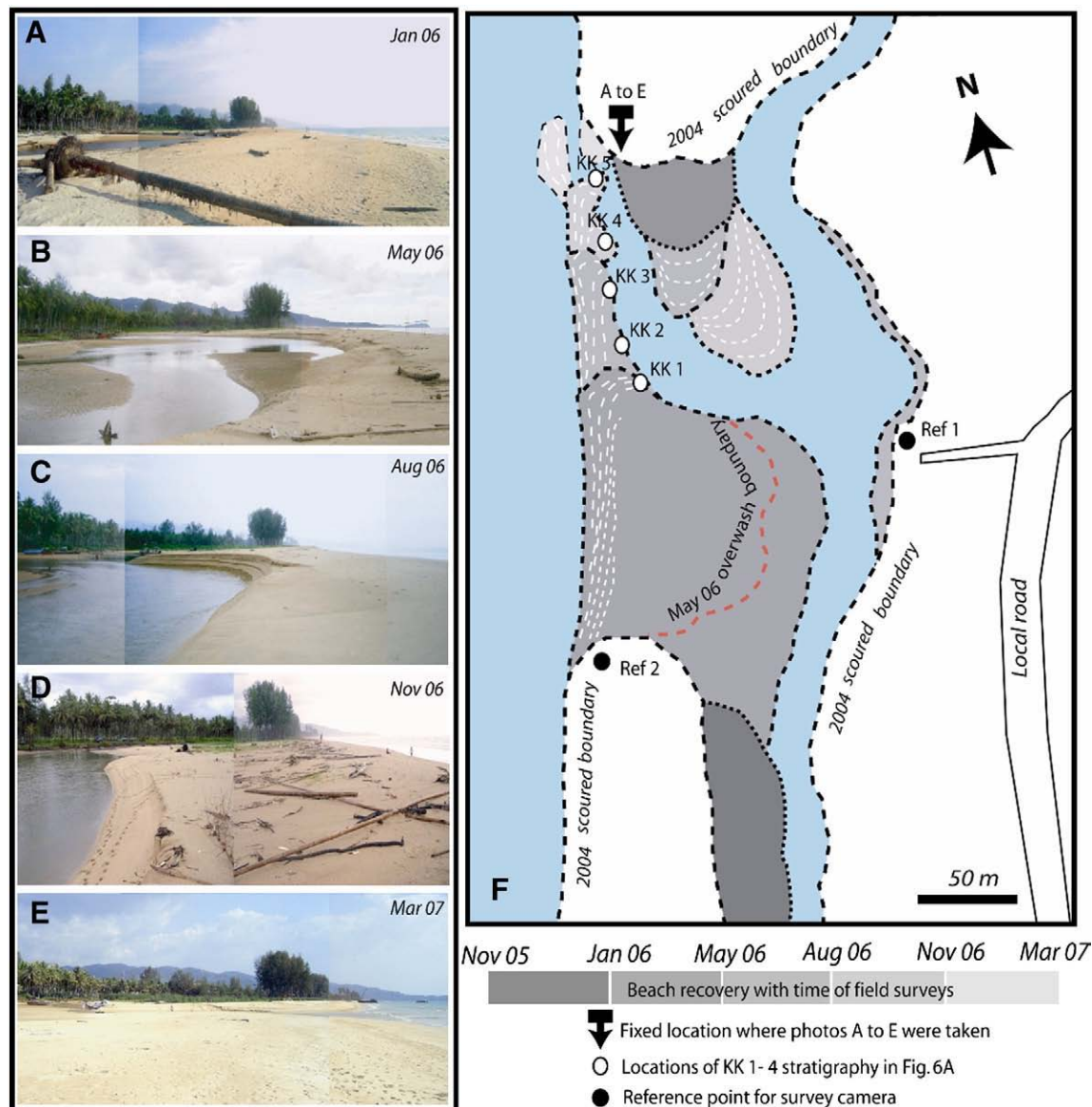


Fig. 4. Series of photographs taken from January 2006 to March 2007 at Khuk Khak tidal channel (A to E, all photos looking south). (F) Geomorphological map and the components of landforms and process that occurred within the 2 years after the tsunami event.

2006 that the inlet was closed and filled by a large amount of coarse- to very coarse-grained sand with extensive coral fragments. These situations suggest that the sediment supply to the shore along this coastline is mainly carried from marine sources rather than of terrestrial origin.

3.4. Beach profiles

We measured the profile across the beach zone at Khuk Khak to understand the morphological changes through time from January to November 2006 (Fig. 5A and B). From January to May, erosion occurred slightly at the foreshore, as recognized from a landward retreat of the beach ridge profile. After that, from May to August 2006, the crest of the beach ridge was slightly higher and the foreshore slope was steeper than those recorded in January to May. The level of the backshore surface was also slightly higher, which was probably caused by the overtopping of washover deposits left by storm surges. Then, from August to November, the crest of the beach ridge was slightly higher and the foreshore slope was also

steeper than in May, with a concave shape. This feature indicated a normal translation of sand bar within the foreshore zone. The changes in profiles of the foreshore and backshore seem likely to support that the beach ridge here had started to achieve its equilibrium profile.

The formation of the beach area at Bang Niang showed a similar pattern throughout 2006 to that discussed above for the Khuk Khak area. In February, the beach profile exhibited a steeper slope than in May (Fig. 5D and E). The rapid deposition that occurred in May led to the rising of the beach ridge crest. During the storm period in May, sediment deposited at the mouth of the inlet tidal channel with the crest of the beach ridge was slightly higher than the high tide water level (HTWL). The inlet was subsequently totally filled by beach and storm washover sediments favoring the channel becoming a temporary lagoon. By August, the inlet was open again and the channel connected to the sea, whilst from August to November the beach ridge was slightly higher than in May. Thus we suggest that the beach at Bang Niang inlet was likely to have reached its equilibrium profile by 2006. This cycle represents a

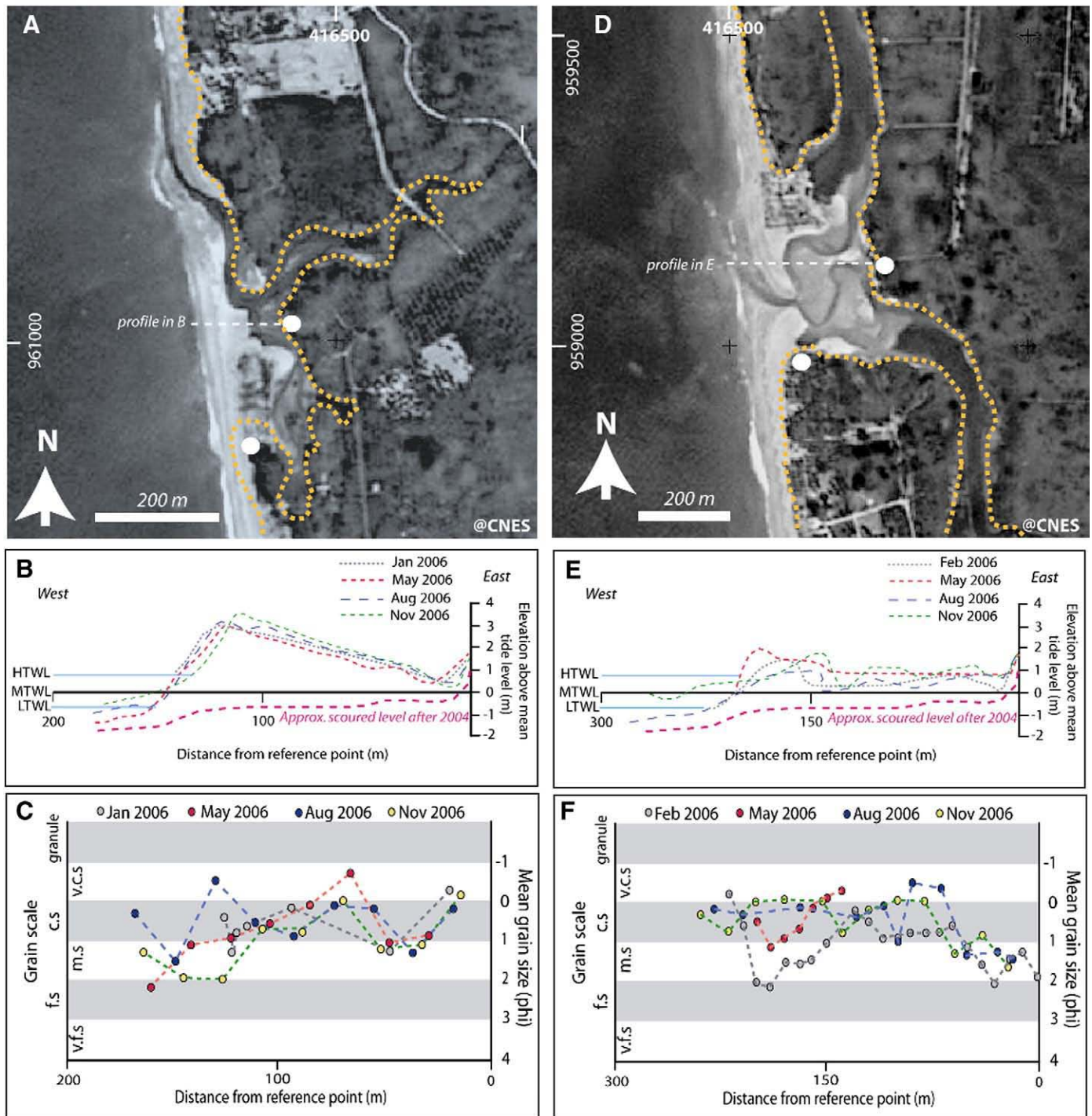


Fig. 5. Geomorphological map of beach area at the two tidal channels with profiles and distribution of surface grain size of beach sediments. Dashed-lines in A and B indicate the scoured boundary by the tsunami event. Two white dots are reference points. B and E are profiles of prograded beach ridges along transect measured in 2006. Two approximate scoured levels after 2004 were estimated from IKONOS high resolution satellite image on 29 December 2004. C and F show grain size distribution of the post-tsunami beach sediments.

series of erosional events during rainy seasons followed by beach recovery during dry seasons.

3.5. Sediment properties and stratigraphy

We examined 85 bulk samples of surface beach sediments from two areas. The average grain size of the post-2004 surface beach sediments at Khuk Khak showed a majority of coarse-grained sand (0.5–1.0 mm) (Fig. 5C). The recovery sediments show the seasonal

change. In January 2006 (Table 2), the grain size of beach sediment was characterized by coarse sand with an average diameter of 0.682 mm, and then slightly finer to 0.669 mm in May. During the rainy and storm season from May to August, the grain size increased to 0.751 mm, and then decreased again to 0.561 mm at the beginning of the winter season.

The average grain size analysis at Bang Niang area (Fig. 5F) revealed a similar trend as that reported at the Khuk Khak area above, but was dominated by coarse-grained sand (Table 2). In February, the mean

Table 2
Change in grain size of beach sediment at Khuk Khak and Bang Niang in 2006

Area	January ^a and February ^b (mm)	May (mm)	August (mm)	November (mm)
KK ¹	0.682	0.669	0.751	0.561
BN ²	0.507	0.783	0.899	0.777

1 = Khuk Khak; 2 = Bang Niang.

^a Samples collected from KK.

^b Sample collected from BN.

diameter of the surface beach sand was 0.507 mm, and this increased to 0.783 mm in May. During the rainy season in August, grain size increased to 0.899 mm. Finally, at the end of the rainy season in November, the grain size had decreased to 0.777 mm.

A change in the mean grain size was also observed to exhibit a relationship with beach morphology as the degree of difference in grain size at the foreshore in each season was greater than at the backshore (Fig. 5B–C and E–F). Within the backshore zone, the average grain size seemed to show the same trend throughout the year, whereas at the foreshore the change in mean grain size with each season was clearly observed. In general, the foreshore, and especially in swash zone, was a dynamic area because waves impact on this part all the time and sediment also moves in and out in both horizontal and vertical directions. In contrast, at the backshore the effect from waves usually only occurs during storm surges, making sediments in this zone more stable than in the foreshore zone.

The compositions of surficial beach sediments of Khuk Khak and Bang Niang areas were mainly composed of quartz (60%), bioclasts (35%), and 5% of rocks fragment and heavy minerals. Bioclasts mainly contained coral fragments and shell fragments. Interestingly, the percentage of quartz during rainy season decreased whilst the percentage of bioclasts (i.e. shell fragments and coral fragments) increased (Table 3). All sediment samples were moderately sorted with angular to sub-angular sphericity morphology. These characteristics of beach composition helped us to distinguish the storm depositional events and a normal coastal deposit. We employed these depositional patterns to infer several depositions by storm events recorded in all the stratigraphies of the sand spit described in the Khuk Khak area (Fig. 6).

The succession of storm deposits (Fig. 6B and C) at Khuk Khak has some distinctive characteristics that help us to differentiate fair weather deposits from storm deposits. The composition and grain size of the sediment is the important key that we used to identify this kind of high-energy deposits. From KK1 log, two events of high-energy deposits were indicated by two fining-upward sequences from coarse to very coarse sand rich in bioclasts, such as shell fragments and coral fragments to the medium sand. These coarse to very coarse sands can be transported and deposited by high-energy flows during storm periods whereas the smaller grains are usually deposited either during the waning phase of a storm surge or during fair weather periods. Bioclasts, especially coral fragments which indicate an offshore source, were also found mainly in the coarse sand layer that indicated a high-energy flow which probably occurred during a storm event. In contrast, during fair weather periods bioclasts were rarely deposited in the successions, as evidenced in all five stratigraphical logs. These findings are also supported by the results of grain size analysis and the composition of sediment deposits. When they are present in the rainy season the average diameter of the grain size and percentage composition of bioclasts were respectively bigger and higher than in the other seasons. In conclusion, at Khuk Khak successive storm deposits consist of sand with an average grain diameter that is larger than other sand layers, and contain a bioclast composition which is associated with coarse sand layers and is rarely found in other layers.

4. Discussions

4.1. Large accommodation space

The coastal plain at Khuk Khak and Bang Niang tidal channels before the 2004 Indian Ocean tsunami event showed stability (Sinsakul et al., 2003) (Fig. 1B). Our analysis of the change in shoreline positions showed a localized seasonal change in the beach zone between these two tidal channels. It is simply explained that the stability occurs once the accommodation space of the area was returned to zero. After the 26th December 2004, the tsunami caused severe erosion with approximately 67% loss of beach surface area, and led to an extensive increase in the accommodation space within the opened and widened tidal channel embayment (Fig. 3B). The rapid rate of deposition that then ensued occurred due to the large positive accommodation space that favored sediment deposition. As a result, the shoreline was prograded rapidly in a seaward direction (Fig. 2). Results of satellite image analysis of the changes in beach area after the 2004 tsunami from both sites revealed a rapid formation of landforms and beach sediments, which represent the extensive formation of beach that started a few months after the event. Thus, from January to June 2005 the deposition of sediment in the scoured beach and tidal channel led to approximately 60% recovery of beach surface area, based on the results of beach area calculations from satellite images.

After sediments had filled up the large positive accommodation space, the rate of the recovery process decreased gradually from August 2005 to November 2006 (Fig. 3E); whilst the beach zone seemed to be stabilized. After November 2006, the accommodation space decreased to almost zero and both tidal channel areas became the sites of a sediment by-pass zone (Fig. 3C). If there is a negative amount of accommodation space, the previously deposited sediments will be eroded and transported to the area of (positive) accommodation space nearby, thus preserving the equilibrium profile (or depositional profile) where the available accommodation space is balanced by the amount of sediment supplied (Coe et al., 2003).

However, this rapid sedimentation was recognized only in the beach zone. We suggest that the widened cut banks along the tidal channel which now extend quite far inland may need several years to return to equilibrium, in agreement with the suggestion by Fagherazzi and Du (2007).

4.2. Source of 2004 tsunami and the post-recovered sediments

We inferred that the sources of quartz and bioclasts deposited along the coast of Khao Lak were derived mainly from the offshore bottom sediments. The angular to sub-angular morphology of the quartz grains and their moderately sorted surface samples were examined and all indicated they were from local sources of sediment supplied to the beach zone. The extensive presence of bioclasts (i.e. coral fragments) also helped to locate the nearshore sources of beach sediments. This is confirmed by Benzoni et al.

Table 3
The percentage of grain compositions in the post-2004 beach sediments

Area	January ^a and February ^b (%)		May (%)		August (%)		November (%)	
	Quartz	Bioclasts	Quartz	Bioclasts	Quartz	Bioclasts	Quartz	Bioclasts
KK ¹	62.86	23.57	61.25	36.38	65.00	34.19	67.00	30.78
BN ²	63.48	32.48	66.71	32.29	60.55	37.18	67.92	28.25

1 = Khuk Khak; 2 = Bang Niang.

^a Samples collected from KK.

^b Sample collected from BN.

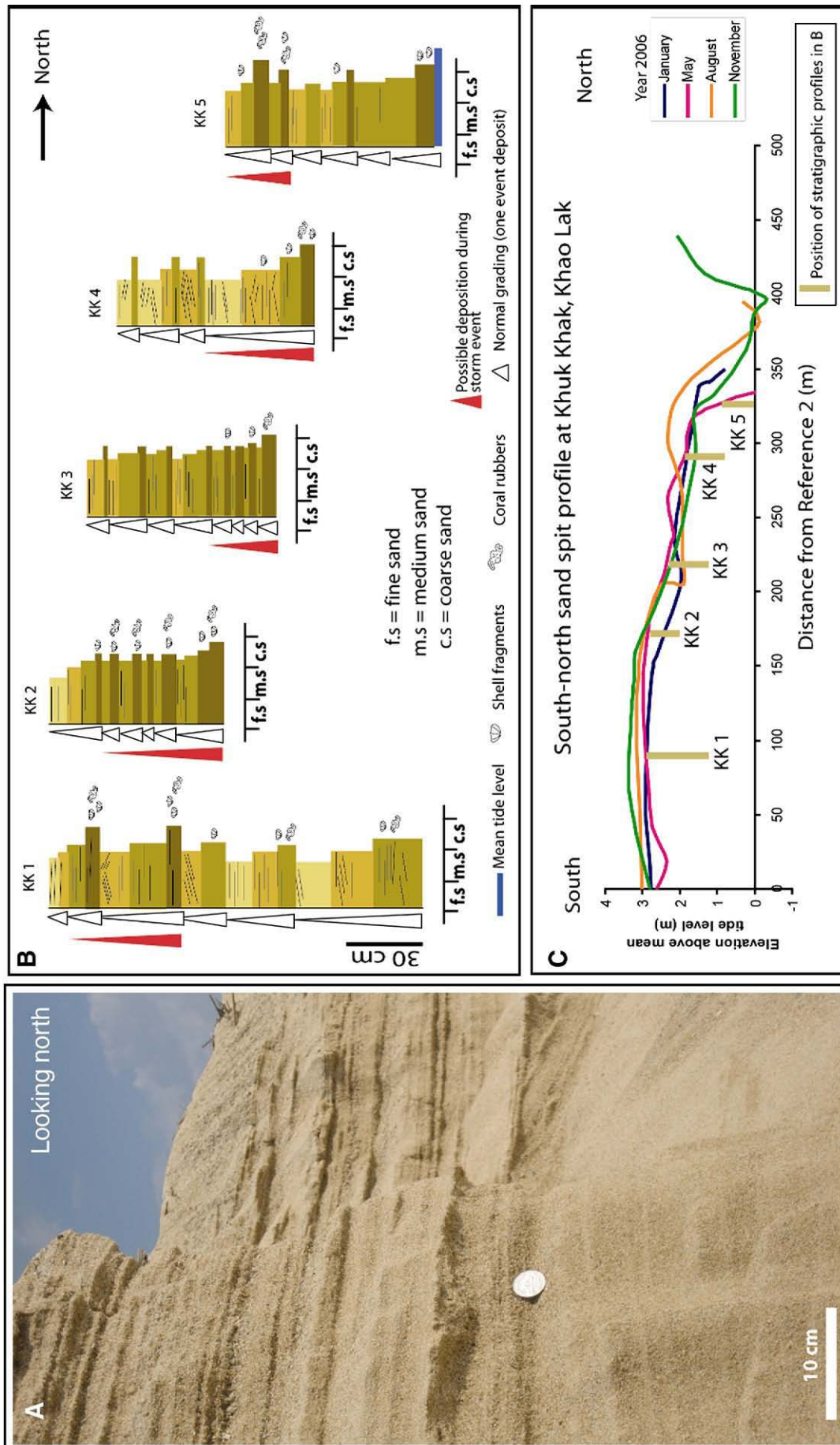


Fig. 6. (A) Photograph showing the depositional features of the post-2004 tsunami beach sediments; (B) stratigraphic correlation among pits along the south–north sand spit profile at Khuk Khak shows multiple normal gradings. Angular to sub-angular coarse-grained sand with coral fragments indicate deposition during storms occurred on May 2006 (red triangles). (C) Topographical profiles of sand spit developed in 2006 from south to north. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

(2006) who showed that several locations of the offshore submerged coral platforms from Khao Lak to Pakarang Cape which had been broken by the 2004 tsunami. Much of the broken coral boulders and fragments were moved away from the coral platforms and re-deposited close to the shore (Goto et al., 2007). It therefore seems of little doubt that small fragments of coral remain offshore and can then be carried onshore by the storm waves during the monsoon season.

5. Conclusion

- 1) The result of field surveys from 2005 to 2007 showed the rapid development of landforms causing beach sediment to return to the shoreline along the Bang Niang to Khuk Khak coastline of Phang-nga, Thailand. We conclude that the beach area had recovered by late 2006 and slightly exceeded the average area measured before the tsunami event. The present morphological process in this area now is mainly the adjustment of the beach zone to maintain the equilibrium profile. The recent formation of the sand spit at Khuk Khak tidal channel tends towards the north and is generated by a sediment transport pathway due to the prevalent northward alongshore current.
- 2) Results of beach profile measurements can be related to the morphological changes through time. The changes in foreshore and backshore profiles also support that the beach ridges initiate the balance in the equilibrium cycle, similar to the results of beach area calculations. We suggest that the balance of deposition and erosion of sediment at Khuk Khak and Bang Niang inlet/outlet tidal channels was also achieved by late 2006.
- 3) Grain size analysis of the post-2004 surface beach sediments at both sites contains a majority of coarse-grained sand. Quartz and bioclasts are common. The grain size during the recovery period changed in accord with seasonal changes. We infer that the sources of quartz and bioclasts, the majority of the deposition along the coast from Bang Niang to Khuk Khak, were derived mainly from the offshore bottom sediments.

However, the return of beach area and sedimentation was recognized only in the beach zone and inlet/outlet of tidal channel. Small incisions in the beach face can be recovered, but the widened cut banks along the tidal channels inland may either need several decades to return or these incisions will now persist into the geological record.

Acknowledgements

We thank the Center for Remote Imaging, Sensing and Processing, National University of Singapore (CRISP), Geo-Informatics and Space Technology Development Agency, Thailand (GISTDA), and National Aeronautics and Space Administration (NASA) for the open access to the satellite images via the website. The Thailand Research Fund (TRF: MRG5180188) and Chulalongkorn Unisearch partially provided a research fund. Thanks are also extended to Dr. Ken-ichiro Hisada, Dr. Naomi Murakoshi, Dr. Kruawan Jankaew and Mr. Peeratit Surakiatchai for field discussion. Dr. Andrew Plater, editor and three anonymous reviewers are thanked for a thorough review that greatly improved the manuscript.

References

- Anders, F.J., Byrnes, M.R., 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach* 59, 17–26.
- Benzoni, F., Basso, D., Giaccone, T., Pessani, D., Cappelletti, F.S., Leonardi, R., Galli, P., Choowong, M., Di Geronimo, S., Robba, E., 2006. Post-tsunami condition of a coral reef in Leam Pakarang (Andaman Sea, Thailand). *Int. Soc. Reef. Studies European Meeting*, Bremen, Germany. 194 pp.
- Chadha, R.K., Latha, G., Yeh, H., Peterson, C., Katada, T., 2005. The tsunami of the great Sumatra earthquake of M 9.0 on 26 December 2004 – impact on the east coast of India. *Current Science* 88, 1297–1301.

- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Daorerk, V., Charoentitrat, T., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P., 2007. Erosion and deposition by the 2004 Indian Ocean tsunami in Phuket and Phang-nga Provinces, Thailand. *Journal of Coastal Research* 23, 1270–1276.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Daorerk, V., Charoentitrat, T., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P., Phantuwongraj, S., 2008a. 2004 Indian Ocean tsunami inflow and outflow at Phuket, Thailand. *Marine Geology* 248, 179–192.
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitrat, T., Phantuwongraj, S., Wongkok, P., Choowong, A., Subsayjun, R., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P., 2008b. Flow conditions of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, inferred from capping bedforms and sedimentary structures. *Terra Nova* 20, 141–149.
- Coe, A.L., Bosence, D.W.J., Church, K.D., Flint, S.S., Howell, J.A., Wilson, R.C.L., 2003. *The Sedimentary Record of Sea-Level Change*. Cambridge University Press. 288 pp.
- CRISP, 2004. Center for Remote Imaging, Sensing and Processing. National University of Singapore. <http://www.crisp.nus.edu.sg/tsunami/tsunami.html>.
- Crowell, M., Leatherman, S.P., Buckley, M.K., 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research* 7, 839–852.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles – characteristics and applications. *Journal of Coastal Research* 7, 53–84.
- Dolan, R., Hayden, B.P., May, P., May, S., 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach* 48, 22–29.
- Fagherazzi, S., Du, X., 2007. Tsunamigenic incisions produced by the December 2004 earthquake along the coasts of Thailand, Indonesia and Sri Lanka. *Geomorphology* 99, 120–129.
- Folk, R.L., Ward, W., 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27, 3–26.
- GISTDA, 2005. Geo-Informatics and Space Technology Development Agency, Thailand. <http://netdev.gistda.or.th/Gallery/html/tsunami2004>.
- Goto, K., Chavanich, A.S., Imamura, F., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Sugawara, D., Yanagisawa, H., 2007. Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geology* 202, 821–837.
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawuttikul, N., Patanakanog, B., 2007. Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: an example of two transects along the western coast of Thailand. *Marine Geology* 239, 163–172.
- Larson, R., Morang, A., Gorman, L., 1997. Monitoring the coastal environment; part II: sediment sampling and geotechnical methods. *Journal of Coastal Research* 13, 308–330.
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, J.C., Nettles, M., Ward, N.S., Aster, C.R., Beck, L.S., Bilek, L.S., Brudzinski, R.M., Butler, R., Deshon, R.H., Ekstrom, G., Satake, K., Sipkin, S., 2005. The great Sumatra–Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science* 308, 1127–1133.
- Leatherman, S.P., 1983. Shoreline mapping: a comparison of techniques. *Shore and Beach* 51, 28–33.
- Matsutomi, H., Takahashi, T., Matsuyama, M., Harada, K., Hiraishi, T., Supartid, S., Nakusakul, S., 2005. The 2004 off Sumatra earthquake tsunami and damage at Khao Lak and Phuket island in Thailand. *Annual Journal of Coastal Engineer, JSCE* 52, 1356–1360.
- Meilianda, E., Dohmen-Janssen, C.M., Maathuis, B.H.P., Hulscher, S.J.M.H., Mulder, J.P.M., 2007. Beach morphology at Banda Aceh, Indonesia in response to the tsunami on 26 December 2004. *Coastal Sediments*. May 13–17 New Orleans. 14 pp.
- Moore, A., Nishimura, Y., Gelfenbaum, G., Kamataki, T., Triyono, R., 2006. Sedimentary deposits of the 26 December 2004 tsunami on the northwest coast of Aceh, Indonesia; the 2004 Great Sumatra earthquake and tsunami. *Earth, Planets and Space* 58, 253–258.
- Morton, R.A., 1991. Accurate shoreline mapping: past, present, and future. *Coastal Sediments* 997–1010.
- NASA, 2005. National Aeronautics and Space Administration. <http://observe.arc.nasa.gov/nasa/exhibits/tsunami/>.
- Okal, E.A., Titov, V.V., 2007. MTSU: recovering seismic moments from tsunami records. *Pure and Applied Geophysics* 164, 355–378.
- Papadopoulos, G.A., Caputo, R., McAdoo, B., Pavlides, S., Karastathis, V., Fokaefs, A., Orfanogiannaki, K., Valkaniotis, S., 2006. The large tsunami of 26 December 2004: field observations and eyewitness accounts from Sri Lanka, Maldives Is. and Thailand. *Earth, Planets and Space* 58, 233–241.
- Satake, K., Than, T.A., Sawai, Y., Okamura, Y., Kyaw, S.W., Win, S., Chit, S., Tint, L.S., Soe, T.T., Maung, M.S., Thant, Z.O., Saw, H.Z., 2006. Tsunami heights and damage along the Myanmar coast from the December 2004 Sumatra–Andaman earthquake. *Earth, Planets and Space* 58, 242–252.
- Sinsakul, S., Tiypairach, S., Chaimanee, N., Aramprayoon, B., 2003. Coastal change along the Andaman sea coast of Thailand. Bangkok: Technical Report of the Department of Mineral and Resources, Thailand. 58 pp. (in Thai with English abstract).
- Stafford, D.B., 1971. An Aerial Photographic Technique for Beach Erosion Surveys in North Carolina. U.S. Coastal Engineering Research Center Technical Memorandum, vol. 36, 115 pp.
- Szczucinski, W., Niedzielski, P., Rachlewicz, G., Sobczynski, T., Ziola, A., Kowalski, A., Lorenc, S., Siepak, J., 2005. Contamination of tsunami sediments in a coastal zone inundated by the 26 December 2004 tsunami in Thailand. *Environmental Geology* 49, 321–331.
- Umitsu, M., Tanavud, C., Patanakanog, B., 2007. Effects of landforms on tsunami flow in the plains of Banda Aceh, Indonesia, and Nam Khem, Thailand. *Marine Geology* 242, 141–153.

Original Research

Geomorphology and Superficial Bottom Sediments of Khao Lak Coastal Area (SW Thailand)

I. Di Geronimo^{1*}, M. Choowong², S. Phantuwongraj²

¹Department di Scienze Geologiche, Sez. di Oceanologia e Paleoecologia, Università di Catania, Corso Italia 57, Catania 95129, Italy

²Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Received: 3 October, 2008

Accepted: 24 November, 2008

Abstract

Submerged and subaerial coastal morphology, nature and distribution of bottom sediments are among the main key factors influencing the environmental impact by tsunami. Here we show our results of the post 2004 tsunami surveys both offshore and nearshore zones. After the 26th December 2004 Indian Ocean tsunami, new bathymetric map and beach profile measurement along Khao Lak area, SW Thailand were made during the year 2006. Sedimentological analysis data of 144 bottom sediment samples together with many observation sites by scuba diving and the echosounder profiles were used for creating the detailed map of sediments and rocky bottoms in this area with a basis scale of 1:30,000. Bottom morphology of the offshore bathymetry, sediment features and distribution patterns in relation to nature of run-up heights are also discussed. As a result, bottom morphology shows significant that can be explained the tsunami impact and run-up reflecting the different nature of each contiguous coastal area, the coastal stretches that were eroded by the tsunami waves were almost fully restored by natural processes of sediment redistribution two years after the catastrophic event.

Keywords: 2004 Indian Ocean tsunami, Khao Lak, offshore morphology, offshore sediments, coastline change

Introduction

On the 26/12/2004, a catastrophic tsunami wave severely damaged the coastal environment and the human community in almost all the countries around the Indian Ocean. Soon after the event, the international solidarity started immediate assistance to peoples and analysis of impact by tsunami wave impact on the environment began. Several pioneer reports and published papers on this extraordinary destruction wave were aimed [1] to document the effects and to better understand the dynamic event, the cause and the factors that has given a different wave impact in coastal area. The tsunami dead toll and injured people in Thailand

exceeded 8500 victims [2] and in terms of geomorphological impact, Phang Nga province was the most severe damaged area.

Later on, many papers were published to document such a tsunami field signature and described the characteristics of tsunami deposits along the Thai coasts [1, 3-9]. Another group of researchers attempted to model the tsunami wave propagation and compare the model with the observed effects on the land [7, 10-12].

Three major components in the mathematical modelling of tsunami that were considered by those authors include:

- 1) the source;
- 2) the sea bathymetry;
- 3) the wave propagation and the run-up model.

*e-mail: digeroni@unict.it

As a result, the wave propagation and the run-up models on the regional scale seemed likely not fully satisfactory in comparison with the small local coastal area. However, those publications provided the best key parameters that will be useful for coastal hazard mitigation in the future. Before the 2004 event, the inland topography and geomorphology of the coastal area of Thailand were well studied, on the contrary, the marine bottom configurations were less known. The previous available bathymetry data are satisfactory only to model the wave propagation in a regional scale starting from deep sea and on the most outer part of the continental shelf, but looked likely not appropriate to model a localized bathymetry near the coast. In the last miles, west the coastline, bathymetry and morphology changes are of the main factors that strongly affect the wave parameters and propagation. This is due to the fact that the sea level, as recorded by eyewitness personal video and photographs from Khao Lak, showed an initial withdrawal of the sea water to about 6-7 metres deep (Fig. 1). Later on, the first and second front waves appeared when the wave crest was overturned just few miles far from the coast. The front wave, earlier propagated as an almost straight line, but later on changes direction near the Khao Lak beach, owing to the articulated bottom morphology and lithology, with different measures rises and fragments (Fig. 1). A white foam crest became bigger and higher, and at last changed colour to brown owing to the high grain concentration both traction and suspension sediments pulled up from the bottom and entrained to the land. The evidence of run-up heights surveyed at Khao Lak area was between 4 and 20m with the maximum observed at Ban Bang Sak [10, 13].

It is evident, then, that the offshore bathymetry, morphology, the characteristics of sediments and rocky bottoms data of the coastal area in place where the tsunami crossing through in last marine mile are very important factors to calculate the more accuracy of run-up and the wave energy values for tsunami hazard evaluation and mitigation. On the basis of this remarks and because the most detailed marine map previously available of the area was 1:60,000 scale [14], the construction of a detailed bathymetry and bottom sediment map of Khao Lak area 1:30,000 scale was the first primary goal of our project. In the same time, coastal evolution after the tsunami was also studied.

Methods

The post tsunami field works were made in three periods, each lasting one week, during February, April and December 2006, along the offshore area of the Andaman coast between Ban Thap Lamu and Ban Bang Sak, Khao Lak, Phang Nga Province (Fig. 2).

A local small boat was equipped with the Lowrance LCX-25C echosounder associated with a GPS. The surveyed lines covered a total distance of 363km with 64 shore normal transects, approximately 350m apart, extended as far as 15m depth. Additionally, supplementary shore parallel transects were made covering a total distance of 55km.

For sedimentological study, 144 sea bottoms samples: 84 by means of a Van Veen grab and 60 hand corers by a scuba diver were taken. The sediments, analysed following standard methods, were described by gravel-sand-silt proportions [15] (Table 1). For a better interpretation of sea bottom topography, geomorphology and sediments distribution patterns, many scuba diving visual surveys and many photographs and video documentation were performed.

All the data collected were used for the construction of a new topographical and sedimentological map 1:30,000 of the area [16] (Fig. 2).

Different periods of satellite images taken from 2002 to 2006 were used to calculate area of eroded shoreline, especially within foreshore and beach zone. Technique in Geographical Information System (GIS) was applied as a tool for the more precise calculation of beach area and helped in planning line survey of beach measurement.

Detail field investigation included the measurement of beach profiles at four selected tidal channels where the 2004 Indian Ocean tsunami eroded away extensive amount of beach sediment and wider the channel mouth. Systematic collection in beach sediment along the survey lines from early 2005 to late 2006 was carried out [17, 18].

Morphology

At Ban Bang Niang bay, between Laem Pakarang and Laem Po, the opened bay is the main coastal feature along this coastline. It also covers the small Khao Lak bay that



Fig. 1. Arrival of 26 December 2004 tsunami to the Khao Lak coast. Pictures from a eyewitness personal video at Laem Hin Chang viewpoint. a) Withdrawal of the first depression wave, at approximately 10h15' a.m.. b) Just after the arrival of the first wave, approximately 10h22' a.m. 1) refracted wave from Laem Hin Chang northern side; 2) backwash from Ao Sam Poeng; 3) The front of first wave still not arrived to the Ban Bang Niang and Laem Pakarang coast, owing the bottom morphology and lithology.

Table 1. Granulometric composition of the sampling sites.

Samples	Gravel	Sand	Mud	Samples	Gravel	Sand	Mud	Samples	Gravel	Sand	Mud
1	0	98.93	1.07	51	0.89	20.68	78.43	103	11.4	86.97	1.63
3	1.42	88.75	9.83	52	21.06	77.36	1.57	104	0.09	96.71	3.2
4	3.85	94.15	2.01	53	18.46	80.87	0.67	105	0.06	16.06	83.87
5	28.95	71.05	0	57	35.4	60.95	3.65	106	0	42.23	57.77
6	19.21	77.12	3.67	58	23.69	71.21	5.1	107	10.24	88.43	1.33
7	28.39	71.45	0.16	61	0	80.54	19.46	108	37.04	60.55	2.42
8	28.47	59.24	12.28	64	4.77	25.4	69.83	109	16.13	80.67	3.2
9	0.44	60.61	38.95	65	10.99	87.99	1.01	111	52.34	45.05	2.6
10	8.26	87.02	4.72	66	21	77.62	1.38	112	21.05	76.86	2.09
11	0.12	99.75	0.12	67	0	24.43	75.57	113	0.11	86.13	13.76
12	36.38	53.69	9.94	68	0	17.16	82.84	114	0,00	1.67	98.33
13	0.49	81.51	18	71	0.16	60.87	38.97	115	50.55	47.89	1.56
14	0.55	93.97	5.48	72	0.23	60.48	39.29	116	3.33	95.8	0.87
18	6.99	83.37	9.64	73	19.14	79.4	1.47	117	2.63	96.07	1.3
19	14.16	84.3	1.54	74	0,00	3.99	96.01	118	1.21	97.05	1.74
20	0	10.53	89.47	75	0.58	95.57	3.86	119	36.52	61.97	1.57
21	0	74.78	25.22	76	47.4	51.12	1.43	120	36.59	41.8	21.6
22	0	94.38	5.62	77	8.59	11.53	79.88	121	26.78	69.76	3.46
23	0	25.41	74.59	79	13.17	85.87	0.96	122	28.84	69.19	1.96
24	10.08	74.58	15.34	80	5.69	94.19	0.12	123	7.37	89.34	3.28
26	0.38	23.85	75.77	81	14.11	84.74	1.15	124	65.25	32.09	2.66
28	18.53	65.81	15.65	82	0,00	6.29	93.71	125	0.85	85.75	13.41
29	0	17.37	82.63	83	19.67	79.47	0.85	126	0.02	87.37	12.62
30	24.86	55.72	19.42	84	18.66	79.2	2.15	127	0	46.24	53.76
31	0	90.86	9.14	85	0,00	2.15	97.85	128	0.53	25.3	74.17
33	0.1	80.59	18.32	86	12.07	86.38	1.55	129	35.9	60.4	3.71
34	2.24	94.84	2.93	87	18.73	79.2	2.06	130	0.02	50.4	49.58
35	24.47	71.3	3.74	88	0.65	97.14	2.21	131	9.35	85.21	5.45
36	39.84	55.3	4.85	89	71.49	28.01	0.51	132	24.33	72.85	2.82
37	23.55	74.6	1.85	90	0.34	97.67	1.99	133	12.03	84.33	3.64
38	16.02	32.64	51.34	91	0.08	95.51	4.41	134	33.41	63.63	2.96
39	0.48	11.96	87.56	92	19.99	78.26	1.75	135	11.03	86.42	2.55
40	0	42.12	57.88	93	0.01	97.09	2.9	136	35.53	61.6	2.86
41	1.76	93.94	4.31	94	18.06	80.77	1.18	137	22.75	75.11	2.14
42	2.51	60.44	37.06	95	25.25	73.45	1.3	138	17.47	78.46	4.07
43	11.61	79.77	8.62	96	33.31	65.7	0.99	139	14.12	83.72	2.15
44	32.83	66.67	0.5	97	37.17	61.52	1.31	140	16	81.8	2.2
45	17.9	81.15	0.95	98	62.04	33.11	4.85	141	37.13	59.88	2.99
47	49.49	47.74	2.77	99	0.6	49.4	50	142	50.32	49.06	0.62
48	23.91	74.9	1.2	100	56.79	41.41	1.8	143	15.92	73.3	10.78
49	15.3	79.3	5.4	101	39.03	59.08	1.89	144	0.33	30.03	69.64

partially protected by the Laem Ao Kham rocky peninsula, locating in the south of Laem Hin Chang. At the Pakarang northern side, this area covers the southern half of the Ban Bang Sak bay, closed to the north by Laem Hua Krang Noi. The Khao Lak, a sandy coast, is generally affected by tsunami that made up of the opened small river mouths and tidal channels with widened cut banks. Mangrove areas are locally along Khlong Phru Sai, Khuek Khak and at Ao Khlong Rian. Rocky coast are dominated as headlands in the north and the south side of Laem Hin Chang and at Laem Ao Kham peninsula.

The sea floor to the North of Pakarang is gently and uniformly degrading up to 15m of depth with dip values of 0.20% (Fig. 3A, prof. 1) except for a narrow coastal area where bottom configurations are quite irregular owing to the presence of several small granite outcrops and large blocks scattered on the sea floor.

From Pakarang to Laem Hin Chang the bottom morphology is even more complex and articulated. Off the coast from Laem Pakarang is surrounded for a length of 3km by a reef tidal flat with more than 800m wide. After a dipping as far as 10.5m, the bottoms high up again in correspondence with a reef shoal extended in N-S direction and reaching on its top a depth of 8.5m (Fig. 3B). As a whole, the area along the slope off the Pakarang reef edge and that one surrounding the shoal is scattered by several boulders and blocks up to over 2m in diameter; some of them are emerging from the bottom sediment, others are simply resting on the bottom surface. The shoal is colonised by several species of corals, but only some of them are horned corals. These horned corals are instead totally lacking along the slope of the tidal flat. Similar shoals, slightly smaller and is located at a little more deeper part (-12m) to the northwest of Laem Ao Kha (Fig. 3B).

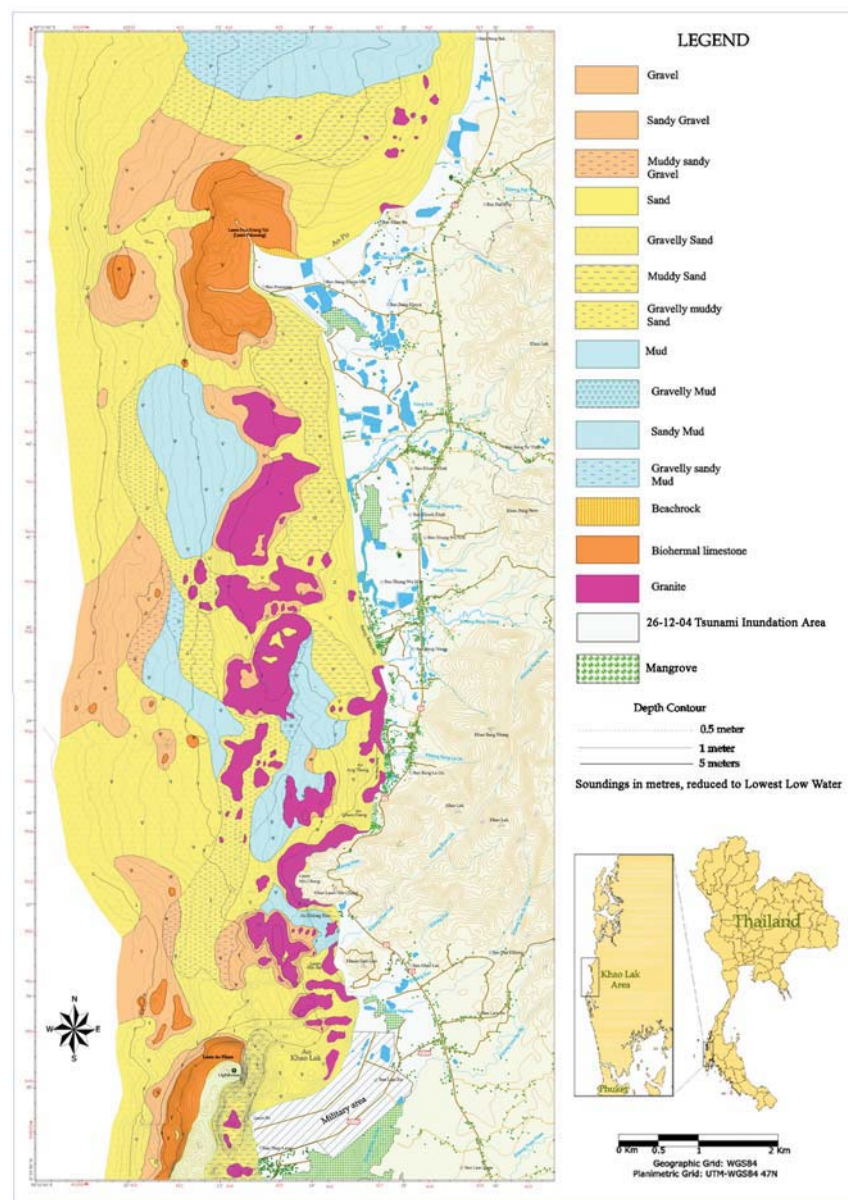


Fig. 2. Topographical and sedimentological map of Khao Lak study area modified from [16].

The bottom area between these two shoals, from 9-10m to 15-16m deep, shows 0.30% mean dip and is mainly characterised by scattered small rocks consisting of biohermal limestones. These biohermal limestones are located above the bottom 1.5m at most and are more frequent in the area off the coast of Bang Niang.

To the South of the Pakarang reef flat as far as Ao Khao Lak, the bottom is extremely indented for a length of ca. 15km and presents a great amount of shoals and coastal rocks. These latter are abundant to the South of Bang Niang and constitute the extension in the submarine environment of the granite outcrops from the mainland. The upper parts of some shoals emerge also at high tide levels (Hin Krang Nok, Hin Khi Nok). On their upper surface, especially on the larger ones, sedimentary pockets consisting of sands and sandy gravel are present. Channels and their pathways occur within such shoals representing the preferential passage in which backwash streams and sediments canalized during monsoon storms (Fig. 3B).

Lastly, in the most southern area, a narrow and long peninsula of Laem Ao Kham presents on its western side as a reef tidal flat (wide up to 350m and ca. 2km long) which forming a steep slope as far as -16 m and more, 2.22% dipping on its upper part and 0.71% on its deeper bottoms (Fig. 3A prof. 7).

The Coastline and the Shore

After one year of tsunami event which shoreline was almost recovered, the characteristic of coastal type in the study area did not change from the day before tsunami event. Before 2004 tsunami event, the rate of coastal erosion along Laem Pakarang to Khao Lak area was documented and the characteristic of coastal behaviour in this area into three types were classified [19]. Firstly, coastal area from the southern part of Laem Pakarang to the south tidal channel where Blue Village Pakarang Resort located was characterized as a depositional coast with the accretion rate of 1-5m/year. Secondly, from the Blue Village Pakarang

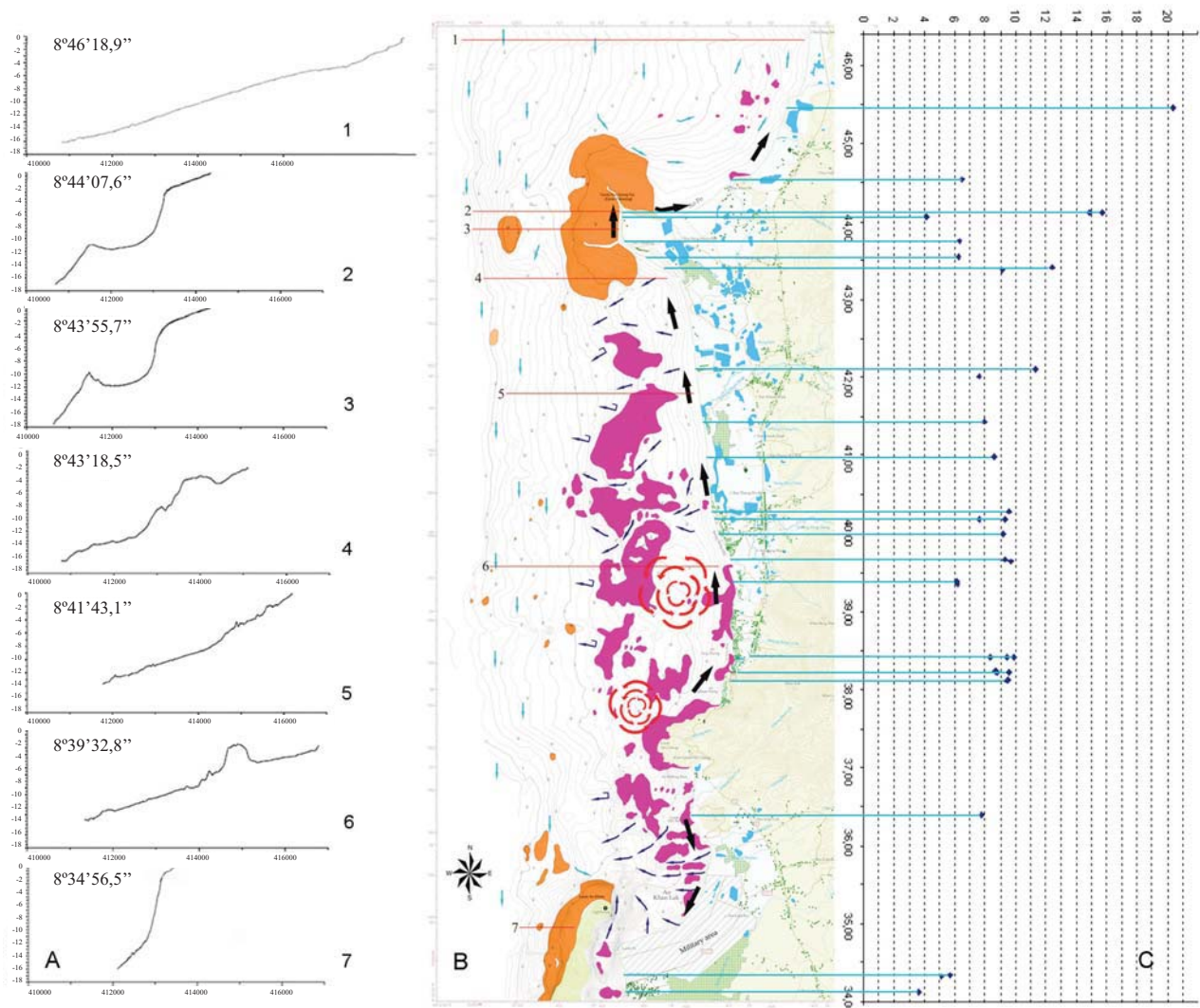


Fig. 3. Relationship between the coastal zone slope inclination, the submerged morphology and lithology and the run-up height. A) Significant morphological bottom profiles (vertical axis-depth in m, horizontal axis-distance). For each profile the latitude value position is indicated. B) Bathymetry map with rocky bottoms; length and position of profiles (1-7). The arrows represent the Andaman current to the south, the littoral drift to the north, the bottoms current by storms to the open sea. The circular arrows represent the two tsunami vortexes. C) Run-up height values observed by [10, 13] and their position at the Khao Lak coastline.

Resort down south to Ban Bang Niang, this zone was defined as a stable coast with depositional rate of $\pm 1\text{m/year}$. Lastly, the area extending from Ban Bang Niang to Khao Lak was identified as a moderately eroded coast with erosional rate of $1\text{--}5\text{m/year}$. After the tsunami event the characteristic of coastal behaviour in this area is still the same.

Results of remote sensing and GIS analysis in shoreline change and beach area recovery show that the recovery of shoreline in the northern part of the study area from Blue Village Pakarang Resort down south to Klong Khuek Khak was 98% recovered whereas at Ban Bang Niang recovery of shoreline was 96%. Recovery of beach area is also similar [17, 18].

The Offshore Sediments

At Khao Lak, the distribution of offshore sediment shows a N-S discontinuous muddy strip landward by sands and towards open sea by sandy gravels and gravelly sands bound (Fig. 2). A longitudinal fragmented and submerged rocky shoals line divided the muddy strip into two parts [16]. The deeper outer strip, is made mostly by gravelly sand but near the biohermal limestone rocky bottoms and seawards the reef edges of Laem Pakarang and Laem Ao Kham, sandy gravels are common. This strip is as far as 3km wide and starts from 10m deep approximately. The sands are medium-coarse grained in size, with rounded or subrounded quartz granules and a small percentage of carbonates. The organogenic fraction is mainly made by brown colour, strongly eroded, rounded and bioeroded molluscs and corals fragments. The sandy gravels, in a similar way, have the pebbles gravel fraction almost completely biolitic and almost completely old, rounded and eroded.

The shallow water coastal sand strip is narrower, about one hundred meters on average, but more than 1km wide and until 9m deep at the offshore of Ban Bang Sak and Ban Bang Niang. These quartz sands are composed of medium and coarse grained in the south, gradually become fine to the north ending at the Khlong Phru Sai channel mouth. Just a little further along the western side of Laem Pakarang, sands suddenly become coarser, sometimes gravelly and consisted mainly of coral fragments.

Based on the sediments with prevailing or secondary mud fraction with patches of different area, shape and origin are genetically arranged from north to south. At the northernmost part, bigger patch in the middle of the Ban Bang Sak Bay is characterized by sandy mud and gravelly sandy mud that extended to the south and then gradually become muddy sand and gravelly muddy sand. Further to the south until Laem Hin Chang, there is a 10 km long and 4 km wide muddy strip, cut off on the eastern coastal side offshore of Ban Bang Niang in two parts and with a granitic rocky shoals longitudinal line in the middle. In the southern one, offshore of Bang La On and to northwest of Laem Hin Chang, there are two pure black mud patches (Fig. 2), covering sand and sandy gravel sediments. This superficial mud layer is up to 20cm thick, anoxic, bad smelling and sometime sticky. In the Ao Khlong Rian, south of Laem

Hin Chang, attached to the coast, there is a last sandy mud and muddy sand small patch.

At Laem Pakarang, on the tidal reef flat and along the reef slope until the base, there are hundreds of reef blocks, several tons weight, and uprooted big coral colonies moved by tsunami waves [7, 20] (Fig. 4c, d). The blocks are located in the middle and in the proximal tidal flat area; some scattered mega-blocks lie very close to the coastline. Others several tons granite blocks were moved by tsunami till 150 m inland, at Poseidon Resort [3] (Fig. 5).

On the Pakarang northern side, at Ao Po, 1km long and 200 metres about large strip of Holocene beachrock occurs (Fig. 2, 6).

Discussion of Results

Sediment Source and Transportation

Sediments patterns along the coast of Khao Lak area are influenced from oceanographic factors (currents, waves, tsunami waves), climatic conditions (rain, storms, monsoon winds, post-Wurmian sea level rise), geologic setting (bottom lithology, earthquakes), coastal and submerged morphology (beach slope, bottom gradient, submerged channels, passes), fluvial flow and regime, sedimentary load.

The fine size terrigenous sediments carried to the sea by few small rivers and tidal channels is very poor. The offshore sediment source is mainly organogenic source, containing mainly of corals followed by molluscs, bryozoans, forams, and others skeletons.

The outer deeper strip sands are not consistent with the present local river load, the coastal morphology and the littoral transport to the North stopped by the bay caps with deep rocky cliffs. The quartz composition, the particles size and roundness, the brown colour and the old look of the abraded, fragmented and bioeroded shells and corals point to the deposition of these sediments as residual littoral or beach sands during the post Wurmian Holocene sea level rise.

Along the coastal marine bottoms of Phang Nga province, the local and northern rivers and tidal channels are likely the natural source of mud, but sediment loading is increased by land and offshore tin mining started the activity in the '70 [21] and before [22]. The Andaman marine current is generally controlled by the tropical monsoonal regime and by coastal morphology, flows to the south and south-west (Fig. 3B) from June to February [23, 24] causing the loading of mud from the coast. Most part of the suspension river mud and the re-suspension by waves and storms during the southwest monsoon season should be dispersed far away at the Andaman continental shelf. Nevertheless, a large amount of mud, after trespassing the rocky shoals line through the numerous submerged channels is trapped just after in a relatively quiet zone off bounded by the open sea Andaman current (Fig. 3B).

At the north of Laem Pakarang, the greater mud quantity is probably coming from the northern Khlong Pak Ko that is trapped inside the bay between Laem Hua Krang Noi and Laem Pakarang.



Fig. 4. Laem Pakarang tidal reef flat after the tsunami impact. a) Microatolls and surge channels at the reef tidal flat at December 2006. b) Coral sand and rubble covering the tidal flat at January 2005. c) Mega-block with a tidal notch moved by tsunami from the tidal flat edge at February 2006. d) Porites colony conical block uprooted and moved by tsunami to the tidal flat at February 2006. e) Erosion surface of Holocene tidal flat covered with a patched thin rubble film at March 2008. f) Holocene bioerosion on tidal flat surface; some perforations still contain the lithophagous mollusc bivalve shells.



Fig. 5. Poseidon Resort at Khao Lak at February 2006. Alignment of granite blocks moved by tsunami up to 150 m far inland.



Fig. 6. Beachrock slabs moved by tsunami at Ao Po, northern side of Laem Pakarang. The slabs are largely exposed during low tide. March 2008.

The mud trapped inside the Ban Bang Niang bay comes mainly from the short canals nearby. The rocky bottoms morphology and the current through the submerged channel off the coast of Ban Thung Wa Nok are likely decisive factors of the two areas of muddy sediment distribution. South of Laem Hin Chang, the mud comes mainly from the Khlong Khao Lak and the Khlong Kao, but, probably and partially transports from the southern Khlong Thung Maphrao.



Fig. 7. Vortex formed at sea, northwest of Laem Hin Chang, by 26 December 2004 tsunami. Picture from eyewitness personal video, at approximately 10:26 a.m.

The two unusual black anoxic pure mud patches at the northwest of Laem Hin Chang (Fig. 3B) are supposed to be temporary. The origin of these shallow water open sea face exceptional mud accumulation is by long time persistent two big vortexes by the 26 December 2004 tsunami (Fig. 7) and by the relevant suspension.

A large amount of marine sand with a low percentage of pebbles, shells and forams was eroded by the tsunami waves from the coastal bottoms, not deeper than 5-6 m, and from the beach, and then quickly deposited on the land with generally 2 layers 0-30cm in thickness [4]. A large amount of white coral sand and rubble, however, was deposited on Pakarang tidal flat (Fig. 4b) and on the Ao Po bay after destroying and pass over the cape. These coral sands and the rubbles were later moved and pushed back to the coast by the return flow; along the coast, and then possibly moved to the north by the littoral drift. Now the Pakarang tidal reef flat, nearly free of sand and coral rubble, shows many areas of the former erosional surface riddled with endobiont organism perforations (Fig. 4e, f). Moreover, around Pakarang 4 evolving sand-rubble bars are presently formed. The larger and longer bar is formed by the northern moved



Fig. 8. Two coral sand-rubble bars along the southern side of Laem Pakarang, at low tide. The smaller one (a), not in the map, is located 300 m southeast of the bigger one (b).

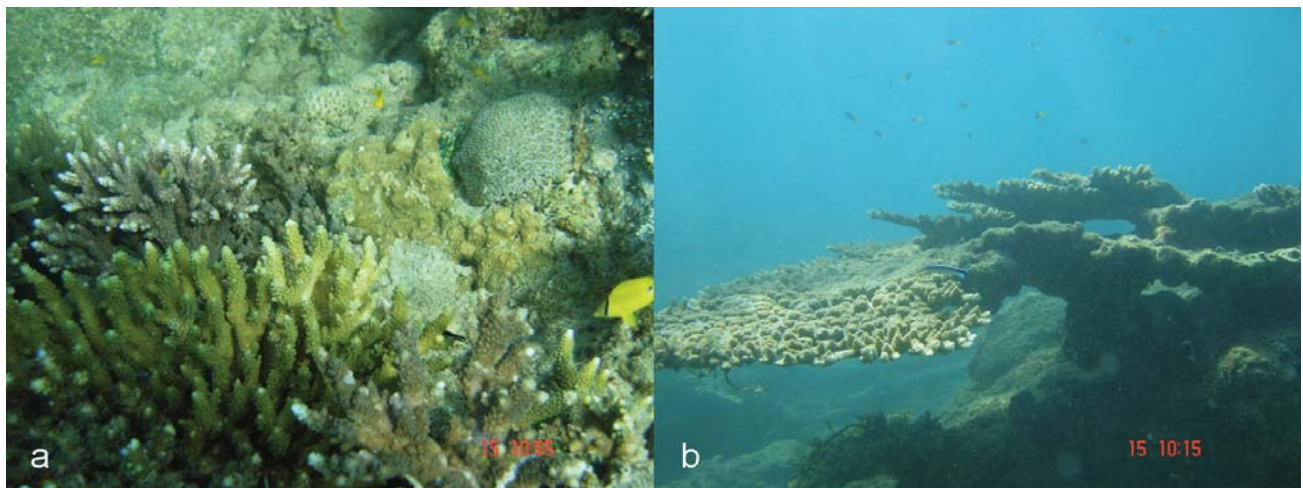


Fig. 9.a-b. Very fragile Acroporidae living coral colonies along the Laem Ao Kham western slope (~ 5 m) not damaged by 26 December 2004 tsunami.

sediments by the littoral drift, in the same place there was the Pakarang terminal stretch swept away by tsunami. The others three bars are likely formed by the present wave refractions (Fig. 8).

The hundreds of blocks on the Pakarang tidal flat were definitely moved by tsunami wave, not only proved by eyewitness but particularly by the nature, the position and the biogenic encrustations. All the blocks are made up of coral reef fragments with irregular globular, pyramidal and conical shape (Fig. 4d), with as far as three meters major axis, and up to more than 40 tons calculated weight [7]. The base of the pyramid or cone shaped blocks are flat, waves eroded and sifted with bivalves and other *Lithophagous* perforations. Three irregular globular large-sized blocks have the upper side with a very smooth and not encrusted tidal notch (Fig. 4c). They are hundred meters far away from the reef edge and lie on one tilted side and on the bottom floor incompatible with the present tidal levels.

The block distribution on the tidal flat contains many small blocks and very rare of large blocks in the Pakarang tidal flat southern area, south of the west point bar and the large blocks are the majority in the central area up to the cape. There are no blocks at the outer area near the tidal flat edge, but instead, the larger amount of blocks occurs in the middle and proximal area with some scattered megablocks near the coastline. Some scattered blocks lie also in the northeast side of the newly formed spit of Pakarang.

Furthermore, the organogenic crusts observed on some block surfaces during a survey in the year 2006 were relatively well preserved and clear, even if they were observed after more than one year from the tsunami event. They are constituted by encrusting invertebrates i.e. corals, bivalves, gastropods, polychaete serpulids, bryozoans and also by calcareous algae. As a whole, the ecological meaning of such association is not compatible with the present position (within the tidal flat) of the encrusted blocks, since all species are typical of infralittoral hard-bottoms, which are regularly submerged or only exceptionally interested by emersion episodes. Further, the distribution pattern of encrusting organisms is not compatible with the present laying of the block above the sea floor. In fact, they are clearly tilted from the sub-horizontal distribution of settlement.

We believe that this distribution pattern was caused not only by the tsunami wave speed, energy and height increase due to the coastal morphology, but also because the reef edge blocks uprooting and their distal deposition was made only by the first big tsunami wave. A similar mechanism which, during the storm weather on the beach, involves the biggest cobbles and boulders deposited more inland in the backshore.

Indeed, the second and the third tsunami wave trains, during their moving forward inland, would presumably encounter a certain resistance, due to the backwash respectively of the preceding first and second waves in turn. In addition, they would be fairly transported owing to the general turbulence produced during the tsunami event. A mechanism like this substantially reduced wave energy and potential transport toward inland of the wave events following the first one.

Relationship between Run-Up and Coastal Morphology

In the Khao Lak area, the good relationship between the observed run-up height with submerged bathymetry, geomorphology and slope inclination of coastal area is clear. Run-up height values from 4 to 21m was observed in the studied area. [10, 13] The maximum run-up value was observed at Ban Bang Sak bay where there is the gentlest sloped inclination (0.20%), and the minimum one was detected at the Laem Ao Kham peninsula cliff where the slope inclination is 1.23% (Fig. 3). At the Ao Kham cliff vertical wall, the vegetation growing higher than 4 m above the sea level have not been impacted. No moved blocks and no broken corals was observed during the diving visual survey on bottoms deeper than 4m. On the reef tidal flat, any signatures of tsunami impact were also recognized. The surface was covered by a very thin and patched film of coral rubble and only one small block with 70cm major axis was found.

At the cut end cape of Laem Pakarang, run-up 16m height was observed. The run-up was 6-7m just north and south of the cape. The surrounding bottom morphology and lithology can explain the strong values difference in nearest and neighbouring coastal areas. When the tsunami front wave coming from the east reached the reef shoal offshore of Pakarang, a first refraction around it possibly formed two wave fronts. These two fronts went ahead to the Pakarang tidal reef edge reaching to two small coves just west at where the cape ended. Here a second refraction happened, causing the further wave to rise up. The load of sand and blocks occurred after the wave run about 500m and then swept away the former Laem Pakarang spit point.

At the northern side of Pakarang, the run-up was lower (6m) because after the refraction around the northern side reef tidal flat, going to SE the new front wave collided with the spit overwash coming from the west. At the southern side of Pakarang, instead after the refraction around the southern side reef tidal flat, the wave interfered with another one that was refracted by the southernmost shoal.

The submerged morphology and the various refraction of the wave can also explain well the wave enhanced energy, the blocks uprooting, the movement and the settlement on the Pakarang tidal flat.

The run-up height values from Pakarang to Ao Khlong Rian were between 8-10m, because the area exhibited at almost the same slope inclination of 0.30% in average. Moreover, the front wave was likely fragmented and refracted many times, leading to the speed and the energy wave reduced almost unvaryingly by the submerged long line of granite shoals.

Conclusions

As we can infer from eyewitness account and from the sediment distribution map of the study area, the erosion occurred at tsunami wave base at depth 5-6m, where the morphology dipping of bottom topography was lesser than 0.5%.

This situation caused, moreover, the beaches, the small canals and tide channel mouths to be strongly eroded. The Pakarang terminal stretch was swept away and a large amount of reef blocks, coral rubble and sand on the tidal flat was poured.

During the diving surveys, excepting the collapsed coral blocks along the Pakarang reef slope, no morphology, erosion sign or tilted blocks on the bottom floor were clearly seen. At Laem Ao Kham reef slope, the horned living coral colonies did not damaged from 4m depth down slope (Fig. 9). At the Pakarang coral rubble rich on horned coral fragments likely came from the Holocene former reef. However, at present, only incrusting coral colonies live along the reef slope.

After two years from the tsunami event, the Khao Lak beaches are almost fully recovered by natural processes and the equilibrium profile also returned almost to a normal situation as recorded before tsunami event. The post-tsunami beach sediment comes mainly from the offshore bottom sediments. Only the widened cut banks along the tidal channels in land may need several decades to return [18]. Around Pakarang area, new sand-rubble bars are forming and a new spit is growing at place where the former spit located by the north long shore drift.

Our new detailed coastal bathymetry and morphology map is of significant to better understanding of two tsunami parameters i.e. 1) the energy wave enhanced and 2) run-up. Our results also help to explain the behaviour of tsunami run-up in relation to the change of bathymetry along the Khao Lak coastline. As these two tsunami wave parameters are the most important key to evaluate the coastal impact, we suggest that a new detailed bathymetry and morphology mapping survey all along the Thai Andaman coastal strip is necessary to build a more realistic coastal hazard map for the mitigation of future tsunami event.

Acknowledgements

Work financed by Italian MIUR (COFIN 2005 Prof. S.I. Di Geronimo), by Catania University (PRA 2006 and 2007 Prof. S.I. Di Geronimo) and partially sponsored by the Thailand Research Fund (TRF: MRG5180188).

The authors wish to thank all colleagues who helped us in the field work, in particular Elio Robba, Daniela Basso, Francesca Benzon, and Mauro Negri of Milano Bicocca University; Donata Violanti, Daniela Pessani and Rocco Mussat Sartor of Torino University; Antonietta Rosso, Rossana Sanfilippo, Angela Zanini, Raffaella Di Geronimo, Carmela Martino, Ivan Agostino, Donatella Larocca, Thalassia Giaccone, Riccardo Leonardi, Alfio Viola, Michele Vagliasindi and Andrea Lo Bue of Catania University; Vararin Vongpanich of the Phuket Marine Biological Center. Many thanks to Mr Nong, Captain of "Amandara" boat from Ban Nam Ken.

Catania Paleoecological Research Group, paper n. 355.

References

1. SZCZUCINCKI W., CHAIMANEE N., NIEDZIELSKI P., RACHLEWICZ G., SAISUTTICHAJ D., TEPUSWAN T., LORENC S., SIEPAK J. Environmental and geological impacts of the 26 December 2004 tsunami in coastal zone of Thailand – overview of short and long-term effects. *Polish Journal of Environmental Studies* **15** (5), 793, **2006**.
2. BAGAI D.S. BJORKMAN H. KULTHAN S. SUWANRAKS R., PITT A., IRVING A.L. et al. Tsunami Thailand one year after International response and contribution of International partners, Report, U.N. dev. Programme, New York, pp. 120, **2005**.
3. SZCZUCINSKI W. CHAIMANEE N., DI GERONIMO I., JAGODZINSKI R., SAISUTTICHAJ D., TEPUSWAN T., YAWSANGRATT S., KOKOCINSKI M., RUAMTUM S., SUNGEON P. Boulder deposits in coastal zone at Ao Klong Rian (Phang Nga province, Thailand) from 2004 Indian Ocean tsunami and from possible paleotsunami event. August 2007, Asia Oceania Geoscience Society, **2007**.
4. CHOOWONG M., MURAKOSHI N., HISADA K., CHARUSIRI P., DAORERK V., CHAROENTITIRAT T., CHUTAKOSITKANON V., JANKAEW K., KANJANAPAYONT P. Erosion and deposition by the 2004 Indian Ocean tsunami in Phuket and Phang-nga Provinces, Thailand. *Journal of Coastal Research* **23**, 1270, **2007**.
5. CHOOWONG M., MURAKOSHI N., HISADA K., CHARUSIRI P., CHAROENTITIRAT T., PHANTUWONGRAJ S., WONGKOK P., CHOOWONG A., SUBSAYJUN R., CHUTAKOSITKANON V., JANKAEW K., KANJANAPAYONT P. Flow conditions of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, inferred from capping bedforms and sedimentary structures. *Terra Nova* **20**, 141, **2008**.
6. FAGHERAZZI S., DU X. Tsunamigenic incisions produced by the December 2004 earthquake along the coasts of Thailand, Indonesia and Sri Lanka. *Geomorphology* **99**, 120, **2007**.
7. GOTO K., CHAVANICH A.S., IMAMURA F., KUNTHASAP P., MATSUI T., MINOURA K., SUGAWARA D., YANAGISAWA H. Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geology* **202**, 821, **2007**.
8. KELLETAT D., SCHIEFFERS S.R., SCHIEFFERS A. Field signatures of the SE-Asian mega-tsunami along the west coast of Thailand compared to Holocene paleo-tsunami from the Atlantic Region. *Pure and Applied Geology* **164**, 413, **2007**.
9. PAPADOPULOS G.A., CAPUTO R., McADOO B., PAVLIDES S., KARASTATHIS V., FOKAEFS A., ORFANOIANNAKI K., VALKANIOTIS S. The large tsunami of 26 december 2004: field observations and eye-witnesses accounts from Sri Lanka, Maldive Is. And Thailand. *Earth, Planets and Space* **58**, 242, **2006**.
10. MATSUTOMI H., TAKAHASHI T., MATSUYAMA M., HARADA K., HIRAISHI T., SUPARTID S., NAKUSAKUL S. The 2004 off Sumatra earthquake tsunami and damage at Khao Lak and Phuket island in Thailand. *Annual Journal of Coastal Engineer, JSCE* **52**, 1356, **2005**.
11. IOUALALEN M., ASAVANANT J., KAEWBANJAK N., GRILLI S.T., KIRBY J.T., WATTS P. Modeling the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami: Case study of impact in Thailand. *Journal of Geophysical research*, 112, C07024, doi:10.1029/2006JC003850, **2007**.

12. PRAKHAMMINTARA P., IAMAMURA F. The correlation between tsunami run-up height and coastal characteristics index of Phang nga and Phuket provinces, Thailand. International Symposium on the Restoration Program from Giant Earthquakes and Tsunamis January 22-24, pp. 6, **2008**.
13. TSUJI Y., NAMEGAYA Y., MATSUMOTO H., IWASAKI S., KANBUA W., SRIWICHAI M., MEESUK V. The 2004 Indian tsunami in Thailand: Surveyed runup heights and tide gauges records. *Earth Planet Space* **58**, (2), 223, **2006**.
14. HYDROGRAPHIC DEPARTMENT, ROYAL THAI NAVY. Ban Thai Muang to Chong Pak Ko. Map, 1:60,000, Bangkok **1996**.
15. FOLK, R.L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology* **62** (4), 344, **1954**.
16. DI GERONIMO I., ROBBA E., CHARUSIRI P., CHOOWONG M., AGOSTINO I., MARTINO C., DI GERONIMO R., PHANTUWONGRAJ S. Marine modern sediments and rocky bottoms of Khao Lak coastal area, Changwat Phang Nga, Andaman Sea, SW Thailand. Color Map, 1:30,000, Catania, Bangkok, **2008**.
17. PHANTUWONGRAJ S., Shoreline change after the 26 December 2004 tsunami between Laem Pakarang-Khao Lak area, Changwat Phang-nga, Thailand. MS Thesis Unpublished, Dept Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, pp. 214, **2006**.
18. CHOOWONG M., PHANTUWONGRAJ S., CHAROEN-TITIRAT T., CHUTAKOSITKANON V., YUMUANG S., CHARUSIRI P. Beach recovery after 2004 Indian Ocean tsunami from Phang-nga, Thailand. *Geomorphology* doi:10.1016/j.geomorph.2008.08.07, **2008**.
19. SINSAKULL S., TIYAPAIRACH S., CHAIMENEE N., ARAMPRAYOON B. Coastal change along the Andaman Sea coast of Thailand. Technical Report of the Department of Mineral and Resources, Bangkok pp. 58, **2003** [In Thai with English abstract].
20. BENZONI F., BASSO D., GIACCONE T., PESSANI D., CAPPELLETTI F.S., LEONARDI R., GALLI P., CHOOWONG M., DI GERONIMO I., ROBBA E. Post-Tsunami condition of a coral reef in Laem Pakarang (Andaman Sea, Thailand). International Society for Reef Studies European Meeting". 19-22 September 2006, Bremen, Germany, **2006**.
21. PHONGSUWAN, N., T. YEEMIN, S. WORACHANANANT, M. DUANGSAWASDI, C. CHOTIYAPUTTA J. COMLEY, Post-tsunami status of coral reefs and other coastal ecosystems on the Andaman Sea coast of Thailand. In Wilkinson, C., D. Souter and J. Goldberg (eds.) Status of Coral Reefs in Tsunami Affected Countries: 2005. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, pp. 63-78, **2006**.
22. CHIEMCHINDARATANA S. Econ. Geol. Rep. n.8/1993, DMR, Bangkok, pp. 48, **1993**.
23. WYRTKI K. Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report **2**, 17, **1961**.
24. FAIRBRIDGE R.W., RODOLFO K.S. Andaman Sea. In: The Encyclopedia of Oceanography, Ed. Fairbridge R.W. pp. 32-35, **1966**.