

การพยากรณ์สื่อนามิโดยวิธีโครงข่ายใยประสาทเทียม



นาย อาทิตย์ อินทวิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TSUNAMI FORECAST USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS



Mr. Artith Intavee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพยากรณ์สึนามิโดยวิธีโครงข่ายใยประสาทเทียม

โดย

นายอาทิตย์ อินทวิ

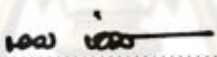
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์

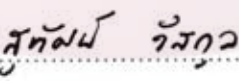
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนिरังวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคณะประสิทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทัศน์ วิสกุล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาทิตย์ อินทวิ : การพยากรณ์สึนามิโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม. (TSUNAMI FORECAST USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. อาณัติ เรืองรัศมี, 162 หน้า.

การพยากรณ์สึนามิโดยทั่วไปอาศัยฐานข้อมูลของความสูงและเวลาเดินทางถึงของคลื่น โดยใช้แบบจำลองสึนามิ และเหตุการณ์ที่วิเคราะห์ไว้ล่วงหน้า โดยสมมติจากกลไกการเกิดแผ่นดินไหวที่เป็นกรณีวิกฤติที่สุด ซึ่งอาจทำให้การเตือนภัยคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลจากสถานีวัดน้ำในการพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน และประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนด้วยหลักการซ้อนทับ

การศึกษานี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางถึงของคลื่นกับตำแหน่งของรอยเลื่อน โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่น 7 สถานีทั้งบริเวณกลางมหาสมุทร และชายฝั่งประเทศไทยเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนเป็นชุดข้อมูลส่งออกสำหรับการฝึกแบบจำลอง และสามารถใช้แบบจำลองที่ได้รับการฝึกแล้วพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อนได้โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 7 สถานี อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนในช่วง ± 5 นาทียังไม่ส่งผลต่อการทำนายตำแหน่งของรอยเลื่อน ในการศึกษาได้แบ่งกลุ่มรอยเลื่อนออกเป็น 3 กลุ่มตามขนาดของรอยเลื่อนเพื่อให้ครอบคลุมขนาดแผ่นดินไหวตั้งแต่ขนาด 7.5 ถึง 9.0 ซึ่งขนาดของรอยเลื่อนที่ต่างกันทำให้เฟสของคลื่นที่สถานีวัดน้ำแตกต่างกัน และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถใช้บ่งชี้ว่าสึนามิที่วัดได้มาจากกลุ่มรอยเลื่อนแบบใด สำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน ได้ใช้ค่ารากของผลรวมผลต่างกำลังสองเป็นตัวบ่งชี้ที่ในการหาระยะการเคลื่อนตัว โดยทดสอบกับกรณีศึกษาสำหรับแผ่นดินไหวขนาด 8.3 และ 8.6 ให้ค่าความผิดพลาดระหว่าง 2.8 % ถึง 14.3 % นอกจากนั้นยังพบว่าควรใช้ระยะเวลาเดินทางถึงของคลื่นอย่างน้อย 30 นาที หลังจากคลื่นเดินทางถึง ณ สถานีสุดท้าย ซึ่งจะส่งผลต่อการพยากรณ์สึนามิ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต..... อาทิตย์ อินทวิ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... อาทิตย์.....
 ปีการศึกษา.....2551.....

4970703021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : ARTIFICIAL NEURAL NETWORK / TSUNAMI / NUMERICAL SIMULATION

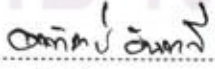
ARTITH INTAVEE : TSUNAMI FORECAST USING ARTIFICIAL NEURAL

NETWORKS. ADVISOR : ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, Ph.D., 162 pp.

The tsunami forecast is usually done using pre-computed database of elapsed time of arrival and tsunami amplitudes from tsunami modeling. The database is developed based on critical scenarios which may be different from actual focal mechanisms. That can lead to false alarms in tsunami warning. In this research, sea level information is used to determine fault parameters. The fault location is evaluated by an artificial neural network (ANN) and the dislocation is estimated by a principle of superposition.

The ANN is used to obtain the relationship of the elapsed time of arrival and the fault locations. The elapsed time of arrival of tsunamis observed from seven tidal stations in the Indian ocean and along the coastal of Thailand is used as the ANN inputs. The fault location is the network output. The trained model can predict the fault location with a good accuracy and the algorithm is robust to the error in the arrival time up to about ± 5 minutes. In this study, fault combinations are divided into 3 groups, covering the possible magnitudes from 7.5 to 9.0. It is found that phase angles of tsunamis depend on the fault dimension. To identify the fault dimension, the correlation coefficient is used as an indicator. The dislocation is estimated using the principle of superposition. The square root of sum of square of errors is used to determine the appropriate dislocation of a fault. This algorithm is applied to cases with moment magnitudes of 8.3 and 8.6. It is found that the error ranges from 2.8% to 14.3 %. In addition, it is found that 30 minute observation time is required after the arrival of tsunamis at the last station.

Department :..... CIVIL ENGINEERING.....

Student's Signature :..... .....

Field of Study :..... CIVIL ENGINEERING.....

Advisor's Signature :..... .....

Academic Year :..... 2008.....

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและแนวคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้ตลอดเสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ วิสกุล ในฐานะกรรมการสอบที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เหมือนสิน ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ พิพัฒน์พงศา Tokyo Institute of Technology ที่อนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงเพื่อการวิเคราะห์แบบจำลอง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนทั้งในอดีตตราบนับปัจจุบัน และที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวสำหรับกำลังใจที่ดีเสมอมา รวมทั้งกำลังใจดีๆ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่าน ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แบบจำลองสึนามิ (Tsunami modeling).....	3
2.2 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	20
2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ.....	30
2.4 เงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (Initial and boundary conditions).....	31
2.5 การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกเนื่องจากรอยเลื่อน (Sea surface deformation).....	32
2.6 โครงข่ายใยประสาทเทียม.....	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 หลักการพยากรณ์สึนามิ.....	61
3.1 หลักการซ้อนทับ (Method of superposition).....	62
บทที่ 4 ฐานข้อมูลสึนามิ.....	68
4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณทะเลอันดามัน.....	68
4.2 การกำหนดพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย.....	70
4.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ทะเลเนื่องจากรอยเลื่อน.....	75
4.4 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของสึนามิ.....	79
4.5 ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	86
บทที่ 5 การใช้โครงข่ายใยประสาทเทียมและหลักการซ้อนทับในการพยากรณ์สึนามิ.....	92

5.1	โครงข่ายใยประสาทเทียม.....	92
5.2	การพยากรณ์ตำแหน่งรอยเลื่อน	108
5.3	การคำนวณระยะเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนด้วยหลักการซ้อนทับ.....	111
บทที่ 6	กรณีศึกษาและผลของเวลาเดินทางของคลื่นต่อความถูกต้องของแบบจำลอง.....	114
6.1	การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.6	114
6.2	การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งตรงกับรอยเลื่อนขนาด หนึ่งหน่วย	121
6.3	การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งไม่ตรงกับรอยเลื่อนขนาด หนึ่งหน่วย	129
บทที่ 7	สรุปผล	137
7.1	สรุปผล	137
7.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม	138
	รายการอ้างอิง.....	139
	ภาคผนวก.....	142
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทสิ่งมีชีวิตกับเซลล์ประสาทเทียม	34
ตารางที่ 2.2	ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการคำนวณจากการแปลงเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและระยะเวลาที่รอยเลื่อนใช้ในการยกตัว (Fujii และ Satake, 2006).....	43
ตารางที่ 2.3	ค่ามุมต่างๆ, ตำแหน่งและความลึกของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Satake, 2006)	44
ตารางที่ 2.4	ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยที่ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่างๆ (Fujii และ Satake, 2006)	44
ตารางที่ 2.5	พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองรอยเลื่อน.....	46
ตารางที่ 2.6	เปรียบเทียบค่า RMSE สำหรับระดับผิวน้ำเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดต่างๆ.....	51
ตารางที่ 2.7	ตำแหน่งและความยาวของรอยร้าวที่มีการแปรผันความยาวในแนวตั้ง	56
ตารางที่ 2.8	ข้อมูลส่งออกที่เป็นเป้าหมายจากโครงข่ายสำหรับรอยร้าว 3 ชนิด	56
ตารางที่ 2.9	ผลลัพธ์จากการทดสอบสำหรับการจำแนกชนิดของรอยร้าว	56
ตารางที่ 2.10	ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1.....	59
ตารางที่ 2.11	ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1.1.....	59
ตารางที่ 2.12	ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1.2.....	60
ตารางที่ 2.13	ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-2.....	60
ตารางที่ 4.1	คุณลักษณะของรอยเลื่อน (Fault characteristics)	72
ตารางที่ 4.2	กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน ที่เกิดจากการรวมกันของรอยเลื่อนเดียว	76
ตารางที่ 4.3	กลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน ที่เกิดจากการรวมกันของรอยเลื่อนเดียว	77
ตารางที่ 4.4	ขอบเขตพื้นที่การคำนวณ.....	80
ตารางที่ 4.5	เงื่อนไขการคำนวณของแต่ละขอบเขตการคำนวณ	81
ตารางที่ 4.6	ข้อมูลตำแหน่งและผู้รับผิดชอบ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี.....	82
ตารางที่ 4.7	ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 1.....	87
ตารางที่ 4.8	ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 2.....	89
ตารางที่ 4.9	ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 3.....	90
ตารางที่ 5.1	ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 1.....	96
ตารางที่ 5.2	ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 2.....	97
ตารางที่ 5.3	ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 3.....	99
ตารางที่ 5.4	พารามิเตอร์ของรอยเลื่อน	112

ตารางที่ 5.5 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี	113
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.6	114
ตารางที่ 6.2 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี	115
ตารางที่ 6.3 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ	115
ตารางที่ 6.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ	116
ตารางที่ 6.5 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	116
ตารางที่ 6.6 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN.....	118
ตารางที่ 6.7 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3	121
ตารางที่ 6.8 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี	122
ตารางที่ 6.9 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ	122
ตารางที่ 6.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่างๆ.....	123
ตารางที่ 6.11 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	124
ตารางที่ 6.12 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN.....	125
ตารางที่ 6.13 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3	129
ตารางที่ 6.14 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี	129
ตารางที่ 6.15 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ.....	130
ตารางที่ 6.16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่างๆ.....	131
ตารางที่ 6.17 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	131
ตารางที่ 6.18 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN.....	133

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 มวลน้ำในระบบพิกัดฉาก	3
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการคลื่นน้ำตื้น (Imamura, 1996)	7
รูปที่ 2.3 การไหลแบบคงที่ในทางน้ำเปิด (Joseph และ John, 2002)	9
รูปที่ 2.4 การไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (Streeter และ Wylie, 1979)	12
รูปที่ 2.5 พื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม	14
รูปที่ 2.6 ภาพขยาย dA	14
รูปที่ 2.7 ปริมาตรควบคุมสามมิติ (Streeter และ Wylie, 1979)	16
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ (2.72) ถึง (2.74), (Imamura, 1996)	20
รูปที่ 2.9 ผลต่างกลาง (Central difference) (UNESCO, 1997)	21
รูปที่ 2.10 จุดสำหรับคำนวณในวิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (UNESCO, 1997)	22
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation errors) กับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษ (Rounding-off errors) สำหรับขนาดความกว้างของช่องกริดขนาดต่างๆ (Imamura, 1996)	30
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความแตกต่างของอัตราการใช้ระหว่าง η ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง รูปของ N_2 (UNESCO, 1997)	31
รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยเลื่อนและตำแหน่งอ้างอิง (Mansinha และ Smylie, 1971)	32
รูปที่ 2.14 ลักษณะทางโครงสร้างเซลล์ประสาทของสิ่งมีชีวิต (Ham และ Kostanic, 2001)	34
รูปที่ 2.15 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Ham และ Kostanic, 2001)	35
รูปที่ 2.16 สถาปัตยกรรมโปรเซสตรอน 3 ชั้น (Ham และ Kostanic, 2001)	36
รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของหน่วยกำเนิดบนเขตมุดตัว Alaska-Aleutian (ดาว) และสถานีวัดน้ำที่เลือกศึกษา (วงกลม) (Titov และคณะ)	38
รูปที่ 2.18 ที่ตั้งของสถานีวัดน้ำที่ 1 กับ 2 และตำแหน่งของแบบจำลองรอยเลื่อน (Koike และคณะ, 2003)	39
รูปที่ 2.19 ระดับน้ำเริ่มต้นที่คำนวณจากแบบจำลองรอยเลื่อน (ซ้าย) และคำนวณย้อนกลับ (ขวา) (Koike และคณะ, 2003)	40
รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบความสูงคลื่นระหว่างวิธีการคำนวณย้อนกลับกับการคำนวณจากแบบจำลองรอยเลื่อน (Koike และคณะ, 2003)	40
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลจากหน่วยสึนามิ (Lee และคณะ, 2005)	41

รูปที่ 2.22 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (Fujii และ Satake, 2006)	42
รูปที่ 2.23 หมายถึงและตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Satake, 2006).....	43
รูปที่ 2.24 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (Fujii และ Satake, 2006).....	45
รูปที่ 2.25 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Fujii และ Satake, 2006).....	45
รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบระดับน้ำ ณ สถานีต่าง (Tomita และคณะ, 2006).....	46
รูปที่ 2.27 ตำแหน่งสถานีสังเกตการณ์สึนามิ และเส้นชั้นเวลาเดินทางของคลื่น (Tomita และคณะ, 2006).....	47
รูปที่ 2.28 ค่าเริ่มต้นของสึนามิคำนวณโดยใช้แบบจำลองรอยเลื่อน (Tomita และคณะ, 2006).....	48
รูปที่ 2.29 ค่าเริ่มต้นของสึนามิคำนวณโดยวิธีผกผัน (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4 (Tomita และคณะ, 2006).....	48
รูปที่ 2.30 ระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 4 เทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (Tomita และคณะ, 2006)	49
รูปที่ 2.31 ค่าเริ่มต้นที่คำนวณโดยวิธีการผกผัน (ก) กรณีที่ 5 (ข) กรณีที่ 6 (Tomita และคณะ, 2006).....	49
รูปที่ 2.32 ระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 5 เทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (Tomita และคณะ, 2006)	50
รูปที่ 2.33 เปรียบเทียบระดับน้ำพยากรณ์กับที่บันทึกได้ทั้ง 8 สถานีตามแนวชายฝั่ง (Tomita และคณะ, 2006)	52
รูปที่ 2.34 Condition number และ RMSE สัมพัทธ์ของกรณี Smoothness และ Smoothness + Epicenter (Tomita และคณะ, 2006).....	53
รูปที่ 2.35 แผ่นแอนไอโซทรอปิกลามิเนท M ชั้น กับรอยร้าว (Xu และคณะ, 2001)	54
รูปที่ 2.36 โครงข่ายโปรเซสตรอนกับชั้นที่ซ่อนภายใน 2 (Xu และคณะ, 2001).....	54
รูปที่ 2.37 ขอบเขตการคำนวณที่มีรอยร้าวอยู่ภายใต้ตัวกลางกึ่งอนันต์และถูกกระทำด้วยแรงกระทำที่พื้นผิวอิสระ (Liu และคณะ, 2002)	55
รูปที่ 2.38 พื้นที่ศึกษา และตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (Romano และคณะ, 2008)	57
รูปที่ 2.39 การเปรียบเทียบเวลาเดินทางของคลื่น (แถวซ้าย) และความสูงคลื่นสูงสุด (แถวขวา) ที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง TUNAMI-N2-NUSS (บน) แบบจำลอง ANNs (กลาง) และค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทั้งสอง (ล่าง) (Romano และคณะ, 2008).....	58
รูปที่ 2.40 รอยเลื่อนและพื้นที่ที่ศึกษา (Supharatid, 2008).....	59

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการพยากรณ์สึนามิ 61

รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ใช้สำหรับศึกษาหลักการซ้อนทับ 63

รูปที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี DART 23401 64

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี DART 53401 64

รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี Port Blair 65

รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี Nicobar 65

รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานีเกาะสุรินทร์ 66

รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานีเกาะเมียง 66

รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานีเกาะราชาน้อย 67

รูปที่ 4.1 ลักษณะธรณีแปรสัณฐานบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา (Chlieh และคณะ, 2007)..... 69

รูปที่ 4.2 แสดงแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่สำคัญที่เคยเกิดในบริเวณเขตมุดตัวสุมาตราระหว่าง ค.ศ. 1797 ถึง ค.ศ. 2004 (Chlieh และคณะ, 2007) 69

รูปที่ 4.3 แผนที่เส้นชั้นความลึกของระนาบรอยเลื่อนบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา ระยะห่างของเส้นชั้นเท่ากับ 50 กิโลเมตร 70

รูปที่ 4.4 แผนที่แสดงตำแหน่งของรอยเลื่อนทั้ง 72 รอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยตลอดแนวเขตมุดตัวสุมาตรา และตำแหน่งสถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี บริเวณกลางทะเล และแนวชายฝั่งประเทศไทย..... 75

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด เนื่องจากรอยเลื่อนเดี่ยว..... 78

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด เนื่องจากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน..... 78

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด เนื่องจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน..... 79

รูปที่ 4.8 ขอบเขตการคำนวณที่ 1 80

รูปที่ 4.9 ขอบเขตการคำนวณที่ 2 81

รูปที่ 4.10 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว 83

รูปที่ 4.11 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนกัน 83

รูปที่ 4.12 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 9 รอยเลื่อน กัน	84
รูปที่ 4.13 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว.....	85
รูปที่ 4.14 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน.....	85
รูปที่ 4.15 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน.....	86
รูปที่ 5.1 โครงข่ายใยประสาทเทียมแบบโปรเซปตรอนหลายชั้น ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น (Romano และคณะ, 2008)	92
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการฝึกแบบจำลอง (Romano และคณะ, 2008)	93
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับคำตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 4	96
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 4	97
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับคำตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 4	98
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 4	98
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับคำตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 1	99
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 1	100
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	102
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	103
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	103
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	104
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	105
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	105
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	106
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	107
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย	107
รูปที่ 5.18 ขั้นตอนการพยากรณ์ขนาดของรอยเลื่อน.....	108

รูปที่ 5.19 คลื่นที่ตรวจวัดได้.....	109
รูปที่ 5.20 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว	109
รูปที่ 5.21 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน	109
รูปที่ 5.22 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน	109
รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่มรอย เลื่อนเดี่ยว, $\rho = 0.02048$	110
รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน, $\rho = 0.68712$	110
รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน, $\rho = 0.96329$	110
รูปที่ 5.26 ขั้นตอนการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน	112
รูปที่ 5.27 ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริงเมื่อมีการแปรผันตัวคุณขยาย คลื่นจากแบบจำลอง.....	113
รูปที่ 6.1 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เลนเนื่องจากรอยเลื่อน.....	114
รูปที่ 6.2 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ	115
รูปที่ 6.3 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	118
รูปที่ 6.4 ความสูงคลื่น ณ สถานีสุรินทร์	119
รูปที่ 6.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ 119	
รูปที่ 6.6 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ 120	
รูปที่ 6.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ 120	
รูปที่ 6.8 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 3.....	121
รูปที่ 6.9 ตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งตรงกับรอยเลื่อนขนาด หนึ่งหน่วย.....	122
รูปที่ 6.10 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ	123
รูปที่ 6.11 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	125
รูปที่ 6.12 ความสูงคลื่น ณ สถานีราชาน้อย	126
รูปที่ 6.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่างๆ.....	127
รูปที่ 6.14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่างๆ.....	127

รูปที่ 6.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่าง ๆ.....	128
รูปที่ 6.16 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 2.....	128
รูปที่ 6.17 ตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งไม่ตรงกับรอยเลื่อน ขนาดหนึ่งหน่วย.....	130
รูปที่ 6.18 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ.....	131
รูปที่ 6.19 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ.....	133
รูปที่ 6.20 ความสูงคลื่น ณ สถานีราชาน้อย.....	134
รูปที่ 6.21 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่าง ๆ.....	134
รูปที่ 6.22 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่าง ๆ.....	135
รูปที่ 6.23 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำ ต่าง ๆ.....	135
รูปที่ 6.24 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 2.....	136

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อวันอาทิตย์ที่ 26 ธันวาคม 2547 เวลา 00:58:53 (UTC) ได้เกิดแผ่นดินไหว ขนาด 9.0 ซึ่งจุดกำเนิดอยู่ในมหาสมุทรอินเดีย นอกชายฝั่งทิศตะวันตกของเกาะสุมาตรา ทำให้มีผู้สูญหาย และเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเวลานั้นยังขาดระบบการเตือนภัยสึนามิ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความสูญเสียดังกล่าวควรมีระบบการเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพ

การพยากรณ์สึนามิโดยทั่วไปอาศัยฐานข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว ที่มีขนาดและตำแหน่งต่างๆ กับเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นโดยการคำนวณจากแบบจำลองสึนามิ และเหตุการณ์ที่วิเคราะห์ไว้ล่วงหน้า เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้นจะทำการค้นหาฐานข้อมูลความสูงคลื่นและเวลาที่เดินทางถึงสถานที่ต่างๆ จากตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวนั้นๆ เพื่อนำมาเตือนภัย การหาขนาดและตำแหน่งของแผ่นดินไหวนั้นสามารถหาได้โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากสถานีวัดต่างๆ และใช้เวลาเพียงไม่กี่นาทีก็สามารถหาตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวได้อย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม กลไกและพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของแผ่นดินไหวอาจจะต้องใช้เวลามากกว่าจะหาค่าได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการสร้างฐานข้อมูลเพื่อการเตือนภัยนั้นมักจะกำหนดพารามิเตอร์ของแผ่นดินไหวให้เป็นค่าที่วิกฤติที่สุด โดยเฉพาะมุมเลื่อนถล่ม (Slip angle) มักจะกำหนดไว้ที่ 90 องศาซึ่งเป็นมุมวิกฤติ และมุมเลื่อนถล่มนี้ยังส่งผลโดยตรงกับความสูงของสึนามิ แต่อย่างไรก็ตามทุกครั้งที่เกิดแผ่นดินไหวนั้น ไม่ได้เกิดการเลื่อนถล่มที่มุม 90 องศาเสมอไป ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของรอยเลื่อน ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันการเกิดสึนามิจึงใช้ข้อมูลระดับน้ำ ณ สถานีวัดน้ำกลางทะเลประกอบ เพื่อให้การพยากรณ์สึนามิมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้คลื่นที่วัดได้ขณะเกิดสึนามิเพื่อทำนายตำแหน่งและการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของรอยเลื่อนจากสถานีวัดน้ำกลางทะเล โดยงานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ การใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ในการพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน และการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนด้วยหลักการซ้อนทับ

โดยโครงข่ายประสาทเทียม มีความโดดเด่นที่สามารถจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีความซับซ้อน และมีปริมาณข้อมูลมากๆ ได้ และสามารถแยกศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งโดยเฉพาะได้ ซึ่งแบบจำลองที่ถูกฝึกแล้วนั้นสามารถที่จะใช้หาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยภายในเวลาที่รวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแยกการศึกษาระหว่างการพยากรณ์หาตำแหน่งของรอยเลื่อน กับการหาค่าการเคลื่อนตัวที่ใช้สึนามิที่วัดมาได้ออกจากกัน

โดยการพยากรณ์หาตำแหน่งของรอยเลื่อนใช้โครงข่ายใยประสาทเทียม เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางของคลื่นกับตำแหน่งของรอยเลื่อน และใช้หลักการซ้อนทับในการหาค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาค้นคืนสึนามิเนื่องจากรอยเลื่อนบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา
- 2) เพื่อพยากรณ์พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนด้วยวิธีแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม และหลักการซ้อนทับ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) ทำการศึกษารอยเลื่อนที่มีศักยภาพก่อให้เกิดสึนามิ ภายในบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกสุมาตราตั้งแต่ละติจูด 10 องศาใต้ ถึง 18 องศาเหนือ และลองจิจูด 87 องศาตะวันออก ถึง 110 องศาตะวันออก
- 2) ใช้แบบจำลองสึนามิ TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami) ที่ใช้ทฤษฎีคลื่นน้ำตื้นเชิงเส้นในระบบพิกัดทรงกลมสำหรับสึนามิระยะไกล (Linear shallow wave in spherical coordinate) และทฤษฎีคลื่นน้ำตื้นแบบไม่เชิงเส้นในระบบพิกัดฉาก (Non-linear shallow wave in cartesian coordinate) สำหรับสึนามิระยะใกล้

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1) ฐานข้อมูลผลตอบแทนของสึนามิจากแหล่งกำเนิดบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา
- 2) แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดจากข้อมูลสถานีวัดน้ำ
- 3) เป็นแนวทางในการพัฒนาการพยากรณ์สึนามิแบบเรียลไทม์ (Real-time tsunami forecasting)

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองสึนามิ (Tsunami modeling)

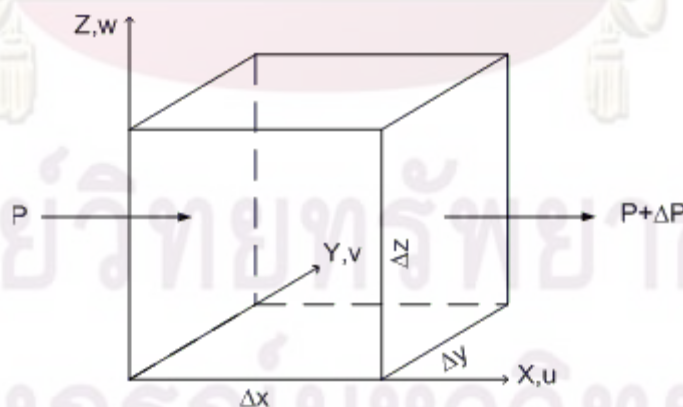
ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายสึนามิซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยสมการคลื่นน้ำตื้นนั้นมีสมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์ดังนี้ (Imamura และคณะ, 2006)

- 1) ไม่คำนึงผลของความเร่งในแนวตั้งของอนุภาคน้ำ เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และความเร็วในแนวตั้งก็มีค่าน้อยมากเช่นกัน
- 2) ความเร็วของคลื่นในทิศทาง x และ y ไม่ขึ้นกับความลึก โดยความเร็วในแนวระนาบเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยสม่ำเสมอตลอดความลึก (Uniform velocity distribution)
- 3) พิจารณามวลน้ำไม่สามารถบีบอัดได้ (Incompressible) และไม่มี ความหนืดในระบบ (Non-viscous fluid)

2.1.1 สมการการเคลื่อนที่ (Motion equation)

พิจารณาอนุภาคน้ำมีขนาดเล็กวัดความกว้าง (Δx) ความยาว (Δy) ความสูง (Δz) ดังรูปที่ 2.1 กำหนดรูปเวกเตอร์พิกัดฉากของสนามความเร็วที่แปรผันกับระยะทางและเวลาเท่ากับ \vec{V} ซึ่งเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทาง

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 มวลน้ำในระบบพิกัดฉาก

โดยที่ u คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง x
 v คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง y
 w คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง z

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$F = ma = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) \quad (2.2)$$

โดยที่ F คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อมวลน้ำ
 m คือ น้ำหนักของมวลน้ำ
 a คือ ความเร่งของมวลน้ำ
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ
 $\frac{D\vec{V}}{Dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา

พิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง x

$$F_x = ma = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{Du}{Dt} \right) \quad (2.3)$$

พิจารณาความเร็วของของไหล u ที่มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง x ในเวลา t จะสามารถหาอนุพันธ์ (Derivative) ของความเร็วในเทอมของการเปลี่ยนแปลงระยะทางและเวลาได้ดังสมการ

$$\frac{Du}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t) - u(x, y, z, t)}{\Delta t} \quad (2.4)$$

สิ่งแรกที่จะพิจารณาคือการคำนวณอนุพันธ์ย่อย $\frac{Df}{Dt}$ เมื่อ $f(x, t)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาและระยะทาง x สามารถเขียนขยายในเทอมได้ดังสมการ

$$\frac{Df}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, t + \Delta t) - f(x, t)}{\Delta t} \quad (2.5)$$

จากพื้นฐานของแคลคูลัสจะได้

$$f(x + \Delta x, t + \Delta t) \approx f(x, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \quad (2.6)$$

ซึ่งสมการที่ (2.6) ได้มาจากการกระจายของเทย์เลอร์ (Taylor's expansion) แทนสมการที่ (2.6) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$\frac{Df}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(x, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t - f(x, t)}{\Delta t} = \frac{\partial f}{\partial x} \left[\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \right] + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.8)$$

แทน $f(x, t)$ ด้วย $u(x, y, z, t)$

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\frac{Du}{Dt} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.3) ได้

$$F_x = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.11)$$

แรงกระทำ F_x ที่ทำให้มวลน้ำเกิดการเคลื่อนตัว ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแรงที่เกิดจากแรงดันน้ำในทิศทาง x โดยสมมติให้แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) กระทำในทิศทาง z ดังนั้นในทิศทาง x จึงไม่พิจารณาผลของแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ผลของแรงเนื่องจากการหมุนของโลก (Coriolis forces) สามารถที่จะเพิ่มเข้าภายหลังได้ ส่วนแรงเฉือนที่กระทำบนอนุภาคของของไหลนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นนั้นเกิดจากผลต่างของแรงดัน Δp ระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังของมวลน้ำในทิศทาง x กระทำบนพื้นที่เท่ากับ $\Delta y \Delta z$ ซึ่งแรงสุทธิจึงเท่ากับ

$\Delta p \Delta y \Delta z$ และแรงดันยังขึ้นกับ x, y, z และ t อีกด้วย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำเทียบกับระยะทางในทิศทาง x จึงเขียนได้ดังนี้

$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \quad (2.12)$$

ดังนั้นค่าแรงสุทธิในทิศทาง x คือ

$$F_x = \Delta p \Delta y \Delta z = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.13)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.11) นั้นเท่ากันซึ่งจะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันพิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง y จะได้สมการในลักษณะเดียวกันกับการพิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง x ดังนั้นจึงได้

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.16)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง z พิจารณาแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกหรือน้ำหนักของมวลน้ำ (w) รวมด้วยซึ่งเป็นในแรงกระทำ F_z ในแนวตั้ง จะได้สมการการเคลื่อนที่ในทิศทาง z ดังนี้

$$\text{weight} = \rho (\Delta x \Delta y \Delta z) g \quad (2.17)$$

$$F_z = \frac{\partial p}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y + \rho \Delta x \Delta y \Delta z g \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) = \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.15), (2.16) และ (2.20) เรียกว่า สมการออยเลอร์ (Euler's equation) ใช้สำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลที่บีบอัดไม่ได้ และความหนืดในระบบมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าแรงหนืด (Viscous forces) ไม่ใช้ปัจจัยที่สำคัญสำหรับปัญหาคลื่นน้ำยาว (Long water wave problems) ยกเว้นในบริเวณที่คลื่นเข้าสู่แนวชายฝั่ง

จากสมมติฐานของคลื่นน้ำตื้น (Shallow water wave) สำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ของสื่อนามิสมมติความเร่งในแนวดิ่งมีค่าน้อยมากดังนั้น ฝั่งขวาของสมการที่ (2.20) จึงเท่ากับศูนย์นั่นคือ

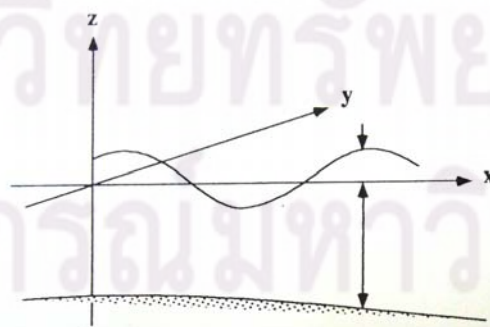
$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.22)$$

จะเห็นได้ว่าความดันนั้นแปรผันตรงกับความลึกถ้ามวลน้ำนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และในการคำนวณการแพร่กระจายของสื่อนามินั้นจะเริ่มจากตำแหน่ง x_0, y_0 ไปสู่ตำแหน่ง x, y ใดๆ ซึ่งจะได้ความสูงของน้ำ (Amplitude) โดยแทนด้วย $\eta(x, y, t)$ เพราะฉะนั้นความดัน ณ ความลึก z ใดๆ จึงเท่ากับ

$$p(x, y, z, t) = -\int \rho g dz + \text{Constant} = -\rho g [\eta(x, y, t) + z] \quad (2.23)$$

$$\partial p = -\rho g \partial \eta \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการคลื่นน้ำตื้น (Imamura, 1996)

ทำการแก้สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งโดยแทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.15) และ (2.16) จะได้

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad (2.25)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (2.26)$$

จะเห็นได้ว่าสมการทั้งสองนั้นหาคำตอบได้ยาก เนื่องจากเป็นสมการคู่ควบ (Coupled equations) อีกทั้งยังมีตัวไม่ทราบค่าถึง 4 ตัวซึ่งแต่ละตัวนั้นยังอยู่ในเทอมของ x, y, z และ t แต่อย่างไรก็ตามสมการทั้งสองนั้นคือความเร็วเฉลี่ยตลอดความลึก นั้นหมายความว่าความเร็วในทิศทาง x และ y จึงไม่แปรผันตามความลึก ซึ่งเป็นสมมติฐานของคลื่นน้ำตื้น และเนื่องจากคลื่นมีคาบยาวการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวดิ่งจึงเข้าใกล้ศูนย์เทอมที่ 3 ของสมการที่ (2.25) และ (2.26) จึงเป็นศูนย์ ดังนั้นจะเหลือตัวไม่ทราบค่าเพียง 3 ตัวคือ u, v, η ซึ่งสมการที่ (2.25) และ (2.26) สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.27)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.28)$$

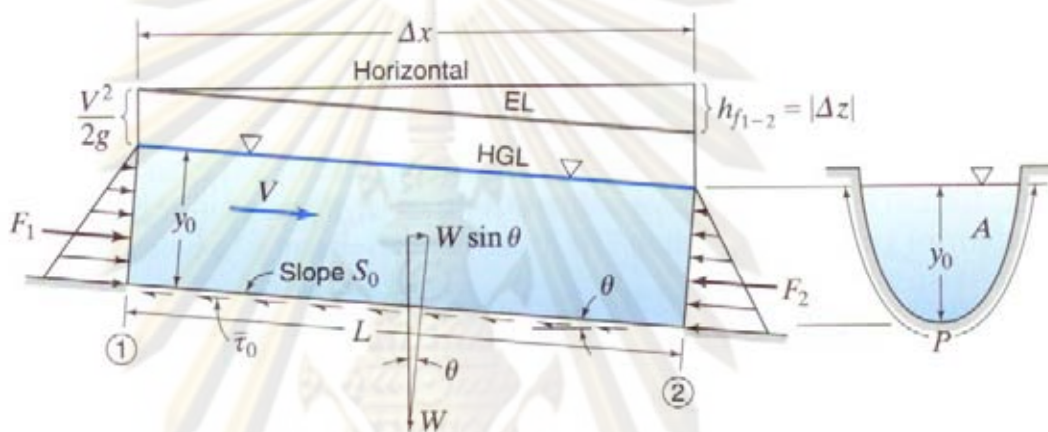
2.1.2 แรงเสียดทานท้องน้ำ (Bottom friction force)

สำหรับการพิจารณาผลของแรงเสียดทานพื้นท้องน้ำ ค่าแรงสุทธิในแต่ละแกนจะรวมแรงเสียดทานพื้นท้องน้ำดั่งนั้นเทอมขวาของสมการที่ (2.13) จะเป็น $\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z + \tau_x \Delta x \Delta y$ สำหรับการไหลในแกน x ส่วนในแกน y กระทำเช่นเดียวกัน จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่คิดผลของแรงเสียดทานพื้นท้องน้ำเป็น

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (2.29)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (2.30)$$

ในเทอมของแรงเสียดทานพื้นท้องน้ำ $\frac{\tau_x}{\rho}$ และ $\frac{\tau_y}{\rho}$ สำหรับการไหลในแกน x และแกน y แรงเสียดทานพื้นท้องน้ำสัมพันธ์กับค่าความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's roughness) และสามารถอธิบายได้โดยการวิเคราะห์การไหลแบบคงที่ในทางน้ำเปิด (Steady open channel flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การไหลแบบคงที่ในทางน้ำเปิด (Joseph และ John, 2002)

เมื่อพิจารณาการไหลในทางน้ำเปิดภายใต้ปริมาตรควบคุมที่มีความยาว Δx ที่หน้าตัดและความเร็วคงที่ ซึ่งมีเส้นพลังงาน (Energy line, EL) ความลาดชันของระดับผิวน้ำ (Water surface slope, S_w) และความลาดชันของท้องน้ำ (Channel bed slope, S_0) เท่ากัน นั่นคือ $S_w = S_0 = \frac{-\Delta z}{\Delta x} = \tan \theta$ และ $S = \frac{h_f}{L} = \sin \theta$ เมื่อ θ คือมุมเอียงของท้องน้ำเมื่อเทียบกับแนวระดับ, h_f คือการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน ทั้งนี้ถ้าท้องน้ำมีความลาดเอียงน้อยๆ แล้ว $\sin \theta \approx \tan \theta$ และ $S_w = S_0 \approx S$ พิจารณาผลรวมแรงตามทางน้ำ ผลของแรงดันน้ำสถิต (Hydrostatic force) F_1 และ F_2 สมดุลซึ่งกันและกัน จะมีเฉพาะแรงในทิศทางการเคลื่อนที่นั่นคือองค์ประกอบแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง กับแรงต้านโดยความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่กระทำบนเส้นขอบเปียกของหน้าตัด จะได้

$$W \sin \theta = \bar{\tau}_0 PL \quad (2.31)$$

$$\gamma AL \sin \theta = \bar{\tau}_0 PL \quad (2.32)$$

โดยที่ W คือมวลของน้ำ, $\bar{\tau}_0$ คือความเค้นเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ $f\rho\frac{v^2}{2}$ ได้มาจากการวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) โดยสมมติให้ $\bar{\tau}_0$ เป็นฟังก์ชันของ ρ, μ, v และ R_h และเลือก ρ, v และ R_h เป็นตัวแปรหลัก เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล, μ คือความหนืดของของไหล, v คือความเร็วของการไหล, R_h คือรัศมีไฮดรอลิก (Hydraulic radius) ซึ่งเท่ากับ $\frac{A}{P}$, f คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, P คือความยาวของเส้นขอบเปียก และ γ คือน้ำหนักจำเพาะของน้ำ และจัดรูปสมการที่ (2.32) ใหม่เป็น

$$\gamma A \frac{h_f}{L} = \bar{\tau}_0 P \quad (2.33)$$

$$h_f = \frac{\bar{\tau}_0 PL}{\gamma A} \quad (2.34)$$

แล้วแทนค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ยลงในสมการที่ (2.34)

$$h_f = f\rho\frac{v^2}{2}\frac{PL}{\gamma A} \quad (2.35)$$

แต่ $\gamma = \rho g$ และ $R_h = \frac{A}{P}$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.35) จะได้

$$h_f = f\rho\frac{v^2}{2g}\frac{L}{R_h} \quad (2.36)$$

หรือ
$$v = \sqrt{\frac{2gR_h S}{f}} \quad (2.37)$$

สมการที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลในทางน้ำเปิดสมการหนึ่งคือ สมการของแมนนิง (Manning's formula) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณการไหลในคลื่นน้ำตื้นได้เช่นเดียวกัน สมการของแมนนิง เขียนอยู่ในรูป

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2.38)$$

โดยที่ n คือสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's roughness coefficient) จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.37) เท่ากับสมการที่ (2.38) และสามารถจัดรูปของสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงได้ดังนี้

$$f = \frac{2gn^2}{R_h^{1/3}} \quad (2.39)$$

สำหรับการไหลของคลื่นน้ำตื้น อัตราความกว้างต่อความลึกมีค่าสูงมาก สมมุติหน้าตัดการไหลเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างมาก รัศมีชลศาสตร์จะเท่ากับ $\frac{D}{1+2D/b}$ นั่นคือถ้า $\frac{b}{D} \rightarrow \infty$ จะทำให้ $R_h \approx D$ สมการที่ (2.39) จะเป็น

$$f = \frac{2gn^2}{D^{1/3}} \quad (2.40)$$

แทนสมการที่ (2.40) ลงในความเค้นเฉือนเฉลี่ย $\tau = f\rho \frac{v^2}{2}$ จะได้

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{1/3}} v^2 \quad (2.41)$$

สมการที่ (2.41) เป็นการไหลในทิศทางเดียว สำหรับการไหลสองทิศทางจะได้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_x}{\rho} &= \frac{gn^2}{D^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \frac{\tau_y}{\rho} &= \frac{gn^2}{D^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

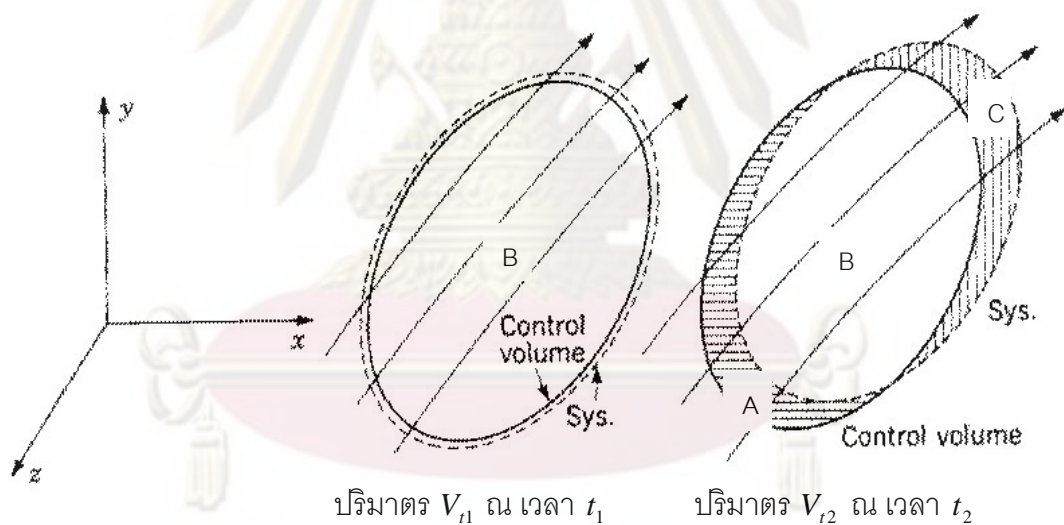
2.1.3 สมการการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

สำหรับการเคลื่อนที่ของของไหล สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งผ่านตำแหน่งที่กำหนดในสนามการไหลที่ไม่แปรเปลี่ยนไปกับของไหล ทั้งนี้เพราะเมื่อของไหล

เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องมีการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเลื่อนไหลและการหมุน ประกอบกันไปด้วย ดังนั้นวิธีการอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลสามารถทำได้โดยการพิจารณาเฉพาะตำแหน่งที่กำหนดเท่านั้นซึ่งเรียกว่าวิธีของออยเลอร์

(Eulerian approach) หรือวิธีการของปริมาตรควบคุม (Control volume approach) ปริมาตรควบคุมคือขอบเขตปริมาตรจำกัดในสนามการไหลที่กำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาคสมบัติการไหลเฉพาะในปริมาตรควบคุมเท่านั้น

พิจารณารูปที่ รูปที่ 2.4 แสดงปริมาตรของไหลในสนามการไหลเท่ากับ V_{11} ที่เวลา t_1 เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_2 (เมื่อ $t_2 = t_1 + \Delta t$) ของไหลจะเคลื่อนที่จากเดิมไปและมีปริมาตร V_{22} สมมุติให้ปริมาตรทั้งหมดแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ A, B, และ C โดยที่ปริมาตร B จะเป็นส่วนคาบเกี่ยวอยู่กับทั้ง A และ C (B เป็นส่วนหนึ่งของทั้ง V_{11} และ V_{22}) ในที่นี้สมมุติว่าปริมาตรควบคุมคือ V_{11} ซึ่งอยู่กับที่ในสนามการไหลโดยมีของไหลไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุมนี้ กล่าวคือช่วงเวลา Δt จะมีของไหลที่เวลา t_1 ไหลออกไปเป็นปริมาตร C ในขณะที่เดียวกันก็มีของไหลปริมาตร A ไหลเข้ามาแทนที่ในปริมาตรควบคุม



รูปที่ 2.4 การไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (Streeter และ Wylie, 1979)

ถ้าให้ X เป็นปริมาณคุณสมบัติทั้งหมดของการไหลคือมวลสาร โมเมนตัมและพลังงานของการไหล และให้ x เป็นปริมาณคุณสมบัติต่อหน่วยมวลสารของการไหล ดังนั้น

$$X = \int x \rho dV \quad (2.43)$$

ปริมาณ X ทั้งหมดในปริมาตร V_{t_1} (ที่เวลา t_1) ประกอบด้วยปริมาณ $X_{A_{t_1}}$ กับ $X_{B_{t_1}}$ โดยที่ $X_{A_{t_1}}$ คือปริมาณคุณสมบัติของ X ที่อยู่ในปริมาตร A ที่เวลา t_1 ในทำนองเดียวกัน ปริมาณ X ทั้งหมดในปริมาตร V_{t_2} (ที่เวลา t_2) ประกอบด้วยปริมาณ $X_{B_{t_2}}$ กับ $X_{C_{t_2}}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณคุณสมบัติ X เมื่อของไหลเคลื่อนที่จากปริมาตร V_{t_1} ไปสู่ V_{t_2} ภายในช่วงเวลา Δt ได้ดังนี้

$$\Delta X = X_{B_{t_2}} - X_{B_{t_1}} + X_{C_{t_2}} - X_{A_{t_1}} \quad (2.44)$$

จัดรูปสมการใหม่โดยการบวกและลบด้วยปริมาณ $X_{A_{t_2}}$ จะได้

$$\Delta X = (X_{B_{t_2}} + X_{A_{t_2}}) - (X_{B_{t_1}} + X_{A_{t_1}}) + X_{C_{t_2}} - X_{A_{t_2}} \quad (2.45)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลง X ในระบบคือ

$$\left. \frac{\Delta X}{\Delta t} \right|_{\text{sys}} = \frac{X_{(A+B)t_2} - X_{(A+B)t_1}}{\Delta t} + \frac{X_{C_{t_2}} - X_{A_{t_2}}}{\Delta t} \quad (2.46)$$

เมื่อต้องการหาอัตราการเปลี่ยนแปลง X ณ ช่วงเวลาใดๆ ทำได้โดยให้ $\Delta t \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{dX}{dt} \quad (2.47)$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X_{(A+B)t_2} - X_{(A+B)t_1}}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X_{C_{t_2}} - X_{A_{t_2}}}{\Delta t} \quad (2.48)$$

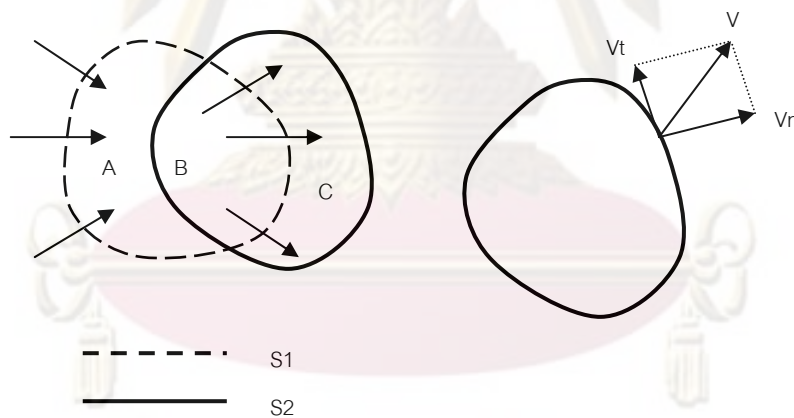
เทอมแรกของด้านขวามือในสมการที่ (2.48) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของ X ในปริมาตรควบคุม (A+B) หรือเป็นอัตราที่ X คงเหลืออยู่ในปริมาตรควบคุมนั่นเอง ถ้าให้สัญลักษณ์ CV แทนปริมาตรควบคุม จะได้

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X_{(A+B)t_2} + X_{(A+B)t_1}}{\Delta t} = \left. \frac{\partial X}{\partial t} \right|_{CV} \quad (2.49)$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} x \rho dV \quad (2.50)$$

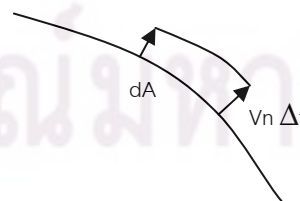
ขั้นตอนต่อไป คือหาสมการของของเทอมที่สองของสมการที่ (2.48) จะเห็นว่า X_{Cr2} คือปริมาณของ X ที่เคลื่อนที่ออกจากปริมาตรควบคุมผ่านพื้นผิว S_2 ภายในช่วงเวลา Δt และ X_{Ar2} คือปริมาณของ X ที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุมผ่านพื้นผิว S_1 ในช่วงเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) เมื่อพิจารณาพื้นที่เล็กๆ dA บนพื้นผิวของปริมาตรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) ความเร็วในการไหลผ่านพื้นที่ dA คือ v โดยมี v_n และ v_t เป็นความเร็วประกอบในแนวตั้งฉากและสัมผัสกับพื้นที่ dA ตามลำดับ จะเห็นว่าความเร็วในแนวสัมผัสมิได้เป็นทิศทางที่จะทำให้ของไหลเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ dA มีเพียงความเร็วในแนวตั้งฉากเท่านั้นที่ส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของไหลออกจาก dA เมื่อขยายภาพของ dA ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีพื้นที่ส่วนที่แรเงาแสดงถึงปริมาตรควบคุมภายในช่วงเวลา Δt มีขนาดเท่ากับ $dA(v_n \Delta t)$ และมีปริมาณมวลสารเป็น $(\rho dA v_n \Delta t)$ ดังนั้นปริมาณย่อย dX คือ

$$dX = x \rho dA v_n \Delta t \quad (2.51)$$



(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 พื้นผิวของปริมาตรควบคุม



รูปที่ 2.6 ภาพขยาย dA

และอัตราการเปลี่ยนแปลง X ผ่านพื้นที่ dA คือ

$$\frac{dX}{\Delta t} = x\rho v_n dA \quad (2.52)$$

ดังนั้น ทั้งสองค่าในเทอมที่สองด้านขวามือของสมการที่ (2.48) จะอยู่ในรูปของ

$$X_{Ct2} = t \int_{S2} x\rho v_n dA \quad (2.53)$$

และ

$$X_{At2} = -t \int_{S1} x\rho v_n dA \quad (2.54)$$

เมื่อรวมกันจะได้

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{X_{Ct2} - X_{At2}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{t \int_{S2} x\rho v_n dA + t \int_{S1} x\rho v_n dA}{\Delta t} \quad (2.55)$$

$$= \int_{(S1+S2)} x\rho v_n dA \quad (2.56)$$

$$= \int_{CS} x\rho v_n dA \quad (2.57)$$

ทั้งนี้เพราะ $(S1+S2)$ คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของปริมาตรควบคุม ซึ่งเรียกว่าพื้นผิวของปริมาตรควบคุม (Control surface, CS) แทนค่าสมการที่ (2.50) และ (2.57) ลงในสมการที่ (2.48) จะได้

$$\left. \frac{dX}{dt} \right|_{\text{sys}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} x\rho dV + \int_{CS} x\rho v_n dA \quad (2.58)$$

สมการที่ (2.58) แสดงความสัมพันธ์ในการแปลงจากอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหล X ที่เกิดขึ้นในระบบมาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลง X ภายในปริมาตรควบคุม ซึ่งหลักการปริมาตร

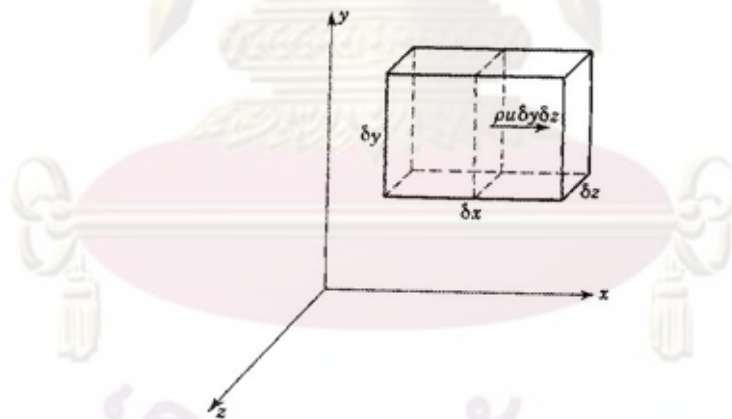
ควบคุมนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาสมการการอนุรักษ์มวล ซึ่งกล่าวว่า ปริมาณมวลสารในระบบจะคงที่ตลอดเวลาไม่มีการสูญหาย นั่นคือ

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.59)$$

ถ้าให้ $X = m$ ซึ่ง m คือปริมาณมวลสารของระบบ ดังนั้น x คือปริมาณมวลสารต่อหนึ่งหน่วยมวลสาร หรือ $x = 1$ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho v_n dA = 0 \quad (2.60)$$

สมการที่ (2.60) สามารถอธิบายสมการสภาพต่อเนื่องในปริมาตรควบคุมจะมีอัตราการเพิ่มของมวลสารเท่ากับปริมาณมวลสารสุทธิที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม เมื่อนำสมการที่ (2.60) มาประยุกต์ใช้กับปริมาตรควบคุมสามมิติขนาด $dx dy dz$ ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 2.7 โดยมีพิกัดศูนย์กลางอยู่ที่ (x, y, z) และมีความเร็วประกอบตามแนวแกน x, y และ z เป็น u, v และ w ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 ปริมาตรควบคุมสามมิติ (Streeter และ Wylie, 1979)

ถ้าพิจารณาการไหลออกจากระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x ในทิศทาง x จะได้อัตราการไหลของมวลสารออกจากปริมาตรควบคุมทางด้านขวา เท่ากับ $\left(\rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) \frac{dx}{2} \right) dy \cdot dz$ โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล ถ้าสมมุติว่า ρ และ u มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั่วสนามการไหล ในที่นี้ $(\rho u dy dz)$ คือปริมาณมวลสารที่ไหลผ่านจุดศูนย์กลางของระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x ในขณะเดียวกัน

อัตราการไหลของมวลสารเข้าสู่ปริมาตรควบคุมทางด้านซ้ายคือ $\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2}\right) dy \cdot dz$ ดังนั้น อัตราการไหลสุทธิออกจากปริมาตรควบคุมในทิศทาง x คือ อัตราการไหลออกลบด้วยอัตราการไหลเข้า ซึ่งเท่ากับ $\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz$ สำหรับอัตราการไหลออกสุทธิจากปริมาตรควบคุมในทิศทาง y และ z คือ $\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx \cdot dy \cdot dz$ และ $\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz$ ตามลำดับ เมื่อรวมทั้งสามแกนจะได้อัตราการไหลสุทธิออกจากปริมาตรควบคุมเท่ากับ $\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right) dx \cdot dy \cdot dz$ ปริมาณนี้คือเทอมที่สองของสมการที่ (2.60) ส่วนเทอมแรกคือ $\frac{\partial \rho}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz$ เมื่อรวมทั้งสองเทอมเข้าด้วยกัน และหารตลอดด้วยปริมาตรของปริมาตรควบคุมแล้วให้ $dx \cdot dy \cdot dz \rightarrow 0$ จะได้สมการสภาพต่อเนื่อง ณ จุดใด ๆ คือ

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.61)$$

สำหรับการไหลที่ไม่สามารถบีบอัดตัวได้ (incompressible flow) $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.61) จะเป็น

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.63)$$

สมการที่ (2.61) ถึง (2.63) คือสมการสภาพต่อเนื่องในการไหล 3 มิติ สำหรับสมการคลื่นน้ำตื้นนั้น พิจารณาการไหล 2 มิติ เทอมที่สามด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.63) สามารถตัดทิ้งได้ นั่นคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.64)$$

2.1.4 สมการคลื่นน้ำตื้นในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Shallow water equations in cartesian coordinate)

เมื่ออธิบายสมการข้างต้นในเทอมของอัตราการไหลออกในแต่ละทิศทางได้โดยให้ M และ N แทนอัตราการไหลออกในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ซึ่งจะได้

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD, N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD \quad (2.65)$$

แทนสมการที่ (2.65) ลงในสมการที่ (2.29) ถึง (2.30) และสมการที่ (2.64) จะได้เป็น

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.68)$$

โดยที่	D	คือ	ความสูงของน้ำทั้งหมด เท่ากับ ความลึก + ความสูงคลื่น
	M	คือ	อัตราการไหลของน้ำทั้งหน้าตัดในทิศทาง x
	N	คือ	อัตราการไหลของน้ำทั้งหน้าตัดในทิศทาง y
	g	คือ	ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก
	n	คือ	ความขรุขระของแมนนิ่ง

สมการที่ (2.66) ถึง (2.68) เป็นสมการหลักสำหรับการแพร่กระจายสึนามิเมื่อคิดผลของแรงเสียดทานพื้นน้ำและไม่คิดผลของแรงเนื่องจากการหมุนของโลก ซึ่งเรียกว่า สมการคลื่นน้ำตื้นไม่เชิงเส้นในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสำหรับการจำลองสึนามิ

2.1.5 สมการคลื่นน้ำตื้นในระบบพิกัดทรงกลม (Shallow water equations in Spherical coordinate)

สำหรับการคำนวณสึนามิที่เคลื่อนที่ในระยะทางไกล (Far field tsunami) จะใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของสึนามิที่เดินทางข้ามมหาสมุทร นั่นคือหากตัดเทอมที่ไม่เชิงเส้นและเทอมของแรงเสียด

ทานของพื้นท้องน้ำในสมการที่ (2.66) และ (2.67) ออกก็จะได้สมการทฤษฎีคลื่นยาวเชิงเส้น (Linear long wave theory) นั่นคือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.71)$$

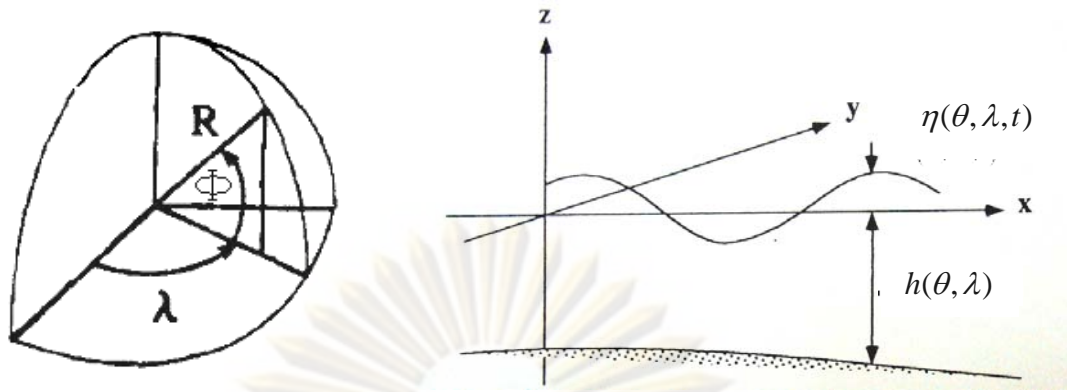
นอกจากนั้นจำเป็นต้องพิจารณาความโค้งของผิวโลก และผลของแรงโคริโอลิส (Coriolis force) Imamura และ Shuto, 1991 จึงเสนอสมการคลื่นน้ำตื้นเชิงเส้นในระบบพิกัดทรงกลม (Linear shallow water equations in spherical coordinates) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = fN \quad (2.72)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = -fM \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \quad (2.74)$$

โดยที่	η	คือ	ความสูงของน้ำ
	M	คือ	อัตราการไหลของน้ำที่หน้าตัดในทิศทาง θ (ละติจูด)
	N	คือ	อัตราการไหลของน้ำที่หน้าตัดในทิศทาง λ (ลองจิจูด)
	g	คือ	ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก
	f	คือ	สัมประสิทธิ์ของโคริโอลิส เท่ากับ $2\omega \sin \phi$ (ω คือความเร็วเชิงมุมของโลก เท่ากับ 7.292×10^{-5} เรเดียนต่อวินาที)



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ (2.72) ถึง (2.74), (Imamura, 1996)

2.2 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

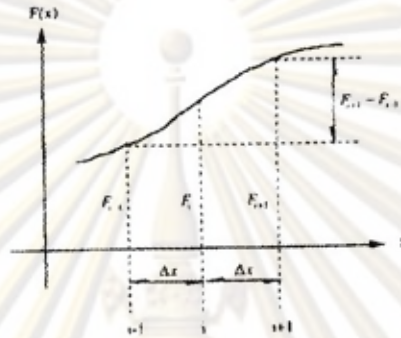
2.2.1 หลักการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับการทำแบบจำลองสึนามิ

Imamura และ Shuto, 1991 ได้พัฒนาการคำนวณเพื่อใช้ในการทำแบบจำลองวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) โดยใช้หลักการอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion series) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณพื้นฐานและได้รับการยอมรับมากที่สุด ในหลักการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์นั้นเป็นการแบ่งพื้นที่ที่สนใจออกเป็นพื้นที่เล็กๆและทำการวิเคราะห์ห้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการหาอนุพันธ์จึงสามารถหาค่าได้โดยการประมาณโดยใช้ผลของความแตกต่างของสมการผลต่างอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ จนกระทั่งปัจจุบันหลักการการคำนวณในลักษณะวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้มีผู้คิดค้นวิธีการอย่างมากมายซึ่งมีข้อควรระวังต่างๆ เช่นการแบ่งขนาดความกว้างของช่องกริด (Grid size), สภาวะความเสถียร (Stability condition) เพื่อให้ได้มาซึ่งผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ถูกต้อง (Exact solution) มากที่สุดโดยใช้สมการผลต่างอนุพันธ์ย่อย

หลักการการคำนวณผลต่าง (Difference numerical scheme) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่ใช้ในการคำนวณการทำแบบจำลองคลื่นยาวมี 3 หลักการได้แก่ วิธีการการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (Staggered leap-frog scheme), หลักการของ Crank-Nicholson และหลักการ 2 ขั้นตอน (Two-step) ของ Lax-Wendroff สำหรับแบบจำลองในการศึกษานี้ซึ่งเป็นแบบจำลอง TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami) ได้ใช้วิธีการการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดดโดยใช้หลักการที่ชัดเจน (Explicit scheme) ในการคำนวณและมีการประมาณอนุพันธ์อันดับที่ 2 ซึ่งเป็นหลักการที่ไม่ต้องการเวลาในการประมวลผลของหน่วยประมวลผลกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์มาก

2.2.2 วิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (Staggered leap-frog scheme)

วิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดดเป็นหลักการผลต่างกลาง (Central difference) ด้วยค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตัดปลาย (Truncation error) อันดับที่สอง ถ้าให้ $F(x)$ เป็นค่า ณ จุด Discrete ที่มีช่วงช่องว่าง (Spatial interval) Δx จากรูปที่ 2.9 จะได้ว่า $F\{(i-1)\Delta x\} = F_{i-1}$, $F(i\Delta x) = F_i$, $F\{(i+1)\Delta x\} = F_{i+1}$ โดยใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์กระจาย F_{i-1} และ F_{i+1} จะได้เป็น



รูปที่ 2.9 ผลต่างกลาง (Central difference) (UNESCO, 1997)

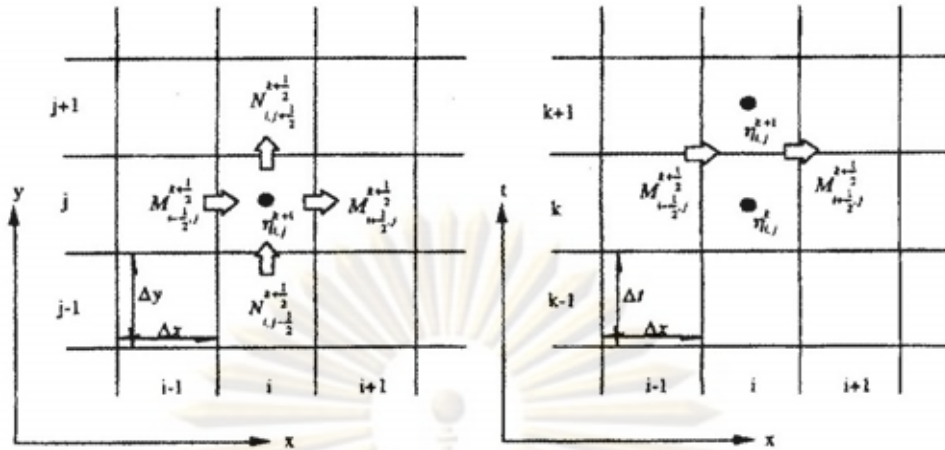
$$F_{i-1} = F_i - \Delta x \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right|_i - \frac{(\Delta x)^3}{6} \left. \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} \right|_i + \frac{(\Delta x)^4}{24} \left. \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} \right|_i + O(\Delta x^5) \quad (2.75)$$

$$F_{i+1} = F_i + \Delta x \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_i + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right|_i + \frac{(\Delta x)^3}{6} \left. \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} \right|_i + \frac{(\Delta x)^4}{24} \left. \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} \right|_i + O(\Delta x^5) \quad (2.76)$$

ซึ่งผลต่างกลางของอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งหาได้จากผลต่างของสองอนุกรมเทเลอร์ข้างบน นั่นคือ

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_i = \frac{1}{2\Delta x} [F_{i+1} - F_{i-1}] + O(\Delta x^2) \quad (2.77)$$

ประยุกต์ใช้หลักการผลต่างดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.77) กับสมการคลื่นน้ำตื้นไม่เชิงเส้นในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน เพื่อความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตวิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด จึงคำนวณค่า η คำนวณไม่พร้อมกันกับค่า M และ N ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดย i, j, k แทนการอธิบายตำแหน่งเชิงพื้นที่ x, y และเวลา t ตามลำดับ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ “การสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด”



รูปที่ 2.10 จุดสำหรับคำนวณในวิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (UNESCO, 1997)

2.2.3 สมการการอนุรักษ์มวล

สำหรับทั้งสามเทอมของสมการที่ (2.68) แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k] \quad (2.78)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left[M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} \left[N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right] \quad (2.80)$$

ดังนั้นหากทราบค่า $\eta_{i,j}^k$ จะมีตัวไม่ทราบค่า $\eta_{i,j}^{k+1}$ เท่านั้น จากนั้นแทนสมการที่ (2.78) ถึง (2.80) ลงในสมการที่ (2.68) แล้วจัดรูปใหม่เป็น

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right] \quad (2.81)$$

2.2.4 สมการการเคลื่อนที่

ขั้นตอนต่อไปทำการประมาณค่าสมการการเคลื่อนที่ โดยจะอธิบายแยกเป็นสามส่วนคือ การประมาณในเทอมเชิงเส้น การประมาณและเสถียรภาพของเทอมการพาของคลื่น (Convection term) และการประมาณเทอมความเสียดทาน

1) พิจารณาสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นในทิศทาง x ซึ่งสามารถเขียนได้โดย

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.82)$$

จะได้

$$M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} = M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} - gD_{i+\frac{1}{2},j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (2.83)$$

โดยที่ $D_{i+\frac{1}{2},j}^k$ คือความลึกของน้ำสุทธิ ซึ่งเท่ากับ

$$D_{i+\frac{1}{2},j}^k = h_{i+\frac{1}{2},j} + \eta_{i+\frac{1}{2},j}^k = h_{i+\frac{1}{2},j} + \frac{1}{2} [\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k] \quad (2.84)$$

กระทำเช่นเดียวกันในทิศทาง y จะได้

$$N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - gD_{i,j+\frac{1}{2}}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} [\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (2.85)$$

โดยที่ $D_{i,j+\frac{1}{2}}^k$ คือความลึกของน้ำสุทธิ ซึ่งเท่ากับ

$$D_{i,j+\frac{1}{2}}^k = h_{i,j+\frac{1}{2}} + \eta_{i,j+\frac{1}{2}}^k = h_{i,j+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} [\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j}^k] \quad (2.86)$$

2) การประมาณและเสถียรภาพของเทอมการพา (Convection term) เมื่อพิจารณาสมการการพา (Convection equation)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (2.87)$$

โดยที่ C คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความเร็ว เมื่อกำหนดจุดการคำนวณสำหรับวิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด โดยประยุกต์หลักการผลต่างข้างหน้า (Forward difference scheme) เพื่อหาอนุพันธ์

อันดับหนึ่งเทียบกับเวลา ผลต่างกลางสำหรับอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะได้ว่า

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left[F_{i+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - F_{i+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right] - O(\Delta t) \quad (2.88)$$

$$C \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{C}{2\Delta x} \left[F_{i+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right] + O(\Delta x^2) \quad (2.89)$$

แทนค่าสมการที่ (2.88) และ (2.89) ลงในสมการที่ (2.87) และจัดรูปให้อยู่ในตัวไม่ทราบค่า $F_{i+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}$ โดยเลือกปลายที่ $O(\Delta t)$ และ $O(\Delta x^2)$ จะได้ว่า

$$F_{i+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = F_{i+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - C \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[F_{i+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.90)$$

อย่างไรก็ตามหากตัดปลายที่อันดับสองเท่ากันสมการที่ (2.90) จะเทียบเท่าโดยปริยาย (Implicitly equivalent) กับสมการที่ (2.91) เมื่อความคลาดเคลื่อนตัดปลายที่ $O(\Delta x^2 + \Delta t^2)$ นั่นคือ

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} + C \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (2.91)$$

หาอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลาของสมการที่ (2.87) แล้วเขียนความสัมพันธ์ใหม่ด้วย

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(-C \frac{\partial F}{\partial x} \right) = C^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \text{ แทนลงในสมการที่ (2.91) จะได้ว่า}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C \frac{\partial F}{\partial x} = -\frac{\Delta t}{2} C^2 \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \quad (2.92)$$

ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของสมการจากสมการการแพร่ (Diffusion equation) โดยที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ติดลบแสดงถึงความไร้เสถียรภาพเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการปัดเศษสะสม ดังนั้นสมการที่ (2.90) จึงไร้เสถียรภาพ (Unstable difference scheme) ส่วนในผลต่างที่มีเสถียรภาพหาได้

จากการประมาณค่าแต่ละเทอมโดยวิธีผลต่างข้างหน้า (Forward difference) หรือข้างหลัง (Backward difference) นั่นคือ

$$C \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{C}{\Delta x} \left[F_{i+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - F_{i+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right] - \frac{\Delta x}{2} C \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + O(\Delta x^2) \quad (2.93)$$

$$C \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{C}{\Delta x} \left[F_{i+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right] + \frac{\Delta x}{2} C \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + O(\Delta x^2) \quad (2.94)$$

สมการที่ (2.93) และ (2.94) คือผลต่างข้างหน้าและข้างหลังตามลำดับ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับผลการคลาดเคลื่อนจากการตัดปลายลำดับที่สอง $O(\Delta x^2 + \Delta t^2)$ สำหรับผลต่างข้างหน้าและผลต่างข้างหลังคือ

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C \frac{\partial F}{\partial x} = -\frac{C}{2} (C\Delta t + \Delta x) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad (2.95)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{C}{2} (-C\Delta t + \Delta x) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad (2.96)$$

ดังนั้นเราจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่เสมือนเป็นบวก (เพื่อให้แน่ใจว่าการคำนวณจะมีเสถียรภาพ) ซึ่งจะใช้ผลต่างข้างหลังในกรณีที่ค่า C เป็นบวก และกรณีที่ค่า C ติดลบใช้ผลต่างข้างหน้า และค่า $\frac{\Delta x}{\Delta t} > C$ ด้วย อย่างไรก็ตามผลต่างนั้นจะเป็นไปตามทิศทางของการไหล ซึ่งก็วิธีการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดดที่มีค่าคลาดเคลื่อนจากการตัดปลายลำดับที่สอง ฉะนั้นในแต่ละเทอมในสมการที่ (2.66) ถึง (2.67) สามารถกระจายได้ด้วยหลักการที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\left(M_{i+\frac{3}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i+\frac{3}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{21} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{31} \frac{\left(M_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.97)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{11} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i+\frac{1}{2}, j+1 & i+\frac{1}{2}, j+1 \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j+1}} + v_{21} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i+\frac{1}{2}, j & i+\frac{1}{2}, j \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j}} + v_{31} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i+\frac{1}{2}, j-1 & i+\frac{1}{2}, j-1 \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j-1}} \right] \quad (2.98)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i+1, j+\frac{1}{2} & i+1, j+\frac{1}{2} \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+1, j+\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i, j+\frac{1}{2} & i, j+\frac{1}{2} \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i, j+\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{\begin{pmatrix} M^{k-\frac{1}{2}} & N^{k-\frac{1}{2}} \\ i-1, j+\frac{1}{2} & i-1, j+\frac{1}{2} \end{pmatrix}}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i-1, j+\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.99)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{12} \frac{\begin{pmatrix} N^{k-\frac{1}{2}} \\ i, j+\frac{3}{2} \end{pmatrix}^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i, j+\frac{3}{2}}} + v_{22} \frac{\begin{pmatrix} N^{k-\frac{1}{2}} \\ i, j+\frac{1}{2} \end{pmatrix}^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i, j+\frac{1}{2}}} + v_{32} \frac{\begin{pmatrix} N^{k-\frac{1}{2}} \\ i, j-\frac{1}{2} \end{pmatrix}^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i, j-\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.100)$$

โดยที่ $M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \begin{cases} \geq 0, \lambda_{11} = 0, \lambda_{21} = 1, \lambda_{31} = -1 \\ < 0, \lambda_{11} = 1, \lambda_{21} = -1, \lambda_{31} = 0 \end{cases}, N^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \begin{cases} \geq 0, v_{11} = 0, v_{21} = 1, v_{31} = -1 \\ < 0, v_{11} = 1, v_{21} = -1, v_{31} = 0 \end{cases}$

$$M^{k-\frac{1}{2}}_{i, j+\frac{1}{2}} \begin{cases} \geq 0, \lambda_{12} = 0, \lambda_{22} = 1, \lambda_{32} = -1 \\ < 0, \lambda_{12} = 1, \lambda_{22} = -1, \lambda_{32} = 0 \end{cases}, N^{k-\frac{1}{2}}_{i, j+\frac{1}{2}} \begin{cases} \geq 0, v_{12} = 0, v_{22} = 1, v_{32} = -1 \\ < 0, v_{12} = 1, v_{22} = -1, v_{32} = 0 \end{cases}$$

3) การประมาณเทอมความเสียดทาน เทอมนี้อาจสร้างความไร้เสถียรภาพขึ้นหากผลเฉลยเป็นผลเฉลยโดยชัดเจน (Explicit scheme) ในที่นี้จึงนำเสนอโดยวิธีปริยาย (Implicit scheme) ดังนี้

$$\frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{gn^2}{\left(D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \right)^{7/3}} \frac{1}{2} \left(M^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} - M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \right) \sqrt{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \right)^2 + \left(N^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2}, j} \right)^2} \quad (2.101)$$

$$\frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{gn^2}{\left(D^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}\right)^{7/3}} \frac{1}{2} \left(N^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} - N^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} \right) \sqrt{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(N^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} \right)^2} \quad (2.102)$$

สุดท้ายจะได้สมการคลื่นน้ำตื้นในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ที่ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนแบบกกระโดดสำหรับไดนามิกระยะใกล้ ดังนี้

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[M^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} - M^{k-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[N^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} - N^{k-\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.103)$$

$$M^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} =$$

$$\left[\begin{aligned} & \left(1 - \mu x^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} \right) M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{3}{2},j} \right)^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{3}{2},j}} + \lambda_{21} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} \right)^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}} + \lambda_{31} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j} \right)^2}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j}} \right] \\ & \frac{1}{1 + \mu x^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}} \left[\frac{\Delta t}{\Delta y} \left[v_{11} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1} N^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1} \right)}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1}} + v_{21} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} N^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} \right)}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}} + v_{31} \frac{\left(M^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-1} N^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-1} \right)}{D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-1}} \right] \right. \\ & \left. - g D^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k) \right] \end{aligned} \right] \quad (2.104)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} =$$

$$\frac{1}{1 + \mu y_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \left\{ \begin{aligned} & \left(1 - \mu y_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right) N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[v_{12} \frac{\left(N_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{22} \frac{\left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{32} \frac{\left(N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{\left(M_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{\left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{\left(M_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ & - g D_{i,j+\frac{1}{2}}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k) \end{aligned} \right\} \quad (2.105)$$

โดยที่ $\mu x_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{\left(D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^{7/3}} \sqrt{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}$

$$\mu y_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{\left(D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^{7/3}} \sqrt{\left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}$$

$$D_{i+\frac{1}{2},j}^k = \frac{1}{2} (D_{i+1,j}^k + D_{i,j}^k) = \frac{1}{2} (\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k) + h_{i+\frac{1}{2},j}$$

$$D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{4} (D_{i+1,j}^k + D_{i+1,j}^{k-1} + D_{i,j}^k + D_{i,j}^{k-1}) = \frac{1}{4} (\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i+1,j}^{k-1} + \eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1}) + h_{i+\frac{1}{2},j}$$

$$D_{i,j+\frac{1}{2}}^k = \frac{1}{2} (D_{i,j+1}^k + D_{i,j}^k) = \frac{1}{2} (\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j}^k) + h_{i,j+\frac{1}{2}}$$

$$D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(D_{i,j+1}^k + D_{i,j+1}^{k-1} + D_{i,j}^k + D_{i,j}^{k-1}) = \frac{1}{4}(\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j+1}^{k-1} + \eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1}) + h_{i,j+\frac{1}{2}}$$

4) ในส่วนสมการคลื่นนำต้นเชิงเส้นในระบบพิกัดทรงกลม ได้ดังนี้

$$\eta_{j,m}^{n+\frac{1}{2}} = \eta_{j,m}^{n-\frac{1}{2}} - R_1 \left[M_{j+\frac{1}{2},m}^n - M_{j-\frac{1}{2},m}^n + N_{j,m+\frac{1}{2}}^n \cos \theta_{m+\frac{1}{2}} - N_{j,m-\frac{1}{2}}^n \cos \theta_{m-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.106)$$

$$M_{j+\frac{1}{2},m}^{n+1} = M_{j+\frac{1}{2},m}^n - R_2 h_{j+\frac{1}{2},m} \left[\eta_{j+1,m}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{j,m}^{n+\frac{1}{2}} \right] + R_3 N' \quad (2.107)$$

$$N_{j,m+\frac{1}{2}}^{n+1} = N_{j,m+\frac{1}{2}}^n - R_4 h_{j,m+\frac{1}{2}} \left[\eta_{j+1,m}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{j,m}^{n+\frac{1}{2}} \right] + R_3 M' \quad (2.108)$$

โดยที่
$$N' = \frac{1}{4} \left[N_{j+1,m+\frac{1}{2}}^n + N_{j+1,m-\frac{1}{2}}^n + N_{j,m+\frac{1}{2}}^n + N_{j,m-\frac{1}{2}}^n \right]$$

$$M' = \frac{1}{4} \left[M_{j+1,m+\frac{1}{2}}^n + M_{j+1,m-\frac{1}{2}}^n + M_{j,m+\frac{1}{2}}^n + M_{j,m-\frac{1}{2}}^n \right]$$

$$R_1 = \frac{\Delta t}{R \cos \theta_m \Delta s}, \quad R_2 = \frac{g \Delta t}{R \cos \theta_m \Delta s}, \quad R_3 = 2 \Delta t \omega \sin \theta_m,$$

$$R_4 = \frac{g \Delta t}{R \Delta s}, \quad R_5 = 2 \Delta t \omega \sin \theta_{m+\frac{1}{2}}$$

ณ จุดที่ทำการคำนวณจะแทนทิศทาง (θ, λ, t) ด้วย (j, m, n) ความยาวของกริดในด้านละติจูดเท่ากับด้านลองจิจูด นั่นคือ $\Delta s = \Delta \theta = \Delta \lambda$ และ ω คือความเร็วเชิงมุมของโลก

สำหรับขนาดกริดเชิงพื้นที่นี้จะกำหนดให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของ Imamura number (I_m) โดยจะกำหนดให้มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

$$I_m = \Delta x / 2h\sqrt{1-K^2} \quad (2.109)$$

$$K = \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.110)$$

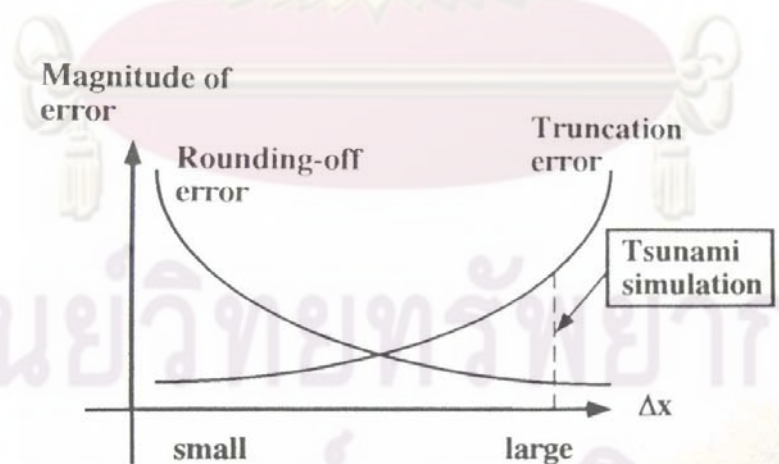
และพิจารณาตามเงื่อนไขของ CFL (Courant-Friedrichs-Levy condition) คือ

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{2gh_{\max}} \quad (2.111)$$

โดยที่	K	คือ	คอเรนต์นัมเบอร์ (Courant Number)
	h	คือ	ความลึกเฉลี่ยของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา
	h_{\max}	คือ	ความลึกมากที่สุดของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา
	Δt	คือ	ช่วงเวลาคำนวณ แต่ละรอบ

2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ

ค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่สำคัญเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุหลัก คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากการปัดเศษ (Rounding-off errors) และค่าคลาดเคลื่อนจากการตัดปลาย (Truncation errors) ค่าคลาดเคลื่อนจากการปัดเศษเกิดจากการจำกัดจำนวนจุดทศนิยมของตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้สำหรับการคำนวณ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนช่องกริดที่แบ่งไว้สำหรับการคำนวณ ส่วนค่าคลาดเคลื่อนจากการตัดปลายเกิดจากขั้นตอนการแปลงสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differentiation equations) ไปสู่ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลายสามารถแทนด้วย Δx^n ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ช่องกริดขนาดเล็กลงอาจทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากการตัดปลายลดลง แต่จะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากการปัดเศษให้มากขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation errors) กับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษ (Rounding-off errors) สำหรับขนาดความกว้างของช่องกริดขนาดต่างๆ (Imamura, 1996)

2.4 เงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต (Initial and boundary conditions)

2.4.1 เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition)

สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นจะอาศัยสมมติฐานว่า เมื่อมีการเคลื่อนตัวของพื้นที่ทะเลเนื่องจากแผ่นดินไหว ผิวน้ำจะมีการเคลื่อนตัวเคลื่อนตัวเท่าๆ กันกับการเคลื่อนตัวของพื้นที่ทะเล โดยใช้หลักการของ Mansinha และ Smylie ปี 1971 และจะต้องทราบค่ากลไกต่างๆ ของแผ่นดินไหว

2.4.2 สภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

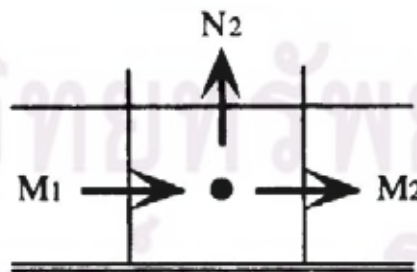
เงื่อนไขขอบเขตจะกำหนดให้คลื่นที่เดินทางถึงขอบพื้นดินสะท้อนกลับหมด โดยความเร็วที่ขอบพื้นดินมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนในขอบเขตที่เป็นผิวน้ำจะกำหนดให้คลื่นเดินทางผ่านได้อย่างอิสระ เมื่อพิจารณาการไหลผ่านเป็นแบบอิสระเชิงเส้น และสมมติให้ η มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับ h จะสามารถหาค่า η ได้จาก

$$\eta = +Q/\sqrt{gh} \quad \text{สำหรับ } \eta \text{ ที่มีค่าเพิ่มขึ้น} \quad (2.112)$$

$$\eta = -Q/\sqrt{gh} \quad \text{สำหรับ } \eta \text{ ที่มีค่าลดลง} \quad (2.113)$$

ซึ่งในที่นี้เมื่อพิจารณาทั้งอัตราการไหล Q และทิศทางการไหลของน้ำ อัตราการไหลได้จากสมการ (2.114) ซึ่งทิศทางการไหลจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ N_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.12

$$Q = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2)^2}{4} + N_2^2} \quad (2.114)$$

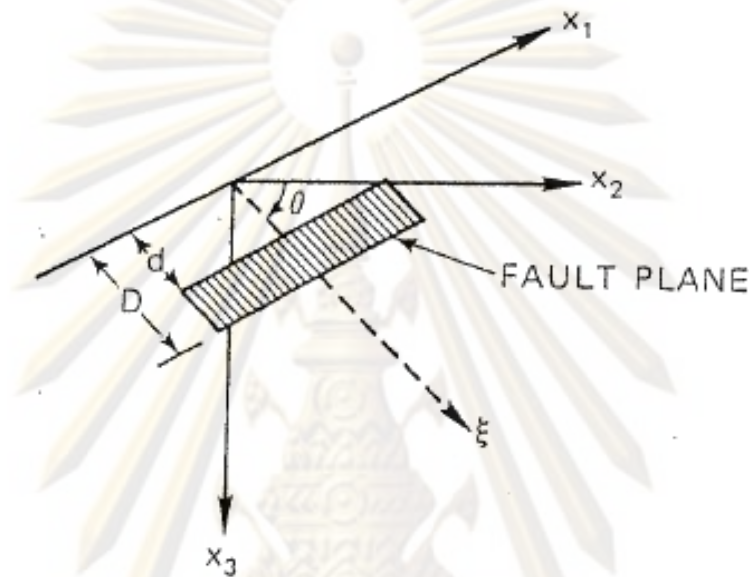


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่าง η ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง รูปของ

N_2 (UNESCO, 1997)

2.5 การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกเนื่องจากรอยเลื่อน (Sea surface deformation)

การเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล จะวิเคราะห์จากสมการของ Mansinha และ Smylie ปี 1971 ซึ่งได้เสนอสมการการคำนวณสนามการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike-slip fault) และรอยเลื่อนตามแนวมุมเท (Dip-slip fault) ในวัตถุยืดหยุ่นสม่ำเสมอครึ่งปริภูมิ (Displacement field in uniform elastic half-space)



รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยเลื่อนและตำแหน่งอ้างอิง (Mansinha และ Smylie, 1971)

2.5.1 ระยะยกตัวสำหรับการเคลื่อนที่ แบบรอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike-slip)

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u_3}{U_1} = & \cos \theta \left[\ln(R + r_3 - \xi) + (1 + 3 \tan^2 \theta) \ln(Q + q_3 + \xi) - 3 \tan \theta \sec \theta \ln(Q + x_3 + \xi_3) \right] \\
 & + \frac{2r_2 \sin \theta}{R} + 2 \sin \theta \frac{(q_2 + x_2 \sin \theta)}{Q} - \frac{2r^2 \cos \theta}{R(R + r_3 - \xi)} \\
 & + \frac{4q_2 x_3 \sin^2 \theta - 2(q_2 + x_2 \sin \theta)(x_3 + q_3 \sin \theta)}{Q(Q + q_3 + \xi)} \\
 & + 4q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_3 + \xi_3) - q_3 \sin \theta]}{Q^3} - 4q_2^2 q_3 x_3 \cos \theta \sin \theta \frac{(2Q + q_3 + \xi)}{Q^3 (Q + q_3 + \xi)^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.115}$$

2.5.2 ระยะยกตัวสำหรับการเคลื่อนที่ แบบรอยเลื่อนแยกตามมุมเท (Dip-slip)

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u_3}{U} = & \sin \theta \left[(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R(R + x_1 - \xi_1)} + 4 \frac{(x_3 - \xi_3)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} \right. \right. \\
 & \left. \left. - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3 (Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right\} - 6 \tan^{-1} \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \cos \theta [\ln(R + x_1 - \xi_1) - \ln(Q + x_1 - \xi_1) - 2 \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{R(R + x_1 - \xi_1)} \\
& - 4 \frac{\{(x_3 + \xi_3)^2 - \xi_3 x_3\}}{Q(Q + x_1 + \xi_1)} + 4 \xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3 (Q + x_1 - \xi_1)^2} \right)] \\
& + 6x_3 \left[\cos \theta \sin \theta \left\{ \frac{2(q_3 + \xi)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + \frac{x_1 - \xi_1}{Q(Q + q_3 + \xi)} - q_2 \frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} \right\} \right]
\end{aligned} \tag{2.116}$$

$$R = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2} \tag{2.117}$$

$$Q = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2} \tag{2.118}$$

$$r_2 = x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, \quad q_2 = x_2 \sin \theta + x_3 \cos \theta \tag{2.119}$$

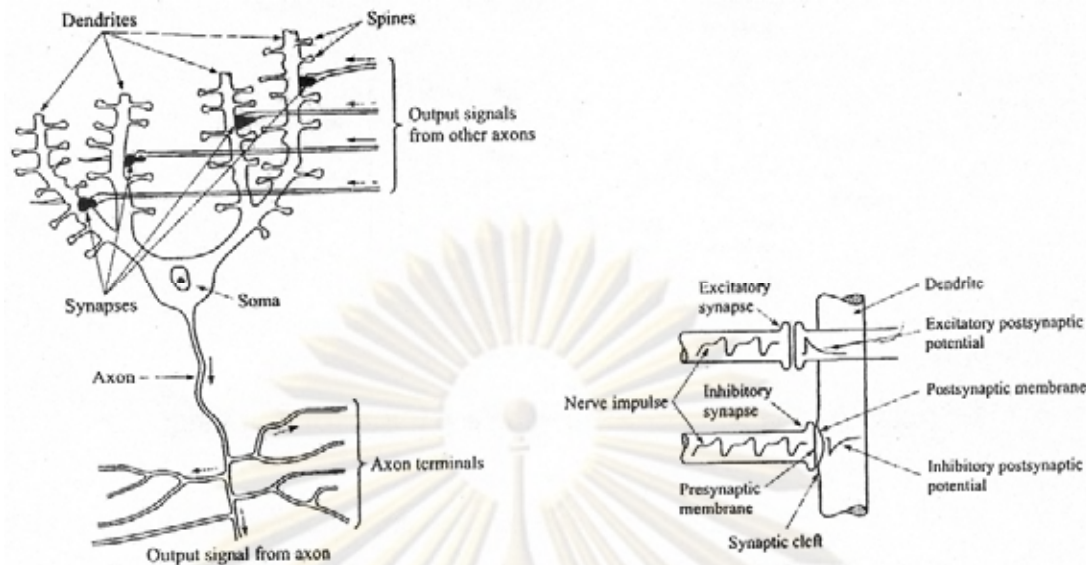
$$r_3 = x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta, \quad q_3 = -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta \tag{2.120}$$

โดยที่	u_3	คือ	ระยะยกตัวในแนวตั้งที่พิกัด (x_1, x_2, x_3)
	U_1	คือ	ระยะเคลื่อนที่ในแนว x_1
	U	คือ	ระยะเคลื่อนที่ในแนว ξ
	θ	คือ	มุมเท ของรอยเลื่อน
	ξ_1, ξ_2, ξ_3	คือ	จุดที่แรงกระทำในระนาบรอยเลื่อน

2.6 โครงข่ายใยประสาทเทียม

แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ ที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ เดนไดรท์ (Dendrite) เซลล์ (Cell body หรือ Soma) และแอกซอน (Axon) (Ham และ Kostanic, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 กระบวนการทำงานจะเริ่มที่เดนไดรท์จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซลล์ประสาทอื่นๆ ผ่านไซแนปส์ (Synapse) และส่งผ่านสัญญาณนั้นเข้าสู่การประมวลผลภายในตัวเซลล์ หลังจากประมวลผลแล้วจะถูกส่งออก (Output) ผ่านทางแอกซอนไปเป็นสัญญาณนำเข้า (Input) ให้กับเซลล์ประสาทตัวต่อไป

ตัวเซลล์ทำหน้าที่หลักสำคัญ 2 ลักษณะคือ การกระตุ้น (Excitatory) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณจากไซแนปส์เพื่อสร้างการกระตุ้นผ่านปฏิกิริยาทางชีวเคมี และการยับยั้ง (Inhibitory) จะทำหน้าที่ตรงข้ามกับการกระตุ้นคือลดสัญญาณจากไซแนปส์ สัญญาณที่ถูกกระตุ้นจะเดินทางไปสู่ปลายของแอกซอน ซึ่งทำหน้าที่ติดต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆ ผ่านทางไซแนปส์ต่อไป ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทสิ่งมีชีวิตกับเซลล์ประสาทเทียม



รูปที่ 2.14 ลักษณะทางโครงสร้างเซลล์ประสาทของสิ่งมีชีวิต (Ham และ Kostanic, 2001)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทสิ่งมีชีวิตกับเซลล์ประสาทเทียม

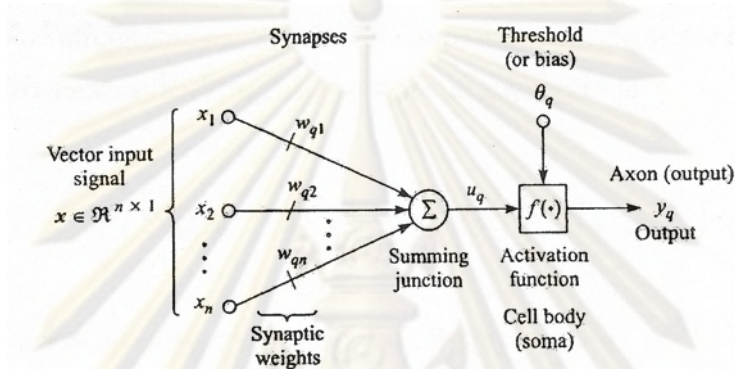
ลำดับที่	เซลล์ประสาทสิ่งมีชีวิต	เซลล์ประสาทเทียม
1	เดนไดรต์ (Dendrite)	ข้อมูลนำเข้า (Input)
2	ไซแนปส์ (Synapse)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights)
3	เซลล์ (Cell body หรือ Soma)	ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)
4	แอกซอน (Axon)	ข้อมูลส่งออก (Output)

2.6.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN)

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบพื้นฐานคือ

- 1) เซตของไซแนปส์ที่สอดคล้องกับค่าถ่วงน้ำหนักไซแนปส์ ค่าที่นำเข้าสู่ไซแนปส์เป็นสัญญาณในรูปของเวกเตอร์ $X \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ ซึ่งประกอบด้วย $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ดังนั้น x_j ก็คืออินพุตที่เข้าสู่ไซแนปส์ลำดับที่ j ซึ่งจะเชื่อมกับนิวรอน q โดยผ่านค่าถ่วงน้ำหนักไซแนปส์ w_{qj}
- 2) ตัวรวม (Summing junction) ทำหน้าที่รวมทุกๆ สัญญาณที่เข้ามาในแต่ละอินพุตจะคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก แล้วจึงรวมเข้าด้วยกันและส่งออกเป็น u_q

- 3) ฟังก์ชันกระตุ้น $f(\bullet)$ ทำหน้าที่กำหนดขอบเขตของแอมพลิจูดก่อนที่จะส่งออกไปเป็น y_q โดยที่ $f(\bullet)$ อาจเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear function), ค่าต่อเนื่อง (Continuous-valued), ฟังก์ชันไบนารี (Binary) หรือฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function)
- 4) เทอร์ชโวลด์ (Threshold) หรือ ไบแอส (Bias) θ_q คือค่าเอนเอียงภายนอกที่เพิ่มให้กับฟังก์ชันกระตุ้นโดยไบแอส จะเป็นส่วนลัดซึ่งจะถูกลบออกจากตัวรวมก่อนที่จะส่งเข้าสู่ฟังก์ชันกระตุ้น ส่วนไบแอส มีค่าตรงกันข้ามกับไบแอส องค์ประกอบทั้งหมดแสดงในรูปแบบที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Ham และ Kostanic, 2001)

2.6.2 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่าย

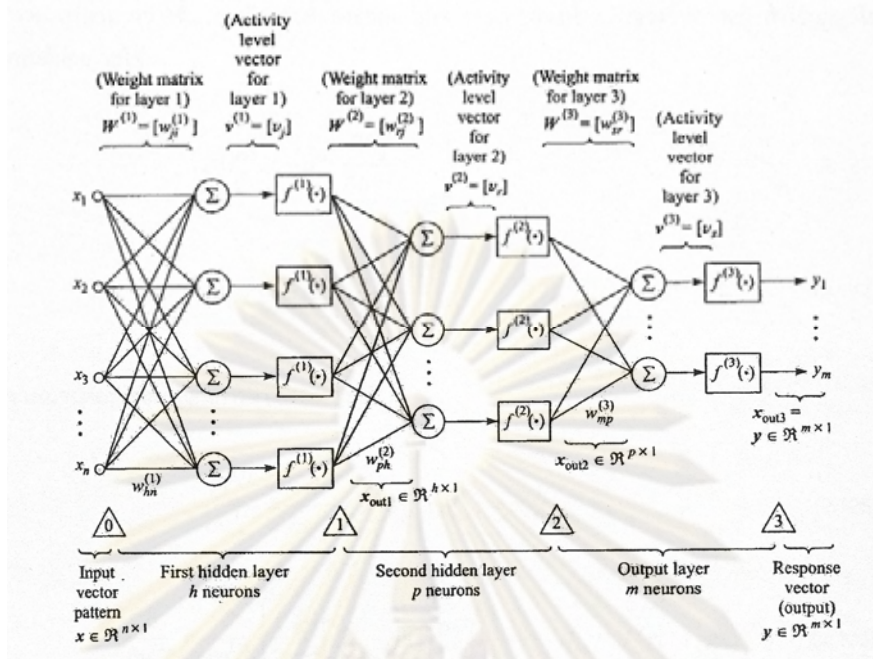
เป็นกระบวนการสำหรับปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และไบแอสของโครงข่าย เพื่อให้ข้อมูลส่งออกจากโครงข่าย (Neural response) กับค่าเป้าหมาย (Target vector) มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation) ซึ่งเป็นเป็นการเรียนรู้ในลักษณะโปรเซปตรอนหลายชั้น (Multilayer perceptron, MLP) MLP คือสถาปัตยกรรมที่นำใยประสาทเดี่ยวหลายๆ อันมาเชื่อมต่อกันเป็นชั้นๆ โดยเซลล์ที่อยู่ในชั้นในจะเรียกว่า ชั้นที่ซ่อนภายใน (Hidden layer) และชั้นที่อยู่ปลายทางจะเรียกว่า ชั้นส่งออก (Output layer) รูปที่ 2.16 แสดง MLP 3 ชั้น ซึ่งมีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น และชั้นส่งออก 1 ชั้น

การแพร่กลับสำหรับการฝึก (Training) MLP นั้นใช้วิธีความชันลงสูงสุด (Steepest descent gradient approach) ในการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน ซึ่งเป็นฟังก์ชันค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดกำหนดด้วย

$$E_q = \frac{1}{2} (\mathbf{d}_q - \mathbf{x}_{out}^{(3)})^T (\mathbf{d}_q - \mathbf{x}_{out}^{(3)}) = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{n_3} (d_{qh} - x_{out}^{(3)})^2 \quad (2.121)$$

โดยที่ \mathbf{d}_q คือ ค่าส่งออกที่ต้องการจากโครงข่ายสำหรับค่านำเข้ารูปแบบที่ q

$\mathbf{x}_{out}^{(3)}$ คือ ค่าส่งออกจริงจาก MLP



รูปที่ 2.16 สถาปัตยกรรมโปรเซ็ปตรอน 3 ชั้น (Ham และ Kostanic, 2001)

จากกฎการเรียนรู้สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายในชั้นใดชั้นหนึ่งโดยใช้ descent gradient approach ให้โดย

Steepest

$$\Delta w_{ji}^{(s)} = -\mu^{(s)} \frac{\partial E_q}{\partial w_{ji}^{(s)}} \tag{2.122}$$

โดยที่ s คือ ลำดับชั้นโครงข่าย เช่น 1, 2, 3
 $\mu^{(s)}$ คือ อัตราการเรียนรู้มีค่ามากกว่า 0

แยกการพิจารณาระหว่างชั้นที่ซ่อนภายใน กับชั้นส่งออกโดยพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นส่งออก แล้วใช้กฎลูกโซ่ของอนุพันธ์ย่อยจะได้

$$\Delta w_{ji}^{(3)} = -\mu^{(3)} \frac{\partial E_q}{\partial w_{ji}^{(3)}} \tag{2.123}$$

$$\Delta w_{ji}^{(3)} = -\mu^{(3)} \frac{\partial E_q}{\partial v_j^{(3)}} \frac{\partial v_j^{(3)}}{\partial w_{ji}^{(3)}} \tag{2.124}$$

แยกพิจารณาแต่ละเทอมในสมการที่ (1.125) จะได้

$$\frac{\partial v_j^{(3)}}{\partial w_{ji}^{(3)}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}^{(3)}} \left(\sum_{h=1}^{n_2} w_{jh}^{(3)} x_{out,h}^{(2)} \right) = x_{out,i}^{(2)} \quad (2.125)$$

และ

$$\frac{\partial E_q}{\partial v_j^{(3)}} = \frac{\partial}{\partial v_j^{(3)}} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{n_2} [d_{qh} - f(v_h^{(3)})]^2 \right\} = -[d_{qh} - f(v_h^{(3)})] g(v_j^{(3)}) \quad (2.126)$$

เมื่อ $g(\bullet)$ แทนอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของฟังก์ชันกระตุ้น $f(\bullet)$ จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\partial E_q}{\partial v_j^{(3)}} = -(d_{qi}^{(3)} - x_{out,i}^{(3)}) g(v_j^{(3)}) = -\delta_j^{(3)} \quad (2.127)$$

แทนสมการที่ (2.126) และ (2.128) ลงในสมการที่ (2.125) จะได้

$$\Delta w_{ji}^{(3)} = -\mu^{(3)} \delta^{(3)} x_{out,i}^{(2)} \quad (2.128)$$

หรือ

$$\Delta w_{ji}^{(3)}(k+1) = w_{ji}^{(3)}(k) + \mu^{(3)} \delta^{(3)} x_{out,i}^{(2)} \quad (2.129)$$

ส่วนสมการการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อนเร้นสามารถกระทำเช่นเดียวกัน และเขียนในรูปทั่วไปดังนี้

$$\Delta w_{ji}^{(s)}(k+1) = w_{ji}^{(s)}(k) + \mu^{(s)} \delta^{(s)} x_{out,i}^{(s-1)} \quad (2.130)$$

โดยที่ $\delta^{(s)} = (d_{qh} - x_{out,j}^{(s)}) g(v_j^{(s)})$ สำหรับชั้นส่งออก

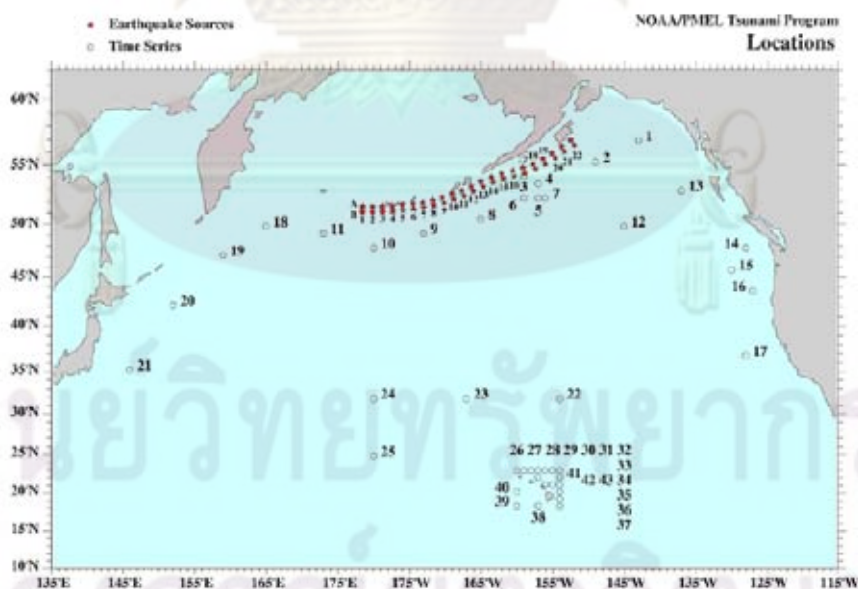
$$\delta^{(s)} = \left(\sum_{h=1}^{n_{s+1}} \delta_h^{(s+1)} w_{hj}^{(s+1)} \right) g(v_j^{(s)}) \quad \text{สำหรับชั้นซ่อนเร้น}$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะรอยเลื่อนของแหล่งกำเนิดสึนามิ

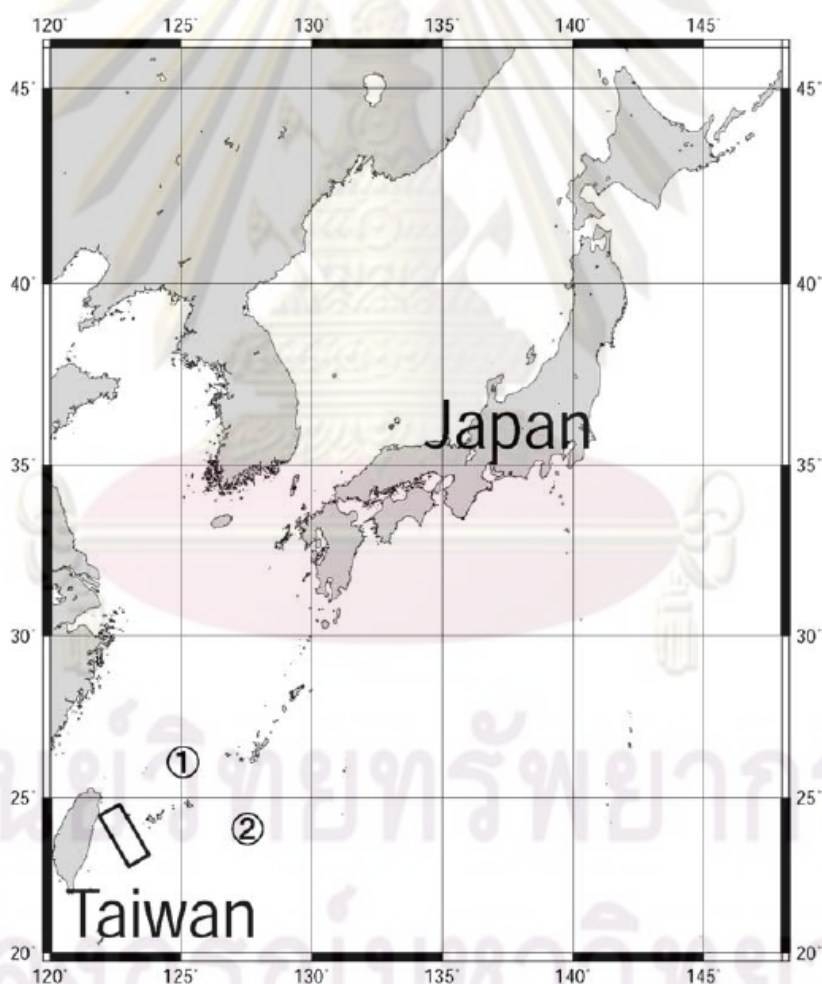
Titov และคณะ (1999) ศึกษาผลกระทบของสึนามิบริเวณชายฝั่งฮาวาย โดยใช้พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนในเขตมุดตัว Alaska-Aleutian และออกแบบจำลองสึนามิเพื่อวิเคราะห์ไวของสึนามิ ซึ่งใช้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกาะ Andreanov ปี 1996 จากการศึกษาพบว่าคลื่นลูกแรกไม่ไวต่อพารามิเตอร์ของรอยเลื่อน นอกจากนั้นผลที่ได้จากแบบจำลองสึนามิยังถูกเก็บเป็นฐานข้อมูลออนไลน์เพื่อใช้สำหรับการทำนายความสูงของสึนามิ ณ ชายฝั่งฮาวาย โดยการเลือกตำแหน่งของแผ่นดินไหวในเขตมุดตัว Alaska-Aleutian และฐานข้อมูลนี้ยังใช้ประโยชน์เป็นเครื่องมือสำหรับการพยากรณ์สึนามิ และการจัดการบรรเทาสาธารณภัย

การสร้างฐานข้อมูลสึนามิทำโดยเลือกจากแผ่นดินไหวขนาด 7.5 เป็นหน่วยของแหล่งกำเนิด (Unit source) ที่มีขนาดของรอยเลื่อนคือ กว้าง 50 กิโลเมตร ยาว 100 กิโลเมตร มุมเท 15 องศา มุมเลื่อนถล่ม 90 องศา ความลึก 5 กิโลเมตร ระยะการเคลื่อนตัว 1 เมตร และมุมแนวระดับวางตามแนวเขตมุดตัว Alaska-Aleutian โดยวางต่อเนื่องเป็นระยะทางรวม 100 กิโลเมตร และแบ่งเป็น 2 แนว แนวแรกวางตามร่องลึก Aleutian (แนว B) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 แนวที่สองวางไว้บนแนวแรกแต่มีความลึกเป็น 17.5 กิโลเมตร หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สึนามิจากรอยเลื่อนเหล่านั้นแล้วเก็บเป็นฐานข้อมูล

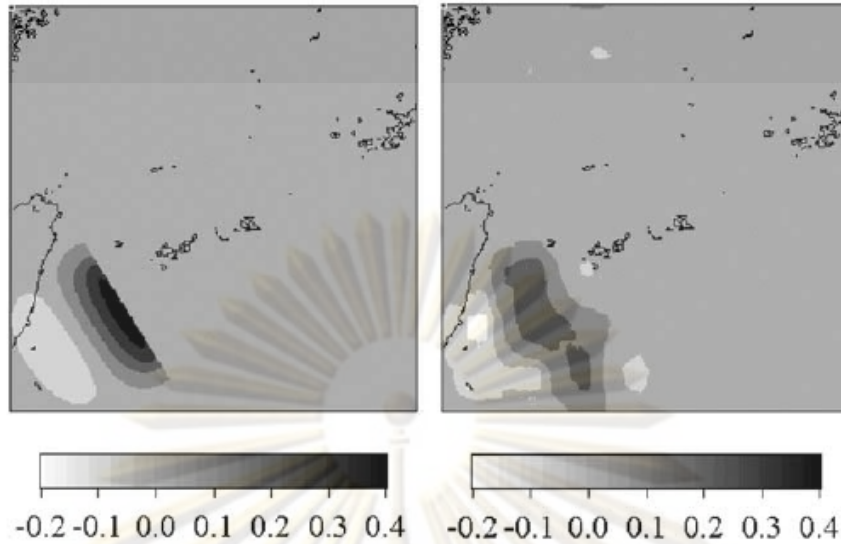


รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของหน่วยกำเนิดบนเขตมุดตัว Alaska-Aleutian (ดาว) และสถานีวัดน้ำที่เลือกศึกษา (วงกลม) (Titov และคณะ)

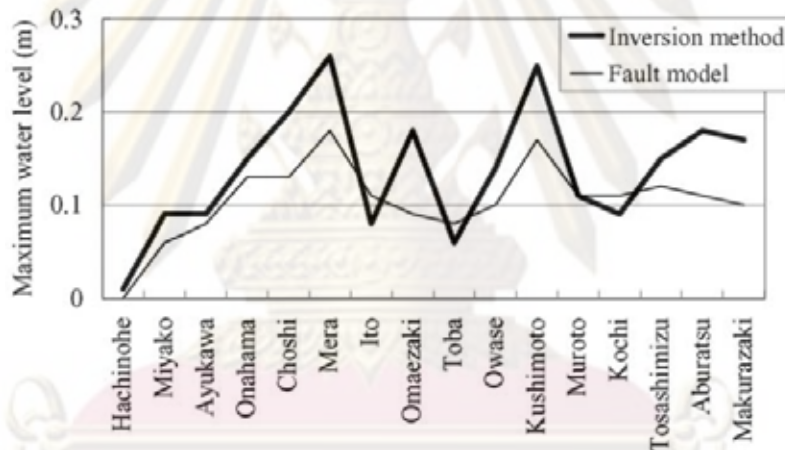
Koike และคณะ (2003) เสนอวิธีการประเมินศักยภาพของสึนามิระยะไกลโดยการสมมุติแบบจำลองรอยเลื่อนบนขอบแปซิฟิก และทำการจำลองสึนามิขึ้นในบริเวณที่สึนามิสามารถสร้างความเสียหายต่อชายฝั่งญี่ปุ่นซึ่งยังไม่เคยเกิดมาก่อน วิธีการที่น่าเสนอคือใช้การคำนวณย้อนกลับโดยการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวเลย และทำการตรวจสอบกับแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยสมมุติเหตุการณ์แผ่นดินไหวนอกทะเลใต้หวัน โดยใช้ข้อมูลคลื่นจากสถานีวัดน้ำช่วงเวลา 90 นาที และใช้เวลาสำหรับการคำนวณย้อนกลับใน 2 มิติอีก 5 วินาที หลังจากนั้นใช้เวลาอีก 2 นาทีสำหรับการพยากรณ์ความสูงคลื่น เมื่อรวมเวลาที่ใช้คำนวณทั้งหมดยังน้อยกว่าเวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากใต้หวันถึงญี่ปุ่นซึ่งใช้เวลาประมาณ 105 นาที และเมื่อเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับกับแบบจำลองรอยเลื่อนมีความคลาดเคลื่อน 0.39 เมตร ส่วนความคลาดเคลื่อนของเวลาที่คลื่นเดินทางคือ 0.007 นาที



รูปที่ 2.18 ที่ตั้งของสถานีวัดน้ำที่ 1 กับ 2 และตำแหน่งของแบบจำลองรอยเลื่อน (Koike และคณะ, 2003)



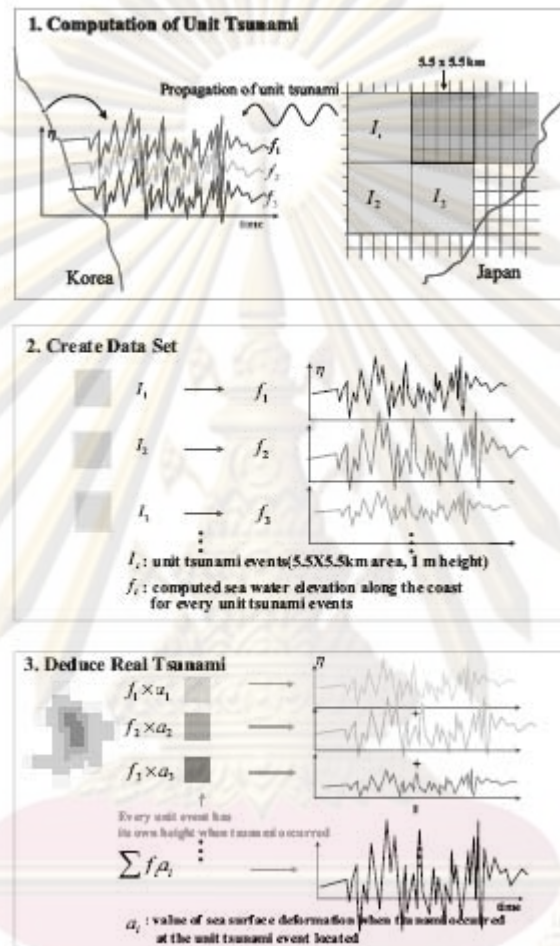
รูปที่ 2.19 ระดับน้ำเริ่มต้นที่คำนวณจากแบบจำลองรอยเลื่อน (ซ้าย) และคำนวณย้อนกลับ (ขวา)
(Koike และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบความสูงคลื่นระหว่างวิธีการคำนวณย้อนกลับกับการคำนวณจากแบบจำลองรอยเลื่อน (Koike และคณะ, 2003)

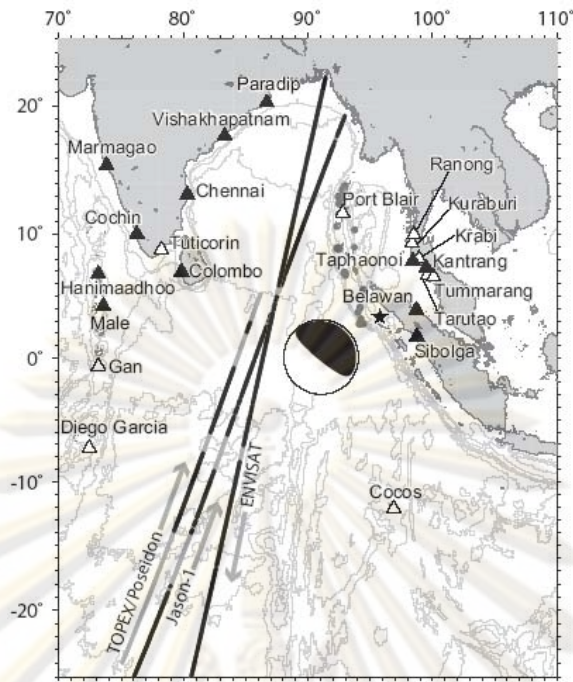
Lee และคณะ (2005) ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพยากรณ์สึนามิโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยใช้สมการคลื่นยาวเชิงเส้นในการคำนวณการแพร่กระจายสึนามิของรอยเลื่อนย่อยๆ แล้วจึงนำมาซ้อนทับกันโดยหลักการซ้อนทับ (Superposition) สึนามิที่คำนวณแต่ละบริเวณจะเรียกว่า หน่วยสึนามิ (Unit tsunami) ที่มีพื้นที่ขนาด 5.5 ตารางกิโลเมตร และในแต่ละบริเวณย่อยนั้นสมมติให้เกิดการยกตัวของพื้นทะเลสูง 1 เมตร โดยเลือกวางตลอดแนวชายฝั่งด้านตะวันออกของประเทศเกาหลีเป็นฐานข้อมูล เมื่อเกิดสึนามิขึ้นจริงจะพยากรณ์จากผลคูณของการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกเริ่มต้น (ใช้สมการของ Mansinha และ Smylie) ทุกๆ ตำแหน่งของหน่วยสึนามิถูกคำนวณไว้ก่อนหน้า เมื่อรวมผลในแต่ละตำแหน่งของการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกจะได้ความสูงคลื่นจริง นอกจากนั้นยังทำการ

ทดสอบแบบจำลองกับเหตุการณ์สึนามิเมื่อปี 1983 เมื่อคำนวณการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก และหาผลรวมของความสูงคลื่นจากฐานข้อมูลซึ่งสามารถทำได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลภายในเวลาไม่กี่นาที และความสูงคลื่นกับเวลาที่คลื่นเดินทางนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม ขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลจากหน่วยสึนามิ (Lee และคณะ, 2005)

Fujii และ Satake (2006) ได้ทำการศึกษาลักษณะรอยเลื่อนของแหล่งกำเนิดสุมาตราสึนามิ 2004 โดยใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion) จากข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (Tide gauge data) ในประเทศต่างๆ ในแถบมหาสมุทรอินเดียและจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม 3 ดวงซึ่งประกอบด้วยดาวเทียม Jason-1, TOPEX/Poseidon และ Envisat ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมทั้ง 3 ดวงได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.22

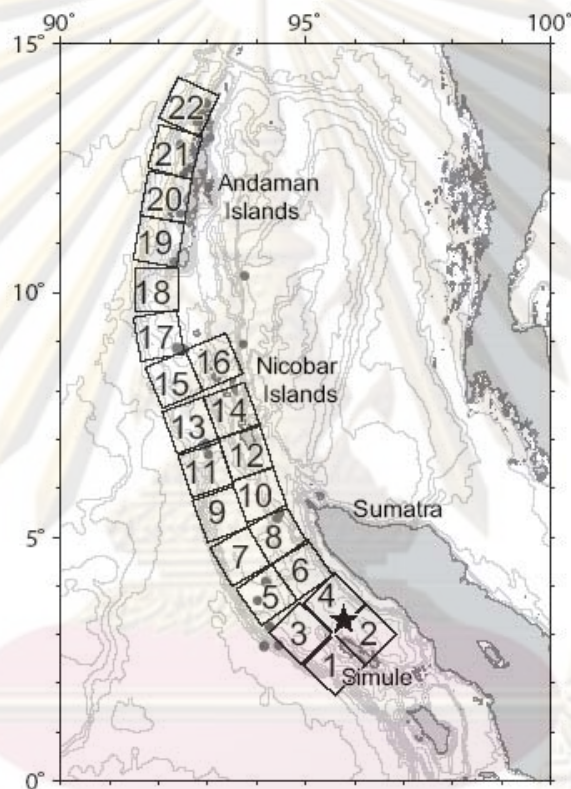


รูปที่ 2.22 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (Fujii และ Satake, 2006)

ในการศึกษานี้ได้แบ่งรอยเลื่อนออกเป็น 22 รอยเลื่อนย่อย (Subfault) ที่วางตัวครอบคลุมพื้นที่ที่เกิดการสั่นสะเทือนที่ตามมาทีหลัง (Aftershock) หลังจากเกิดแผ่นดินไหว 1 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ขนาดของแต่ละรอยเลื่อนย่อยกำหนดให้มีขนาดเท่ากันคือ 100 กม. x 100 กม. ซึ่งจะทำให้การแปรเปลี่ยนเฉพาะค่าการเลื่อนตัวของแต่ละรอยเลื่อนย่อยแต่จะกำหนดค่ามุมเท (Dip angle) เท่ากับ 10 องศา โดยที่ค่ามุมเทนี้ได้มาจากการสำรวจลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

ในการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลจากสถานีวัดน้ำได้กำหนดให้การยกตัวของผิวน้ำทะเล (Sea surface height) แปรผันเป็นแบบเส้นตรงกับลักษณะของคลื่นสึนามิ (Tsunami waveforms) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหว (Coseismic displacement) และจากสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นยาวแบบเชิงเส้น (Linear long wave propagation) สำหรับค่าการเคลื่อนตัวทำการคำนวณย้อนกลับโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งไม่พิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่เป็นค่าลบ ในการศึกษานี้ให้รอยเลื่อนมีค่าความเร็วในการเคลื่อนตัวในแนวของรอยเลื่อนและมีระยะเวลาในการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง จากผลการศึกษาโดยการหาค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดได้ผลดังตารางที่ 2.2 สำหรับค่าความเร็วในการจากการคำนวณย้อนกลับได้ตำแหน่งและค่าลักษณะของรอยเลื่อนย่อยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการสอบเทียบใช้ข้อมูลลักษณะท้องน้ำจาก ETOPO2 ขนาดความกว้างของช่องกริด 2 ลิปดา ในบริเวณที่ใกล้ชายฝั่งได้เพิ่มความละเอียดขนาดความกว้างของช่อง กริด เป็น 24 พิลิปดา ขอบเขตในการคำนวณคือ 25°S ถึง 25°N และ 70°E ถึง 110°E ลำดับขั้นเวลา (Time step) ในการคำนวณ 2 วินาที จากผลการศึกษาได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าความเร็วของการแพร่กระจายตัวในแนวรอยเลื่อน 1 กม./วินาที ค่าระยะเวลาที่รอยเลื่อนเคลื่อนตัวในแนวตั้ง 3 นาที และได้ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยดังแสดงในตารางที่ 2.4 สำหรับการสอบเทียบผลจากแบบจำลอง กับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำและจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 และ รูปที่ 2.25



รูปที่ 2.23 หมายถึงและตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Satake, 2006)

ตารางที่ 2.2 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการคำนวณจากการแปลงเปลี่ยนความเร็วการเคลื่อนตัวของ รอยเลื่อนและระยะเวลาที่รอยเลื่อนใช้ในการยกตัว (Fujii และ Satake, 2006)

Vr (km/s)	Tide Gauge data			Satellite Altimeter data			TG+SA data		
	1 min	2 min	3 min	1 min	2 min	3 min	1 min	2 min	3 min
0.5	23.1	20.8	18.8	27.8	29.5	31.0	22.0	20.1	18.3
1.0	32.8	33.4	34.2	33.8	36.4	38.2	29.8	31.0	32.1
1.5	29.3	29.5	29.8	31.1	33.8	35.5	26.8	27.3	27.8
2.0	30.2	29.9	29.7	29.7	32.3	34.2	27.2	27.3	27.4
2.5	28.4	28.2	28.3	28.4	30.6	32.9	25.0	25.2	25.6
3.0	28.5	28.4	28.5	27.4	29.7	31.9	24.9	25.2	25.6

ตารางที่ 2.3 ค่ามุมต่างๆ, ตำแหน่งและความลึกของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Satake, 2006)

No.	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Depth (km)
1	315	10	95	1.75	95.60	3
2	315	10	95	2.38	96.23	20
3	315	10	95	2.40	94.90	3
4	315	10	95	3.00	95.60	20
5	325	10	100	3.20	94.10	3
6	325	10	100	3.71	94.83	20
7	330	10	105	4.00	93.50	3
8	330	10	105	4.44	94.27	20
9	340	10	105	4.90	93.00	3
10	340	10	105	5.30	93.80	20
11	342	10	100	5.82	92.68	3
12	342	10	100	6.15	93.50	20
13	340	10	95	6.72	92.38	3
14	340	10	95	7.02	93.22	20
15	337	10	85	7.64	92.08	3
16	337	10	85	8.00	92.90	20
17	350	10	99	8.60	91.64	3
18	0	10	106	9.60	91.51	3
19	10	10	115	10.66	91.48	3
20	10	10	115	11.56	91.63	3
21	15	10	120	12.51	91.78	3
22	25	10	130	13.51	92.01	3

Length and width are 100 km for each subfault.

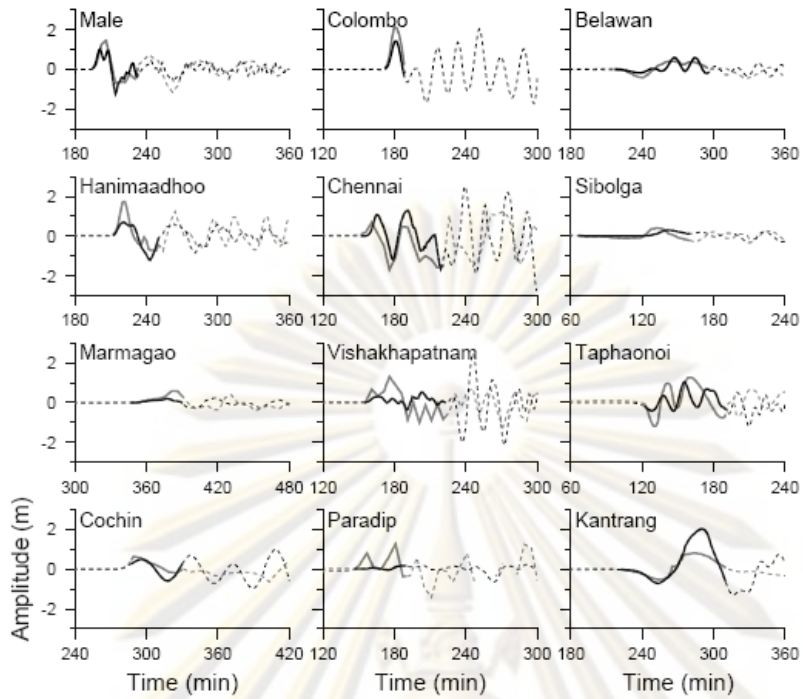
Locations (Lat., Lon., and Depth) indicates the left bottom corner of each subfault.

ตารางที่ 2.4 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยที่ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่างๆ (Fujii และ Satake, 2006)

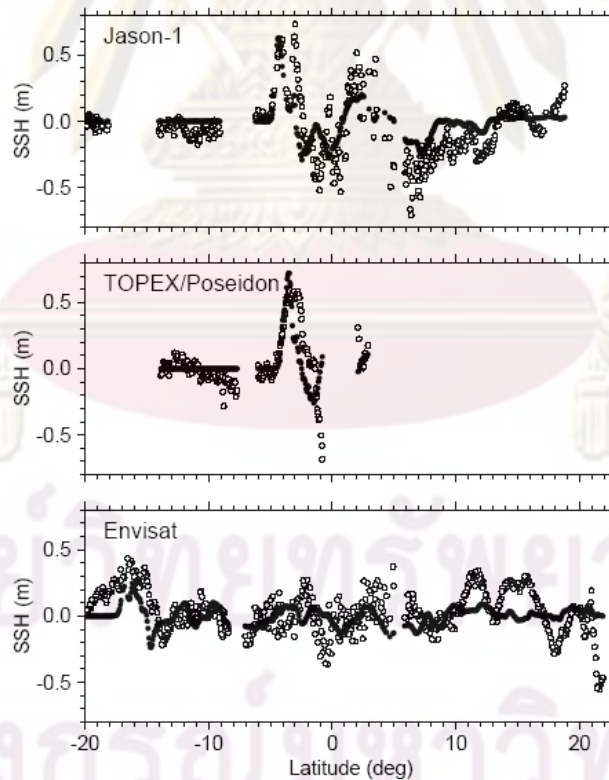
No.	Tide Gauge data			Satellite Altimeter data			TG+SA data		
	1.0 km/s	1.5 km/s	2.0 km/s	1.0 km/s	1.5 km/s	2.0 km/s	1.0 km/s	1.5 km/s	2.0 km/s
1	0.0±0.2	0.0±1.3	1.1±10.5	10.4±4.9	10.4±5.0	8.0±4.2	0.0±0.2	0.0±0.4	0.0±1.4
2	0.0±0.3	1.9±1.2	8.5±4.5	0.0±1.7	0.0±0.0	0.0±0.0	4.3±2.2	15.8±7.8	19.6±16.6
3	30.3±15.5	25.4±11.6	20.8±9.2	1.0±0.6	1.2±0.6	3.6±1.6	24.6±13.7	18.6±10.3	16.4±7.0
4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	2.5±1.1	0.7±0.3	1.3±0.6	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
5	24.6±10.0	25.5±11.0	25.4±9.1	30.2±13.7	27.4±16.3	24.3±12.6	24.6±9.8	26.6±11.5	25.5±10.2
6	7.4±3.5	0.6±0.4	0.0±1.0	30.2±15.4	35.0±16.5	32.2±16.0	12.3±5.5	7.1±3.2	3.9±3.8
7	13.2±5.9	16.6±6.3	17.5±7.8	19.7±15.7	15.8±7.4	18.1±13.1	12.8±7.6	15.7±7.0	16.8±8.0
8	1.7±1.4	6.8±3.4	4.9±2.3	0.5±9.8	3.0±7.1	6.4±7.4	1.8±2.8	6.0±3.2	4.7±2.3
9	1.6±1.2	0.0±0.3	0.7±0.2	15.4±6.6	18.1±8.3	17.5±6.7	1.9±3.9	0.0±0.4	0.8±0.4
10	4.2±1.8	2.4±1.6	2.6±1.4	8.0±4.1	11.3±4.8	11.5±5.1	4.5±2.0	3.0±1.3	3.3±1.7
11	6.2±3.2	0.8±0.8	0.0±0.5	14.9±6.6	8.7±4.6	9.8±4.6	6.0±3.3	1.0±1.1	0.0±0.5
12	3.9±4.1	3.3±3.5	3.2±3.6	0.0±0.2	0.0±1.0	0.7±0.5	3.2±3.7	3.2±3.7	2.7±3.4
13	6.6±2.8	2.8±2.1	0.0±0.7	7.4±3.5	7.2±3.5	8.6±4.3	6.5±2.6	2.4±1.1	0.0±0.5
14	0.0±0.2	0.8±2.4	1.2±2.1	0.0±0.0	0.0±0.5	0.0±0.2	0.0±0.0	0.1±0.2	0.9±2.2
15	6.5±3.0	3.1±3.3	0.0±0.5	12.7±5.7	5.7±2.3	8.3±3.6	7.1±2.9	3.6±1.2	0.2±0.2
16	2.8±2.2	3.5±1.4	2.5±1.7	8.0±3.8	14.2±6.4	16.2±7.4	3.5±3.5	4.1±1.4	2.7±1.6
17	3.0±1.8	0.0±0.3	0.0±0.0	6.1±3.1	12.4±5.1	11.0±4.7	3.2±1.9	0.0±0.0	0.0±0.0
18	2.5±1.5	4.2±2.7	3.9±2.0	0.0±0.4	4.6±2.5	5.2±2.8	2.7±1.9	4.3±2.5	4.0±2.2
19	0.1±0.2	1.6±1.1	1.8±1.0	0.0±0.4	0.0±1.0	0.0±0.0	0.0±0.3	1.7±1.0	1.8±1.0
20	0.0±0.7	0.0±0.0	0.0±0.0	10.4±5.2	0.0±0.7	0.0±1.6	0.0±0.3	0.0±0.0	0.0±0.0
21	0.0±0.2	0.0±0.1	0.0±0.3	0.0±0.6	0.0±0.0	0.0±0.3	0.0±0.1	0.0±0.1	0.0±0.4
22	0.7±0.3	2.2±1.0	2.5±1.2	13.3±6.4	9.7±5.0	7.1±4.1	1.0±0.4	2.3±1.1	2.6±1.3
Mw	9.3	9.2	9.3	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
VR (%)	38.2	35.5	34.2	34.2	29.8	29.7	32.1	27.8	27.4

Mw: Moment magnitude

VR: Variance reduction



รูปที่ 2.24 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (Fujii และ Satake, 2006)



รูปที่ 2.25 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Fujii และ Satake, 2006)

Tomita และคณะ (2006) ได้ทำการปรับปรุงเทคนิคการผกผันของสัญญาณใหม่ 3 เทคนิคดังนี้

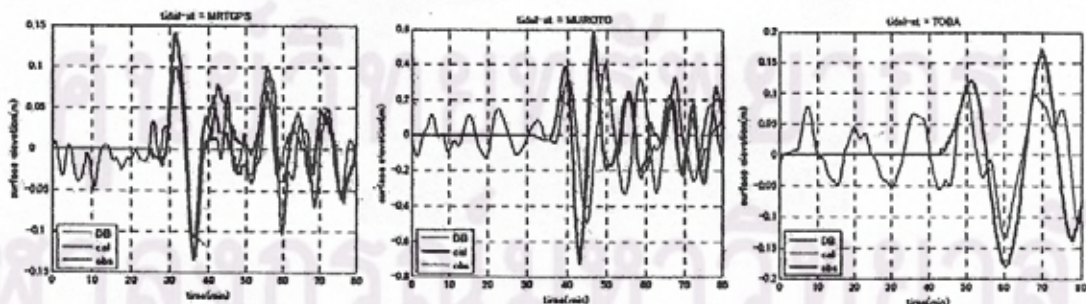
- 1) พิจารณาจุดสังเกตนอกชายฝั่ง และสถานีวัดน้ำตลอดชายฝั่ง
- 2) วิเคราะห์คลื่นสั้นสะท้อนเพื่อ กำหนดขนาดและตำแหน่ง ของแผ่นดินไหวภายใน 3 นาทีหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว
- 3) ประมาณค่าระดับผิวน้ำเชิงพื้นที่โดยใช้เรดาร์ความถี่สูง ในเหตุการณ์แผ่นดินไหว Tokaido-Oki ขนาด 7.4 เมื่อปี 2004 โดยใช้พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองรอยเลื่อนดังตารางที่ 2.5 และเงื่อนไขสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลขและการคำนวณดังนี้

- 1) แบบจำลองเชิงตัวเลขคลื่นยาวไม่เชิงเส้น 2 มิติ ซึ่งพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพในแนวตั้งด้วย
- 2) แบ่งขนาดของกริดเป็น 1350, 450 และ 150 ตารางเมตร
- 3) พิจารณาช่วงเวลา 80 นาทีหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยแบ่งทุกๆ 0.5 วินาที
- 4) แบบจำลองรอยเลื่อนตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองรอยเลื่อน

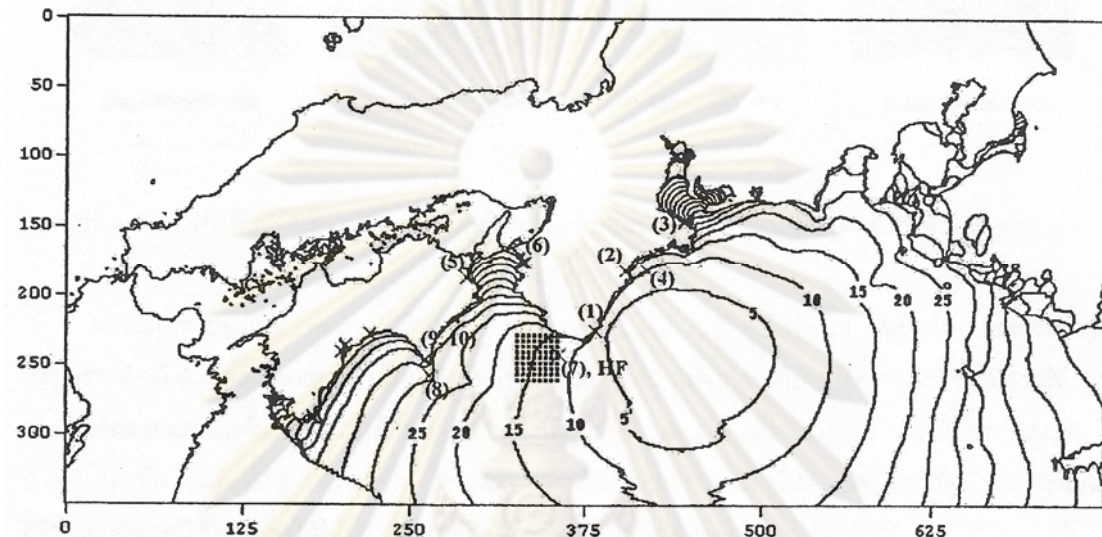
ละติจูด	ลองจิจูด	ความลึก (กม)	มุมแนวระดับ	มุมเท	มุมเลื่อน ถล่ม	ความยาว (กม)	ความกว้าง(กม)	ระยะการเคลื่อนตัว(ม)
33.2	137.1	8.0	227.0	52.0	69.0	60.0	30.0	1.8

จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์จากแบบจำลองกับผลการบันทึกระดับน้ำ ณ สถานีวัดน้ำให้ค่าความสูงคลื่นลูกแรก และเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงนั้น เป็นที่ยอมรับได้ตลอดชายฝั่งดังแสดงในรูปที่ 2.26 แต่อย่างไรก็ตามความแปรปรวนของระดับน้ำก่อนที่สัญญาณลูกแรกจะมาถึงนั้นยังไม่สามารถที่จะพยากรณ์ได้ เนื่องจากระดับน้ำใกล้ชายฝั่งนั้นคำนวณได้ลำบากเป็นผลมาจากลักษณะทางภูมิประเทศและโครงสร้างที่อยู่ตามแนวชายฝั่งเองมีความซับซ้อนมากซึ่งกริดขนาด 150 ตารางเมตรไม่ละเอียดพอสำหรับการพยากรณ์



รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบระดับน้ำ ณ สถานีต่าง (Tomita และคณะ, 2006)

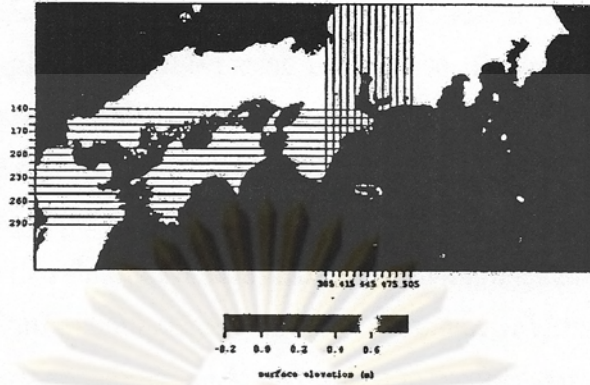
การใช้ประโยชน์จากการผสมผสานระดับน้ำระหว่างสถานีนอกชายฝั่งกับตามแนวชายฝั่ง ซึ่งระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขจะกำหนดให้เป็นข้อมูลสังเกตการณ์ในวิธีการผกผัน จำนวน 10 สถานี และสมมุติสถานีวัดระดับน้ำที่วัดโดยเรดาร์ความถี่สูงอีก 72 สถานีนอกชายฝั่ง Kii Peninsula ดังแสดงในรูปที่ 2.27



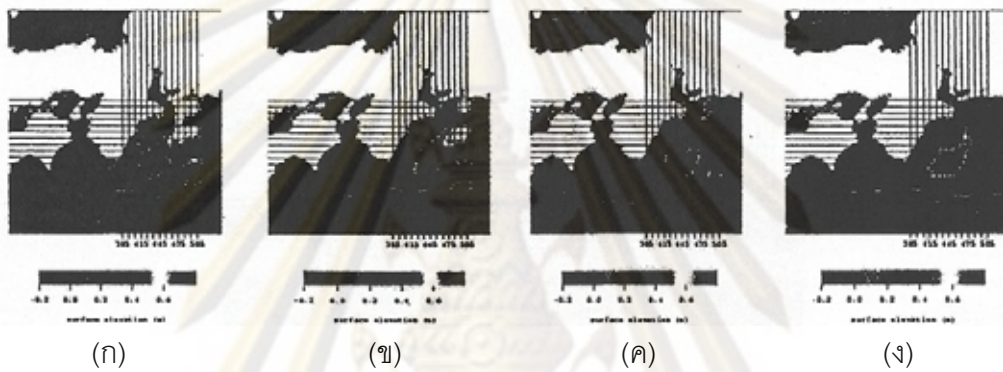
รูปที่ 2.27 ตำแหน่งสถานีสังเกตการณ์สึนามิ และเส้นชั้นเวลาเดินทางของคลื่น (Tomita และคณะ, 2006)

สำหรับการศึกษาวิธีการผกผันนั้นแบ่งเป็น 2 กรณี ที่ช่วงเวลา 20 นาที โดยกรณีที่ 1 พิจารณาเฉพาะระดับน้ำ ณ สถานีวัดน้ำนอกชายฝั่ง ส่วนในกรณีที่ 2 พิจารณาทั้งสถานีนอกชายฝั่งและตามแนวชายฝั่ง จากผลการศึกษาพบว่ากรณีที่ 1 ให้ค่าเริ่มต้นของสึนามิที่ผิดพลาดอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ 2 ซึ่งพิจารณาจากค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root mean square error, RSME) ในกรณีที่ 1 ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.637 ส่วนในกรณีที่ 2 นั้นให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.341 แต่อย่างไรก็ตามกรณีที่ 2 ยังแตกต่างกับค่าเริ่มต้นที่คำนวณโดยแบบจำลองรอยเลื่อนอยู่มาก ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้วิเคราะห์นั้นไม่เพียงพอที่จะอธิบายคุณลักษณะของสึนามิได้ และเมื่อพิจารณากรณีที่ 3 โดยขยายช่วงเวลาในการวิเคราะห์เป็น 40 นาทีนั้นให้ค่า RMSE ดีขึ้นจาก 0.341 เป็น 0.076 ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 (ก) ถึง (ค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.28 ค่าเริ่มต้นของสึนามิคำนวณโดยใช้แบบจำลองรอยเลื่อน (Tomita และคณะ, 2006)

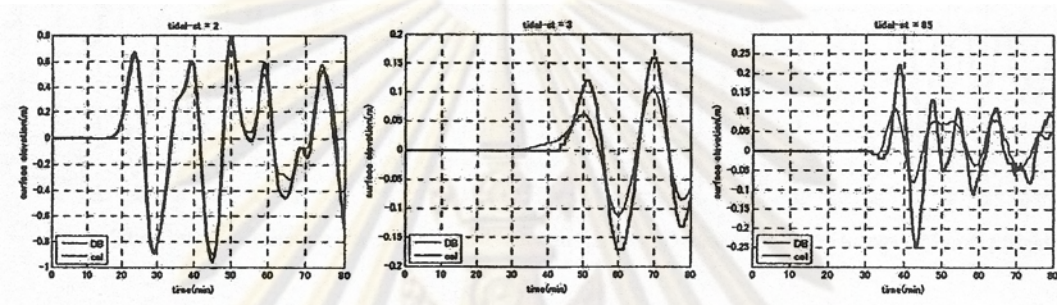


รูปที่ 2.29 ค่าเริ่มต้นของสึนามิคำนวณโดยวิธีผกผัน (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4 (Tomita และคณะ, 2006)

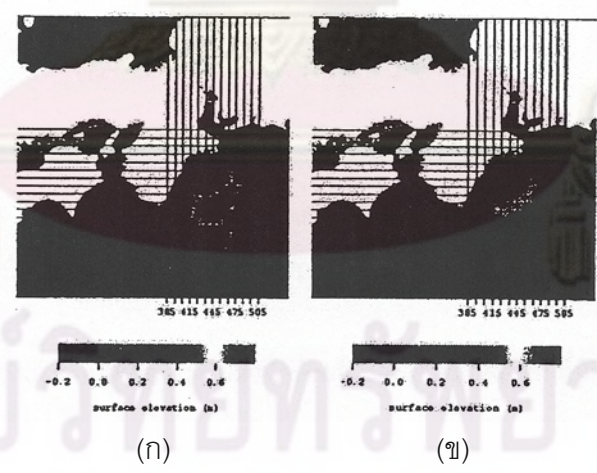
การใช้ประโยชน์จากข้อมูลแผ่นดินไหว สำหรับการผกผันในกรณีที่ 4 ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหว และ ช่วงเวลาที่ใช้วิเคราะห์ 20 นาทีหลังเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งกรณีที่ 4 นี้ให้ผลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ผ่านมา ซึ่งในกรณีที่ 1 ถึง 3 นั้นให้ผลของค่าเริ่มต้นบริเวณใกล้กับชายฝั่งผิดปกติสูงมาก แต่อย่างไรก็ตาม กรณีที่ 4 ก็ให้ค่า RMSE แค่ 0.081 เท่านั้น ในรูปที่ 2.30 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเฉพาะเฟสเท่านั้นที่ได้นั้น สอดคล้องกัน

การใช้ประโยชน์ของการกระจายระดับน้ำเชิงพื้นที่ประมาณโดยเรดาร์ความถี่สูง สำหรับกรณีที่ 5 สมมุติระดับน้ำอีก 72 ตำแหน่งซึ่งประมาณโดยเรดาร์ความถี่สูงถูกใช้แทนระดับน้ำที่คำนวณ ณ สถานี Shionomisaki GPS Buoy ดังนั้นจะมีจุดสังเกตการณ์เพิ่มขึ้นเป็น 81 จุด ใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ 15 นาที หลังจากเกิดแผ่นดินไหว ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.31(ก) ซึ่งให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.080 เมื่อเทียบกับกรณีที่ 4 แล้วกรณีที่ 5 ใช้ช่วงเวลาวิเคราะห์น้อยกว่า และยังให้ค่า RMSE ต่ำกว่าด้วย ในรูปที่ 2.32 เปรียบเทียบระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 5 แสดงให้เห็นว่าทั้ง เฟส และแอมพลิจูดที่ได้นั้นสอดคล้องกัน ภายใต้ช่วงเวลาที่สั้นลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 4 แต่จะต้องมีจุด

สังเกตการณ์ที่มากขึ้นเพื่อจับคุณลักษณะของสึนามิ กรณีที่ 6 ลดช่วงเวลาการวิเคราะห์จาก 15 ลงเป็น 10 นาทีเพื่อให้เข้าใกล้เวลาจริงมากขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.31(ข) จะเห็นว่าเวลา 10 นาทีสั้นเกินไปสำหรับการจับคุณลักษณะของสึนามิ และไม่สามารถใช้ประเมินค่าเริ่มต้นของสึนามิได้เพราะเวลาที่คลื่นเดินทางไม่สอดคล้องกับแบบจำลองในรูปที่ 2.27 ถึงแม้ค่า RMSE จะต่ำก็ตาม ซึ่งค่า RMSE ในกรณีที่ 6 นั้นเท่ากับ 0.105 เมื่อช่วงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีที่ 5 ลดลงจาก 20 นาทีเป็น 15 นาที ผลการพยากรณ์ไม่เลวร้ายมากนัก หากแต่การลดลงจาก 15 เป็น 10 นาทีนั้นส่งผลต่อความละเอียดของการพยากรณ์มากกว่า

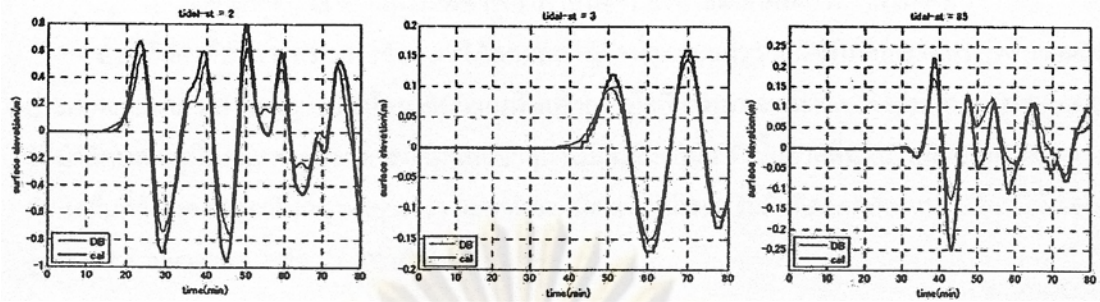


รูปที่ 2.30 ระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 4 เทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (Tomita และคณะ, 2006)



รูปที่ 2.31 ค่าเริ่มต้นที่คำนวณโดยวิธีการผกผัน (ก) กรณีที่ 5 (ข) กรณีที่ 6 (Tomita และคณะ, 2006)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.32 ระดับน้ำที่คำนวณโดยวิธีการผกผันกรณีที่ 5 เทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (Tomita และ คณะ, 2006)

Tatsumi และ Tomita (2007) ศึกษาการพยากรณ์สึนามิโดยอาศัยตำแหน่งแผ่นดินไหว และใช้ Condition Number สำหรับประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของวิธีการผกผัน พร้อมทั้งปรับปรุงวิธีการผกผันอีกสองประเด็นนั่นคือ การใช้ประโยชน์จากข้อมูลแผ่นดินไหว และข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดระดับน้ำตามแนวชายฝั่ง ในส่วนการใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวนั้นวิเคราะห์จากคลื่นการสั่นสะเทือนเพื่อกำหนดขนาดและตำแหน่งของแผ่นดินไหว ซึ่งระยะทางระหว่างจุดกำเนิดสึนามิกับจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวจะถูกนำมาประกอบการวิเคราะห์ ทำให้ได้เมตริกใหม่คือ I_2

$$I_2 = Fa = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ & 0.0 & & & \\ & & 0.1 & & \\ & & & 0.2 & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} a \quad (2.131)$$

โดยที่ I_2 เป็นเมตริกทแยงซึ่งสมาชิกในเมตริกคือระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว โดยที่สมาชิกที่เท่ากับศูนย์หมายถึงจุดกำเนิดสึนามิเป็นจุดเดียวกันกับจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว โดยหลักการกำลังสองน้อยสุดจะได้

$$a = (H^T H + \varepsilon_1^2 D^T D + \varepsilon_2^2 F^T F)^{-1} H^T \eta \quad (2.132)$$

โดยที่ a คือ ระดับน้ำเริ่มต้นที่ประมาณโดยจุดกำเนิดสึนามิตามแนวชายฝั่งใดๆ

H คือ เมตริกชุดคลื่น ณ สถานีที่พิจารณาซึ่งเกิดโดยหน่วยกำเนิดสึนามิ i ภายได้ช่วงเวลาที่พิจารณาใดๆ j

D คือ อนุพันธ์เชิงพื้นที่ของระดับผิวน้ำเริ่มต้นของจุดกำเนิดสึนามิที่น้อยที่สุดเพื่อทำให้จุดกำเนิดนั้นมีความราบเรียบ

F คือ เมตริกทแยงที่สมาชิกประกอบด้วยค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ของระยะทางสัมพัทธ์ จากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว

η คือ ชุดคลื่น ณ ตำแหน่งที่พิจารณาภายในคาบเวลาที่สังเกตในการทำการผกผัน

ส่วนที่สองที่ทำการปรับปรุงข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดน้ำตามแนวชายฝั่งนั้น ศึกษาผลของ ลักษณะภูมิประเทศและอาคารตามแนวชายฝั่งโดยใช้ขนาดกริดเล็กลง เมื่อพิจารณาเฉพาะเวลาที่คลื่น เดินทางมาถึงสถานีวัดน้ำลักษณะภูมิประเทศและอาคารตามแนวชายฝั่งไม่มีผลมากนัก ดังนั้นถ้าคลื่น หน่วยสึนามิเดินทางมาถึงก่อนคลื่นที่สังเกต ณ สถานีใดๆ ที่พิจารณา จะกำหนดให้ค่าระดับผิวน้ำ เริ่มต้นที่สอดคล้องหน่วยสึนามินั้นเท่ากับศูนย์ และด้านล่างของเมตริก H เท่ากับหนึ่ง นั่นคือ

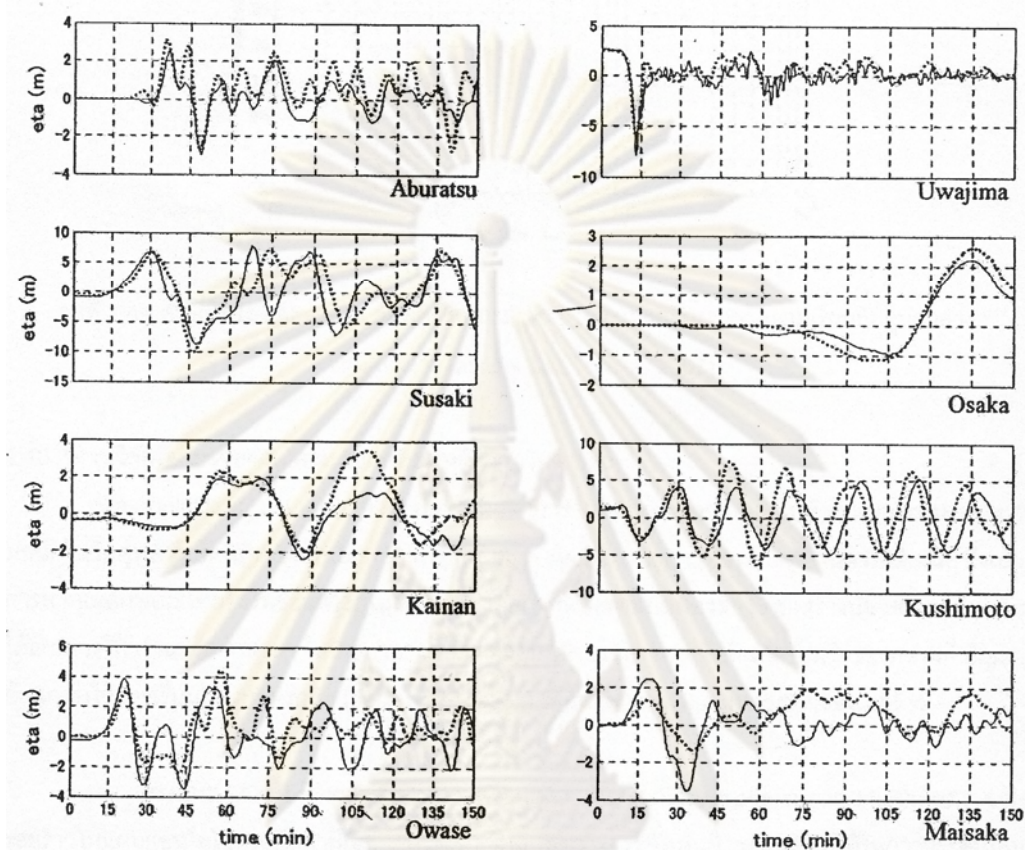
$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_T \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \tilde{\eta}_{1,1} & \cdots & \tilde{\eta}_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\eta}_{1,T} & \cdots & \tilde{\eta}_{N,T} \\ 1 \cdots & \cdots & \cdots 0 \\ 0 \cdots & 1 \cdots & \cdots 0 \\ 0 \cdots & \cdots 1 & \cdots 0 \end{bmatrix} \quad (2.133)$$

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระดับผิวน้ำเริ่มต้นกับแผ่นดินไหว 4 เหตุการณ์ โดยวิธีการผกผัน 3 วิธี และใช้คาบเวลาที่สังเกต 15 นาทีดังตารางที่ 2.6 สำหรับ Smoothness + Tidal Stations พิจารณาโดยใช้ค่าที่วัดจากเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงสถานีวัดระดับน้ำ 10 จุดสังเกตการณ์นอกชายฝั่ง กับ 17 สถานีวัดระดับน้ำ ซึ่ง 10 จุดสังเกตการณ์สมมติให้เป็นสถานี GPS ลอยน้ำวางห่างกัน 40 กิโลเมตร โดยทั้งหมดห่างจากชายฝั่ง 20 กิโลเมตร จะเห็นได้ว่าผลของ Epicenter หรือ Tidal Stations ให้ค่าระดับน้ำเริ่มต้นของจุดกำเนิดสึนามิที่ละเอียดกว่า

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบค่า RMSE สำหรับระดับผิวน้ำเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดต่างๆ

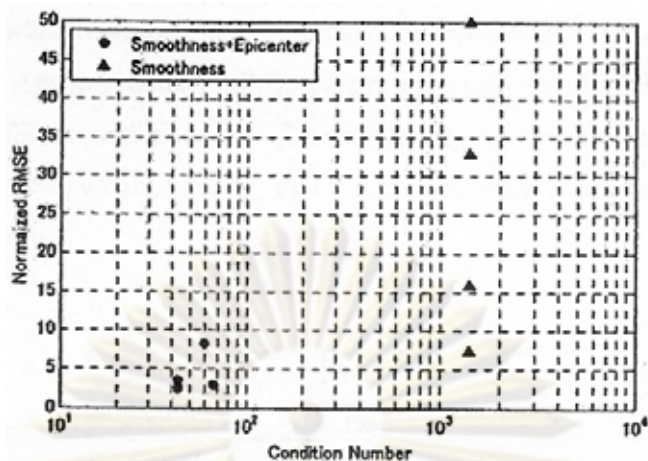
	Tokai-Nankai	Tonankai	Nankai	Tokaido-Oki
ความเรียบ	4.598	0.219	0.841	0.300
ความเรียบ + ศูนย์กลาง แผ่นดินไหว	0.501	0.089	0.137	0.050
ความเรียบ + สถานีวัดน้ำ	0.660	0.097	0.142	0.040

ส่วนการพยากรณ์ความสูงและเวลาที่คลื่นลูกแรกจะเข้าสู่ฝั่งนั้นสอดคล้องกับระดับน้ำที่บันทึกได้ดังแสดงในรูปที่ 2.33 และใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์โดยวิธีการผกผันแค่ 15 นาที ซึ่งนั่นคือสามารถพยากรณ์คลื่นสึนามิได้ก่อนที่คลื่นสึนามิจริงจะเข้าชายฝั่ง



รูปที่ 2.33 เปรียบเทียบระดับน้ำพยากรณ์กับที่บันทึกได้ทั้ง 8 สถานีตามแนวชายฝั่ง (Tomita และคณะ, 2006)

ความละเอียดของวิธีการผกผันสึนามินั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของการแก้สมการที่ (2.133) ดังนั้น Condition Number ของเมตริก $(H^T H + \varepsilon_1^2 D^T D + \varepsilon_2^2 F^T F)$ จะมีประสิทธิภาพในการประเมินความละเอียดของวิธีการผกผันสึนามิ เมื่อนำผลลัพธ์ของกรณี Smoothness และ Smoothness + Epicenter มาวิเคราะห์หา Condition number แล้วเปรียบเทียบกับค่า RMSE ที่เหตุการณ์แผ่นดินไหวแตกต่างกัน โดยการทำให้ RMSE สัมพันธ์กับระดับผิวน้ำเริ่มต้นทั้งหมดในแต่ละจุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง Condition number และ RMSE จะลดลงเมื่อพิจารณา Epicenter ด้วย นั่นหมายถึงว่าสามารถที่จะใช้ Condition number เป็นค่าที่แสดงความละเอียดของวิธีการผกผันสึนามิ โดยทั่วไป Condition number จะขึ้นอยู่กับเฉพาะเมตริก H เท่านั้น เพราะฉะนั้นเราสามารถที่จะคำนวณ Condition number ไว้ล่วงหน้าก่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้



รูปที่ 2.34 Condition number และ RMSE สัมพัทธ์ของกรณี Smoothness และ Smoothness + Epicerter (Tomita และคณะ, 2006)

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม

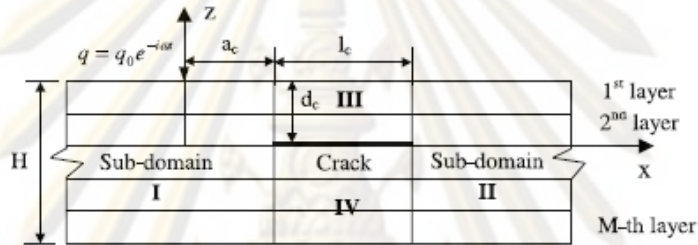
Stavroulakis และ Antes (1998) ศึกษาปัญหาการจำแนกรอยร้าวย้อนกลับด้วยการกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกในวัสดุพลาสต์ยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยการใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation) และเทคนิคเบานดารีอิเลเมนต์ ซึ่งเน้นการหาคุณลักษณะรอยร้าวที่ซ่อนตัวอยู่ในโครงสร้าง โดยการวัดผลตอบสนองของโครงสร้างบนขอบเขตที่เข้าถึงได้โดยการให้แรงแบบคาบเวลา ในปัญหาทางตรงหาคำตอบโดยใช้เบานดารีอิเลเมนต์ในเชิงความถี่ ส่วนในปัญหาย้อนกลับใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับเพื่อหาตำแหน่งและความยาวของรอยร้าว

Xu และคณะ (2001) ศึกษาการใช้โปรเซปตรอนหลายชั้น (MLP) เพื่อตรวจจับรอยร้าวในแผ่นแอนไอโซทรอปิกกลามิเนต โดยใช้ผลตอบสนองการกระตุ้นบนผิวของแผ่น ที่ได้รับการกระตุ้นโดยแรงฮาร์มอนิกแบบเส้น (Time-harmonic line load) เป็นข้อมูลนำเข้าโครงข่าย MLP โดยกำหนดตำแหน่งและขนาดของรอยร้าวในแผ่นแอนไอโซทรอปิกกลามิเนตให้เป็นข้อมูลส่งออกจากโครงข่าย MLP การฝึกแบบจำลองครั้งแรกล้วนสร้างความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างผลตอบสนองการกระตุ้นที่กระจายอยู่บนผิว กับตำแหน่งและขนาดของรอยร้าวที่สมนัยกัน ตัวอย่างผลตอบสนองการกระตุ้นที่ต้องการใช้ในการฝึก คำนวณโดยวิธีสตริปอิเลเมนต์ (Strip element method, SEM) เพื่อความสะดวกในการฝึกได้เสนอกาววิเคราะห์ความสัมพันธ์สำหรับข้อมูลส่งออกของโครงข่ายในชั้นที่ซ่อนภายในที่เหมาะสมด้วย และทำการดัดแปลงวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับโดยการปรับอัตราการเรียนรู้แบบพลวัต และเพิ่มตัวประกอบกระโดด (Jump factor) เพื่อเพิ่มความเร็วให้กับกระบวนการเรียนรู้ให้มีการลู่เข้าเร็วขึ้น การฝึกแบบจำลอง MLP นี้ จะใช้เมื่อมีการสร้างพารามิเตอร์รอยร้าวขึ้นมาใหม่โดยการป้อนผลตอบสนองการกระตุ้นบนพื้นผิว พารามิเตอร์ที่สร้างขึ้นใหม่จะถูกตรวจสอบกับผลลัพธ์จาก RMSE ว่าใกล้เคียงเพียงไร

ถ้าไม่ แบบจำลอง MLP ก็จะต้องกลับไปทำการฝึกใหม่จนกว่าผลตอบสนองที่วัดได้กับแบบจำลองใกล้เคียงกัน

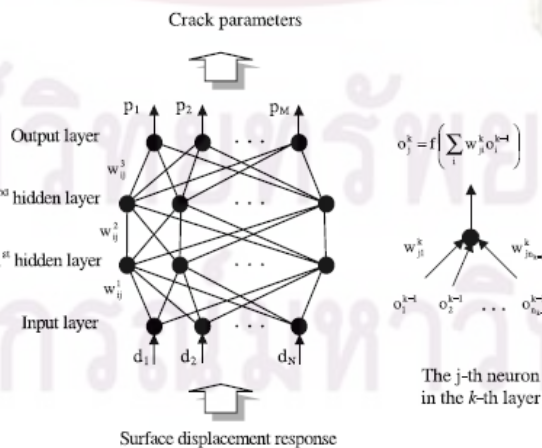
เทคนิคที่นำเสนอนี้เพื่อทดสอบเชิงตัวเลขโดยใช้แผ่นแอนไอโซทรอปิกลามิเนทที่มีตำแหน่งรอยร้าวในแนวราบ และความยาวที่แตกต่างกัน แล้วจำลองผลตอบสนองพื้นผิวที่มี และไม่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการฝึกแบบจำลอง MLP เพื่อตรวจสอบรอยร้าว

รูปที่ 2.35 แสดงแผ่นลามิเนทที่ประกอบด้วยชั้นของแอนไอโซทรอปิก M ชั้น ความหนาของแผ่นในแนวแกน z กำหนดให้เป็น H ความยาวและความกว้างอยู่ในแกน x และ y ตามลำดับ และพิจารณาเป็นค่าอนันต์ สำหรับปัญหานี้พิจารณาเป็น 2 มิติ และสมมติให้รอยร้าวอยู่มแนวราบ วางอยู่ในแนวแกนเป็นระยะ a_c (จากระนาบ $x=0$ ถึงปลายด้านซ้ายของรอยร้าว) และมีความลึก d_c (จากผิวบนของแผ่นถึงจุดศูนย์กลางของรอยร้าวตามแนวแกน z) ความยาวของรอยร้าวให้เป็น l_d



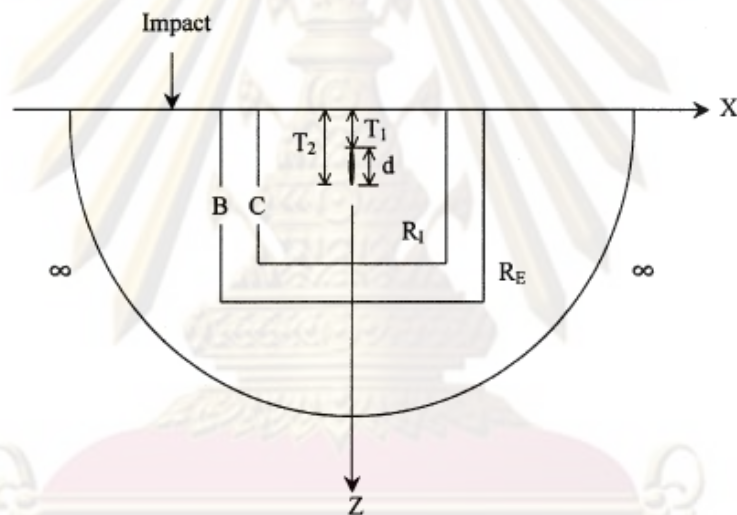
รูปที่ 2.35 แผ่นแอนไอโซทรอปิกลามิเนท M ชั้น กับรอยร้าว (Xu และคณะ, 2001)

รูปที่ 2.36 แสดงโครงข่าย MLP ซึ่งประกอบด้วยชั้นนำเข้า ชั้นส่งออก และชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเซลล์ที่รวมกันด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ซึ่งใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)



รูปที่ 2.36 โครงข่ายโปรเซปตรอนกับชั้นที่ซ่อนภายใน 2 (Xu และคณะ, 2001)

Liu และคณะ (2002) นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ที่ย้อนกลับเพื่อจำลองคลื่นอัลตราโซนิก A-scan สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับ และทำการคำนวณทางกลศาสตร์ การศึกษาทำการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วนคือ ปัญหาทางตรง และปัญหาย้อนกลับ ในปัญหาทางตรง การคำนวณผลตอบสนองของคลื่นในภาวะคงตัวของรอยร้าวที่อยู่ภายในตัวกลาง ภายใต้การกระทำของ แรงกระแทก โดยใช้การคำนวณทางกลศาสตร์ร่วมกับวิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์ และสมการบานดารีอินทิเกรล (Boundary integral equation) ส่วนผลตอบสนองของคลื่นในภาวะชั่วคราวใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fast fourier transform, FFT) ในปัญหาย้อนกลับใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับ เพื่อสอนโดยใช้คุณลักษณะของพารามิเตอร์ที่ได้จากผลตอบสนองของคลื่นที่หาจากปัญหาทางตรง โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ได้รับการฝึกไว้แล้วนั้นจะสามารถจำแนก และบ่งชี้รอยร้าวภายในตัวกลางของ โครงสร้าง เช่น ประเภท ตำแหน่ง และความยาวของรอยร้าวได้รูปที่ 2.37 แสดงขอบเขตการคำนวณ โดยรอยร้าวอยู่ภายในตัวกลางกึ่งอนันต์และถูกกระทำด้วยแรงกระแทกที่พื้นผิว



รูปที่ 2.37 ขอบเขตการคำนวณที่มีรอยร้าวอยู่ภายใต้ตัวกลางกึ่งอนันต์และถูกกระทำด้วยแรงกระแทกที่พื้นผิวอิสระ (Liu และคณะ, 2002)

โดยการศึกษาพิจารณาให้แรงกระทำ 10 จุดบนพื้นผิวคือที่ระยะ $x/d = -0.45, -0.95, -1.45, -1.95, -2.5, -3.0, -4.0, -6.0, -8.0, -10.0$ ส่วนตัวรับคลื่นวางตามแนวพื้นผิวที่ระยะ $x/d = -2$ และ 2 ซึ่งจะมีตัวรับคลื่น 65 ตัวสำหรับกรณีที่ไม่มีรอยร้าว 69 ตัวสำหรับกรณีที่รอยร้าวอยู่ที่พื้นผิว และ 70 ตัวสำหรับกรณีที่รอยร้าวอยู่ที่พื้นผิวดารางที่ 2.7 แสดงตำแหน่งและความยาวของรอยร้าวที่มีการแปรผันความยาวในแนวตั้งทั้ง 5 ขนาด

ตารางที่ 2.7 ตำแหน่งและความยาวของรอยร้าวที่มีการแปรผันความยาวในแนวดิ่ง

Class	Length	Upper tip (T_1)	Lower tip (T_2)
Surface-breaking cracks	$0.75d$	0.0	$0.75d$
	d	0.0	d
	$1.25d$	0.0	$1.25d$
Sub-surface cracks	$0.75d$	$0.5d$	$1.25d$
	d	$0.25d$	$1.25d$

สำหรับข้อมูลที่ใช้ในปัญหาย่อยกลับใช้จากการวิเคราะห์ผ่านปัญหาทางตรงทั้งหมด 510 คลื่น นอกจากนั้นยังเพิ่มอีก 85 คลื่นจากกรณีพิจารณารอยร้าวทั้ง 5 รอยตามตารางที่ 2.7 และ 85 คลื่นจากกรณีที่ไม่คิดรอยร้าว ในแต่ละผลตอบสนองพื้นผิวชั่วคราวที่หาจากปัญหาทางตรงจะแยกออกเป็น 13 ลักษณะ นั่นคือ สามค่าแรกจากผลตอบสนองสัมพัทธ์มากที่สุด, สามค่าแรกจากผลตอบสนองสัมพัทธ์น้อยที่สุด, ระยะเวลาเดินทางของคลื่น และระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับคลื่น

ข้อมูลส่งออกที่ต้องการจากโครงข่ายแยกเป็นสามประเภทคือ ไม่มีรอยร้าว, รอยร้าวที่พื้นผิว และรอยร้าวใต้พื้นผิว ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ส่วนข้อมูลนำเข้าโครงข่าย 12 ค่าคือ สามค่าแรกจากผลตอบสนองสัมพัทธ์มากที่สุด, สามค่าแรกจากผลตอบสนองสัมพัทธ์น้อยที่สุด, ระยะเวลาเดินทางของคลื่น ส่วนระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับคลื่นจะไม่พิจารณาในที่นี้ ดังนั้นจำนวนของนิวรอลนำเข้าคือ 12 และจำนวนนิวรอลส่งออกคือ 3 จำนวนชั้นซ่อนเร้นคือ 1 ที่มีจำนวนโหนด 12 โหนด (12-12-3) ตารางที่ 2.9 คือผลที่ได้จากโครงข่ายที่จำแนกจากข้อมูลนำเข้า 320 คลื่นสำหรับการสอน และ 190 คลื่นสำหรับการทดสอบ

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลส่งออกที่เป็นเป้าหมายจากโครงข่ายสำหรับรอยร้าว 3 ชนิด

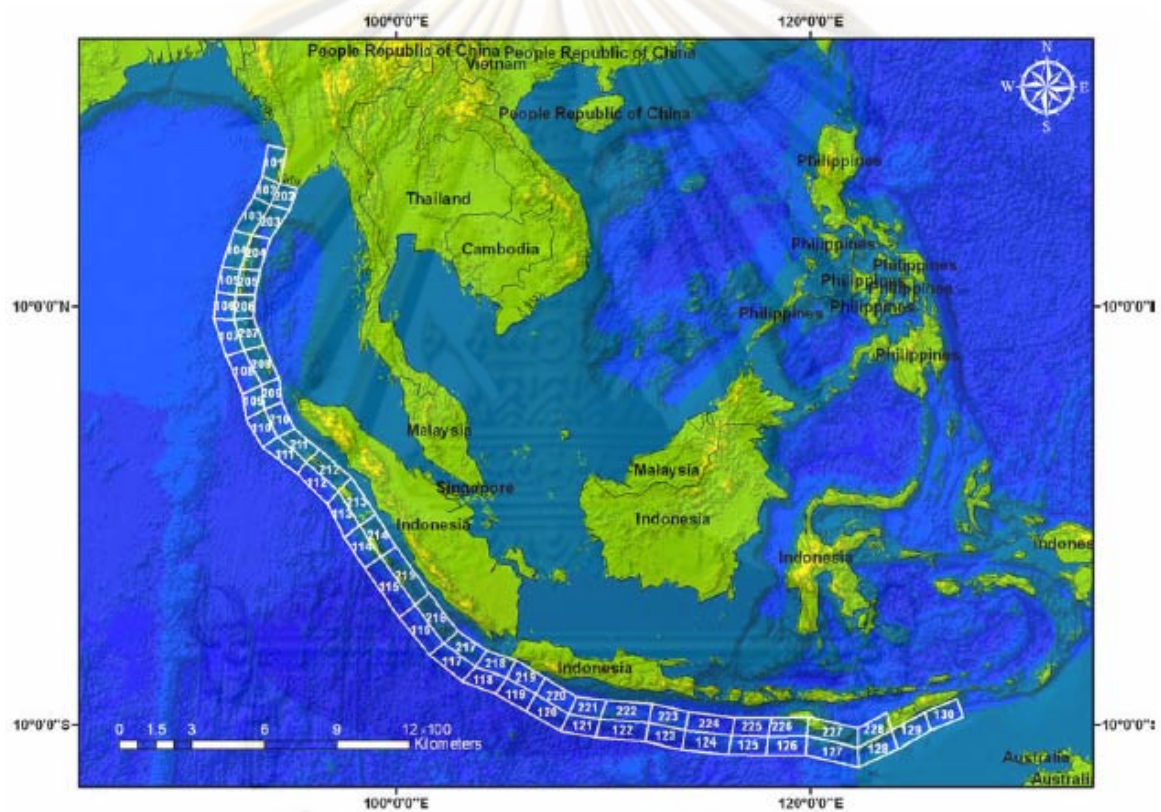
Class	Neuron #1	Neuron #2	Neuron #3
Sub-surface cracks	0	0	1
Surface-breaking cracks	0	1	0
Without cracks	1	0	0

ตารางที่ 2.9 ผลลัพธ์จากการทดสอบสำหรับการจำแนกชนิดของรอยร้าว

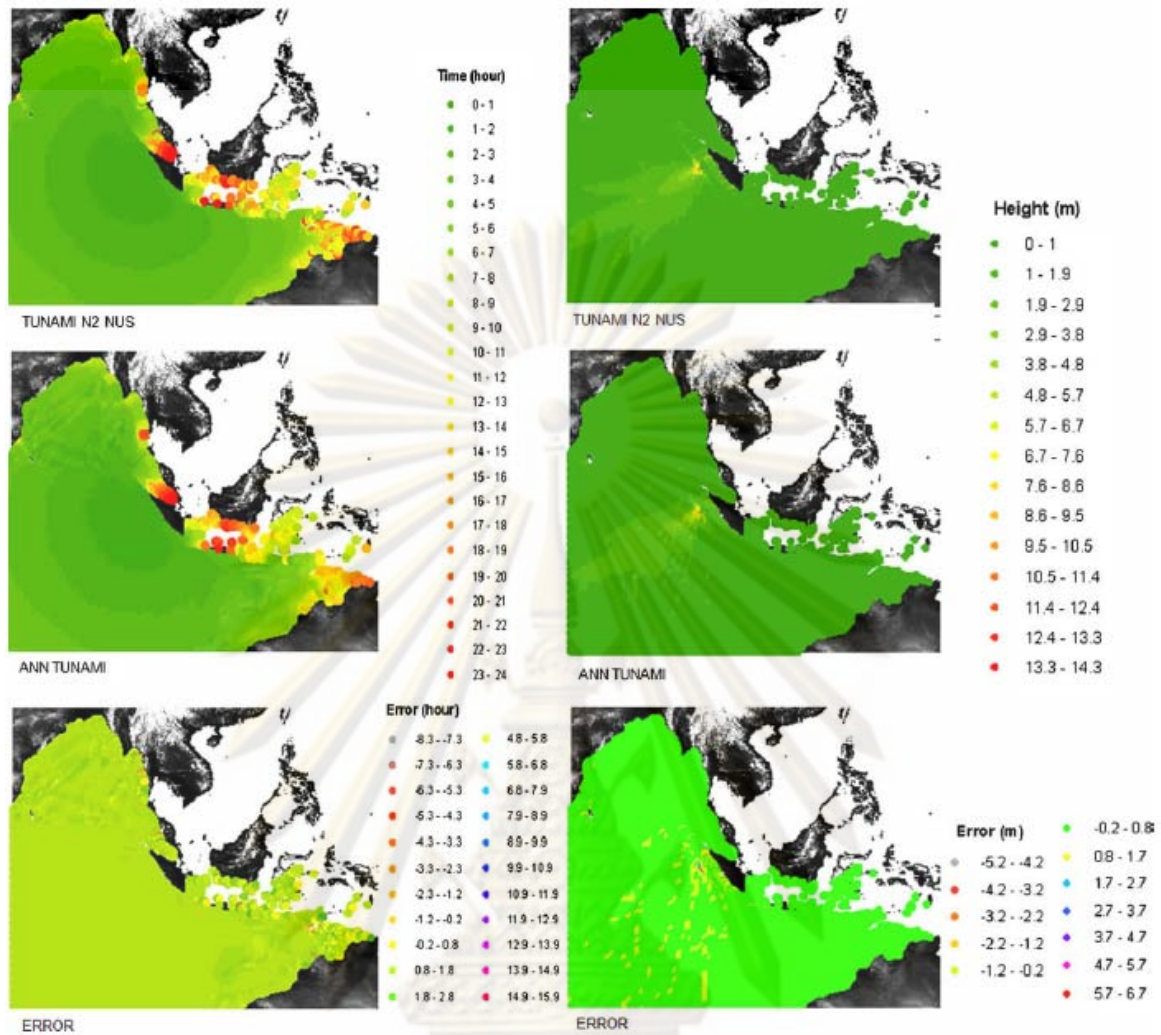
Desired outputs			Actual outputs		
1	0	0	0.943	0.000	0.057
1	0	0	0.967	0.002	0.031
1	0	0	0.969	0.001	0.031
0	1	0	0.000	0.998	0.002
0	1	0	0.000	0.999	0.001
0	1	0	0.000	1.000	0.000
0	0	1	0.000	0.003	0.997
0	0	1	0.000	0.001	0.999
0	0	1	0.000	0.000	1.000

Romano และคณะ (2008) ศึกษาวิธีการค้นหาข้อมูลและพยากรณ์สึนามิ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับฝึกแบบจำลองและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบสึนามิ (Tsunami

scenarios) กับความสูงคลื่นและเวลาเดินทางถึงของคลื่นของแต่ละรูปแบบ การศึกษานั้นศึกษาโดยการสมมุติรอยเลื่อนย่อยตลอดแนวเขตมุดตัวสุมาตรา ดังแสดงในรูปที่ 2.38 และทำการจำลองสึนามิโดยให้มีขนาดการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันไปตั้งแต่ 10, 20 ,30 และ 40 เมตรตามลำดับ สำหรับแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลอง TUNAMI-N2-NUS ส่วนแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) ของความสูงคลื่นสูงสุดและเวลาเดินทางของคลื่นเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้รูปแบบของรอยเลื่อนแต่ละแบบเป็นชุดข้อมูลส่งออก จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมนั้นพบว่า สามารถพยากรณ์ความสูงคลื่นและเวลาเดินทางของคลื่นในแต่ละตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับกับการใช้แบบจำลอง TUNAMI-N2-NUS วิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.38

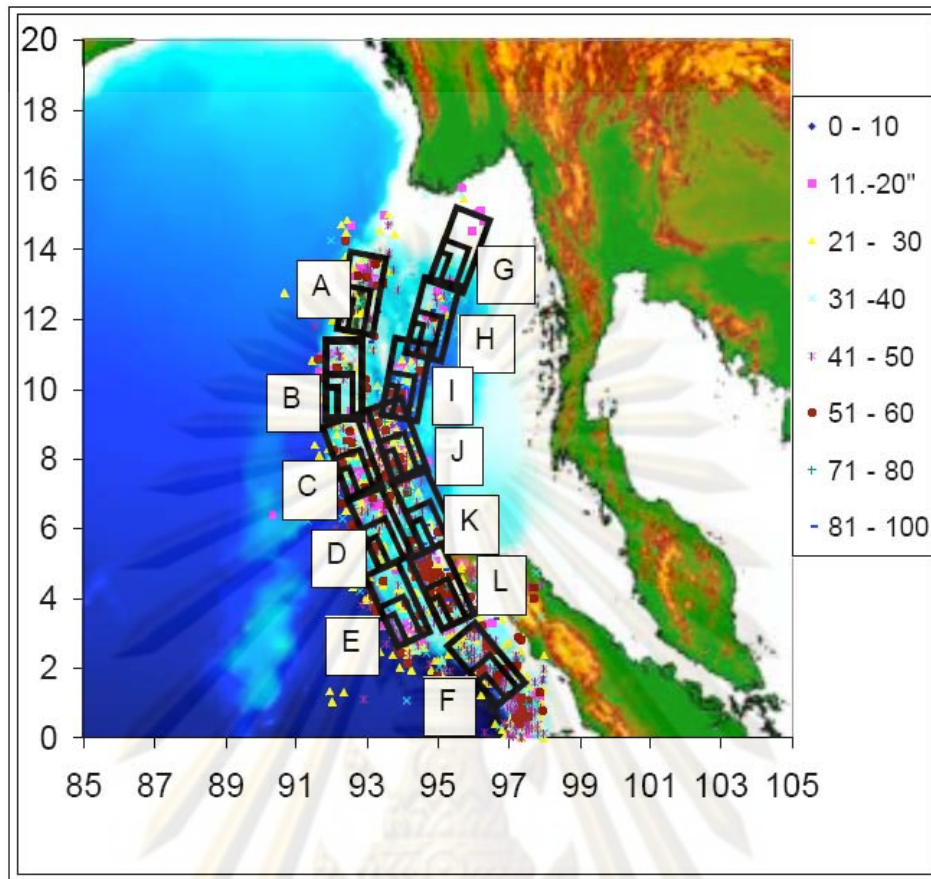


รูปที่ 2.38 พื้นที่ศึกษา และตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (Romano และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.39 การเปรียบเทียบเวลาเดินทางของคลื่น (แถวซ้าย) และความสูงคลื่นสูงสุด (แถวขวา) ที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง TUNAMI-N2-NUS (บน) แบบจำลอง ANNs (กลาง) และค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทั้งสอง (ล่าง) (Romano และคณะ, 2008)

Supharatid (2008) ศึกษาการพยากรณ์ความสูงคลื่น ณ ชายฝั่งภาคใต้ฝั่งตะวันตกของประเทศไทย 58 ตำแหน่ง รวมทั้งสถานีวัดน้ำ DART buoy 2 สถานีกลางทะเล โดยใช้พารามิเตอร์ของแผ่นดินไหวที่กำหนดขึ้นในเขตมุดตัวสุมาตรา 12 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2.40 ซึ่งแต่ละตำแหน่งกำหนดให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดตั้งแต่ 6.0–9.0 และมีความลึกตั้งแต่ 10–50 กิโลเมตร ในการศึกษาใช้ General regression neural network สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นในตำแหน่งๆ กับตำแหน่งของรอยเลื่อนที่กำหนดขึ้น ทั้งหมด 4 แบบจำลองซึ่งมีข้อมูลนำเข้าและส่งออกแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.10 ถึงตารางที่ 2.13 โดยแบบจำลอง GRNN-1 ไม่ได้ใช้ข้อมูลสถานี DART buoy เป็นข้อมูลนำเข้า ส่วนแบบจำลองที่เหลือใช้ข้อมูลสถานี DART buoy เป็นข้อมูลนำเข้าร่วมด้วย



รูปที่ 2.40 รอยคลื่นและพื้นที่ที่ศึกษา (Supharatid, 2008)

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1

Inputs		Outputs
Epicenter	Fixed at 12 locations	Maximum wave height in 58 risked communities along the coastline and 2 DART buoy locations
Earthquake magnitude (Mw)	6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 and 9.0	
Earthquake depth (D)	10, 20, 30, 40 and 50 km.	

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1.1

Inputs		Outputs
Epicenter	Fixed at 12 locations	Maximum wave height in 58 selected communities along the coastline
Earthquake magnitude (Mw)	6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 and 9.0	
Earthquake depth (D)	10, 20, 30, 40 and 50 km.	
DART buoy	No. 23401	

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-1.2

Inputs		Outputs
Epicenter	Fixed at 12 locations	Maximum wave height in 58 selected communities along the coastline
Earthquake magnitude (Mw)	6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 and 9.0	
Earthquake depth (D)	10, 20, 30, 40 and 50 km.	
DART buoy	No. 54301	

ตารางที่ 2.13 ข้อมูลนำเข้า ส่งออกของแบบจำลอง GRNN-2

Inputs		Outputs
Epicenter	Fixed at 12 locations	Maximum wave height in 58 selected communities along the coastline
Earthquake magnitude (Mw)	6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 and 9.0	
Earthquake depth (D)	10, 20, 30, 40 and 50 km.	
DART buoy	Nos. 23401 and 54301	

จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลสถานีวัดน้ำ DART buoy (แบบจำลอง GRNN-1.1, GRNN-1.2 และ GRNN-2) ให้ค่า EI สูงขึ้น 4 % ส่วนค่า RMSE ให้ค่าลดลง 26 % เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่ใช้ข้อมูลสถานีวัดน้ำ DART buoy (แบบจำลอง GRNN-1) ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลสถานีวัดน้ำ DART buoy จะใช้สำหรับปรับค่าความสูงคลื่น ณ ชายฝั่ง เมื่อสึนามิเดินทางถึงสถานี DART buoy สถานีใดสถานีหนึ่ง เพื่อให้ค่าความสูงคลื่น ณ ชายฝั่งมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3

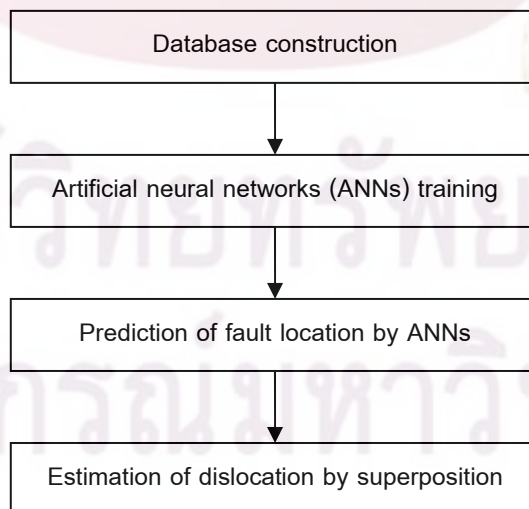
หลักการพยากรณ์สึนามิ

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโดยทั่วไปมักจะใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้สำหรับหาทั้งตำแหน่งและระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้ทั้งจากขั้นตอนการหาตำแหน่งและระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงแยกการพิจารณาการหาตำแหน่ง และระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนออกจากกัน โดยการหาตำแหน่งจะประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) ที่ใช้ข้อมูลจากสถานีวัดน้ำเพื่อให้แน่ใจได้ว่าจะมีการเกิดสึนามิตามมาหลังจากการเกิดแผ่นดินไหว และอาศัยหลักการซ้อนทับในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

การพยากรณ์สึนามิในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) การสร้างฐานข้อมูลสึนามิจากรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย
- 2) การฝึกแบบจำลอง ANN จากฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น
- 3) การพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน
- 4) การหาค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนนั้น ดังแสดงใน รูปที่ 3.1

การสร้างฐานข้อมูลสึนามิจำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณทะเลอันดามัน ประกอบ เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ของรอยเลื่อน และจำลองสึนามิเพื่อศึกษาผลตอบแทนของสึนามิจากรอยเลื่อนดังกล่าวโดยแบบจำลอง TUNAMI แล้วเก็บเป็นฐานข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งของรอยเลื่อนกับผลตอบแทนของสึนามิ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการพยากรณ์สึนามิ

การฝึกแบบจำลอง ANN นั้นใช้การฝึกกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation) ซึ่งเป็นการเรียนรู้ที่ใช้สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทหลายชั้น (Multilayer perceptron) โดยใช้ผลตอบสนองของคลื่น ณ สถานีวัดน้ำทั้งที่อยู่กลางมหาสมุทรและบริเวณชายฝั่งภาคใต้ฝั่งตะวันตก อันเกิดมาจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนเป็นข้อมูลส่งออก

การพยากรณ์ตำแหน่งจะพยากรณ์จากแบบจำลอง ANN ที่ได้ทำการฝึกมาแล้ว โดยใช้ผลตอบสนองของสึนามิ ณ สถานีวัดน้ำในตำแหน่งต่างๆ เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง แล้วจำคำนวณหาตำแหน่งของรอยเลื่อน ซึ่งสามารถหาผลตอบสนองของสึนามิได้จากฐานข้อมูล ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 4

การพยากรณ์ขนาดการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนอาศัยหลักการซ้อนทับ โดยการขยายคลื่นที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลอง ANN แล้วหาค่าคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับคลื่นที่วัดได้จริง ตัวคูณขยายที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดก็คือระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

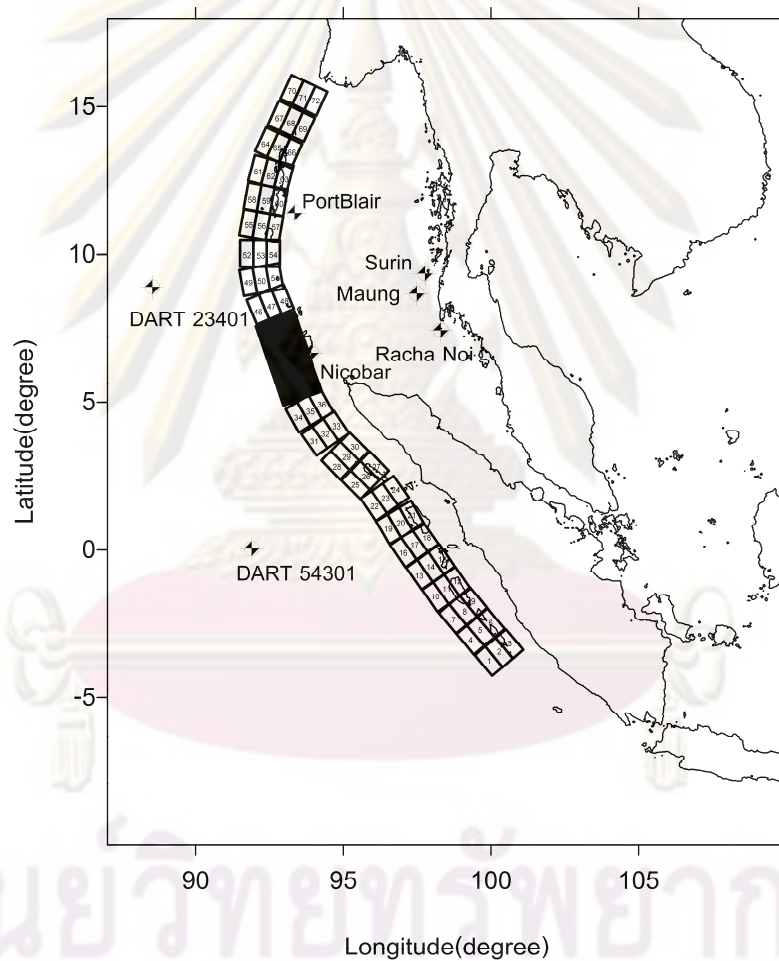
3.1 หลักการซ้อนทับ (Method of superposition)

แผ่นดินไหวสามารถทำให้มีการเคลื่อนของรอยเลื่อนขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นดินไหวนั้นๆ ในหัวข้อนี้จะประเมินความถูกต้องของหลักการซ้อนทับ จากการวิเคราะห์สึนามิจากรอยเลื่อนที่มีการเคลื่อนตัว 1 เมตร รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งสำหรับทดสอบหลักการซ้อนทับซึ่งได้เลือกรอยเลื่อนขนาด 150x300 กิโลเมตร เป็นกรณีศึกษา และจะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิเนื่องจากรอยเลื่อนดังกล่าวที่มีการเคลื่อนตัว 5 เมตร โดยพิจารณา 3 กรณีคือ

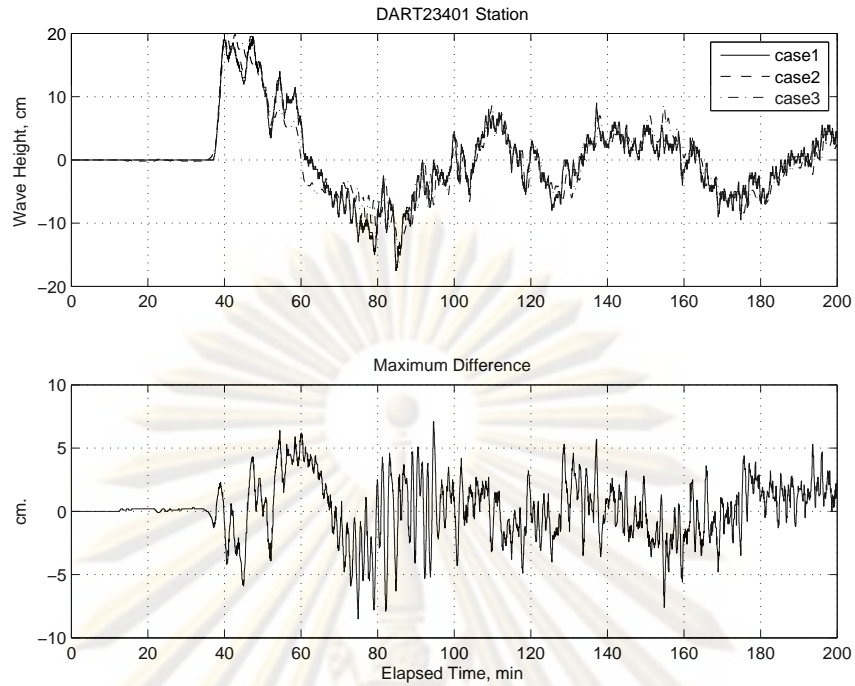
- 1) กรณีที่ 1 (case1) คือ ผลรวมผลวิเคราะห์สึนามิจากรอยเลื่อนหมายเลข 37 ถึง 45 (รอยเลื่อนเคลื่อนตัว 1 เมตร) คุณด้วย 5
- 2) กรณีที่ 2 (case2) คือ ผลการวิเคราะห์สึนามิจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมหมายเลข 1013 แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้คูณด้วย 5
- 3) กรณีที่ 3 (case3) คือ ผลวิเคราะห์สึนามิเนื่องจากรอยเลื่อนขนาด 150x300 กิโลเมตร ที่มีการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน 5 เมตร (เหตุการณ์อ้างอิง)

รูปที่ 3.3 ถึง รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สึนามิ ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี จะเห็นได้ว่าทั้งเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ความสูงคลื่นลูกแรก และเฟสของคลื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปการใช้หลักการซ้อนทับได้ว่า

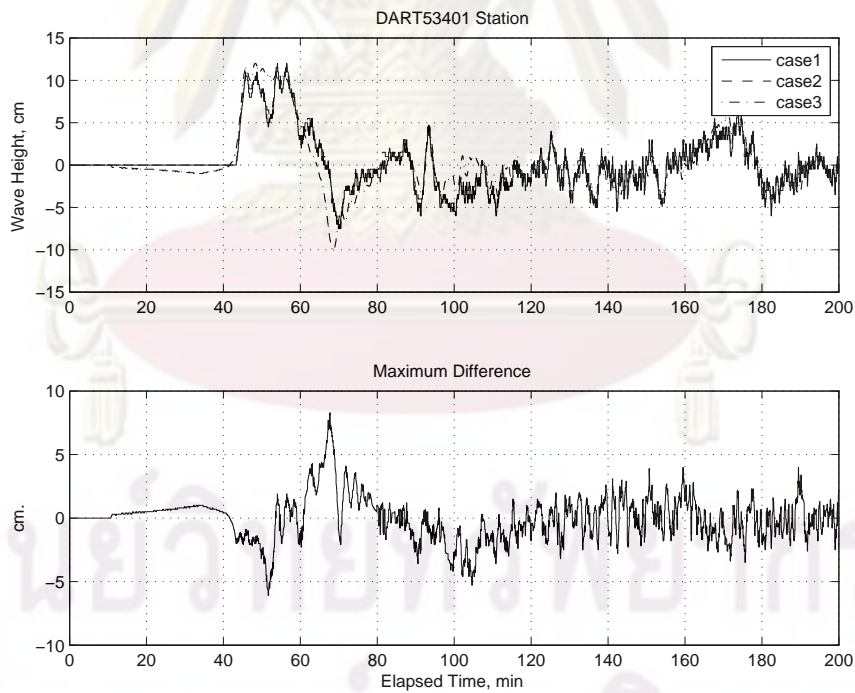
- 1) เมื่อใช้หลักการซ้อนทับกับการเคลื่อนตัวของพื้นทะเลในแต่ละรอยเลื่อน แล้วนำไปวิเคราะห์หีสึนามิ ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างไปจากการวิเคราะห์หีสึนามิที่ละรอยเลื่อนแล้วนำมา รวมกัน (เปรียบเทียบระหว่าง case1 และ case2)
- 2) เมื่อนำผลการวิเคราะห์หีสึนามิจากรอยย่อยแต่ละรอยมารวมกันแล้วคุณขยายผลลัพธ์ ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันกับ การวิเคราะห์หีสึนามิที่ใช้ขนาดรอยเลื่อนเท่าจริงทั้งขนาดและการเคลื่อนตัว (เปรียบเทียบระหว่าง case1 และ case3)
- 3) พบว่าความสูงของคลื่นมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน
- 4) เวลาเดินทางของคลื่นในแต่ละสถานี ไม่ขึ้นกับระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน



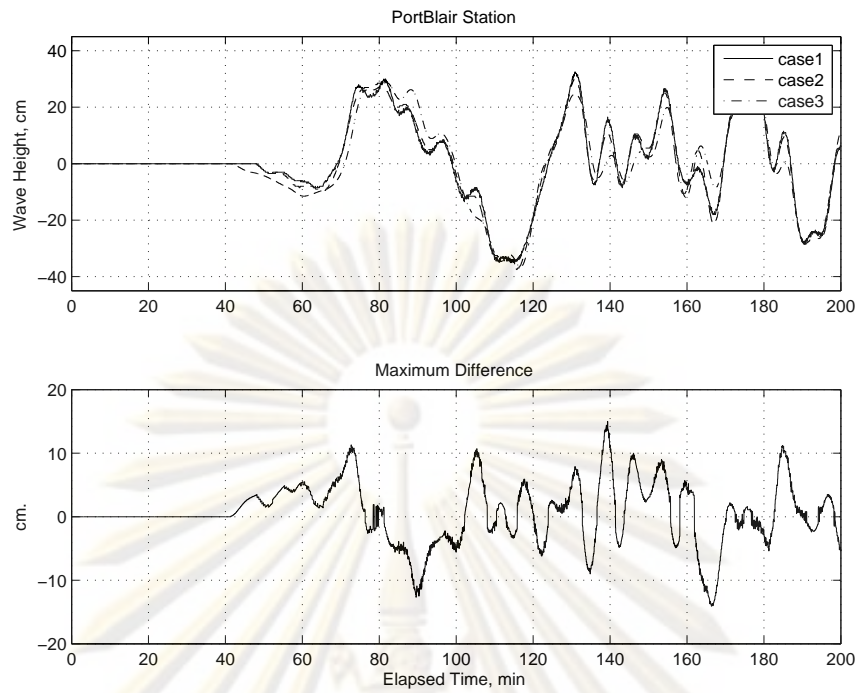
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ใช้สำหรับศึกษาหลักการซ้อนทับ



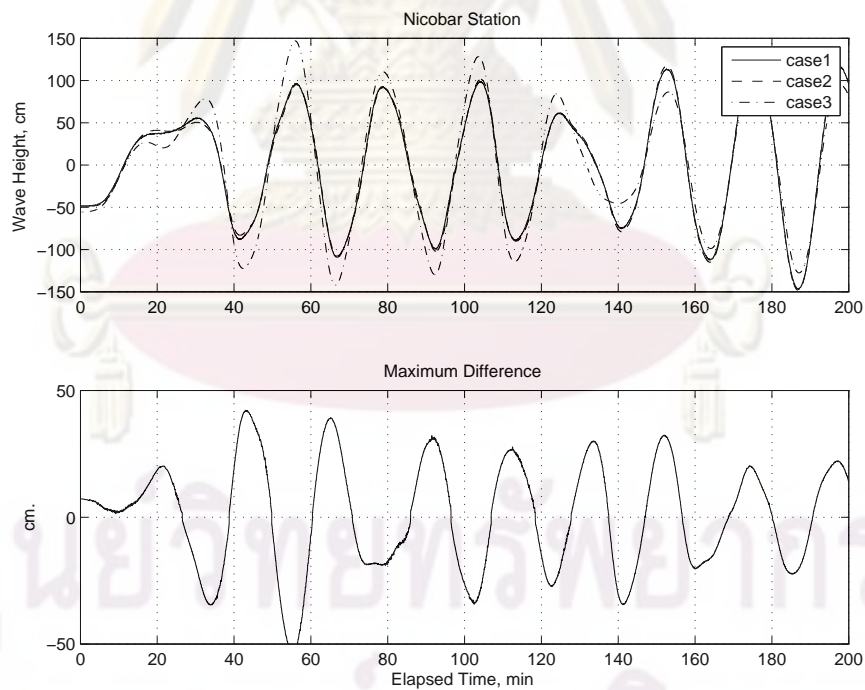
รูปที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นสามเหตุการณ์ ณ สถานี DART 23401



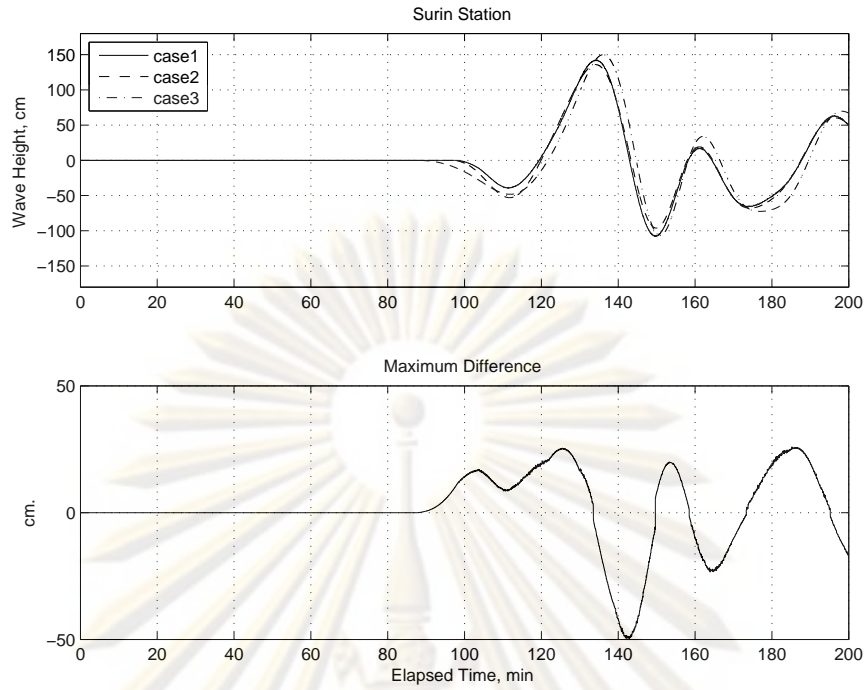
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นสามเหตุการณ์ ณ สถานี DART 53401



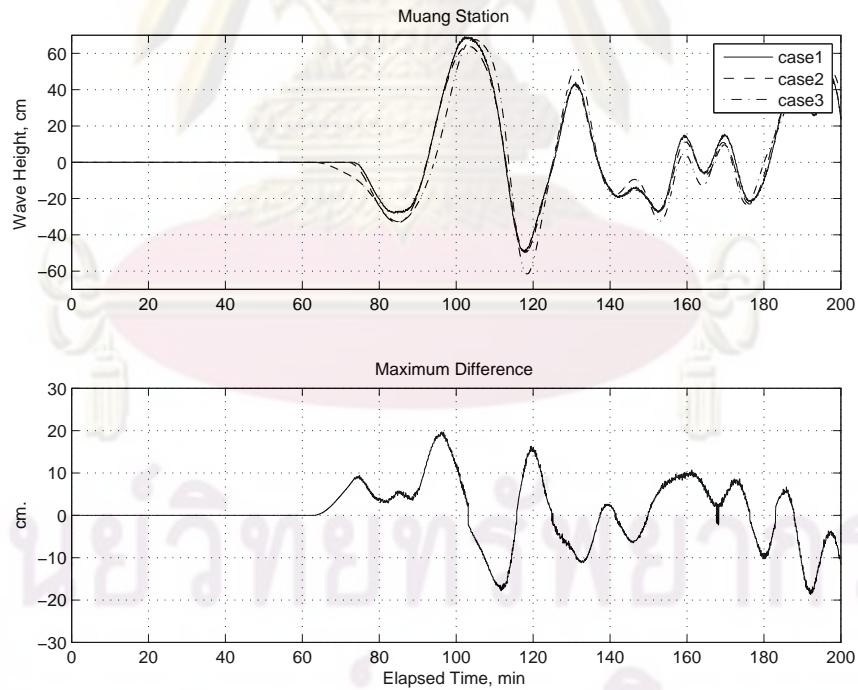
รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หีสึนามิตั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี Port Blair



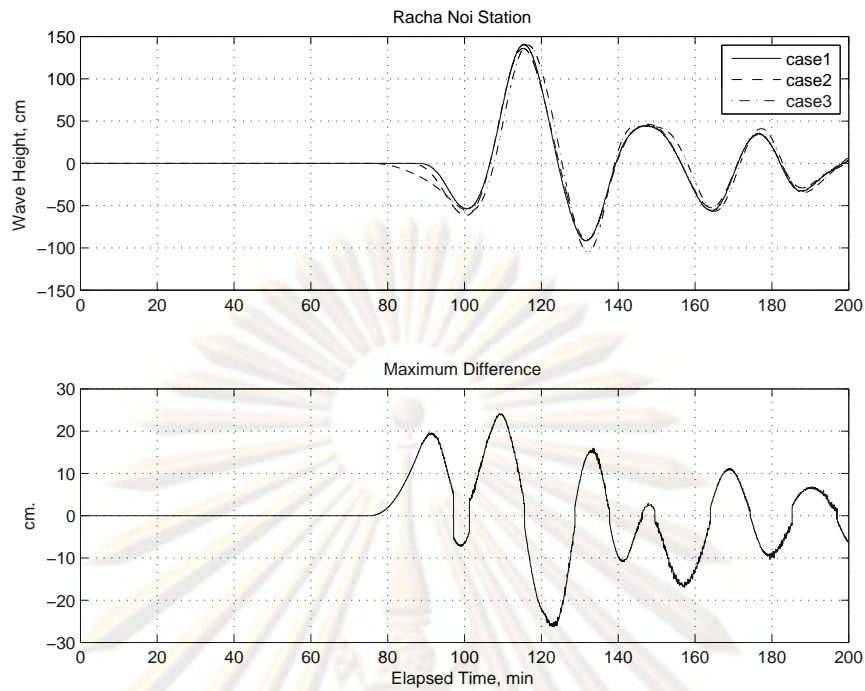
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หีสึนามิตั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานี Nicobar



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นสามเหตุการณ์ ณ สถานีเกาะสุรินทร์



รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นสามเหตุการณ์ ณ สถานีเกาะเมียง



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หีสึนามิทั้ง 3 เหตุการณ์ ณ สถานีเกาะราชาน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

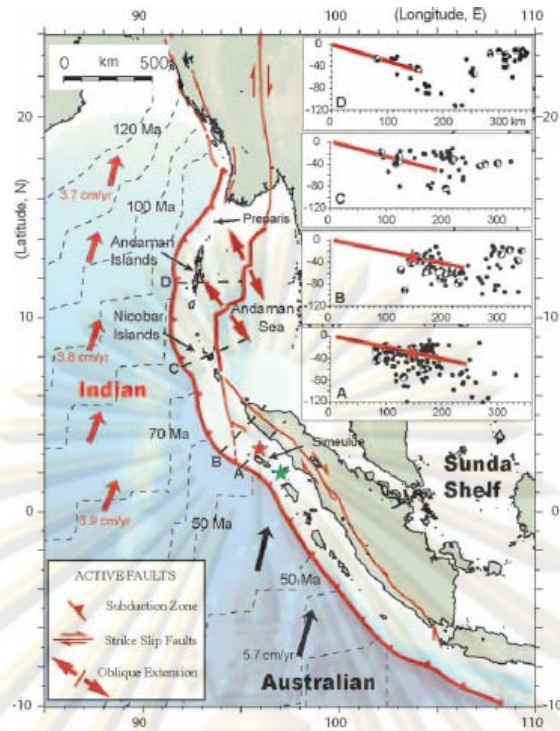
บทที่ 4

ฐานข้อมูลสึนามิ

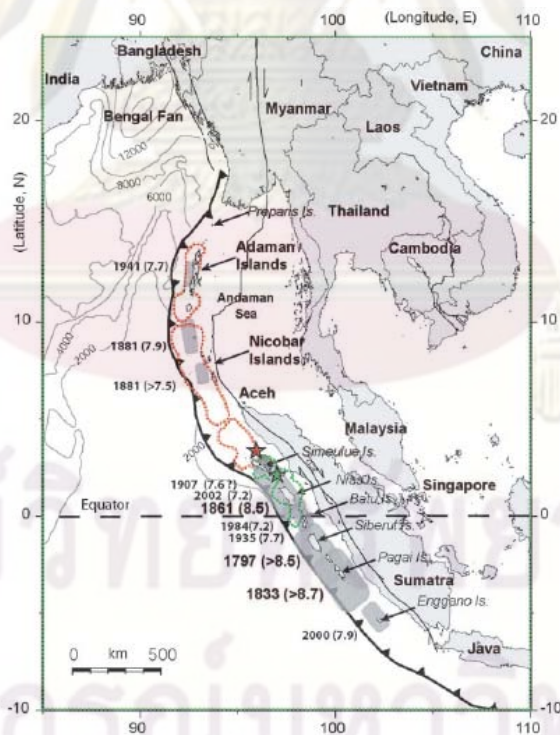
4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณทะเลอันดามัน

การกำหนดพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนจำเป็นต้องมีการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาประกอบ เนื่องจากสึนามิส่วนมากเกิดจากแผ่นดินไหวในบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก ซึ่งประเทศไทยอาจได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวขึ้นเหนือที่เกือบจะขนานกับร่องรอยเลื่อนของแผ่นทวีปอินเดียน-ออสเตรเลีย เมื่อเทียบกับแผ่นซุนดา ทำให้บริเวณดังกล่าวมีทั้งการมุดตัวและบิดตัวของเปลือกโลกไปพร้อมๆ กัน ในบริเวณเกาะอันดามันจะมีอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นทวีปอินเดียนอยู่ระหว่าง 14-34 มม ต่อ ปี ซึ่งน้อยกว่าบริเวณด้านใต้ของเกาะสุมาตราที่มีอัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 63 มม ต่อ ปี เนื่องจากอายุและความหนาของแผ่นทวีปเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความเร็วของการเคลื่อนตัวของแผ่นทวีป และส่งผลโดยตรงต่อการเกิดแผ่นดินไหวดังจะเห็นว่าแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มักเกิดในบริเวณตอนใต้ของเกาะสุมาตรา ซึ่งเป็นบริเวณที่แผ่นทวีปมีอายุน้อยกว่าและมีความหนาน้อยกว่าบริเวณเกาะอันดามัน

Chlieh และคณะ (2007) ได้ศึกษาลักษณะทางธรณีแปรสัณฐานบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเห็นได้ว่าบริเวณแผ่นออสเตรเลียมีการเคลื่อนตัวด้วยความเร็วประมาณ 57 มม ต่อ ปี (ลูกศรสีดำ) และแผ่นอินเดียนเคลื่อนตัวด้วยความเร็วประมาณ 3.8 มม ต่อ ปี (ลูกศรสีแดง) ความเร็วทั้งคู่เทียบกับแผ่นซุนดา เส้นประแสดงอายุของแผ่นทวีปอินเดียน-ออสเตรเลียที่มีอายุอยู่ระหว่าง 50 ถึง 120 ล้านปี ซึ่งบริเวณเกาะอันดามันมีอายุมากกว่าบริเวณด้านใต้เกาะสุมาตรา และที่มุมขวาบนแสดงรูปตัดขวางบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา และตำแหน่งของแผ่นดินไหวขนาด (Mw) 6 ขึ้นไปตั้งแต่ปี ค.ศ. 1964 ถึง ค.ศ. 2002 ซึ่งรวบรวมจาก Harvard CMT catalog และในรูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่สำคัญที่เคยเกิดขึ้นในบริเวณเขตมุดตัวสุมาตราระหว่าง ค.ศ. 1797 ถึง ค.ศ. 2004 และเส้นแสดงความหนาของแผ่นทวีป เห็นได้ชัดว่าแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มักเกิดในบริเวณด้านตะวันตกเฉียงใต้ของเกาะสุมาตรา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอายุน้อยกว่าและมีความหนาน้อยกว่าบริเวณเกาะอันดามัน โดยบริเวณด้านตะวันตกเฉียงใต้ของเกาะสุมาตรามีความหนาประมาณ 2 กิโลเมตร ส่วนบริเวณเกาะอันดามันไปจนถึงอ่าวเบงกอลมีความหนาดั้งแต่ 2 ถึง 6 กิโลเมตร และในบริเวณที่แรงเสียดทานคือการประมาณรอยเลื่อนเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวระหว่าง ค.ศ. 1797 ถึง ค.ศ. 2004 เส้นจุดสีแดง และสีเขียวคือบริเวณการสั่นสะเทือนร่วมเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อ ธันวาคม 2547 และ มีนาคม 2548 ตามลำดับ



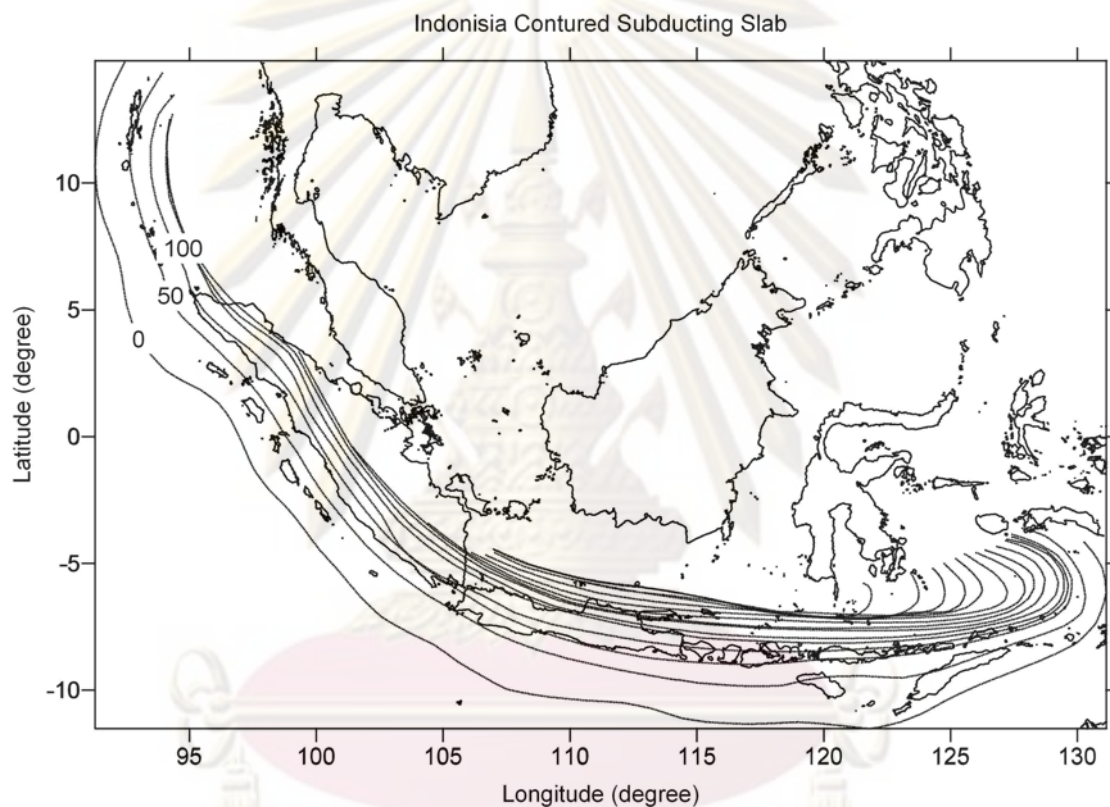
รูปที่ 4.1 ลักษณะธรณีแปรสัณฐานบริเวณเขตมุดตัวสุมาตรา (Chlieh และคณะ, 2007)



รูปที่ 4.2 แสดงแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่สำคัญที่เคยเกิดในบริเวณเขตมุดตัวสุมาตราระหว่าง ค.ศ.

1797 ถึง ค.ศ. 2004 (Chlieh และคณะ, 2007)

Gudmundsson และ Sambridge (1998) สร้างเส้นชั้นความลึกของระนาบของรอยเลื่อนบริเวณเขตมุดตัวสูมาตราจากข้อมูลแผ่นดินไหว ซึ่งค่ามุมเทของรอยเลื่อนบริเวณนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 12 - 30 องศา และมีค่าเพิ่มขึ้นจากใต้ไปสู่เหนือ ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะของรอยเลื่อนที่ศึกษาโดย Ammon และคณะ (2005) ซึ่งศึกษากระบวนการแตกตัวของแผ่นดินไหวเมื่อ 26 ธันวาคม 2547 โดยใช้คลื่นการสั่นสะเทือนและในแบบจำลองรอยเลื่อน Ammon-III นั้นพบว่ามุมเทที่เหมาะสมของรอยเลื่อนอยู่ระหว่าง 12-17.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนที่เส้นชั้นความลึกของระนาบรอยเลื่อนบริเวณเขตมุดตัวสูมาตรา ระยะห่างของเส้นชั้นเท่ากับ 50 กิโลเมตร

4.2 การกำหนดพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย

เนื่องจากแผ่นดินไหวเกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก และขนาดของแผ่นดินไหว (Moment magnitude, M_w) สอดคล้องกับพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา และมีความสัมพันธ์กับขนาดของรอยเลื่อนตามสมการโมเมนต์การสั่นสะเทือน (Seismic moment, M_0) ตามสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) (Hanks และ Kanamori, 1979)

$$M_0 = \mu A \bar{D} \quad (4.1)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.73 \quad (4.2)$$

โดยที่	M_0	คือ	โมเมนต์การสั่นสะเทือน (Seismic moment, dyne.cm)
	M_w	คือ	ขนาดแผ่นดินไหว (Moment magnitude)
	μ	คือ	โมดูลัสความแกร่ง (Rigidity, dyne/cm ²)
	A	คือ	พื้นที่รอยเลื่อน (Fault area, cm ²)
	\bar{D}	คือ	การกระจัดของรอยเลื่อนเฉลี่ย (Average displacement, cm)

เนื่องจากขนาดของแผ่นดินไหวที่มีศักยภาพก่อให้เกิดสึนามิมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 7.5 ขึ้นไป เมื่อคำนวณพื้นที่ของรอยเลื่อนจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) โดยให้มีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 1 เมตร จะได้พื้นที่ของรอยเลื่อนประมาณ 4,500 ตารางกิโลเมตร และโดยทั่วไปขนาดความยาวของรอยเลื่อนมีค่าเป็น 2 เท่าของขนาดความกว้าง ดังนั้นจึงกำหนดรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยที่มีขนาดกว้างของรอยเลื่อนเท่ากับ 50 กิโลเมตร ยาว 100 กิโลเมตร โดยวางให้ครอบคลุมบริเวณรอยเลื่อนที่มีศักยภาพก่อให้เกิดแผ่นดินไหวซึ่งพิจารณาจากการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาที่กล่าวมาข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้รอยเลื่อนสามารถครอบคลุมแผ่นดินไหวขนาดใหญ่จึงกำหนดรอยเลื่อนขนาด 100x200 กิโลเมตร โดยใช้การรวมกันของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยที่อยู่ติดๆ กัน 4 รอยเลื่อน และรอยเลื่อนขนาด 150x300 กิโลเมตร โดยใช้การรวมกันของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยที่อยู่ติดๆ กัน 9 รอยเลื่อน เพื่อเป็นตัวแทนของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงแบ่งรอยเลื่อนออกเป็น 3 กลุ่มคือ

- 1) กลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว มีรอยเลื่อนทั้งหมด 72 รอยเลื่อน
- 2) กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน มีรอยเลื่อนทั้งหมด 46 รอยเลื่อน
- 3) กลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน รอยเลื่อนทั้งหมด 22 รอยเลื่อน

การแบ่งกลุ่มรอยเลื่อนเป็น 3 กลุ่มยังทำให้การฝึกแบบจำลอง ANN ทำได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะแต่ละกลุ่มจะมีจำนวนนิวรอลส่งออกเพียงนิวรอลเดียวเท่านั้น ซึ่งจำนวนนิวรอลส่งออกนั้นไม่ควรจะมีมากเกินไปกว่าจำนวนของนิวรอลนำเข้า และการแบ่งเป็นกลุ่มยังเป็นการแยกกลุ่มคำตอบที่เป็นขนาดของรอยเลื่อนจากแบบจำลอง ANN ออกจากกันได้อีกด้วย

จากสภาพธรณีแปรสัณฐานที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถจะกำหนดรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย (Unit fault) ที่วางตามแนวเขตมุดตัวเป็นจำนวน 72 รอยเลื่อนได้ดังต่อไปนี้

- 1) มุมเทมีค่าอยู่ระหว่าง 12 ถึง 30 องศา มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรอยเลื่อน

- 2) รอยเลื่อนมีขนาดความกว้างขนาด 50 กิโลเมตร ยาว 100 กิโลเมตร โดยวางซ้อนกัน 3 แถว แถวละ 24 รอยเลื่อน เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่เกิดแผ่นดินไหว
- 3) ความลึกของรอยเลื่อนกำหนดให้แถวนอกสุดมีความลึก 5 กิโลเมตร แถวกลาง และแถวในมีความลึกเป็นสัดส่วนทางเรขาคณิตกับมุมเทของแต่ละรอยเลื่อน
- 4) ระยะเคลื่อนตัวกำหนดให้ทุกๆรอยเลื่อนเคลื่อนที่เท่าๆกันคือ 1 เมตร
- 5) มุมเลื่อนถล่มเท่ากับ 90 องศาเท่ากันทุกๆรอยเลื่อนเนื่องจากเป็นมุมวิกฤตที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกมากที่สุด
- 6) ส่วนมุมแนวระดับของแต่ละรอยเลื่อนจะพิจารณาตามแนวเขตมุมตัวสุมาตรา ข้อมูลรอยเลื่อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.4

ตำแหน่งรอยเลื่อนที่อยู่ใต้สุดนั้นก็คือตำแหน่งของแผ่นดินไหวขนาด 8.4 เมื่อวันที่ 12 กันยายน 2550 ในเหตุการณ์ครั้งนั้น กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ วัดความสูงคลื่นสูงสุดที่สถานีวัดน้ำทับละมุได้ประมาณ 0.2 เมตร ดังนั้นหากเกิดแผ่นดินไหวได้ลงไปกว่านี้ก็ส่งผลกระทบต่อชายฝั่งประเทศไทยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของรอยเลื่อน (Fault characteristics)

ลำดับ	ละติจูด ^[1] (องศา)	ลองจิจูด ^[2] (องศา)	ความลึก (กม)	ระยะเคลื่อน (ม)	มุมแนวระดับ (องศา)	มุมเท (องศา)	มุมสลีป (องศา)
1	-4.20	100.00	5	1	320	12	90
2	-3.91	100.35	15	1	320	12	90
3	-3.62	100.69	26	1	320	12	90
4	-3.49	99.39	5	1	320	12	90
5	-3.20	99.74	15	1	320	12	90
6	-2.91	100.08	26	1	320	12	90
7	-2.78	98.80	5	1	320	12	90
8	-2.49	99.15	15	1	320	12	90
9	-2.20	99.49	26	1	320	12	90
10	-2.05	98.18	5	1	325	12	90
11	-1.79	98.55	15	1	325	12	90
12	-1.53	98.92	26	1	325	12	90
13	-1.30	97.65	5	1	325	12	90
14	-1.04	98.02	15	1	325	12	90
15	-0.78	98.39	26	1	325	12	90
16	-0.55	97.11	5	1	325	12	90

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) คุณลักษณะของรอยเลื่อน (Fault characteristics)

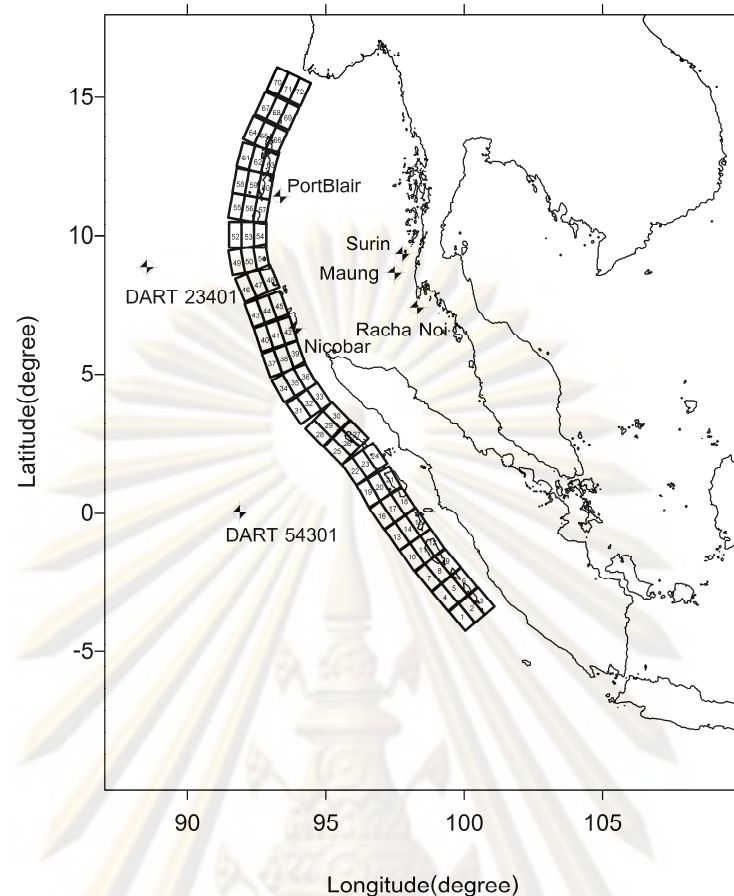
ลำดับ	ละติจูด ^[1] (องศา)	ลองจิจูด ^[2] (องศา)	ความลึก (กม)	ระยะเคลื่อน (ม)	มุมแนวระดับ (องศา)	มุมเท (องศา)	มุมสลิป (องศา)
17	-0.29	97.48	15	1	325	12	90
18	-0.03	97.85	26	1	325	12	90
19	0.23	96.57	5	1	330	12	90
20	0.46	96.96	15	1	330	12	90
21	0.68	97.35	26	1	330	12	90
22	1.02	96.12	5	1	325	12	90
23	1.28	96.49	15	1	325	12	90
24	1.54	96.86	26	1	325	12	90
25	1.75	95.60	5	1	315	12	90
26	2.07	95.92	15	1	315	12	90
27	2.39	96.24	26	1	315	12	90
28	2.40	94.90	5	1	315	15	90
29	2.72	95.22	18	1	315	15	90
30	3.04	95.54	30	1	315	15	90
31	3.20	94.10	5	1	325	15	90
32	3.46	94.47	18	1	325	15	90
33	3.72	94.84	30	1	325	15	90
34	4.00	93.50	5	1	330	15	90
35	4.23	93.89	18	1	330	15	90
36	4.45	94.28	30	1	330	15	90
37	4.90	93.00	5	1	340	20	90
38	5.06	93.43	22	1	340	20	90
39	5.21	93.85	39	1	340	20	90
40	5.82	92.68	5	1	342	20	90
41	5.96	93.11	22	1	342	20	90
42	6.10	93.54	39	1	342	20	90
43	6.72	92.38	5	1	340	20	90
44	6.88	92.81	22	1	340	20	90
45	7.03	93.23	39	1	340	20	90
46	7.64	92.08	5	1	337	20	90
47	7.82	92.50	22	1	337	20	90
48	8.00	92.91	39	1	337	20	90

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) คุณลักษณะของรอยเลื่อน (Fault characteristics)

ลำดับ	ละติจูด ^[1] (องศา)	ลองจิจูด ^[2] (องศา)	ความลึก (กม)	ระยะเคลื่อน (ม)	มุมแนวระดับ (องศา)	มุมเท (องศา)	มุมสลิป (องศา)
49	8.60	91.64	5	1	350	20	90
50	8.68	92.09	22	1	350	20	90
51	8.76	92.53	39	1	350	20	90
52	9.60	91.51	5	1	0	20	90
53	9.60	91.96	22	1	0	20	90
54	9.60	92.41	39	1	0	20	90
55	10.66	91.48	5	1	10	30	90
56	10.58	91.93	30	1	10	30	90
57	10.50	92.37	55	1	10	30	90
58	11.56	91.63	5	1	10	30	90
59	11.48	92.08	30	1	10	30	90
60	11.40	92.52	55	1	10	30	90
61	12.51	91.78	5	1	15	30	90
62	12.39	92.22	30	1	15	30	90
63	12.27	92.65	55	1	15	30	90
64	13.51	92.01	5	1	25	30	90
65	13.32	92.42	30	1	25	30	90
66	13.13	92.83	55	1	25	30	90
67	14.40	92.44	5	1	25	30	90
68	14.21	92.85	30	1	25	30	90
69	14.02	93.26	55	1	25	30	90
70	15.27	92.89	5	1	25	30	90
71	15.08	93.30	30	1	25	30	90
72	14.89	93.71	55	1	25	30	90

[1] คือ ค่าบวกคือ ละติจูดมีหน่วยเป็นองศาเหนือ ค่าลบคือ ละติจูดมีหน่วยเป็นองศาใต้

[2] คือ ค่าลองจิจูดมีหน่วยเป็นองศาตะวันออก



รูปที่ 4.4 แผนที่แสดงตำแหน่งของรอยเลื่อนทั้ง 72 รอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยตลอดแนวเขตมุดตัว
สุมาตรา และตำแหน่งสถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี บริเวณกลางทะเล และแนวชายฝั่งประเทศไทย

4.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ทะเลเนื่องจากรอยเลื่อน

เพื่อเป็นการสร้างเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ให้กับแบบจำลองไดนามิก จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ทะเล สมการที่ใช้สำหรับคำนวณนั้นคือสมการของ Mansinha และ Smylie ปี ค.ศ. 1971 ซึ่งได้เสนอสมการการคำนวณสนามการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike-slip fault) และรอยเลื่อนตามแนวมุมเท (Dip-slip fault) ในวัตถุยืดหยุ่นสม่ำเสมอครึ่งปริภูมิ (Displacement field in uniform elastic half-space) และในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของสึนามินั้นทำการแบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กลุ่มคือ

- 1) กลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว จะวิเคราะห์สึนามิที่ละรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย รวมทั้งหมด 72 เหตุการณ์
- 2) กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน จะวิเคราะห์สึนามิจากการรวมกันของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยที่อยู่ติดกัน 4 รอยเลื่อน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเหตุการณ์ที่ต้องวิเคราะห์ทั้งหมด 46 เหตุการณ์

- 3) กลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน จะวิเคราะห์สันนามิจากการรวมกันของรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยที่อยู่ติดกัน 9 รอยเลื่อนที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งจะมีเหตุการณ์ที่ต้องวิเคราะห์อีก 22 เหตุการณ์

ตารางที่ 4.2 กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน ที่เกิดจากการรวมกันของรอยเลื่อนเดียว

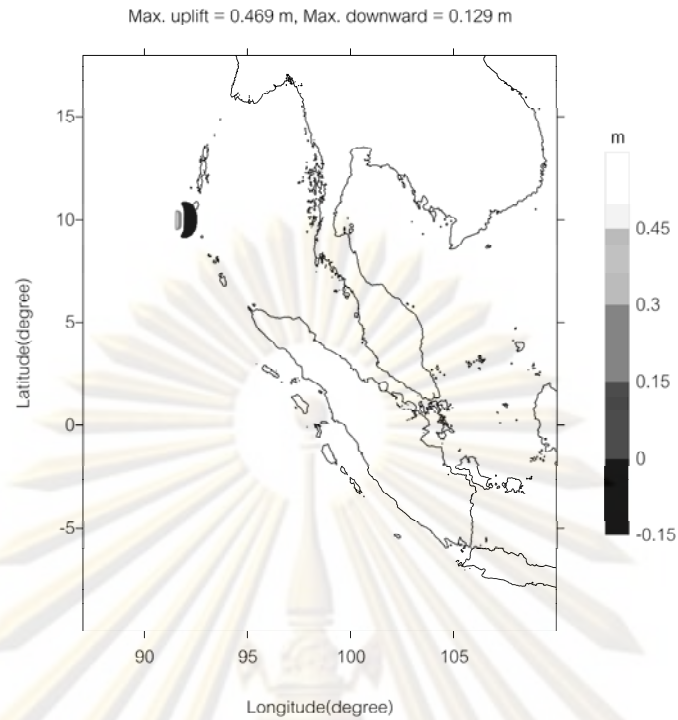
รอยเลื่อน หมายเลข	รอยเลื่อนเดี่ยวหมายเลข				รอยเลื่อน หมายเลข	รอยเลื่อนเดี่ยวหมายเลข			
101	1	2	4	5	124	35	36	38	39
102	2	3	5	6	125	37	38	40	41
103	4	5	7	8	126	38	39	41	42
104	5	6	8	9	127	40	41	43	44
105	7	8	10	11	128	41	42	44	45
106	8	9	11	12	129	43	44	46	47
107	10	11	13	14	130	44	45	47	48
108	11	12	14	15	131	46	47	49	50
109	13	14	16	17	132	47	48	50	51
110	14	15	17	18	133	49	50	52	53
111	16	17	19	20	134	50	51	53	54
112	17	18	20	21	135	52	53	55	56
113	19	20	22	23	136	53	54	56	57
114	20	21	23	24	137	55	56	58	59
115	22	23	25	26	138	56	57	59	60
116	23	24	26	27	139	58	59	61	62
117	25	26	28	29	140	59	60	62	63
118	26	27	29	30	141	61	62	64	65
119	28	29	31	32	142	62	63	65	66
120	29	30	32	33	143	64	65	67	68
121	31	32	34	35	144	65	66	68	69
122	32	33	35	36	145	67	68	70	71
123	34	35	37	38	146	68	69	71	72

ตารางที่ 4.3 กลุ่ม 9 รอยเลื่อนรวมกัน ที่เกิดจากการรวมกันของรอยเลื่อนเดี่ยว

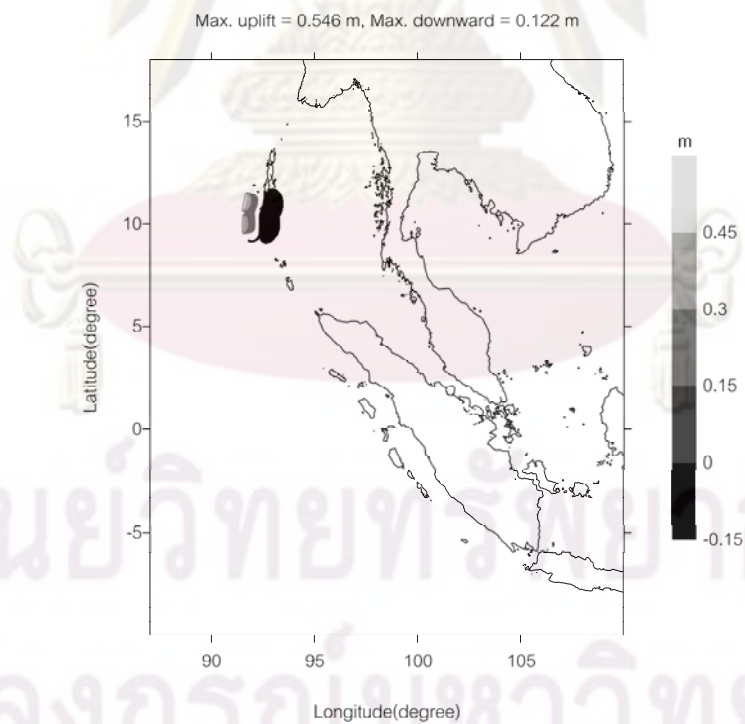
รอยเลื่อน หมายเลข	รอยเลื่อนเดี่ยวหมายเลข								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1001	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1002	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1003	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1004	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1005	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1006	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1007	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1008	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1009	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1010	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1011	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1012	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1013	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1014	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1015	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1016	46	47	48	49	50	51	52	53	54
1017	49	50	51	52	53	54	55	56	57
1018	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1019	55	56	57	58	59	60	61	62	63
1020	58	59	60	61	62	63	64	65	66
1021	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1022	64	65	66	67	68	69	70	71	72

เมื่อรวมเหตุการณ์ทั้งสามกลุ่มรอยเลื่อนแล้วก็จะมีเหตุการณ์ที่ต้องวิเคราะห์ทั้งหมด 140 เหตุการณ์ รูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เนื่องจากรอยเลื่อนของกลุ่มต่างๆ

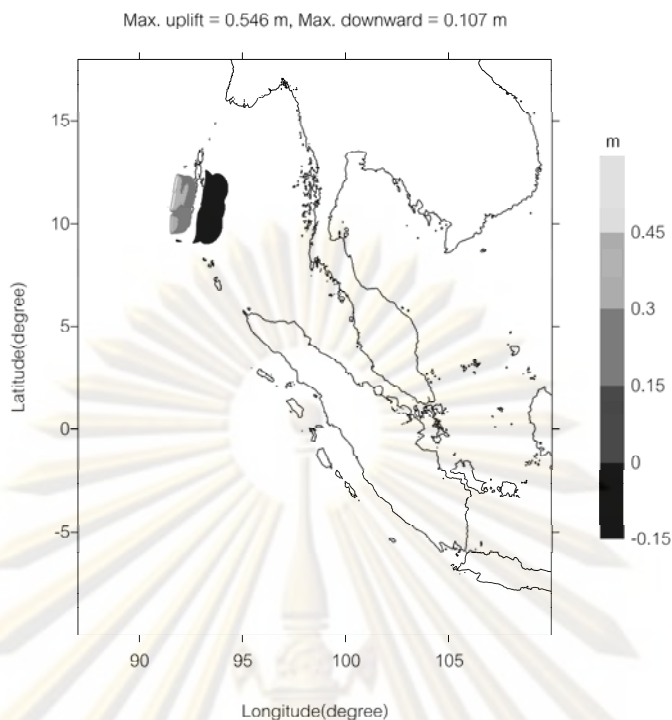
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด
เนื่องจากรอยเลื่อนเดี่ยว



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด
เนื่องจากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเส้นชั้นความสูงของการเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเล ค่ายกตัวสูงสุด และค่ายุบตัวสูงสุด เนื่องจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน

4.4 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของสึนามิ

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของสึนามิแบ่งพื้นที่การวิเคราะห์ออกเป็น 2 ขอบเขต คือ

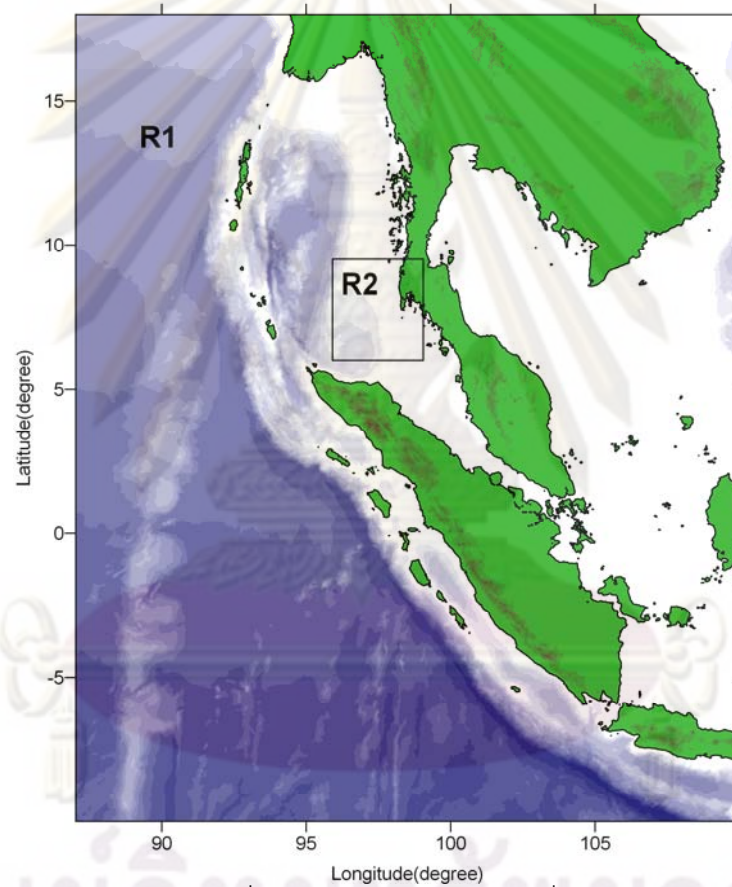
- 1) ขอบเขตที่ 1 จะครอบคลุมทะเลอันดามัน โดยใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและลักษณะท้องน้ำจาก GEBCO (General Bathymetric Charts of the Oceans) ซึ่งแบ่งช่องกริดให้มีขนาด 2 ลิปดา ดังแสดงในรูปที่ 4.8
- 2) ขอบเขตที่ 2 ซึ่งแบ่งช่องกริดให้มีขนาด 15 ฟลิปดาจะครอบคลุมบริเวณชายฝั่งภาคใต้ฝั่งตะวันตกของประเทศไทย และใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศบริเวณนอกชายฝั่งจาก GEBCO ส่วนบริเวณชายฝั่งใช้ข้อมูลจากกรมแผนที่ทหาร สำหรับข้อมูลลักษณะพื้นท้องน้ำได้มาจากการดิจิไตซ์แผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหมายเลข 362 ซึ่งแสดงความลึกของท้องน้ำที่ระดับน้ำต่ำสุด (Lowest water) แล้วได้ทำการปรับแก้เป็นความลึกที่เทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) โดยระดับน้ำต่ำสุดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง 2.35 เมตร ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างระดับน้ำทะเลปานกลางกับระดับน้ำต่ำสุดของ 6 สถานี ได้แก่สถานีปากน้ำระนอง จ.ระนอง, สถานีคูระบุรี จ.พังงา, สถานีปากน้ำกระบี่ จ.กระบี่, สถานีแม่น้ำตรัง จ.ตรัง, สถานีปากน้ำเจ๊ะบิลัง จ.สตูล และสถานีตำมะลัง จ.สตูล ตามข้อมูลจากสถานีวัดน้ำของกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 ขอบเขตพื้นที่การคำนวณ

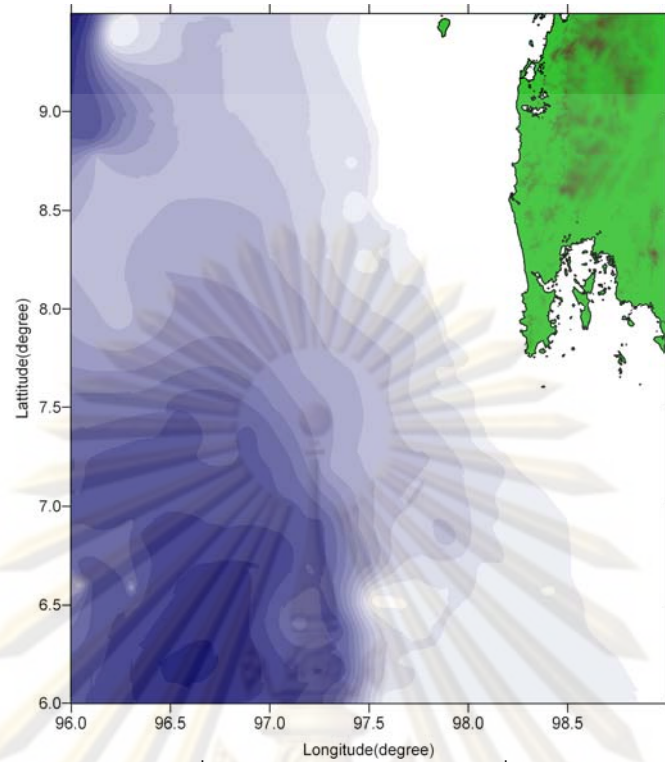
ขอบเขต		ละติจูด ^[1]		ลองจิจูด ^[2]		ขนาดกริด
		จาก	ถึง	จาก	ถึง	
ทะเล อันดามัน	ขอบเขตที่ 1	-10°0'0"	18°0'0"	87°0'0"	110°0'0"	120"
	ขอบเขตที่ 2	5°59'45"	9°30'0"	95°59'45"	99°0'0"	15"

[1] คือ ค่าบวกคือ ละติจูดมีหน่วยเป็นองศาเหนือ ค่าลบคือ ละติจูดมีหน่วยเป็นองศาใต้

[2] คือ ค่าลองจิจูดมีหน่วยเป็นองศาตะวันออก



รูปที่ 4.8 ขอบเขตการคำนวณที่ 1



รูปที่ 4.9 ขอบเขตการคำนวณที่ 2

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของสึนามิโดยใช้ทฤษฎีคลื่นน้ำตื้น ซึ่งแต่ละขอบเขตการคำนวณจะมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการคำนวณของแต่ละขอบเขตการคำนวณ

เงื่อนไข	ขอบเขตที่ 1	ขอบเขตที่ 2
สมการคลื่นน้ำตื้น	สมการเชิงเส้น	สมการไม่เชิงเส้น
ความขรุขระพื้นทะเล	ไม่คิด	คิด
ความโค้งของโลก	คิด	ไม่คิด
ความเร็วเชิงมุมของโลก	คิด	ไม่คิด
ความหนืดของของไหล	ไม่คิด	ไม่คิด
แรงต้านที่พื้นผิว	ไม่คิด	ไม่คิด
ความสามารถในการอัดตัวได้	ไม่คิด	ไม่คิด
ความเร่งในแนวตั้งของของไหล	ไม่คิด	ไม่คิด
ความเร็วคงที่ตลอดความลึก	คิด	คิด

ในงานวิจัยนี้สนใจทั้งผลตอบสนองของความสูงคลื่นสูงสุด และเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง สถานีวัดน้ำแต่ละสถานี ตารางที่ 4.6 แสดงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและผู้รับผิดชอบทั้ง 7 สถานี ที่จะใช้เป็นสถานีฐานสำหรับการวิเคราะห์โครงข่ายเฝ้าระวังภัยพิบัติ และเก็บเป็นฐานข้อมูล

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลตำแหน่งและผู้รับผิดชอบ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี

สถานี	ละติจูด (องศาเหนือ)	ลองจิจูด (องศาตะวันออก)	หน่วยงานรับผิดชอบ
DART 23401	8.905	88.540	TMD
DART 53401	0.050	91.899	BPPT
Port Blair	11.863	92.767	GLOSS
Nicrobar	7.000	93.833	GLOSS
Surin	9.423	97.856	HDRTN
Muang	8.571	97.639	HDRTN
Racha Noi	7.476	98.313	HDRTN

BPPT คือ Indonesian Agency for Assessment and Application of Technology

GLOSS คือ The Global Sea Level Observing System

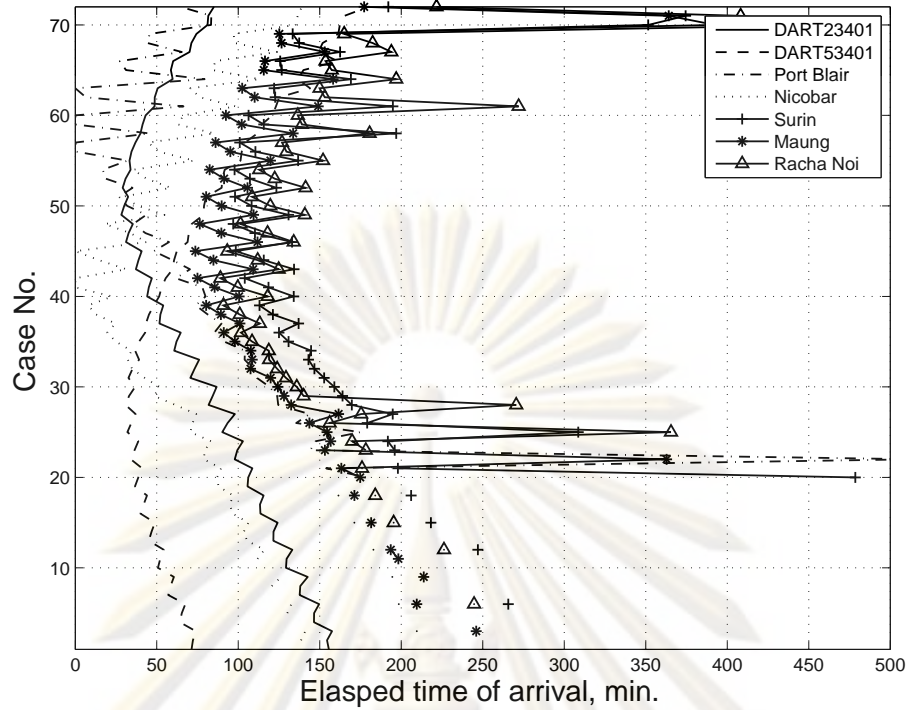
HDRTN คือ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

TMD คือ กรมอุตุนิยมวิทยา

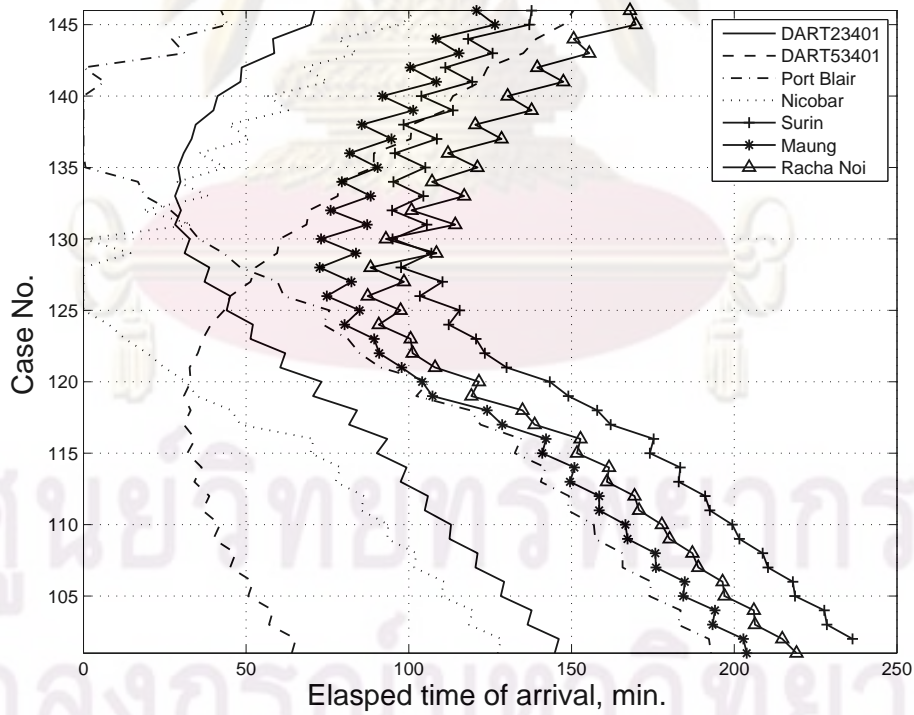
4.4.1 ผลการวิเคราะห์เวลาเดินทางของคลื่น

ผลการวิเคราะห์เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงในแต่ละสถานีของกลุ่มรอยเลื่อนเดียวแสดงใน รูปที่ 4.10 จากรูปจะเห็นว่ารอยเลื่อนหมายเลข 1-22 สีนามิไม่สามารถเดินทางมาถึงยังสถานี Port Blair, Nicrobar, Surin, Maung และ Racha Noi ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ในทะเลอันดามัน และรอยเลื่อนดังกล่าว อยู่ค่อนข้างไกลจากสถานีเหล่านั้น จึงทำให้คลื่นสลายไปก่อนที่จะมาถึง อีกทั้งยังมีหมู่เกาะนิโคบาร์ และหมู่เกาะอันดามันบังคลื่นไว้อีกชั้นหนึ่ง ส่วนสถานี DART23401 และ DART53401 นั้นอยู่ในมหาสมุทรอินเดียซึ่งเป็นทะเลเปิดคลื่นจึงสามารถเดินทางมาถึงได้ทุกๆ เหตุการณ์

ผลการวิเคราะห์กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วม พบว่าคลื่นเนื่องจากรอยเลื่อนหมายเลข 135-140 ทำให้เกิดสีนามิขึ้นทันทีทันใด ณ สถานี Port Blair และในทำนองเดียวกันคลื่นเนื่องจากรอยเลื่อนหมายเลข 125-128 ก็เกิดคลื่นทันทีทันใด ณ สถานี Nicobar เช่นกัน ดังแสดงใน รูปที่ 4.11 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก สถานีวัดน้ำเหล่านั้นตั้งอยู่บนรอยเลื่อนนั่นเอง ส่วนสถานีวัดน้ำอื่นๆ นั้นเวลาเดินทางของคลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างรอยเลื่อนกับสถานีวัดน้ำ นั่นคือหากระยะทางระหว่างรอยเลื่อนกับสถานีวัดน้ำ ไกลมาก คลื่นก็ใช้เวลาเดินทางมากขึ้นด้วย



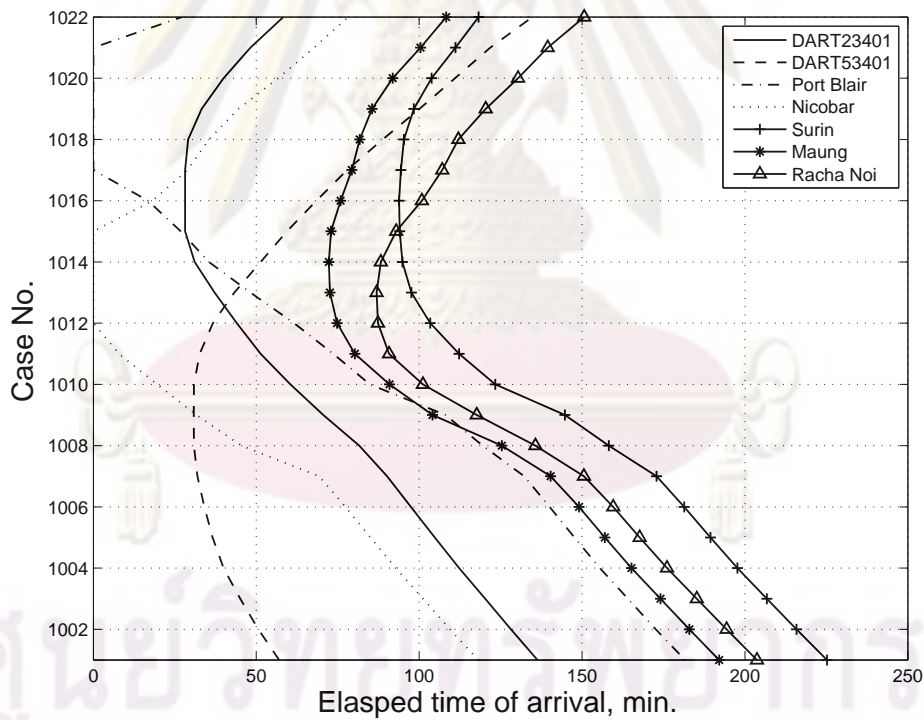
รูปที่ 4.10 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่มรอยคลื่นเดี่ยว



รูปที่ 4.11 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 4 รอยคลื่นกัน

ผลการวิเคราะห์พบว่ากลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วม พบว่าคลื่นเนื่องจากรอยเลื่อนหมายเลข 1017-1021 ทำให้เกิดคลื่นขึ้นทันทีทันใด ณ สถานี Port Blair และในทำนองเดียวกันคลื่นเนื่องจากรอยเลื่อนหมายเลข 1012-1015 ก็เกิดคลื่นทันทีทันใด ณ สถานี Nicobar เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสถานีวัดน้ำเหล่านั้นตั้งอยู่บนรอยเลื่อนนั่นเอง ส่วนสถานีวัดน้ำอื่นๆ นั้นเวลาเดินทางของคลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างรอยเลื่อนกับสถานีวัดน้ำ นั่นคือหากระยะทางระหว่างรอยเลื่อนกับสถานีวัดน้ำไกลมาก คลื่นก็ใช้เวลาเดินทางมากขึ้นด้วย

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองของคลื่นมีทั้งสามกลุ่มรอยเลื่อนพบว่าระยะเวลาที่คลื่นเดินทางตั้งแต่ละสถานีนั้นมีความสอดคล้องกันกับระยะทางระหว่างรอยเลื่อนกับสถานีวัดน้ำ และหลังจากนี้จะทำการเก็บผลการวิเคราะห์โดยแต่ละกลุ่มรอยเลื่อน ซึ่งจะเป็นการเตรียมข้อมูลนำเข้า-ส่งออกให้กับโครงข่าย โดยข้อมูลนำเข้าคือเวลาที่คลื่นเดินทางตั้งแต่ละสถานี ฉะนั้นในเหตุการณ์หนึ่งๆ จะมีเวลาการเดินทางของคลื่น 7 ค่า (จากสถานีวัดน้ำทั้ง 7) และข้อมูลส่งออกคือหมายเลขของรอยเลื่อนหรือเหตุการณ์ของแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะแทนคุณลักษณะของรอยเลื่อน (Fault characteristics)

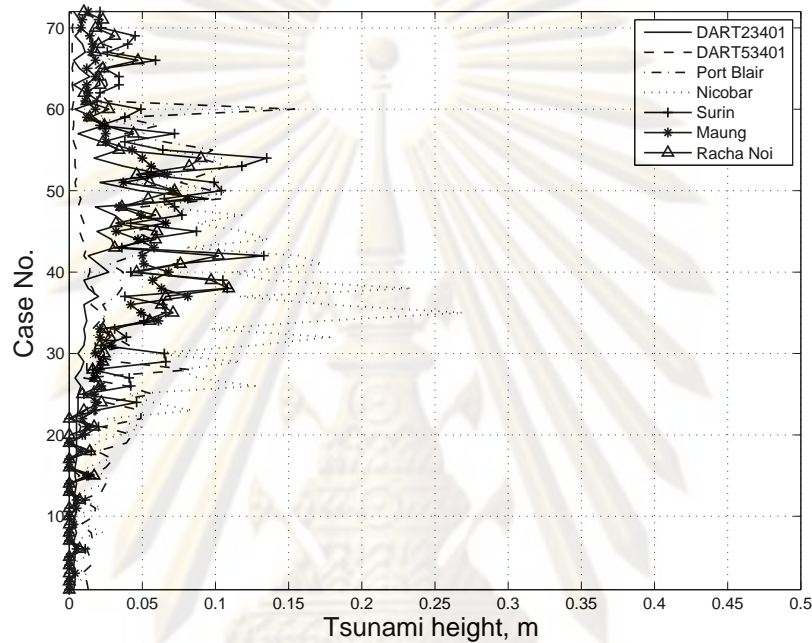


รูปที่ 4.12 เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนกัน

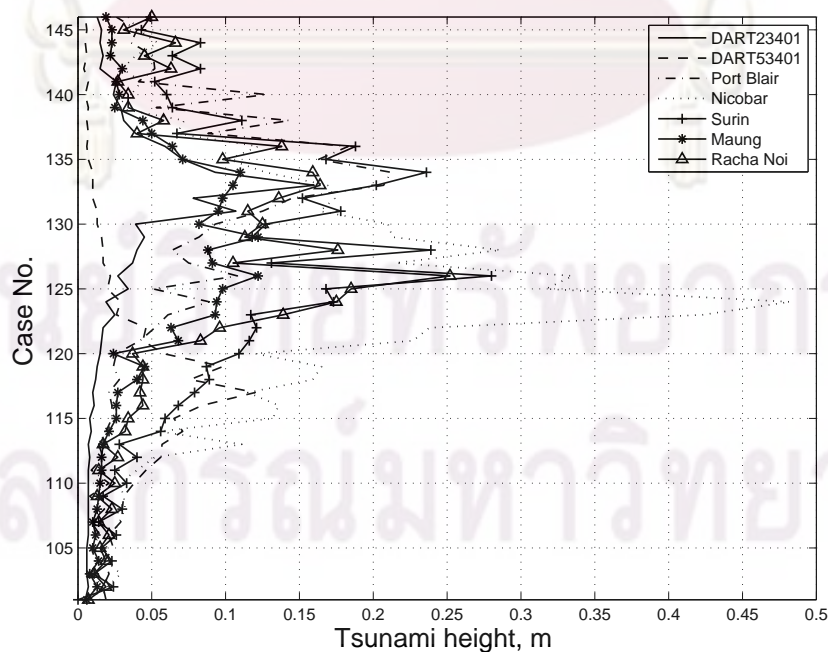
4.4.2 ผลวิเคราะห์ความสูงคลื่น

จากการวิเคราะห์ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานีนั้นพบว่า ความสูงคลื่นเนื่องจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมนั้นมีความสูงโดยเฉลี่ยสูงที่สุดประมาณ 35 ซม ณ สถานี Nicobar และ Surin ส่วนความสูง

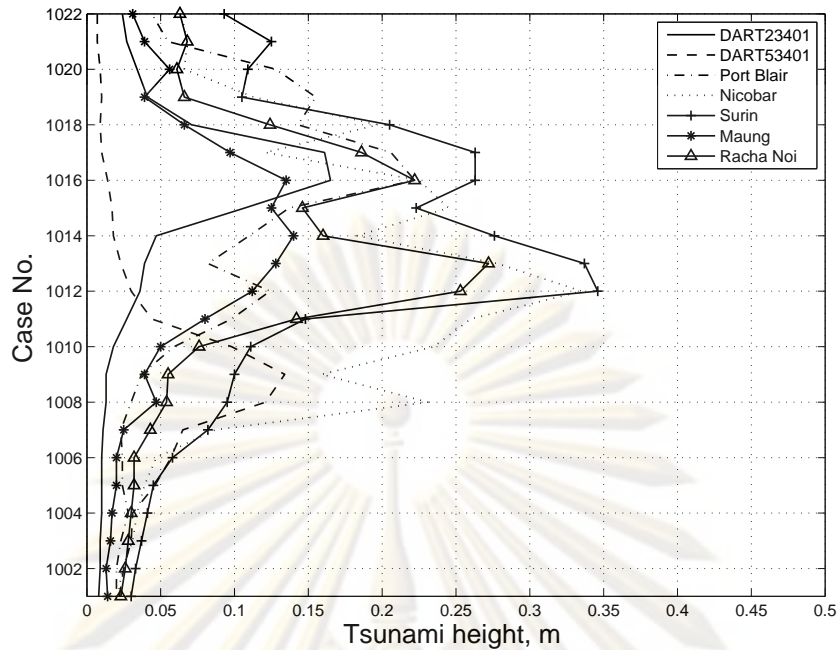
คลื่นจากกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยวมีความสูงโดยเฉลี่ยสูงที่สุดประมาณ 10 ซม ยกเว้นที่สถานี Nicobar และ Port Blair ที่มีที่ตั้งใกล้แหล่งกำเนิดจึงทำให้ความสูงคลื่นสูงโดดเด่นออกมา อาจสรุปได้ว่าความสูงคลื่นสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดของรอยเลื่อน นั่นคือถ้ารอยเลื่อนมีขนาดใหญ่จะทำให้มีความสูงคลื่นสูงกว่า รอยเลื่อนที่มีขนาดเล็กกว่า รูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.15 แสดงความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานีเนื่องจากกลุ่มรอยเลื่อนต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว



รูปที่ 4.14 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



รูปที่ 4.15 ความสูงคลื่นสูงสุดทั้ง 7 สถานี ซึ่งวิเคราะห์จากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน

4.5 ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบแบบจำลอง ANN สำหรับการศึกษาคั้งนี้จะใช้เวลาเดินทางของคลื่นในแต่ละสถานีมาเป็นชุดข้อมูลนำเข้าโครงข่ายเนื่องจากเวลาเดินทางของคลื่นไม่ได้ขึ้นกับระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน และหาจำนวนของนิวรอลที่เหมาะสมกับแบบจำลองโดยวิธีการลองผิดลองถูก จากนั้นจึงจะนำเข้าสู่กระบวนการฝึกแบบจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองโครงข่าย 3 แบบตามขนาดของรอยเลื่อน โดยแบ่งตามลักษณะของกลุ่มรอยเลื่อน นั่นคือ

- 1) แบบจำลองที่ 1 สำหรับกลุ่มรอยเลื่อนเดียว
- 2) แบบจำลองที่ 2 สำหรับกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน
- 3) แบบจำลองที่ 3 สำหรับกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน

แบบจำลองที่ 1 นี้จะใช้เวลาเดินทางของคลื่นที่วิเคราะห์มาจากกลุ่มรอยเลื่อนเดียวเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และชุดข้อมูลส่งออกก็คือหมายเลขรอยเลื่อนของกลุ่มรอยเลื่อนเดียว ซึ่งตำแหน่งรอยเลื่อนก็จะแทนคุณลักษณะของรอยเลื่อนเช่น ขนาดของรอยเลื่อน เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์เวลาเดินทางของคลื่นเนื่องจากกลุ่มรอยเลื่อนเดียวแสดงใน รูปที่ 4.10 นั้นจะเห็นว่า ณ สถานี Port Blair, Nicobar, Surin, Maung และ Racha Noi คลื่นเนื่องจากรอยเลื่อนหมายเลขที่ต่ำกว่าหมายเลข 22 คลื่นเดินทางไม่ถึง ดังนั้นจึงตัดข้อมูลที่หมายเลขต่ำกว่า 22 ออก จึงทำให้เหลือชุดข้อมูลนำเข้า-ส่งออกเพียง 50 ชุดดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 1

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
23	99.42	36.35	144.22	79.42	195.95	153.15	178.22
24	102.88	38.68	147.42	83.35	191.75	156.68	169.82
25	90.22	31.95	174.88	70.62	308.55	154.42	365.48
26	93.42	34.35	135.48	72.02	179.08	143.68	156.02
27	97.95	36.95	143.75	74.22	194.75	161.55	175.35
28	81.75	30.88	124.55	61.42	169.68	132.42	270.55
29	84.28	32.95	123.88	48.42	163.95	128.08	140.08
30	86.68	36.75	119.22	51.68	158.95	124.28	135.88
31	70.62	32.62	111.48	42.62	152.68	119.82	129.28
32	73.22	35.15	109.28	34.82	146.68	107.55	123.88
33	76.02	39.15	103.88	32.28	143.08	108.55	118.95
34	60.68	36.68	104.08	34.35	144.68	107.68	118.75
35	62.08	39.15	91.35	24.82	130.88	97.88	108.42
36	64.75	42.88	85.35	19.68	125.02	91.08	101.68
37	51.62	43.35	89.75	24.68	137.02	101.02	113.22
38	52.22	45.22	81.35	12.82	121.22	89.35	100.88
39	53.95	48.22	73.95	7.88	113.02	80.28	90.95
40	44.08	51.48	79.88	22.75	134.02	100.55	118.08
41	45.15	52.95	77.95	0.02	118.55	85.48	99.68
42	46.95	55.48	61.68	0.02	103.95	74.95	89.02
43	37.22	59.75	70.42	31.42	134.22	109.08	124.82
44	38.75	60.62	59.62	14.48	115.62	84.75	111.88
45	40.68	62.28	48.22	0.02	98.48	73.68	93.28
46	31.15	68.88	57.55	43.82	133.02	111.82	134.02
47	32.68	69.68	43.08	33.75	110.28	89.62	118.02
48	35.28	71.42	35.48	18.15	96.88	76.35	101.35
49	28.22	78.68	43.55	54.75	130.82	109.42	140.88
50	29.95	79.02	31.82	38.48	108.22	89.82	119.62
51	32.42	80.15	26.82	28.88	98.02	80.28	108.42
52	29.08	89.82	35.15	58.62	123.42	105.68	141.35

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 1

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
53	30.82	90.15	18.82	43.75	107.15	91.28	122.35
54	33.95	91.68	16.88	35.48	97.75	82.42	112.82
55	33.28	101.35	32.08	72.95	136.75	119.75	152.02
56	34.48	102.15	0.62	51.22	110.48	95.08	129.55
57	36.88	104.08	0.02	44.75	100.95	86.08	126.88
58	40.02	111.75	45.55	85.35	196.95	133.68	180.55
59	41.28	114.48	0.02	63.02	115.68	102.15	139.02
60	43.15	120.88	0.02	66.28	106.28	92.42	136.55
61	48.68	123.08	66.35	98.35	194.82	149.02	272.02
62	48.75	125.15	6.48	76.48	122.62	110.08	153.02
63	50.48	144.15	0.02	70.62	121.95	102.42	149.88
64	59.75	136.55	79.35	112.95	169.08	158.15	196.95
65	58.68	140.02	31.08	84.42	126.68	115.68	157.35
66	60.08	160.95	27.28	85.88	125.68	116.42	153.55
67	70.15	149.22	65.35	123.75	162.48	153.08	193.88
68	71.28	151.75	44.35	97.88	137.35	126.55	182.48
69	74.28	161.35	45.55	97.08	133.35	125.15	165.02
70	81.08	162.28	83.28	135.15	351.48	392.55	463.28
71	81.62	165.15	83.48	136.48	374.42	364.08	408.22
72	85.02	179.68	64.75	138.95	192.08	177.22	221.68

แบบจำลองที่ 2 ใช้เวลาเดินทางของคลื่นที่วิเคราะห์จากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกันเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และชุดข้อมูลส่งออกคือ ตำแหน่งรอยเลื่อนของกลุ่ม 4 รอยเลื่อน ผลการวิเคราะห์การเดินทางของคลื่น จากกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกันแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าคลื่นสามารถเดินทางมาถึงทุกๆ สถานี ฉะนั้นจะมีชุดข้อมูลนำเข้า-ส่งออกทั้งหมด 46 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 2

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
101	144.82	64.02	192.88	127.35	1000	203.82	219.15
102	146.08	65.28	192.22	128.35	236.35	202.82	214.75
103	136.48	57.02	182.75	118.48	228.48	193.35	206.35
104	137.75	58.28	183.55	119.75	227.68	194.08	206.02
105	128.28	50.62	173.88	109.82	218.68	184.35	197.02
106	129.28	52.15	174.55	110.88	218.02	184.82	196.42
107	120.48	45.08	165.68	101.68	210.35	175.95	188.95
108	121.15	46.75	165.68	102.35	208.75	175.75	187.15
109	112.48	39.95	157.28	93.35	201.62	167.22	180.15
110	112.95	41.95	156.88	93.68	199.42	166.55	177.75
111	104.88	36.62	148.88	85.35	192.48	158.48	170.75
112	105.88	38.68	149.22	86.22	191.08	158.48	169.35
113	97.48	34.08	140.55	77.48	182.95	149.55	160.88
114	99.28	36.35	142.02	79.08	183.42	150.88	161.55
115	90.15	31.95	132.55	69.75	174.08	141.02	151.68
116	93.35	34.35	134.48	70.75	175.22	142.15	152.75
117	81.62	30.88	122.02	48.28	162.02	128.68	138.68
118	84.08	32.95	118.95	45.48	157.88	124.08	134.95
119	70.55	30.88	102.28	34.82	149.02	107.28	119.22
120	73.15	32.95	106.22	31.62	143.35	104.08	121.55
121	60.48	32.62	91.28	24.82	130.02	97.82	108.08
122	62.02	35.15	84.88	19.62	123.35	90.88	101.15
123	51.35	36.68	81.28	12.82	120.68	89.35	100.55
124	52.08	39.15	73.62	7.88	112.28	80.28	90.75
125	44.02	43.28	75.62	0.02	115.62	84.88	97.48
126	45.08	45.15	61.62	0.02	103.42	74.82	87.35
127	37.22	51.35	59.62	0.02	110.35	82.35	98.48
128	38.68	52.88	48.22	0.02	97.62	72.62	88.22
129	31.08	59.48	43.08	14.48	106.95	83.75	108.48
130	32.68	60.35	35.48	0.02	95.02	73.02	92.95

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 2

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
131	28.15	68.55	31.82	33.48	105.55	87.22	114.28
132	29.95	69.35	26.82	18.15	94.88	75.95	100.82
133	28.15	78.15	18.82	38.42	104.48	88.28	117.02
134	29.82	78.35	16.75	28.88	95.28	79.42	107.15
135	29.08	89.15	0.62	43.68	105.08	90.42	121.08
136	30.82	89.28	0.02	35.48	95.75	81.82	112.02
137	33.22	100.55	0.02	51.22	108.62	94.68	128.48
138	34.48	100.88	0.02	44.55	98.42	85.55	120.42
139	39.95	111.15	0.02	62.95	113.55	101.35	137.75
140	41.22	113.55	0.02	56.75	103.88	91.88	130.35
141	48.28	122.08	6.48	75.15	119.48	108.48	147.48
142	48.62	124.22	0.02	67.75	111.22	100.42	139.48
143	58.68	135.15	31.08	84.02	125.75	115.42	155.48
144	58.22	139.15	27.15	78.22	118.22	108.28	150.68
145	69.88	147.42	44.35	97.62	137.02	126.48	169.75
146	71.02	150.62	42.28	102.35	137.75	120.82	167.95

แบบจำลองที่ 3 ใช้เวลาเดินทางของคลื่นที่วิเคราะห์จากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนรวมกันเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และชุดข้อมูลส่งออกก็คือ ตำแหน่งรอยเลื่อนของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนรวมกัน ผลการวิเคราะห์เวลาเดินทางของคลื่นเนื่องจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนรวมกันแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าคลื่นสามารถเดินทางมาถึงในทุกๆ สถานี ทำให้มีชุดข้อมูลนำเข้า-ส่งออกทั้งหมด 22 ชุดดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 3

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
1001	136.35	57.02	181.62	118.15	225.22	192.08	203.68
1002	128.15	50.62	172.62	109.48	215.82	182.95	194.35
1003	120.28	45.08	164.08	101.22	206.75	174.08	185.22

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออกสำหรับแบบจำลองที่ 3

รอยเลื่อน หมายเลข	เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)						
	DART 23401	DART 53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
1004	112.28	39.95	155.48	92.82	197.68	165.15	176.08
1005	104.82	36.62	147.68	85.08	189.42	157.02	167.68
1006	97.48	34.08	140.08	77.35	181.35	149.08	159.55
1007	90.15	31.95	132.22	69.28	172.88	140.35	150.55
1008	81.62	30.88	119.48	45.48	158.22	125.35	135.68
1009	70.55	30.82	108.08	31.62	144.75	104.08	117.68
1010	60.48	30.88	84.88	19.62	123.35	90.88	101.15
1011	51.35	32.62	73.62	7.88	112.28	80.28	90.75
1012	44.02	36.68	61.62	0.02	103.42	74.82	87.35
1013	37.22	43.28	48.22	0.02	97.62	72.62	86.95
1014	31.08	51.35	35.48	0.02	94.88	72.28	88.22
1015	28.15	59.42	26.82	0.02	94.02	72.95	92.95
1016	28.15	68.48	16.75	18.15	93.82	75.88	100.82
1017	28.15	77.88	0.02	28.88	94.42	79.35	107.08
1018	29.08	88.82	0.02	35.48	95.35	81.75	112.02
1019	33.22	100.08	0.02	44.55	98.35	85.55	120.42
1020	39.95	111.02	0.02	56.75	103.82	91.88	130.35
1021	48.22	121.82	0.02	67.75	111.15	100.42	139.48
1022	58.28	134.75	27.15	78.22	118.22	108.28	150.68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

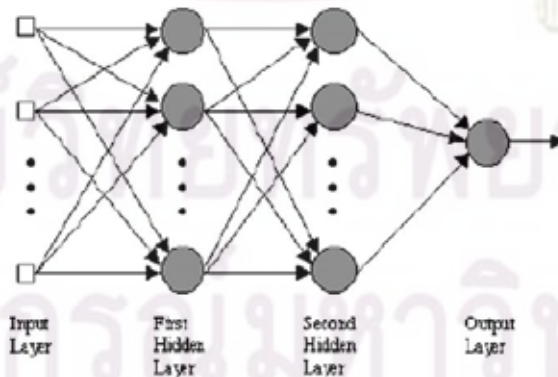
การใช้โครงข่ายประสาทเทียมและหลักการซ้อนทับในการพยากรณ์สึนามิ

การพยากรณ์สึนามิแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ การใช้แบบจำลอง ANN ในการพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน และการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลอง ANN ด้วยหลักการซ้อนทับ การฝึกและการใช้แบบจำลอง ANN สำหรับการพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน การฝึกแบบจำลองนั้นทำการฝึก 3 แบบตามการแบ่งกลุ่มของรอยเลื่อน เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นแต่ละสถานี กับตำแหน่งรอยเลื่อนที่เป็นตัวแทนคุณลักษณะของรอยเลื่อนของแต่ละกลุ่ม

การประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนโดยการใช้หลักการซ้อนทับนั้น ซึ่งจากการศึกษาหลักการซ้อนทับพบว่า ความสูงคลื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน เพราะฉะนั้นถ้าทำการขยายคลื่นที่วัดได้จากแบบจำลอง ANN ด้วยตัวคูณขยายใดๆ แล้วทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นที่วัดได้จริงกับคลื่นจากแบบจำลอง ANN ที่ถูกคูณด้วยตัวคูณขยายมีค่าน้อยที่สุด ตัวคูณขยายที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดนั้นคือ ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

5.1 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นแต่ละสถานี กับตำแหน่งรอยเลื่อน โดยใช้เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งรอยเลื่อนที่เป็นตัวแทนของคุณลักษณะของรอยเลื่อนเป็นชุดข้อมูลส่งออกดังแสดงในรูปที่ 5.1 แล้วทำการฝึกแบบจำลองทั้ง 3 แบบตามการแบ่งกลุ่มของรอยเลื่อน

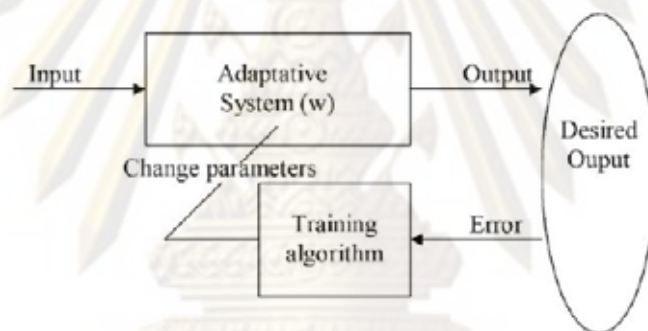


รูปที่ 5.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโปรเซปตรอนหลายชั้น ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น (Romano และคณะ, 2008)

การใช้งานแบบจำลองที่ถูกฝึกแล้วทำโดยการใช้เวลาที่คลื่นเดินทางแต่ละสถานีที่วัดได้จริงเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง แบบจำลองก็จะวิเคราะห์หาตำแหน่งรอยเลื่อนที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ที่ได้สร้างไว้แล้ว

5.1.1 การฝึกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้การฝึกแบบแพร่กลับ (Backpropagation) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยเมื่อชุดข้อมูลนำเข้าถูกส่งเข้าสู่แบบจำลอง แบบจำลองจะทำการคำนวณหาผลลัพธ์ต่างในแต่ละชั้นไปจนถึงชั้นส่งออกจะได้เป็นค่าส่งออก แบบจำลองจะทำการเปรียบเทียบค่าส่งออกจากแบบจำลองกับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมาย ค่าคลาดเคลื่อนของค่าส่งออกจากแบบจำลองกับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมายจะถูกย้อนกลับโดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบน ค่าคลาดเคลื่อนจะลดลงในแต่ละรอบของการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบน จนกระทั่งได้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ยอมรับให้



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการฝึกแบบจำลอง (Romano และคณะ, 2008)

ก่อนที่จะนำชุดข้อมูลนำเข้า และส่งออก เข้าสู่แบบจำลองจะต้องทำข้อมูลให้เป็นบรรทัดฐานในช่วง -1 ถึง 1 (Normalization) ดังแสดงในสมการที่ (5.1) และแต่ละนิวรอลจะใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก แทนเจนท์ ซิกมอยด์ (Hyperbolic tangent sigmoid) เป็นฟังก์ชันกระตุ้น

$$P_n = \frac{2(P - P_{\min})}{(P_{\max} - P_{\min})} - 1 \quad (5.1)$$

โดยที่ P_n คือ บรรทัดฐานในช่วง -1 ถึง 1
 P คือ ค่าจริง
 P_{\min} คือ ค่าน้อยที่สุดของชุดข้อมูล

P_{\max} คือ ค่ามากที่สุดของชุดข้อมูล

ในการเปรียบเทียบค่าส่งออกจากแบบจำลองกับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมาย จะพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination หรือ R^2) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root mean square error หรือ RMSE)

ค่า R^2 ค่าที่ชี้วัดความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมาย ดังนั้นถ้า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองกับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมายมีความสัมพันธ์กันมาก ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และไม่มีหน่วย จากสมการที่ (5.2) จะเห็นว่า ถ้าพจน์ $\sum_{i=1}^n (o_i - t_i)^2$ มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งหมายถึงค่า o_i กับ t_i มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ค่า R^2 จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ในทางกลับกันหากพจน์ $\sum_{i=1}^n (o_i - t_i)^2$ มีค่ามาก ค่า R^2 ก็เข้าใกล้ศูนย์

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 + \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{t})^2} \quad (5.2)$$

โดยที่	n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด
	o_i	คือ	ผลลัพธ์จากแบบจำลอง
	t_i	คือ	ข้อมูลส่งออกเป้าหมาย
	\bar{t}	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลส่งออกเป้าหมาย

ส่วนค่า RMSE เป็นค่าที่ใช้สำหรับทดสอบแบบจำลองโดยใช้การประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) เพื่อหาฟังก์ชันซึ่งสามารถแทนการประมาณค่าของข้อมูลที่ให้ผลต่างระหว่างแบบจำลอง กับชุดข้อมูลส่งออกเป้าหมายน้อยที่สุด ซึ่งหาได้จากสมการที่ (5.3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - t_i)^2}{n}} \quad (5.3)$$

โดยที่	o_i	คือ	ผลลัพธ์จากแบบจำลอง
	t_i	คือ	ข้อมูลส่งออกเป้าหมาย
	n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองโครงข่าย 3 แบบ โดยแบ่งตามลักษณะของกลุ่มรอยเลื่อน นั่นคือ

- 1) แบบจำลองที่ 1 กลุ่มรอยเลื่อนเดียว
- 2) แบบจำลองที่ 2 กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน
- 3) แบบจำลองที่ 3 กลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน

จากรูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างโครงข่ายใยประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการฝึกแบบจำลองแต่ละแบบนี้มีเงื่อนไขการฝึกดังต่อไปนี้

- 1) จำนวนนิรอลในชั้นนำเข้าเท่ากับ 7 นิรอล ซึ่งเท่ากับจำนวนสถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี
- 2) จำนวนรูปแบบการฝึกจะเท่ากับจำนวนหมายเลขรอยเลื่อนในแต่ละแบบจำลองนั่นคือ 50, 46 และ 22 รูปแบบตามลำดับ
- 3) จำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น แต่ละชั้นเท่ากับ 30 นิรอล ซึ่งจากการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นที่ซ่อนภายในจาก 10-30 นิรอลพบว่าจำนวนนิรอลเท่ากับ 30 นิรอลให้ค่า R^2 และค่า $RMSE$ ดีที่สุดดังแสดงในภาคผนวก
- 4) จำนวนนิรอลในชั้นส่งออกเท่ากับ 1 นิรอล คือชุดข้อมูลหมายเลขรอยเลื่อน
- 5) ฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละนิรอลใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก แทนเจนต์ ซิกมอยด์ เหมือนกันทุกๆ ชั้น
- 6) จำนวนรอบการฝึกแบบจำลองตั้งแต่ 100,000 ถึง 2,000,000 รอบ

5.1.1.1 การฝึกแบบจำลองที่ 1

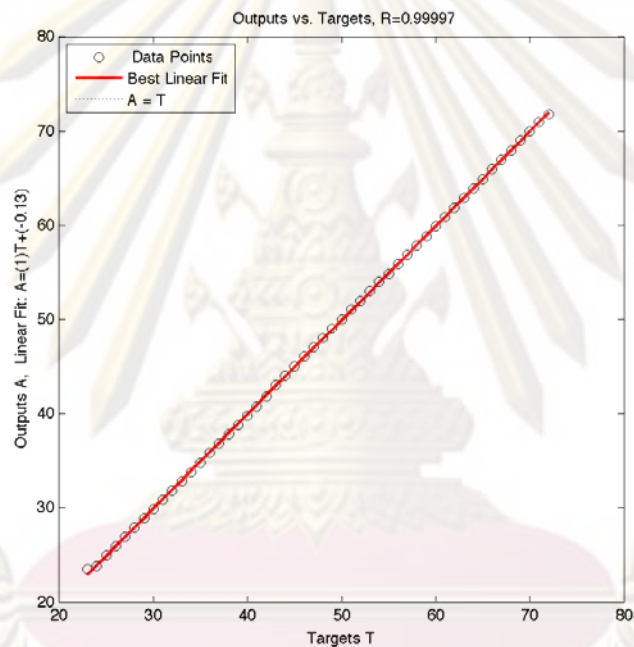
แบบจำลองที่ 1 จะพยากรณ์ตำแหน่งรอยเลื่อนจากข้อมูลนำเข้าที่เป็นเวลาเดินทางของคลื่นทั้ง 7 สถานีของกลุ่มรอยเลื่อนเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.7 ดังนั้นจะมีจำนวนข้อมูลนำเข้า 7 นิรอล นิรอลละ 50 ข้อมูล รวมทั้งหมด 350 ข้อมูล และเลือกจำนวนชั้นที่ซ่อนภายในจำนวน 2 ชั้น ในแต่ละชั้นที่ซ่อนภายในให้มีจำนวนนิรอลเท่ากับ 30 นิรอล ส่วนข้อมูลส่งออกจะมี 1 นิรอล คือตำแหน่งรอยเลื่อนซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 50 ข้อมูล ซึ่งแบบจำลองสามารถสรุปเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ 7-30-30-1 หมายความว่าจำนวนชั้นนำเข้าเท่ากับ 7 นิรอล จำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น ชั้นละ 30 นิรอล และจำนวนชั้นส่งออก 1 นิรอล สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละนิรอลใช้ฟังก์ชัน Hyperbolic tangent sigmoid หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยการสุ่มเลือกจำนวนรอบของการวิเคราะห์ และอัตราการเรียนรู้ดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.1

จากตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือโครงข่ายที่ 4 ซึ่งใช้จำนวนรอบอยู่ที่ 1 ล้านรอบและอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 1 ค่า R^2 เท่ากับ 0.99997 และค่า $RMSE$ เท่ากับ 0.1661 สำหรับความสัมพันธ์ของข้อมูลส่งออกระหว่างแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมายแสดงในรูปที่ 5.3 จากตารางที่ 5.1 จะเห็น

ได้ว่าจำนวนรอบการคำนวณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้น และค่า $RMSE$ จะลดลง ส่วนการเพิ่มค่าอัตราการเรียนรู้เป็น 1.25 ในโครงข่ายที่ 2 ได้ค่า R^2 ที่ลดลง และค่า $RMSE$ ที่เพิ่มขึ้น

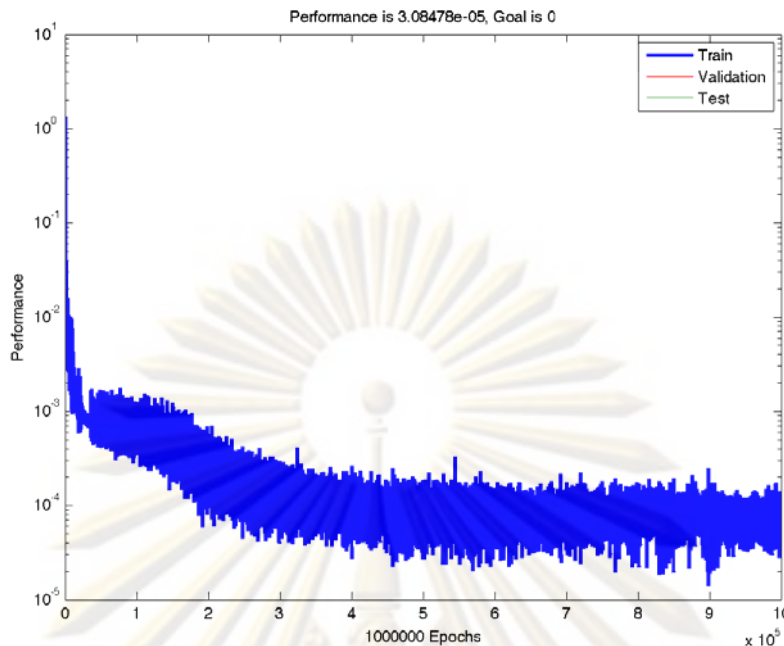
ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 1

Network Iteration	Epochs	Learning Rate	R^2	RMSE
1	100000	1	0.99981	0.3942
2	100000	1.25	0.9972	1.1147
3	500000	1	0.99985	0.2891
4	1000000	1	0.99997	0.1661



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับค่าตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 4

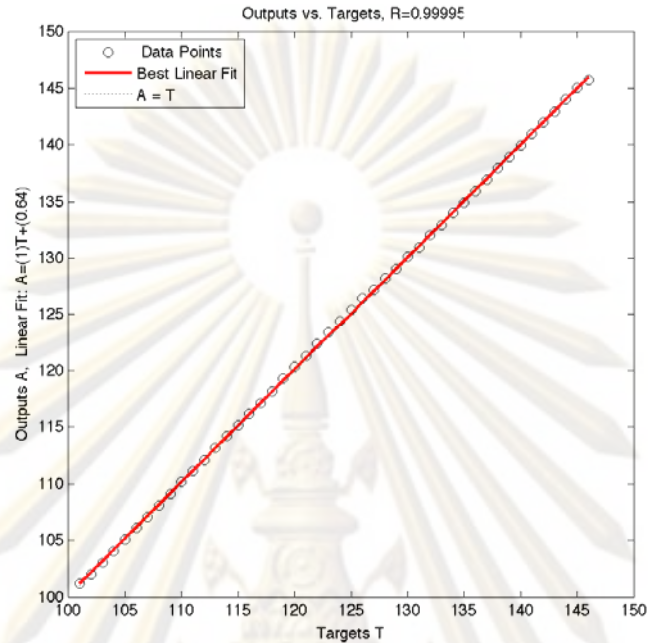
5.1.1.2 การฝึกแบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 2 จะพยากรณ์ตำแหน่งรอยเลื่อนจากข้อมูลนำเข้าที่เป็นเวลาเดินทางของคลื่นทั้ง 7 สถานีของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนดังแสดงในตารางที่ 4.8 ดังนั้นจะมีจำนวนข้อมูลนำเข้า 7 นิวรอล นิวรอลละ 46 ข้อมูล รวมทั้งหมด 322 ข้อมูล และเลือกจำนวนชั้นที่ซ่อนภายในจำนวน 2 ชั้น ในแต่ละชั้นที่ซ่อนภายในให้มีจำนวนนิวรอลเท่ากับ 30 นิวรอล ส่วนข้อมูลส่งออกจะมี 1 นิวรอล คือตำแหน่งรอยเลื่อนซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 46 ข้อมูล ซึ่งแบบจำลองสามารถสรุปเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ 7-30-30-1 หมายความว่า มีจำนวนชั้นนำเข้าเท่ากับ 7 นิวรอล จำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น ชั้นละ 30 นิวรอล และจำนวนชั้นส่งออก 1 นิวรอล สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละนิวรอลใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก แทนเจนท์ ซิกมอยด์ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยการสุ่มเลือกจำนวนรอบของการวิเคราะห์ และอัตราการเรียนรู้ดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.2

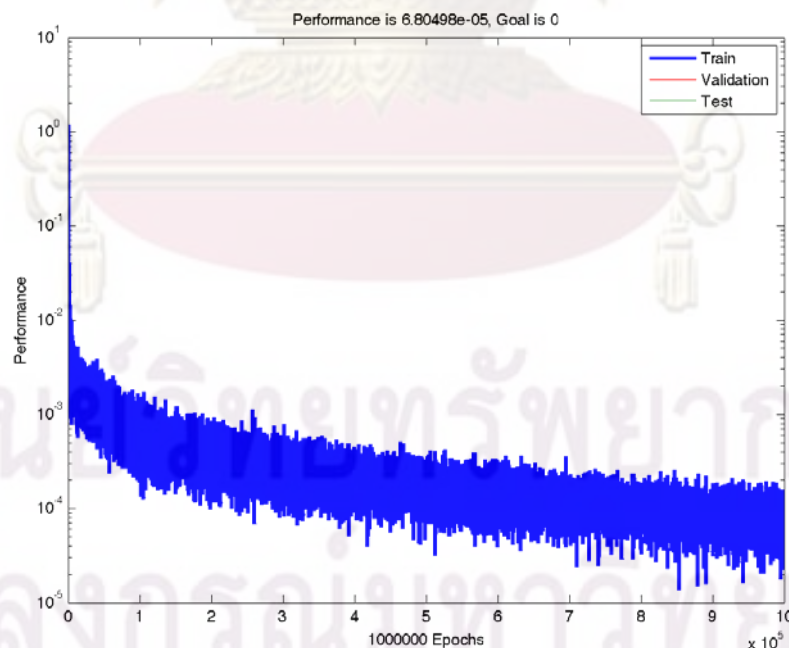
ตารางที่ 5.2 ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 2

Network	Epochs	Learning Rate	R ²	RMSE
1	500000	1	0.99966	0.3583
2	100000	1.25	0.99958	0.4557
3	500000	1.25	0.99988	0.3513
4	1000000	1	0.99995	0.1856

จากตารางที่ 5.2 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือโครงข่ายที่ 4 ซึ่งใช้จำนวนรอบอยู่ที่ 1 ล้านรอบและอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 1 ค่า R^2 เท่ากับ 0.99995 และค่า $RMSE$ เท่ากับ 0.1856 สำหรับความสัมพันธ์ของข้อมูลส่งออกกระหว่างแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมายแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับค่าตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 4



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 4

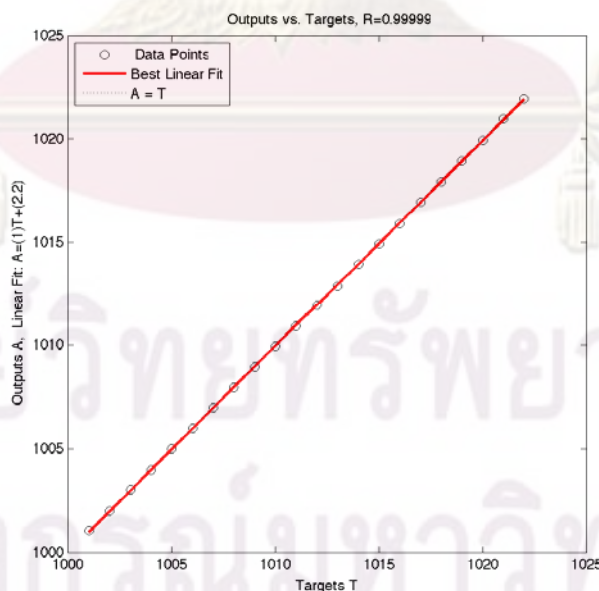
5.1.1.3 การฝึกแบบจำลองที่ 3

แบบจำลองที่ 3 จะพยากรณ์ตำแหน่งรอยเลื่อนจากข้อมูลนำเข้าที่เป็นเวลาเดินทางของคลื่นทั้ง 7 สถานีของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนดังแสดงในตารางที่ 4.9 ดังนั้นจะมีจำนวนข้อมูลนำเข้า 7 นิวรอล นิวรอลละ 22 ข้อมูล รวมทั้งหมด 154 ข้อมูล และเลือกจำนวนชั้นที่ซ่อนภายในจำนวน 2 ชั้น ในแต่ละชั้นที่ซ่อนภายในให้มีจำนวนนิวรอลเท่ากับ 30 นิวรอล ส่วนข้อมูลส่งออกจะมี 1 นิวรอล คือตำแหน่งรอยเลื่อนซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 22 ข้อมูล ซึ่งแบบจำลองสามารถสรุปเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ 7-30-30-1 หมายความว่า มีจำนวนชั้นนำเข้าเท่ากับ 7 นิวรอล จำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น ชั้นละ 30 นิวรอล และจำนวนชั้นส่งออก 1 นิวรอล สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละนิวรอลใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ ซิกมอยด์ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยการสุ่มเลือกจำนวนรอบของการวิเคราะห์ และอัตราการเรียนรู้ดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.3

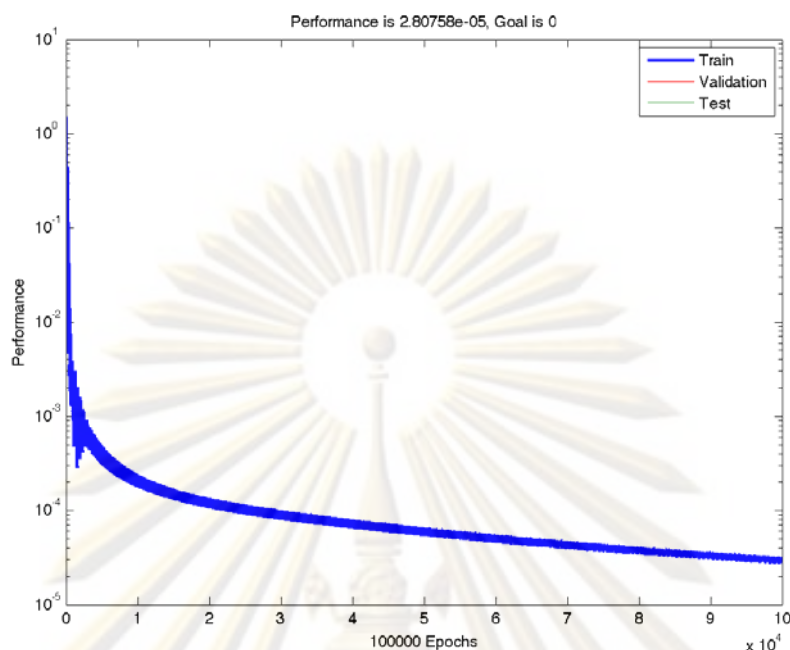
ตารางที่ 5.3 ตารางสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 3

Network	Epochs	Learning Rate	R^2	RMSE
1	100000	0.5	0.99999	0.0556

จากตารางที่ 5.3 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือโครงข่ายที่ 1 ซึ่งใช้จำนวนรอบอยู่ที่ 1 แสนรอบและอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.5 ค่า R^2 เท่ากับ 0.99999 และค่า $RMSE$ เท่ากับ 0.0556 สำหรับความสัมพันธ์ของข้อมูลส่งออกระหว่างแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมายแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง (แกน Y) กับค่าตอบเป้าหมาย (แกน X) ของโครงข่ายที่ 1



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของโครงข่ายที่ 1

5.1.2 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณหาตำแหน่งของรอยเลื่อน

เมื่อแบบจำลองทั้ง 3 แบบที่ผ่านกระบวนการฝึกแล้วนั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางมาถึงของคลื่น กับตำแหน่งของรอยเลื่อนของแต่ละแบบจำลอง จากการฝึกแบบจำลอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก และเมทริกซ์ค่าเอนเอียงของแต่ละชั้น การคำนวณหาตำแหน่งของรอยเลื่อนจะทำโดยให้ชุดข้อมูลนำเข้าเข้าสู่แบบจำลองที่ได้รับการฝึกแล้ว แบบจำลองจะคำนวณหาตำแหน่งของรอยเลื่อนจากค่าเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก และเมทริกซ์ค่าเอนเอียงของแบบจำลองที่ได้รับการฝึกแล้ว สำหรับชุดข้อมูลนำเข้าใช้ข้อมูลเวลาที่คลื่นเดินทางถึงสถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทำข้อมูลนำเข้าให้เป็นบรรทัดฐานในช่วง -1 ถึง 1 ตามสมการที่ (5.1) แล้วคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นนำเข้า หลังจากนั้นจึงรวมผลรวมของผลคูณนั้นตามสมการที่ (5.4)

$$h_k = \sum_i w_{ik} x_i \quad (5.4)$$

- 2) นำ h_k จากสมการที่ (5.4) รวมกับเมทริกซ์ค่าเอนเอียงของชั้นข้อมูลนำเข้า แล้วทำการคำนวณผลลัพธ์ของแต่ละนิวรอนในชั้นนำเข้าโดยผ่านฟังก์ชันกระตุ้นตามสมการที่ (5.5)

$$y_k = f(h_k + b_k) \quad (5.5)$$

โดยที่	h_k	คือ	ผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักกับข้อมูลนำเข้าในชั้นโครงข่าย k
	w_{ik}	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักของนิวรอน i ในชั้นโครงข่าย k
	x_i	คือ	ข้อมูลนำเข้าที่ทำเป็นบรรทัดฐาน -1 ถึง 1 ของนิวรอน i
	y_k	คือ	ผลลัพธ์จากชั้นโครงข่าย k
	$f(x)$	คือ	ฟังก์ชันกระตุ้นไฮเพอร์โบลิก แทนเจนท์ ซิกมอยด์ $= \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$
	b_k	คือ	ค่าเอนเอียงในชั้นโครงข่าย k

- 3) สำหรับชั้นโครงข่ายอื่นๆ ก็ทำเช่นเดียวกันโดยแทน x_i ด้วย y_k กลับไปในขั้นตอนที่ 1 ทำเช่นนี้จนครบทุกชั้นโครงข่าย ก็จะได้ผลลัพธ์ของโครงข่าย อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยังเป็นค่าบรรทัดฐานอยู่ ซึ่งจะต้องทำการคำนวณกลับให้เป็นค่าจริงนั่นคือ

$$\text{prediction value} = \frac{(y_k + 1)(o_{\max} - o_{\min})}{2} + 1 \quad (5.6)$$

โดยที่	o_{\max}	คือ	ค่าสูงสุดของชุดข้อมูลส่งออก (Target value)
	o_{\min}	คือ	ค่าต่ำสุดของชุดข้อมูลส่งออก (Target value)

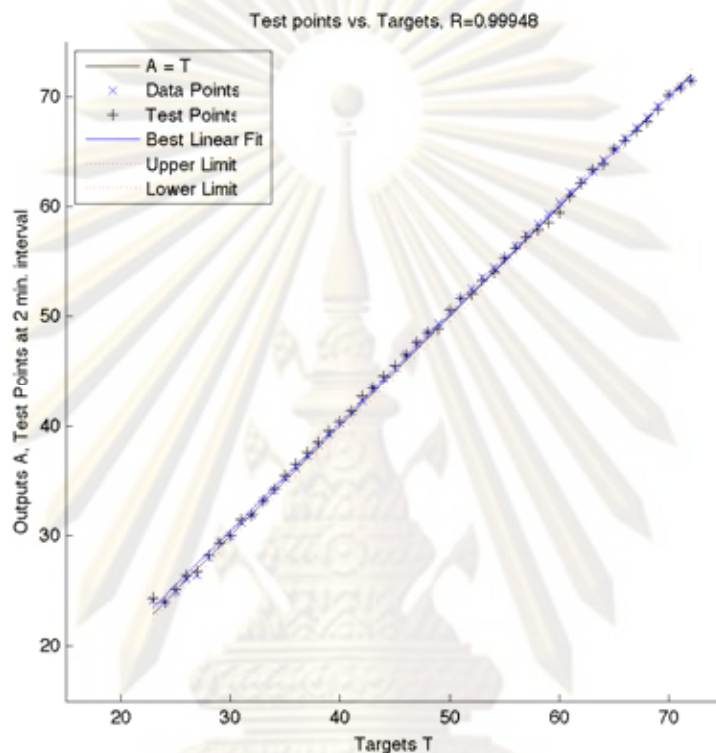
5.1.3 ผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน

การศึกษาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เพื่อทดสอบว่าหากคลื่นเดินทางมาเร็ว หรือช้ากว่าเวลาที่ใช้ทำการฝึกแบบจำลอง แบบจำลองนั้นจะให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร การทดสอบจะทำการสุ่มค่าข้อมูลนำเข้าจากข้อมูลที่ใช้ฝึกให้อยู่ในช่วงต่างๆ 3 ค่าคือ ± 2 นาที่, ± 5 นาที่ และ ± 10 นาที่ แล้วนำข้อมูลสุ่มคำนวณหาผลลัพธ์จากแบบจำลองตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.1.2

5.1.3.1 แบบจำลองที่ 1

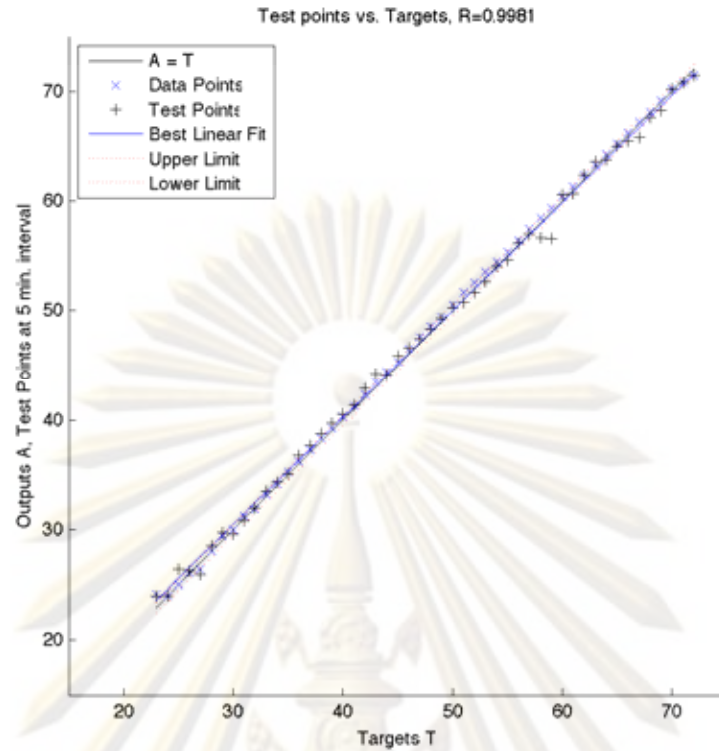
ทำการสุ่มข้อมูลให้อยู่ในช่วง ± 2 นาที่, ± 5 นาที่ และ ± 10 นาที่ จากข้อมูลนำเข้าที่ใช้ฝึกแบบจำลอง แล้วทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สำหรับชี้วัดความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มกับคำตอบเป้าหมาย และกำหนดขอบเขตบนและล่างไว้ที่ ± 0.5 ของคำตอบเป้าหมาย จากรูปที่ 5.9 ถึง รูปที่ 5.11 จะเห็นว่าเมื่อช่วงการสุ่มข้อมูลกว้างขึ้นจะทำให้ค่า R^2

มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 สูงถึง 0.99948 ส่วนผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที ถึงแม้จะให้ R^2 ค่อนข้างสูง แต่ก็มีผลลัพธ์บางจุดที่ให้ค่าออกนอกขอบเขตที่กำหนด และสุดท้ายผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที ผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะออกนอกขอบเขตที่กำหนด

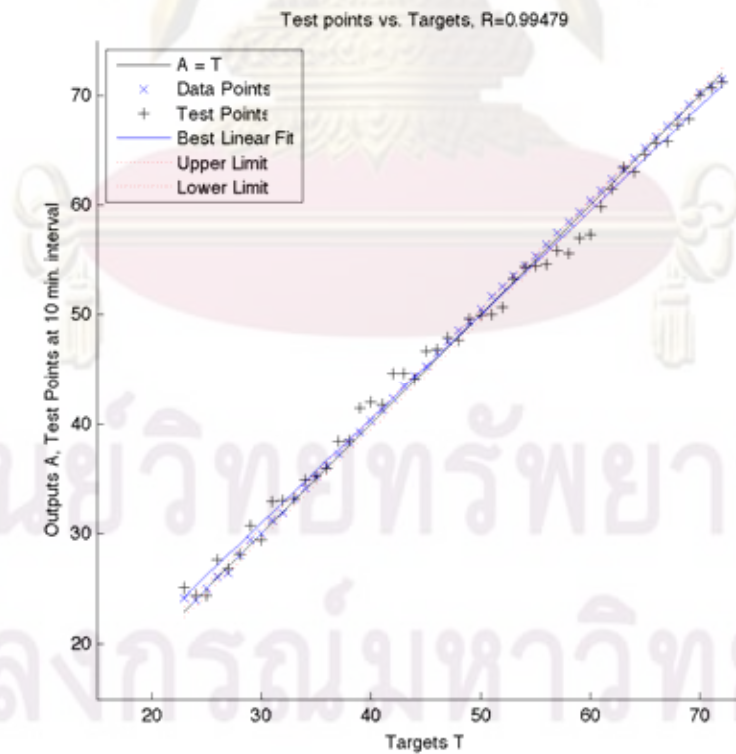


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับค่าตอบเป้าหมาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



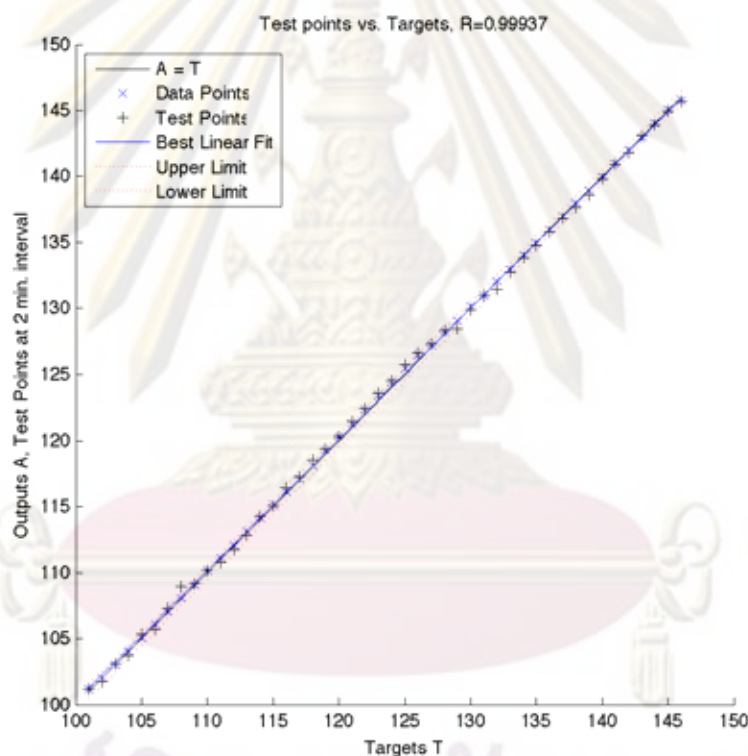
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย



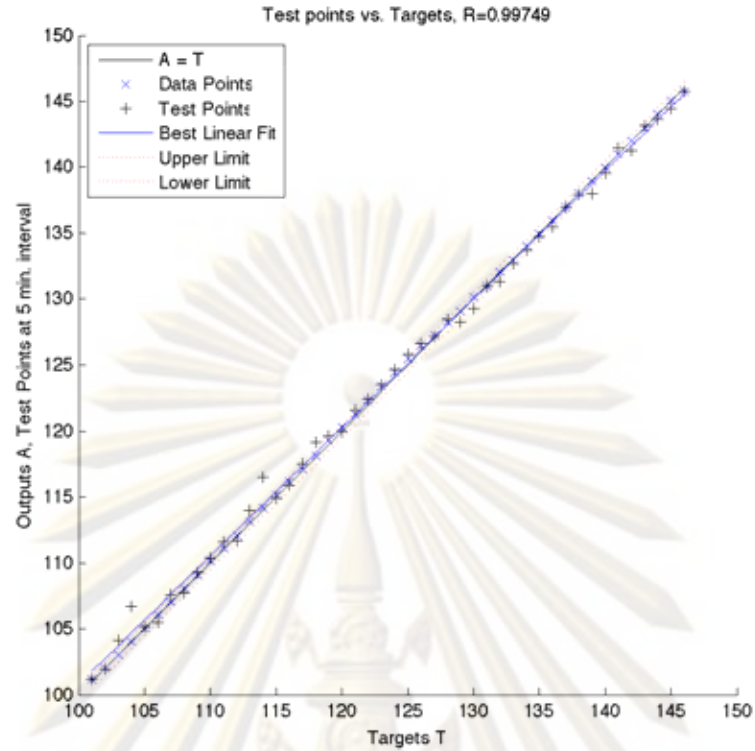
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย

5.1.3.2 แบบจำลองที่ 2

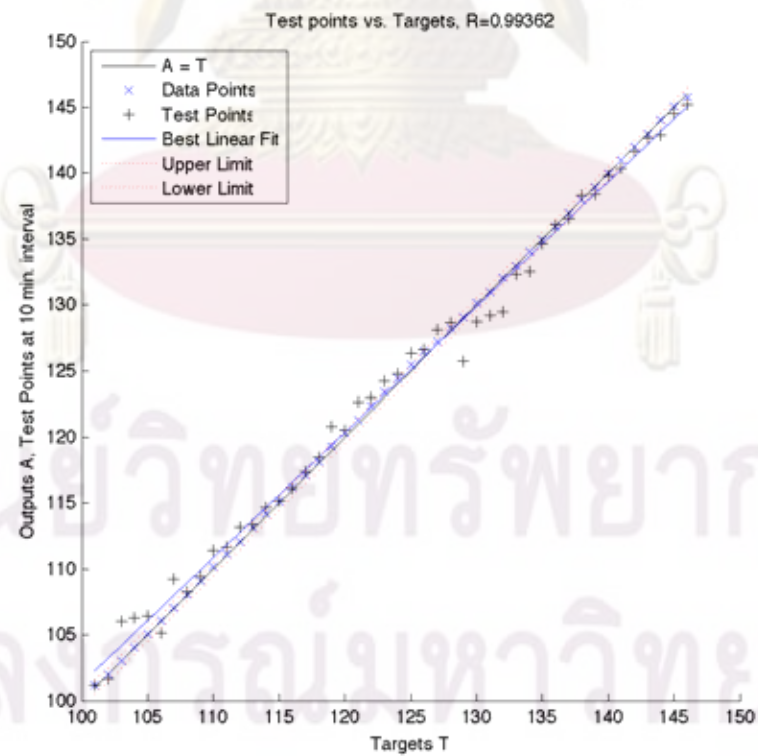
ทำการสุ่มข้อมูลให้อยู่ในช่วง ± 2 นาที, ± 5 นาที และ ± 10 นาที จากข้อมูลนำเข้าที่ใช้ฝึกแบบจำลองเช่นกัน และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สำหรับชี้วัดความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มกับคำตอบเป้าหมาย และกำหนดขอบเขตบนและล่างไว้ที่ ± 0.5 ของคำตอบเป้าหมาย จากรูปที่ 5.12 ถึง รูปที่ 5.14 จะเห็นว่าเมื่อช่วงการสุ่มข้อมูลกว้างขึ้นจะทำให้ค่า R^2 มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 สูงถึง 0.99937 ส่วนผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที ถึงแม้จะให้ R^2 ค่อนข้างสูง แต่ก็มีผลลัพธ์บางจุดที่ให้ค่าออกนอกขอบเขตที่กำหนด และสุดท้ายผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที ผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะออกนอกขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับคำตอบเป้าหมาย



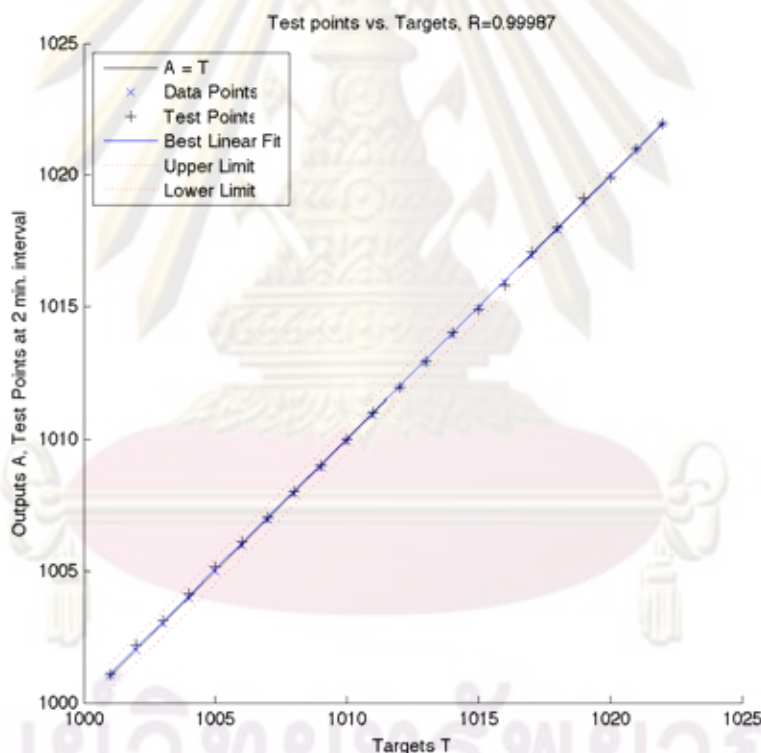
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย



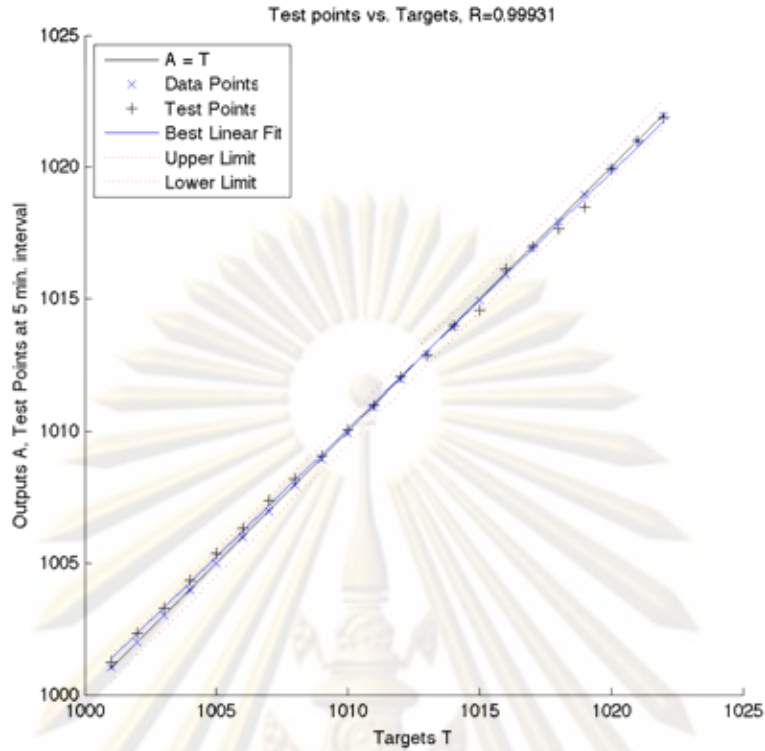
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย

5.1.3.3 แบบจำลองที่ 3

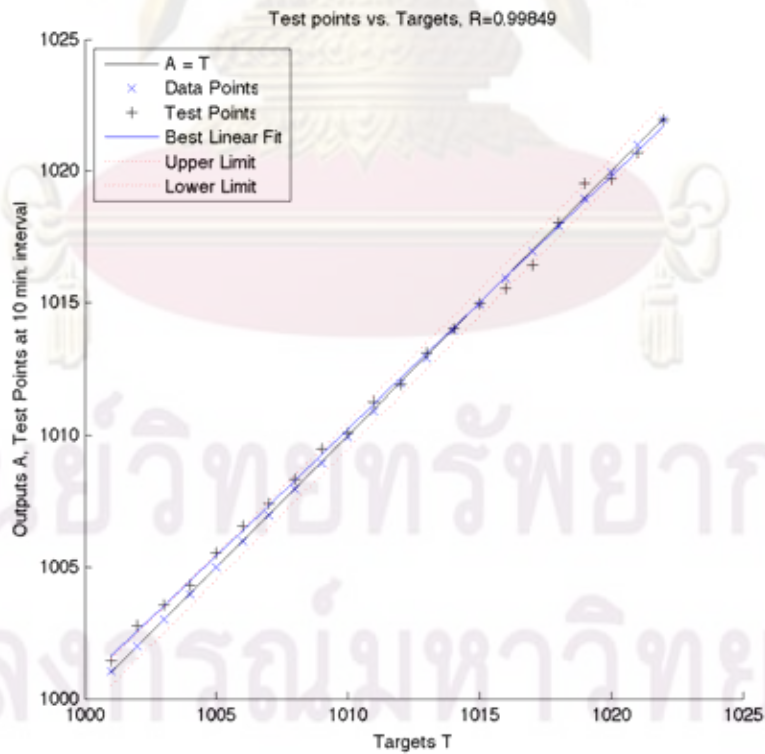
ทำการสุ่มข้อมูลให้อยู่ในช่วง ± 2 นาที, ± 5 นาที และ ± 10 นาที จากข้อมูลนำเข้าที่ใช้ฝึกแบบจำลองเช่นกัน และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สำหรับชี้วัดความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มกับค่าตอบเป้าหมาย และกำหนดขอบเขตบนและล่างไว้ที่ ± 0.5 ของค่าตอบเป้าหมาย จากรูปที่ 5.15 ถึง รูปที่ 5.17 จะเห็นว่าเมื่อช่วงการสุ่มข้อมูลกว้างขึ้นจะทำให้ค่า R^2 มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที และในช่วง ± 5 นาทีให้ผลลัพธ์ที่ดีและมีผลลัพธ์อยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดยมีค่า R^2 สูงถึง 0.99987 และ 0.99931 ตามลำดับ แต่ผลลัพธ์จากข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที ผลลัพธ์ที่แย่ที่สุด อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ส่วนใหญ่ยังอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ที่ผลลัพธ์มีค่าที่ดีเนื่องจากแบบจำลองที่ 3 เป็นแบบจำลองที่เกิดจากการรวมกันของรอยเลื่อนย่อย 9 รอยเลื่อน ซึ่งผลต่างเวลาที่คลื่นเดินทางถึงสถานีวัดน้ำของแต่ละเหตุการณ์มีค่าค่อนข้างกว้าง



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 2 นาที กับค่าตอบเป้าหมาย



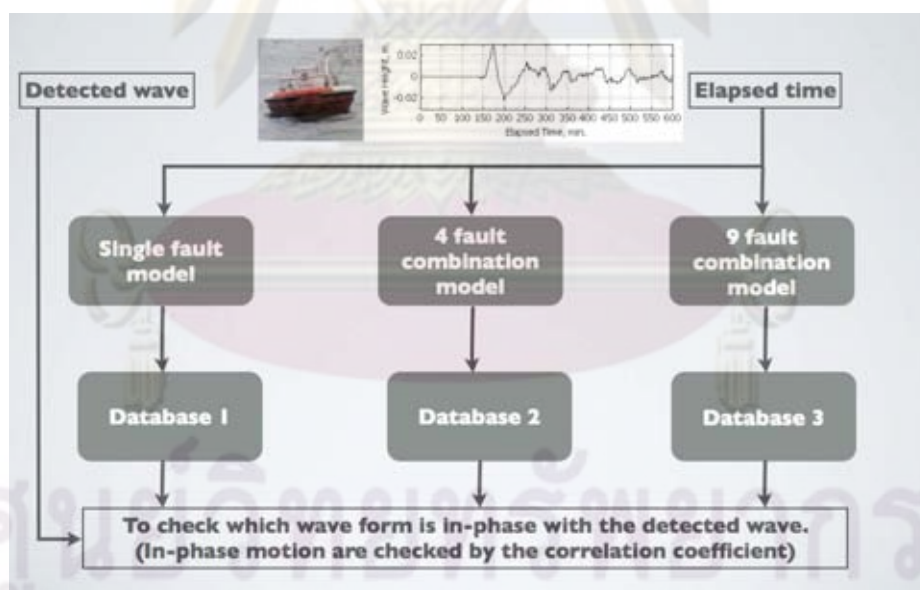
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 5 นาที กับคำตอบเป้าหมาย



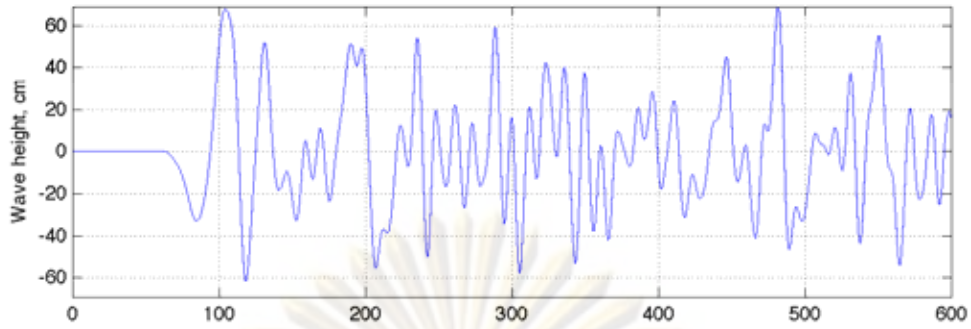
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ที่ใช้ข้อมูลสุ่มในช่วง ± 10 นาที กับคำตอบเป้าหมาย

5.2 การพยากรณ์ตำแหน่งรอยเลื่อน

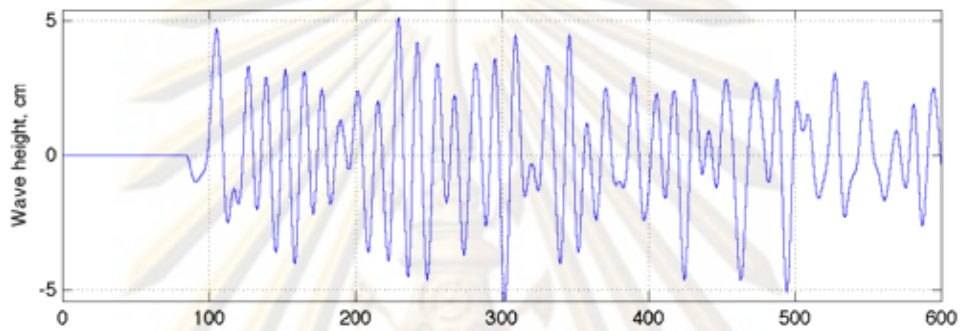
การพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อนเริ่มต้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหวแล้วทำให้เกิดคลื่นขึ้น ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สามารถจะวัดรูปแบบคลื่นและเวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีได้ นำเวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองเพื่อคำนวณหาขนาดของรอยเลื่อน ซึ่งดังแสดงในรูปที่ 5.18 เนื่องจากแบบจำลองถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่มตามขนาดของรอยเลื่อน จึงทำให้มีคำตอบจากรอยเลื่อน 3 คำตอบ หลักเกณฑ์ในการเลือกคำตอบจากรอยเลื่อนทั้งสามนั้นใช้การเปรียบเทียบเฟสของคลื่นแต่ละรอยเลื่อนจากแบบจำลอง ANN กับ คลื่นที่วัดได้จริง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, ρ) เป็นตัวบ่งชี้ จากรูปที่ 5.19 คือคลื่นที่วัดได้จริง และรูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.22 คือคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว, กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน, และกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคลื่นจากกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน มีเฟสใกล้เคียงกับคลื่นที่วัดได้จริงมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแต่ละกลุ่ม กับคลื่นที่วัดได้จริงนั้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ดังนั้นจากตัวอย่างที่แสดงสามารถสรุปได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกันมีความสัมพันธ์กับคลื่นที่วัดได้จริงมากที่สุด



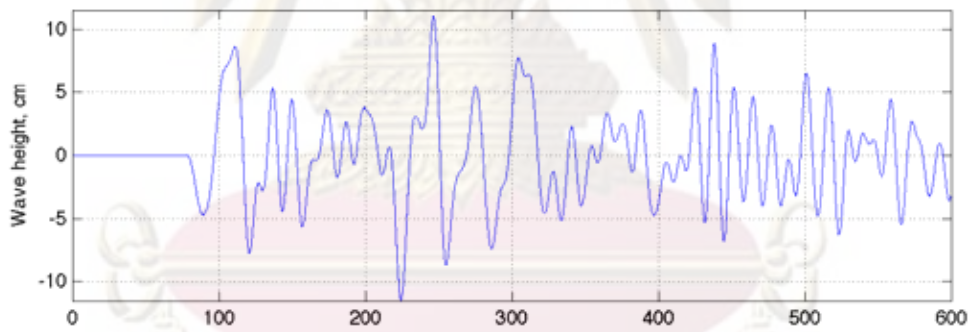
รูปที่ 5.18 ขั้นตอนการพยากรณ์ขนาดของรอยเลื่อน



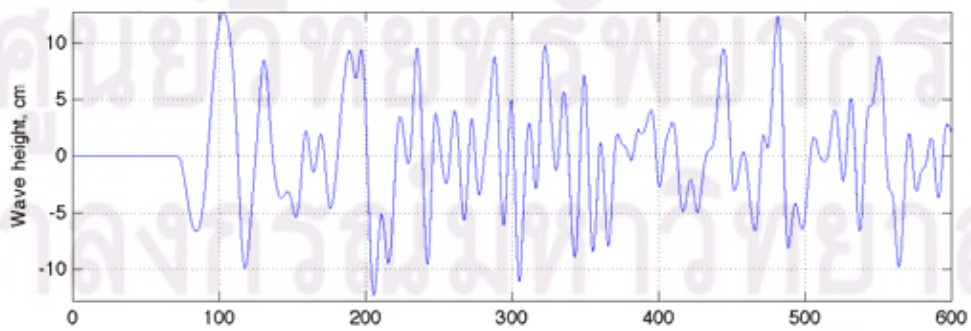
รูปที่ 5.19 คลื่นที่ตรวจวัดได้



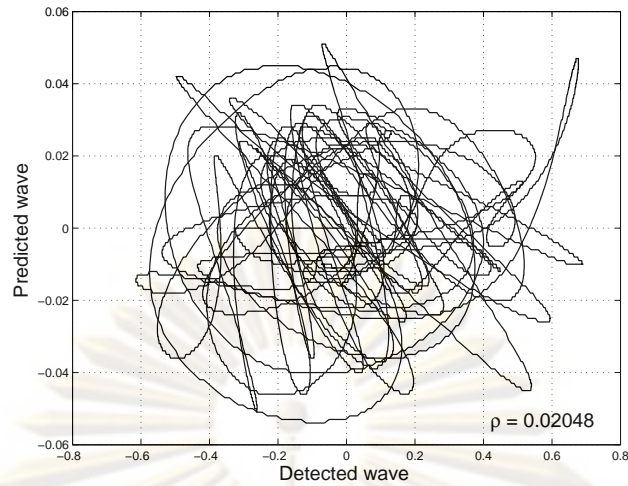
รูปที่ 5.20 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่มรอยคลื่นเดี่ยว



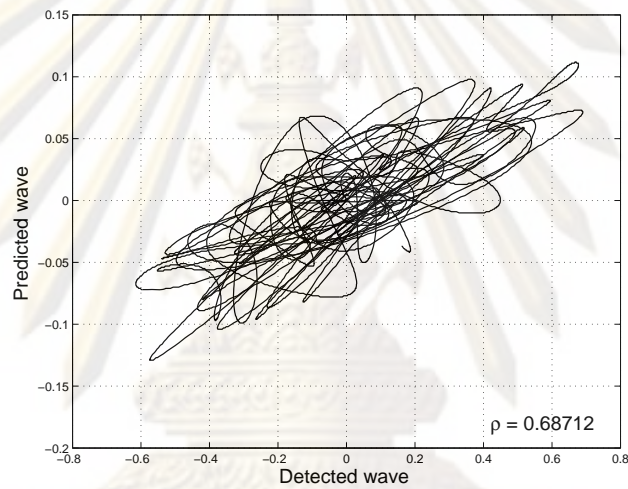
รูปที่ 5.21 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่ม 4 รอยคลื่นร่วมกัน



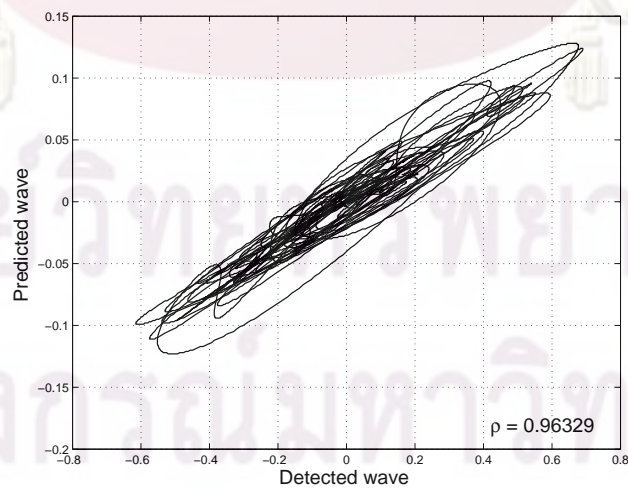
รูปที่ 5.22 คลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ของกลุ่ม 9 รอยคลื่นร่วมกัน



รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่มรอย
เลื่อนเดี่ยว, $\rho = 0.02048$



รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่ม 4 รอย
เลื่อนร่วมกัน, $\rho = 0.68712$



รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่วัดได้กับคลื่นที่วิเคราะห์จากแบบจำลองของกลุ่ม 9 รอย
เลื่อนร่วมกัน, $\rho = 0.96329$

สำหรับการวัดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, ρ) ที่เป็นตัวชี้วัดซึ่งหาได้จากสมการที่ (5.7)

$$\rho = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}} \quad (5.7)$$

และค่า ρ จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ไม่มีหน่วย โดยความหมายของค่า ρ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่า ρ เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม คือถ้า X เพิ่ม Y จะลดลง แต่ถ้า X ลด Y จะเพิ่ม
- 2) ค่า ρ เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือถ้า X เพิ่ม Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้า X ลด Y ก็ลดด้วย
- 3) ถ้า ρ มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
- 4) ถ้า ρ มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก
- 5) ถ้า $\rho = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์
- 6) ถ้า ρ เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ถึงขั้นตอนนี้สามารถที่จะเลือกรูปแบบคลื่นที่มีความสัมพันธ์กันคลื่นที่วัดได้จริงได้ ซึ่งรูปแบบคลื่นที่ได้นั้นจะเชื่อมโยงกับคุณลักษณะของรอยเลื่อนที่ก่อให้เกิดคลื่นรูปแบบนั้นๆ

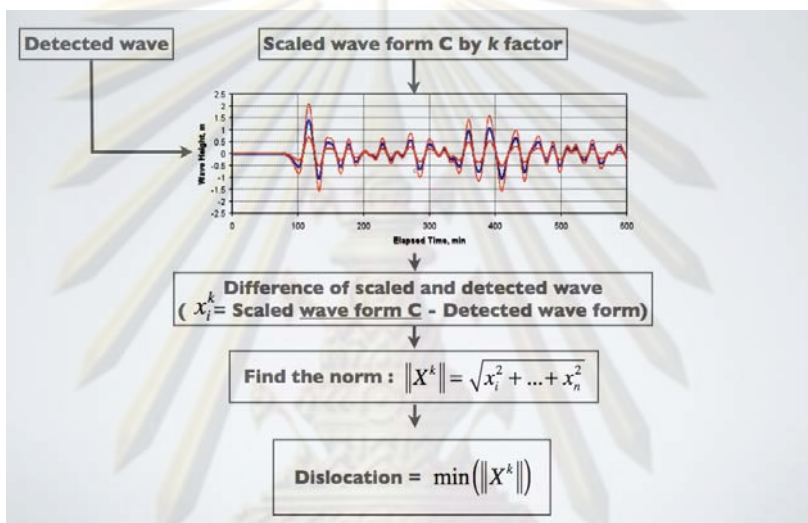
5.3 การคำนวณระยะเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนด้วยหลักการซ้อนทับ

การประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนโดยการใช้หลักการซ้อนทับนั้น ซึ่งจากการศึกษาหลักการซ้อนทับพบว่า ความสูงคลื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน เพราะฉะนั้นถ้าทำการขยายคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN ด้วยตัวคูณขยายใดๆ แล้วทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นที่วัดได้จริงกับคลื่นจากแบบจำลอง ANN ที่ถูกคูณด้วยตัวคูณขยายมีค่าน้อยที่สุด ตัวคูณขยายที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดนั้นคือ ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน สำหรับค่าตัวคูณขยายนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ที่รอยเลื่อนจะสามารถเคลื่อนตัวได้สูงสุด เนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ค่าคูณขยายตั้งแต่ 1 ถึง 15 และมีช่วงห่างกันทุกๆ 0.5 (คูณด้วย 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, ...) การหาค่าความคลาดเคลื่อนจะหาโดยใช้ค่ารากของผลรวม

ผลต่างกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ (5.8) ขั้นตอนของการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน โดยสรุปแสดงไว้ในรูปที่ 5.26

$$\|X\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2} \tag{5.8}$$

โดยที่ $\|X\|$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง
 x_i คือ ผลต่างของความสูงคลื่นระหว่างของคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ เวลาใดๆ



รูปที่ 5.26 ขั้นตอนการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

กรณีศึกษาการพยายากรณีสึนามิ โดยจำลองสึนามิให้เกิดในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อน หมายเลข 1013 ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน ซึ่งมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 5.4 และทำการวิเคราะห์ สึนามิได้เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีดังแสดงในตารางที่ 5.5

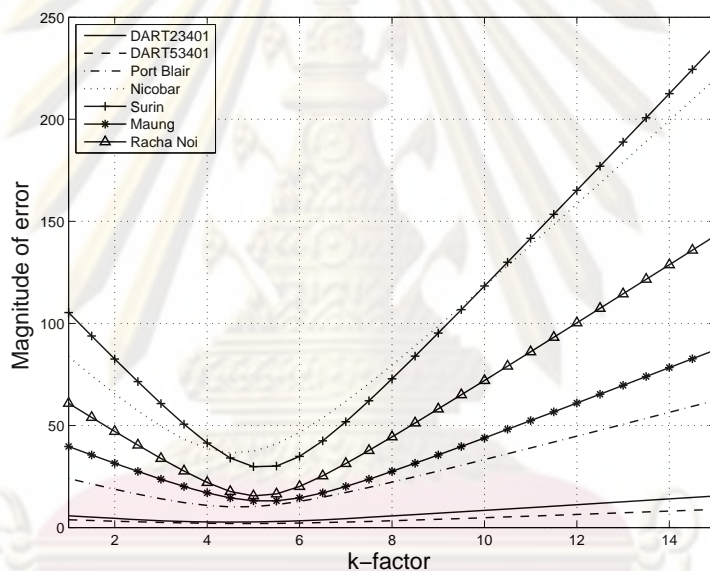
ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อน

ความยาว/ความกว้าง (กม)	มุมแนวระดับ/มุมเท/มุมเลื่อนถล่ม	ความลึก (กม)	ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	จุดกำเนิด(ละติจูด/ลองจิจูด)
300 / 150	340 / 20 / 90	5	5	4.90N / 93.0E

ตารางที่ 5.5 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี

เวลาที่คลื่นเดินทางถึง ณ สถานีต่างๆ (นาทีก)						
DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Muang	RachaNoi
12.62	10.75	42.42	0.02	88.15	63.48	76.15

รูปที่ 5.27 แสดงค่าคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นจากแบบจำลอง ANN กับคลื่นที่วัดได้จริงจากกรณีศึกษา โดยการคูณตัวคูณขยายตั้งแต่ 1-15 ทุกช่วง 0.5 กับคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง ANN แล้วนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นที่วัดได้จริงของทุกๆ สถานี จะเห็นได้ว่าทุกๆ สถานีจะมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่เมื่อคูณด้วยตัวคูณขยายคลื่นประมาณ 5 นำค่าตัวคูณขยายคลื่นมาเฉลี่ยจากทุกๆ สถานี ซึ่งเท่ากับ 4.86 นั่นก็คือค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน และคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -2.8 %



รูปที่ 5.27 ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริงเมื่อมีการแปรผันตัวคูณขยายคลื่นจากแบบจำลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

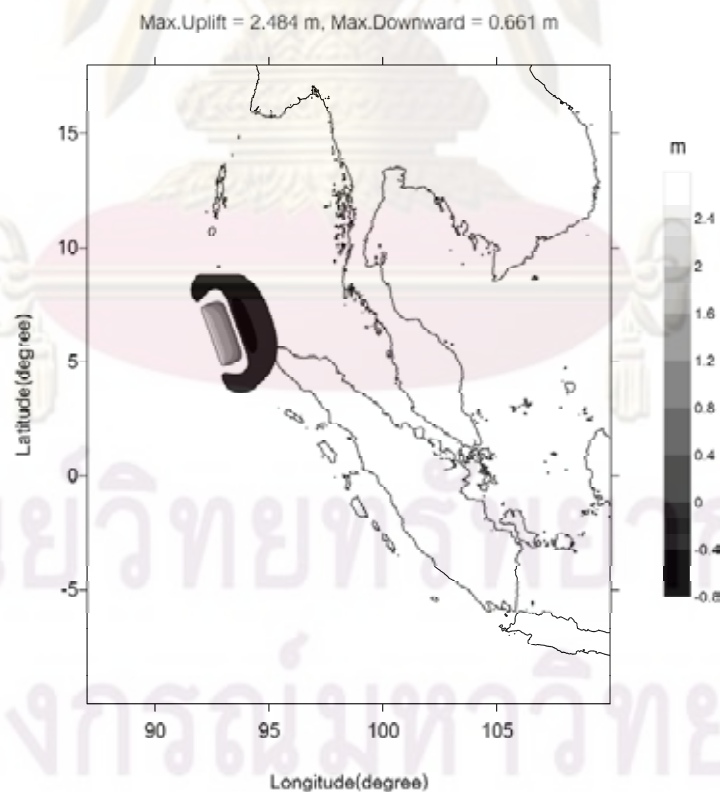
กรณีศึกษาและผลของเวลาเดินทางของคลื่นต่อความถูกต้องของแบบจำลอง

6.1 การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.6

แผ่นดินไหวขนาด Mw 8.6 มีพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนตามตารางที่ 6.1 สำหรับทดสอบแบบจำลอง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับรอยเลื่อนหมายเลขที่ 37 ถึง 45 รูปที่ 6.1 แสดงการเคลื่อนตัวของพื้นทะเล และผลการวิเคราะห์สึนามิได้เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี่ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.6

ความยาว/ความกว้าง (กม)	มุมแนวระดับ/มุมเท/มุมเลื่อนถล่ม	ความลึก (กม)	ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	จุดกำเนิด(ละติจูด/ลองจิจูด)
300 / 150	340° / 20° / 90°	5	5	4.90°N / 93.0°E



รูปที่ 6.1 การเปลี่ยนแปลงของพื้นทะเลเนื่องจากรอยเลื่อน

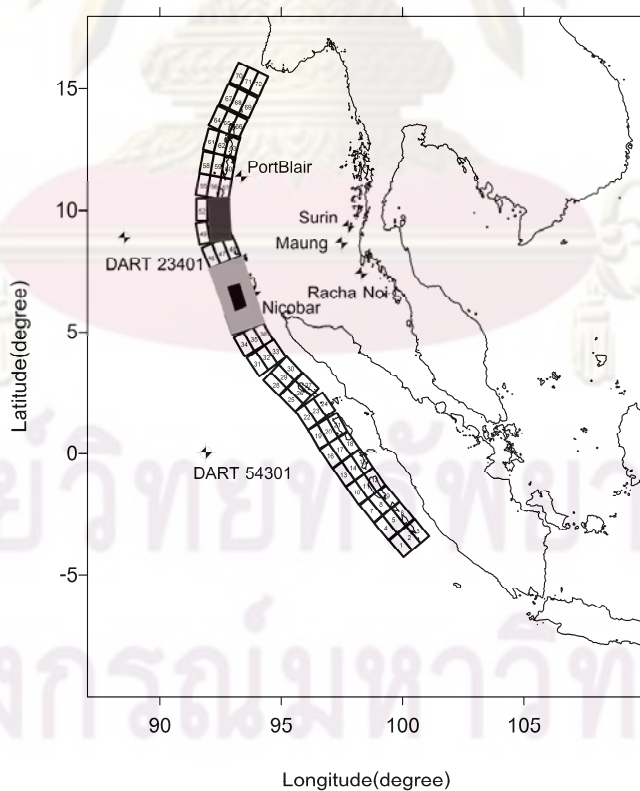
ตารางที่ 6.2 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี

เวลาที่คลื่นเดินทางถึง ณ สถานีต่างๆ (นาที)						
DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	Racha Noi
12.62	10.75	42.42	0.02	88.15	63.48	76.15

1) เมื่อนำเวลาเดินทางของคลื่นในตารางที่ 6.2 เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองทั้ง 3 แบบ แล้วทำการคำนวณหารอยเลื่อนจากแบบทั้งสามซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.3 และ รูปที่ 6.2 โดยบริเวณแรงเงาสีดำคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 1 แรเงาสีเทาคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 2 และแรเงาสีเทาอ่อนคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 3

ตารางที่ 6.3 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

แบบจำลองที่	รอยเลื่อนจากแบบจำลอง	รอยเลื่อนที่ร่วมกัน
	ANN	
แบบจำลองที่ 1	41	41
แบบจำลองที่ 2	134	50 / 51 / 53 / 54
แบบจำลองที่ 3	1013	37 / 38 / 39 / 40 / 41 / 42 / 43 / 44 / 45



รูปที่ 6.2 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

2) หลังจากได้รอยเลื่อนแล้ว แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่ารอยเลื่อนใดใกล้เคียงกับรอยเลื่อนที่เกิดจริง ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับคลื่นจริงว่าคลื่นจากแบบจำลองใดมีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ซึ่งคลื่นจากแบบจำลองได้มาจากฐานข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้ว และผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6.4 จะเห็นได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองแบบที่ 3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดนั่นหมายถึงคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 มีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ารอยเลื่อนที่ทำให้เกิดสึนามิในตัวอย่างนี้คือ รอยเลื่อนหมายเลข 1013 ที่มีรอยเลื่อนร่วม 9 รอยเลื่อนคือ รอยเลื่อนหมายเลข 37 ถึง 45

ตารางที่ 6.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

แบบจำลองที่	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
แบบจำลองที่ 1	0.3377	0.2997	0.1973	-0.0130	0.7428	0.0205	0.5527
แบบจำลองที่ 2	0.6084	0.6342	0.6787	0.6765	0.8150	0.6871	0.7370
แบบจำลองที่ 3	0.9312	0.9018	0.9400	0.9351	0.9735	0.9633	0.9785

3) เมื่อได้ตำแหน่งของรอยเลื่อนแล้วแต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่ารอยเลื่อนเคลื่อนตัวไปทำไต่ ซึ่งจะต้องหาค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่นระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง โดยการคูณขยายคลื่นจากแบบจำลองด้วย 1 ถึง 15 ทุกๆ ช่วง 0.5 แล้วหาค่าอนุกรมของผลต่างของคลื่นที่ถูกขยายกับคลื่นจริงทุกๆ สถานี ผลลัพธ์การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 6.5 และ รูปที่ 6.3 จะเห็นว่าตัวคูณขยายคลื่นที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของแต่ละสถานีอยู่ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ค่าคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากผลเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดของแต่ละสถานีซึ่งเท่ากับ 4.86 ดังนั้นจะสรุปได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองที่ 3 มีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 4.86 เมตร

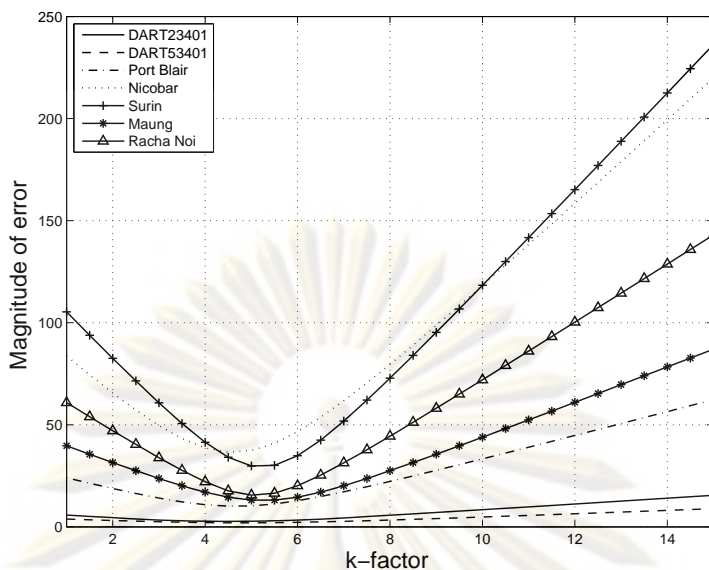
ตารางที่ 6.5 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณขยายคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
1	5.779133	3.828109	24.01393	83.7295	105.3259	39.69538	60.86165
1.5	5.137366	3.470241	21.35096	74.47439	93.87349	35.54977	53.94605
2	4.522371	3.1295	18.78149	65.57524	82.57313	31.47756	47.10982
2.5	3.946683	2.812118	16.34968	57.19843	71.4969	27.51134	40.3933
3	3.430152	2.526912	14.12679	49.60927	60.76749	23.70438	33.86776
3.5	3.003455	2.285957	12.2273	43.22466	50.60597	20.14717	27.66868
4	2.709373	2.104508	10.82286	38.64627	41.43231	16.99724	22.07284

ตารางที่ 6.5 (ต่อ) ค่าตลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณ ขยายคลื่น	ค่าตลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
4.5	2.593419	1.998838	10.12167	36.55912	34.05442	14.52208	17.66318
5	2.678825	1.981108	10.26882	37.38282	29.83566	13.10963	15.48837
5.5	2.948143	2.053598	11.23101	40.94207	30.13345	13.10804	16.4595
6	3.357403	2.207437	12.82612	46.6144	34.83216	14.51779	20.12621
6.5	3.862373	2.427207	14.85158	53.73475	42.49622	16.99113	25.34437
7	4.430446	2.696837	17.15565	61.80465	51.82639	20.13995	31.34858
7.5	5.040332	3.002927	19.64051	70.49879	62.07588	23.69649	37.76578
8	5.678574	3.335453	22.24566	79.6129	72.85775	27.50302	44.41732
8.5	6.33661	3.68727	24.93343	89.01809	83.96716	31.46897	51.21197
9	7.008866	4.053359	27.67976	98.63113	95.28962	35.541	58.09954
9.5	7.691615	4.430182	30.46882	108.3967	106.7574	39.68648	65.05054
10	8.382293	4.81522	33.28986	118.2771	118.3282	43.88458	72.04659
10.5	9.079092	5.206652	36.13541	128.2457	129.9745	48.12156	79.07575
11	9.780702	5.603137	39.00009	138.2835	141.6777	52.38796	86.1299
11.5	10.48616	6.003674	41.87999	148.3764	153.4249	56.67715	93.20338
12	11.19473	6.407503	44.77215	158.514	165.2065	60.98432	100.2921
12.5	11.90587	6.814039	47.67436	168.688	177.0158	65.30591	107.393
13	12.61914	7.222825	50.58489	178.8924	188.8475	69.63924	114.5039
13.5	13.33419	7.6335	53.50236	189.1222	200.6977	73.98225	121.623
14	14.05076	8.045774	56.42572	199.3736	212.5633	78.33332	128.7489
14.5	14.76862	8.459413	59.35408	209.6432	224.4418	82.69118	135.8806
15	15.4876	8.874227	62.28675	219.9287	236.3313	87.05481	143.0171

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.3 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

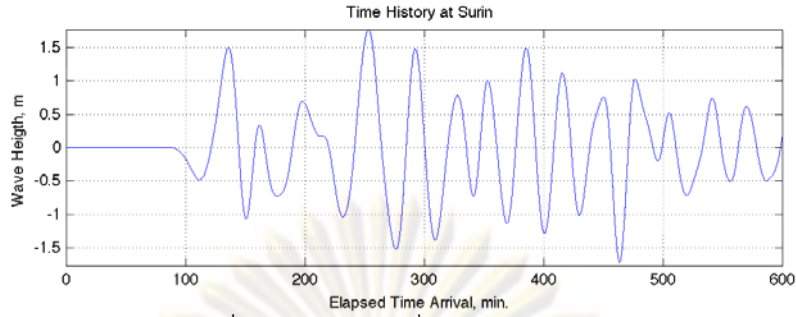
4) จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นสามารถสรุปการหาคคุณลักษณะของรอยเลื่อนได้ดังนี้

ตารางที่ 6.6 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN

	สำหรับใช้วิเคราะห์	จากแบบจำลอง ANN	ค่าคลาดเคลื่อน
ความยาว/ความกว้าง (กม)	300 / 150	300 / 150	-
จุดกำเนิด(ละติจูด/ลองจิจูด)	4.90°N / 93.0°E	4.90°N / 93.0°E	-
ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	5.00	4.86	-2.8 %

6.1.1 ผลของระยะเวลาเดินทางของคลื่นต่อความถูกต้องของแบบจำลองฯ

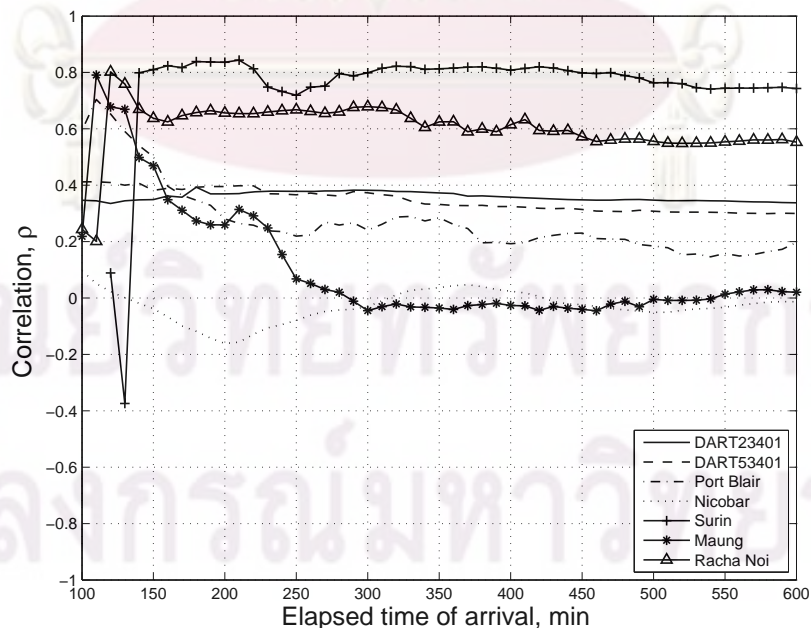
ที่ผ่านมาเป็นการทำนายโดยใช้คลื่นที่มีเวลาเดินทางยาว 600 นาที นับจากการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการเตือนภัยไม่สามารถรอเวลาเดินทางของคลื่นได้ยาวนานขนาดนั้น ในหัวข้อนี้จึงศึกษาว่าหากลดเวลาเดินทางของคลื่นลงจะมีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองเพียงใด เมื่อพิจารณาเวลาเดินทางมาถึงของคลื่น ณ สถานีสุดท้ายที่มาถึงคือ สถานีสุรินทร์ เมื่อเวลา 88.15 นาทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงจะทดสอบใช้เวลาเดินทางของคลื่นเริ่มต้นที่ 100 นาที และเพิ่มทีละ 10 นาที จนถึง 600 นาที



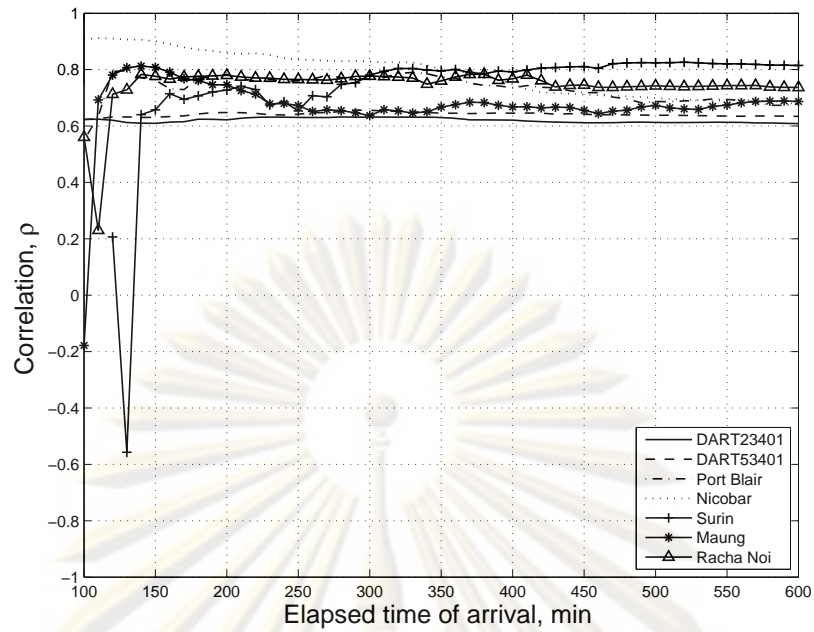
รูปที่ 6.4 ความสูงคลื่น ณ สถานีสุรินทร์

จากการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองที่ 3 ยังให้ค่าเข้าใกล้ 1 เช่นเดียวกับการนำคลื่นมาใช้คำนวณทั้ง 600 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ถึง รูปที่ 6.7

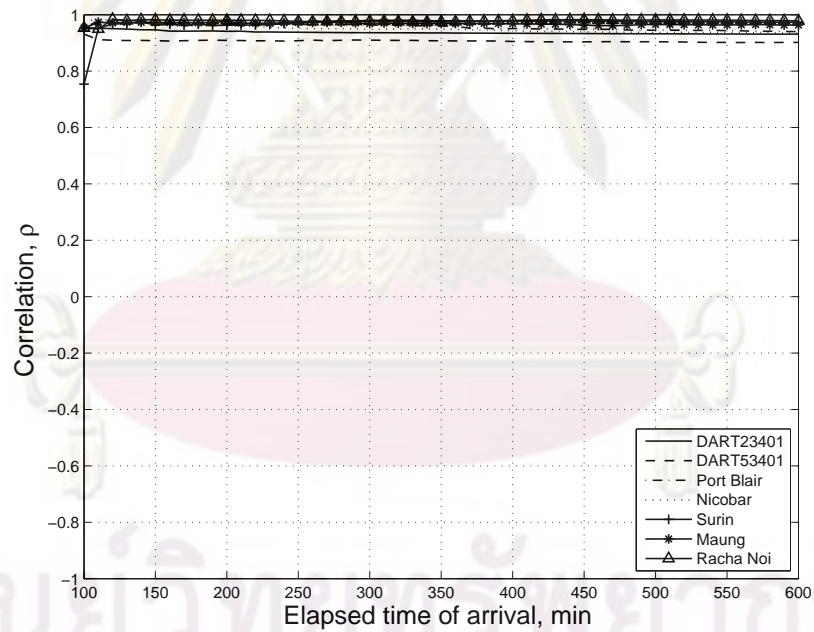
เมื่อเลือกขนาดของรอยเลื่อนได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้แล้ว คือรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 3 แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 3 นั้นมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5 เมตรทุกๆ ระยะเวลาของคลื่นที่ใช้คำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนมีค่าใกล้เคียงกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวจริงเมื่อใช้ระยะเวลาเดินทางของคลื่นที่ 120 นาทีหลังเกิดแผ่นดินไหว หรือ 31.85 นาทีนับจากคลื่นเดินทางถึงสถานีสุรินทร์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ระยะเวลาเดินทางถึงของคลื่นอย่างน้อย 30 นาที หลังจากคลื่นเดินทางถึง ณ สถานีสุดท้าย



รูปที่ 6.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

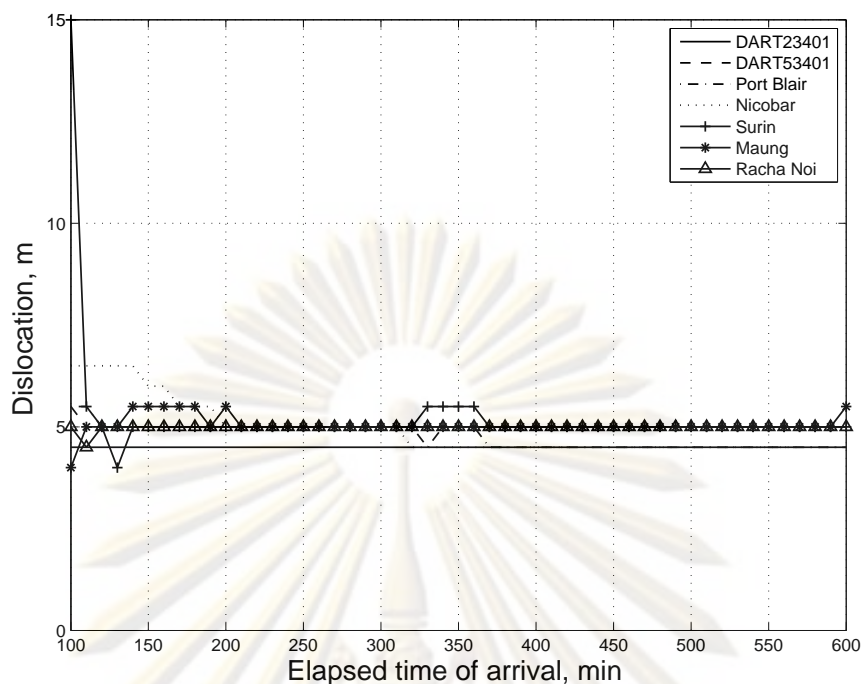


รูปที่ 6.6 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ



รูปที่ 6.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.8 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 3

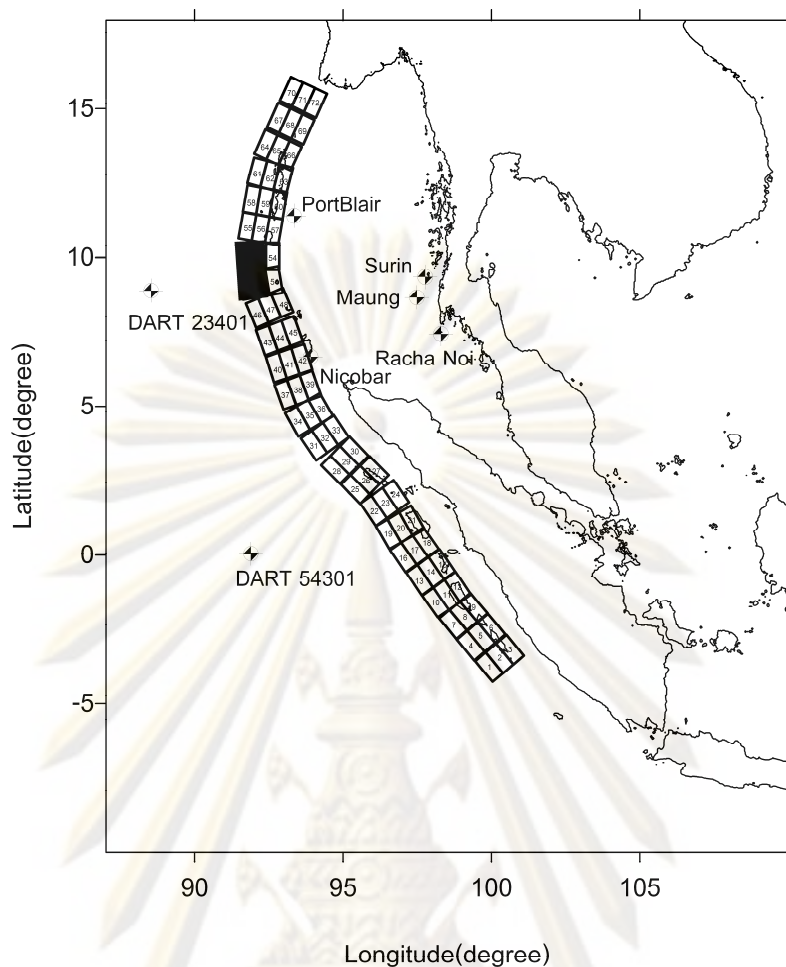
6.2 การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งตรงกับรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย

แผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 มีพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนตามตารางที่ 6.7 สำหรับทดสอบแบบจำลอง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับรอยเลื่อนหมายเลขที่ 49, 50, 52 และ 53 รูปที่ 6.9 แสดงตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งตรงกับรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยและผลการวิเคราะห์สึนามิได้เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีดังแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.7 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3

ความยาว/ความกว้าง (กม)	มุมแนวระดับ/มุมเท/มุมเลื่อนถล่ม	ความลึก (กม)	ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	จุดกำเนิด(ละติจูด/ลองจิจูด)
200 / 100	355° / 20° / 90°	5	3.5	8.60°N / 91.64°E

1) เมื่อนำเวลาเดินทางของคลื่นในตารางที่ 6.8 เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองทั้ง 3 แบบ แล้วทำการคำนวณหารอยเลื่อนจากแบบทั้งสามซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.9 และ รูปที่ 6.10 โดยบริเวณแวงเงาสีดำคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 1 แวงเงาสีเทาคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 2 และ แวงเงาสีเทาอ่อนคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 3



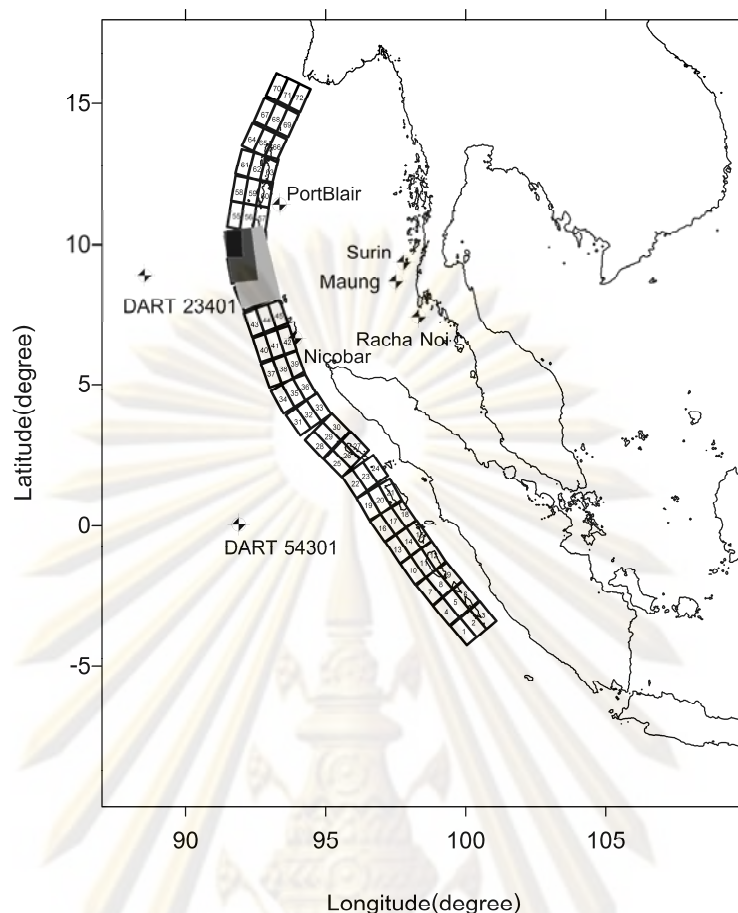
รูปที่ 6.9 ตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งตรงกับรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย

ตารางที่ 6.8 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี

เวลาที่คลื่นเดินทางถึง ณ สถานีต่างๆ (นาท)						
DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
28.75	77.22	20.62	37.02	101.35	86.22	112.68

ตารางที่ 6.9 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

แบบจำลองที่	รอยเลื่อนจากแบบจำลอง	
	ANN	รอยเลื่อนที่ร่วมกัน
แบบจำลองที่ 1	52	52
แบบจำลองที่ 2	113	49 / 50 / 52 / 53
แบบจำลองที่ 3	1016	46 / 47 / 48 / 49 / 50 / 51 / 52 / 53 / 54



รูปที่ 6.10 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

2) จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับคลื่นจริงว่าคลื่นจากแบบจำลองใดมีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ซึ่งคลื่นจากแบบจำลองได้มาจากรูปร่างข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้ว และผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6.10 จะเห็นได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดนั่นหมายถึงคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 มีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ารอยเลื่อนที่ทำให้เกิดสึนามิในตัวอย่างนี้คือ รอยเลื่อนหมายเลข 113 ที่มี 4 รอยเลื่อนรวมกันคือ รอยเลื่อนหมายเลข 49, 50, 52 และ 53

ตารางที่ 6.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

แบบจำลองที่	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
แบบจำลองที่ 1	0.55988	0.29497	0.15959	0.23677	0.43361	0.55160	0.26976
แบบจำลองที่ 2	0.74780	0.84901	0.92320	0.92750	0.95324	0.93511	0.95538
แบบจำลองที่ 3	0.64166	0.61847	0.84749	0.47000	0.63323	0.71784	0.68420

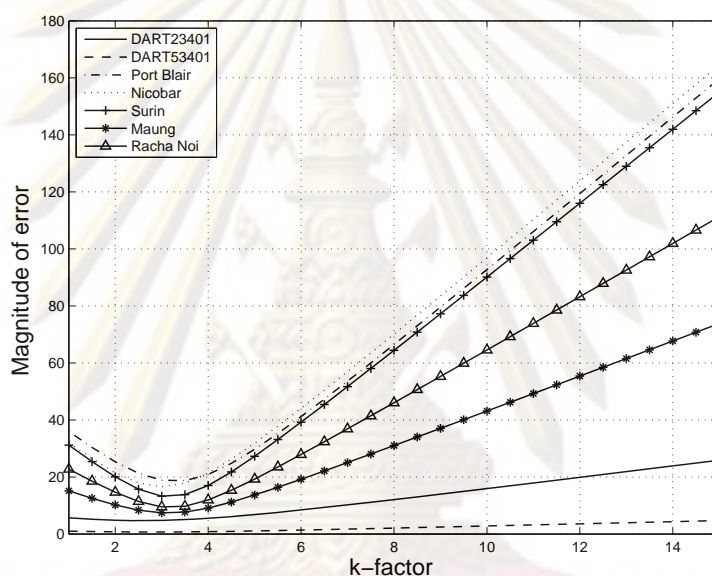
3) เมื่อได้ตำแหน่งของรอยเลื่อนแล้วแต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่ารอยเลื่อนเคลื่อนตัวไปทำใด ซึ่งจะต้องหาค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่นระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง โดยการคูณขยายคลื่นจากแบบจำลองด้วย 1 ถึง 15 ทุกๆ ช่วง 0.5 แล้วหาค่านอร์มของผลต่างของคลื่นที่ถูกขยายกับคลื่นจริงทุกๆ สถานี ผลลัพธ์การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 6.11 และ รูปที่ 6.11 จะเห็นว่าตัวคูณขยายคลื่นที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของแต่ละสถานีอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3.5 ค่าคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากผลเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดของแต่ละสถานีซึ่งเท่ากับ 3.00 ดังนั้นจะสรุปได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองที่ 2 มีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.00 เมตร

ตารางที่ 6.11 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณ ขยายคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
1	5.687031	0.997711	35.9688	32.0197	31.1635	15.1463	22.7413
1.5	5.174852	0.868645	30.3639	26.4125	25.3915	12.5307	18.5527
2	4.828864	0.766439	25.3323	21.5217	20.0859	10.1887	14.6785
2.5	4.686024	0.702908	21.2844	17.9429	15.7262	8.3535	11.4425
3	4.764638	0.688840	18.8647	16.5504	13.2793	7.4116	9.5194
3.5	5.054383	0.727109	18.7156	17.8630	13.8030	7.6983	9.7223
4	5.522125	0.810336	20.8858	21.3883	17.0252	9.0981	11.9434
4.5	6.127234	0.926482	24.7732	26.2495	21.7796	11.2012	15.3291
5	6.833315	1.064829	29.7111	31.8405	27.2763	13.6872	19.2752
5.5	7.612322	1.217834	35.2609	37.8391	33.1481	16.3827	23.5012
6	8.444096	1.380633	41.1760	44.0793	39.2269	19.1997	27.8800
6.5	9.314512	1.550143	47.3196	50.4715	45.4298	22.0917	32.3496
7	10.213695	1.724386	53.6131	56.9646	51.7120	25.0327	36.8770
7.5	11.134678	1.902062	60.0095	63.5277	58.0478	28.0073	41.4434
8	12.072473	2.082292	66.4790	70.1410	64.4215	31.0059	46.0370
8.5	13.023449	2.264466	73.0022	76.7917	70.8227	34.0221	50.6505
9	13.984917	2.448151	79.5660	83.4708	77.2447	37.0516	55.2789
9.5	14.954853	2.633030	86.1609	90.1720	83.6827	40.0913	59.9188
10	15.931711	2.818869	92.7804	96.8906	90.1332	43.1392	64.5677
10.5	16.914292	3.005488	99.4196	103.6234	96.5937	46.1936	69.2237
11	17.901653	3.192752	106.0748	110.3677	103.0623	49.2533	73.8855
11.5	18.893046	3.380554	112.7431	117.1215	109.5377	52.3173	78.5521
12	19.887866	3.568808	119.4224	123.8833	116.0186	55.3850	83.2227

ตารางที่ 6.11 (ต่อ) ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณ ขยายคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
12.5	20.885624	3.757446	126.1109	130.6519	122.5043	58.4558	87.8967
13	21.885919	3.946414	132.8072	137.4261	128.9939	61.5292	92.5735
13.5	22.888418	4.135665	139.5101	144.2053	135.4869	64.6048	97.2527
14	23.892843	4.325164	146.2189	150.9888	141.9829	67.6824	101.9340
14.5	24.898961	4.514879	152.9326	157.7760	148.4815	70.7616	106.6171
15	25.906576	4.704783	159.6508	164.5664	154.9822	73.8423	111.3018



รูปที่ 6.11 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

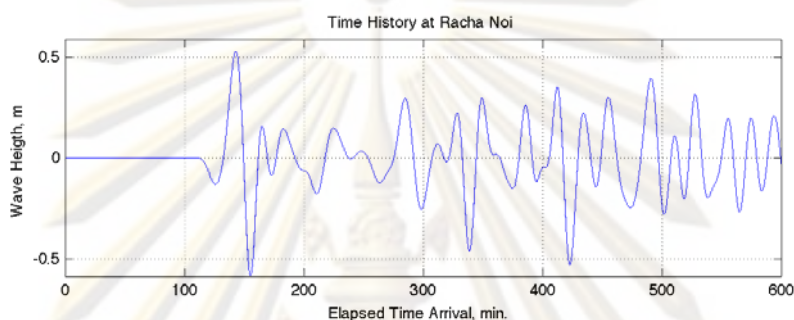
4) จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นสามารถสรุปการหาคุณลักษณะของรอยเลื่อนได้ดังนี้

ตารางที่ 6.12 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN

	สำหรับใช้วิเคราะห์	จากแบบจำลอง ANN	ค่าคลาดเคลื่อน
ความยาว/ความกว้าง (กม)	200 / 100	200 / 100	-
จุดกำเนิด(ละติจูด/ ลองจิจูด)	8.60°N / 91.64°E	8.60°N / 91.64°E	-
ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	3.50	3.00	-14.29%

6.2.1 ผลของระยะเวลาเดินทางของคลื่นต่อความถูกต้องของแบบจำลองฯ

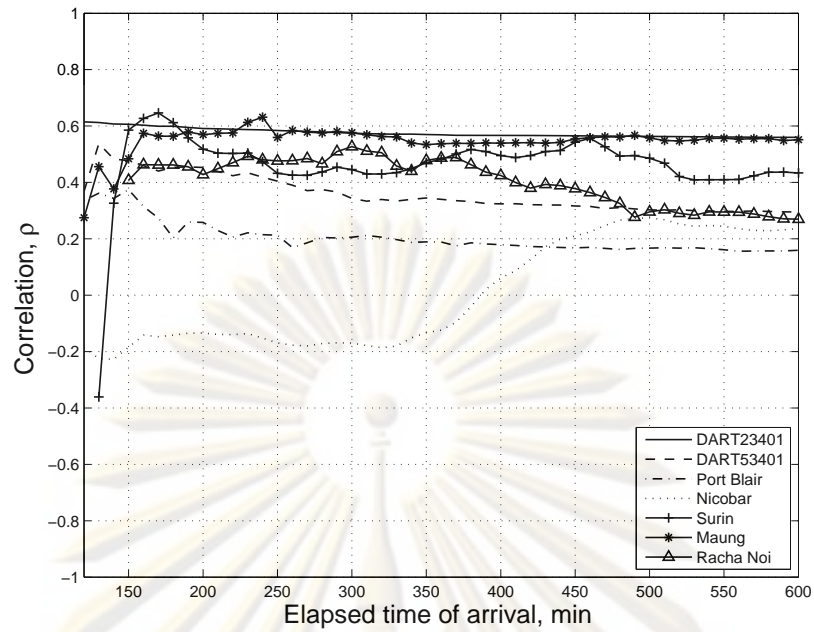
ที่ผ่านมาเป็นการทำนายโดยใช้คลื่นที่มีเวลาเดินทางยาว 600 นาที นับจากการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการเตือนภัยไม่สามารถรอเวลาเดินทางของคลื่นได้ยาวนานนั้น ในหัวข้อนี้จึงศึกษาว่าหากลดเวลาเดินทางของคลื่นลงจะมีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองเพียงใด เมื่อพิจารณาเวลาเดินทางมาถึงของคลื่น ณ สถานีสุดท้ายที่มาถึงคือ สถานีราชาน้อย เมื่อเวลา 112.68 นาที หลังจากเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงจะทดสอบใช้เวลาเดินทางของคลื่นเริ่มต้นที่ 120 นาที และเพิ่มทีละ 10 นาที จนถึง 600 นาที



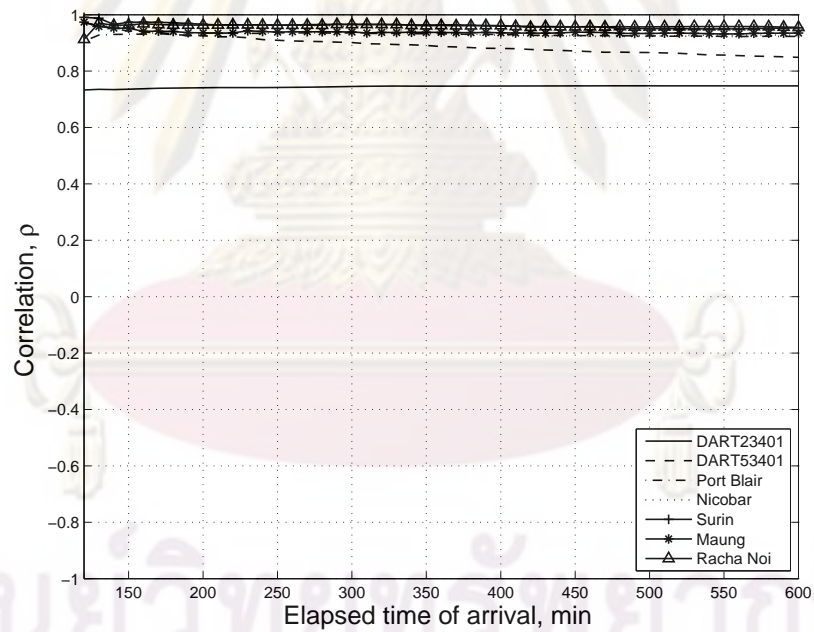
รูปที่ 6.12 ความสูงคลื่น ณ สถานีราชาน้อย

จากการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองที่ 2 ยังให้ค่าเข้าใกล้ 1 เช่นเดียวกับการนำคลื่นมาใช้คำนวณทั้ง 600 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ถึง รูปที่ 6.15

เมื่อเลือกขนาดของรอยเลื่อนได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้แล้ว คือรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 2 นั้นมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5 เมตรทุกๆ ระยะเวลาของคลื่นที่ใช้คำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 จะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนมีค่าใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนตัวจริงเมื่อใช้ระยะเวลาเดินทางของคลื่นที่ 130 นาทีหลังเกิดแผ่นดินไหว หรือ 17.23 นาทีนับจากคลื่นเดินทางถึงสถานีราชาน้อย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ระยะเวลาเดินทางถึงของคลื่นอย่างน้อย 20 นาที หลังจากคลื่นเดินทางถึง ณ สถานีสุดท้าย

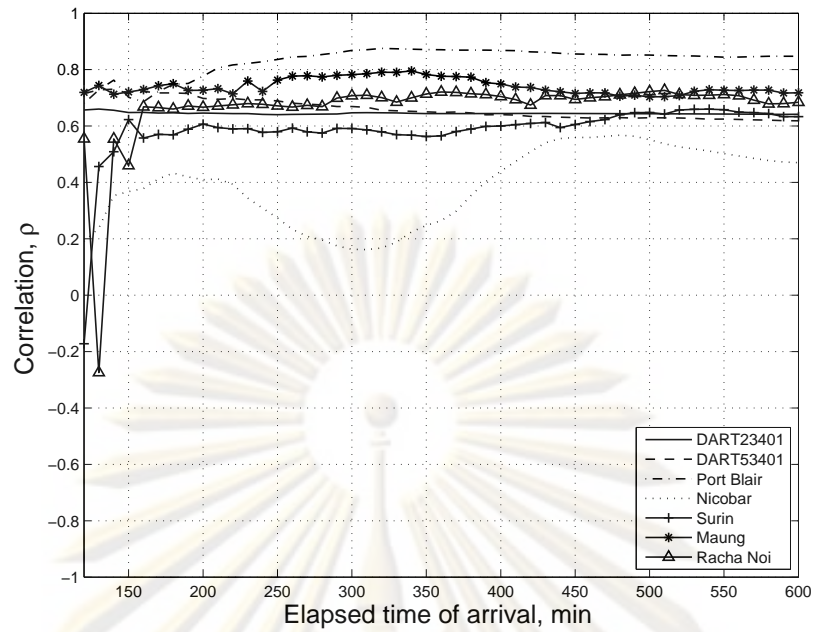


รูปที่ 6.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

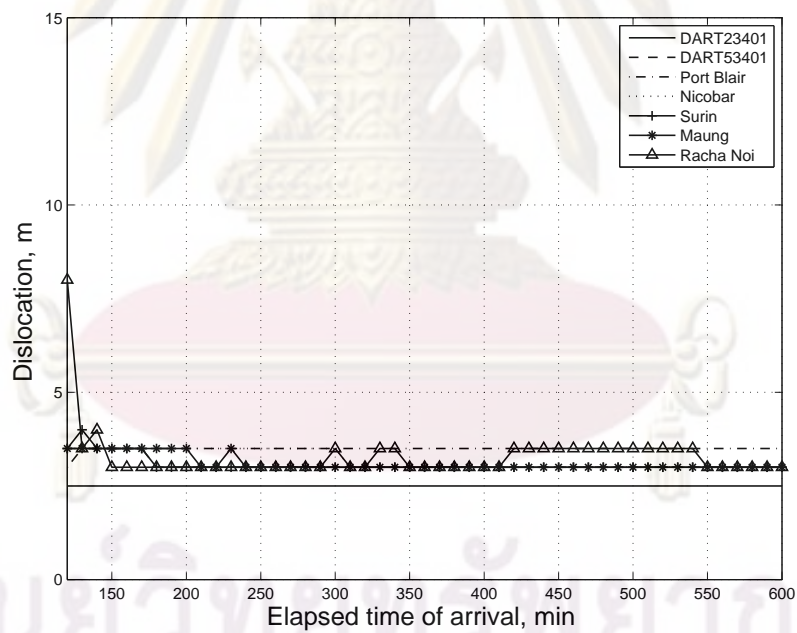


รูปที่ 6.14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ



รูปที่ 6.16 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 2

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 การพยากรณ์สึนามิสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งไม่ตรงกับรอยเลื่อน ขนาดหนึ่งหน่วย

แผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 มีพารามิเตอร์ของรอยเลื่อนตามตารางที่ 6.13 สำหรับทดสอบแบบจำลอง รูปที่ 6.17 แสดงตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งไม่ตรงกับรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วยและผลการวิเคราะห์สึนามิได้เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานีดังแสดงในตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.13 พารามิเตอร์ของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3

ความยาว/ความกว้าง (กม)	มุมแนวระดับ/มุมเท/มุมเลื่อนถล่ม	ความลึก (กม)	ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	จุดกำเนิด(ละติจูด/ลองจิจูด)
200 / 100	25 / 20 / 90	5	3.5	14.230N / 92.59E

ตารางที่ 6.14 เวลาที่คลื่นเดินทางถึงแต่ละสถานี

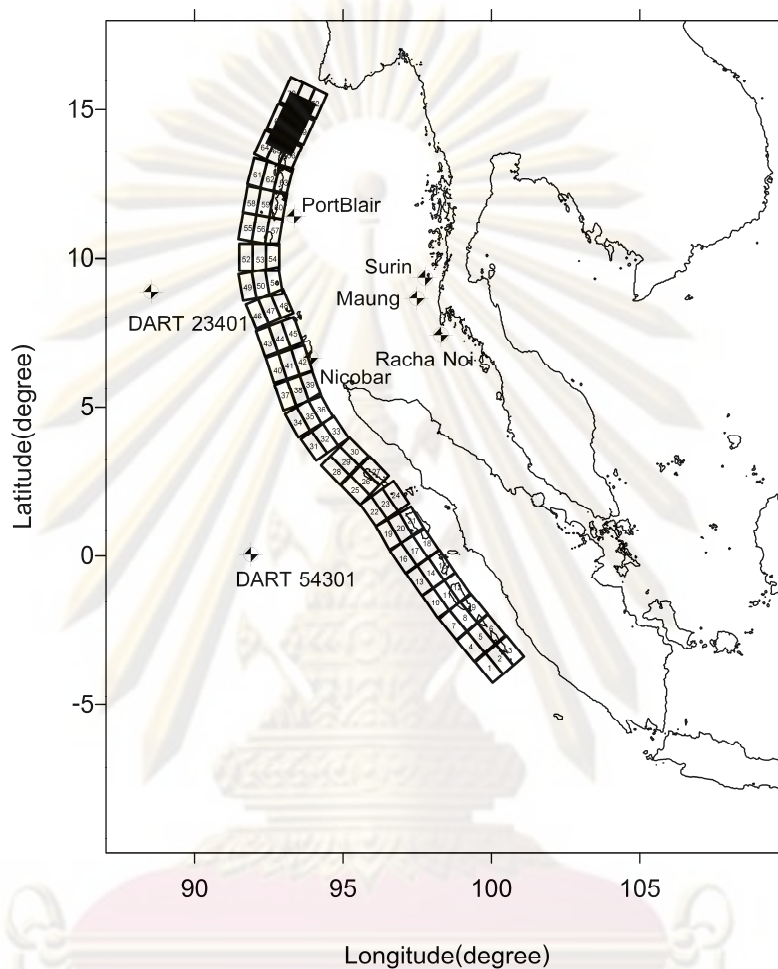
เวลาที่คลื่นเดินทางถึง ณ สถานีต่างๆ (นาที)						
DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
70.68	147.08	42.35	88.75	125.48	117.28	156.22

1) เมื่อนำเวลาเดินทางของคลื่นในตารางที่ 6.14 เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองทั้ง 3 แบบ แล้วทำการคำนวณหารอยเลื่อนจากแบบทั้งสามซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.15 และ รูปที่ 6.18 โดยบริเวณแรงงาสีดำคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 1 แรงงาสีเทาคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 2 และ แรงงาสีเทาอ่อนคือผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ 3

2) จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับคลื่นจริงว่าคลื่นจากแบบจำลองใดมีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ซึ่งคลื่นจากแบบจำลองได้มาจากรูปร่างข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้ว และผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6.16 จะเห็นได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดนั่นหมายถึงคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 มีความสัมพันธ์กับคลื่นจริงมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ารอยเลื่อนที่ทำให้เกิดสึนามิในตัวอย่างนี้คือ รอยเลื่อนหมายเลข 149 ที่มี 4 รอยเลื่อนร่วมกันคือ รอยเลื่อนหมายเลข 68, 69, 72 และ 72

3) เมื่อได้ตำแหน่งของรอยเลื่อนแล้วแต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่ารอยเลื่อนเคลื่อนตัวไปทำใด ซึ่งจะต้องหาค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่นระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง โดยการคูณขยายคลื่นจากแบบจำลองด้วย 1 ถึง 15 ทุกๆ ช่วง 0.5 แล้วหาค่านอร์มของผลต่างของคลื่นที่ถูกขยายกับคลื่นจริงทุกๆ สถานี ผลลัพธ์การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 6.11 และ รูปที่ 6.11 จะเห็น

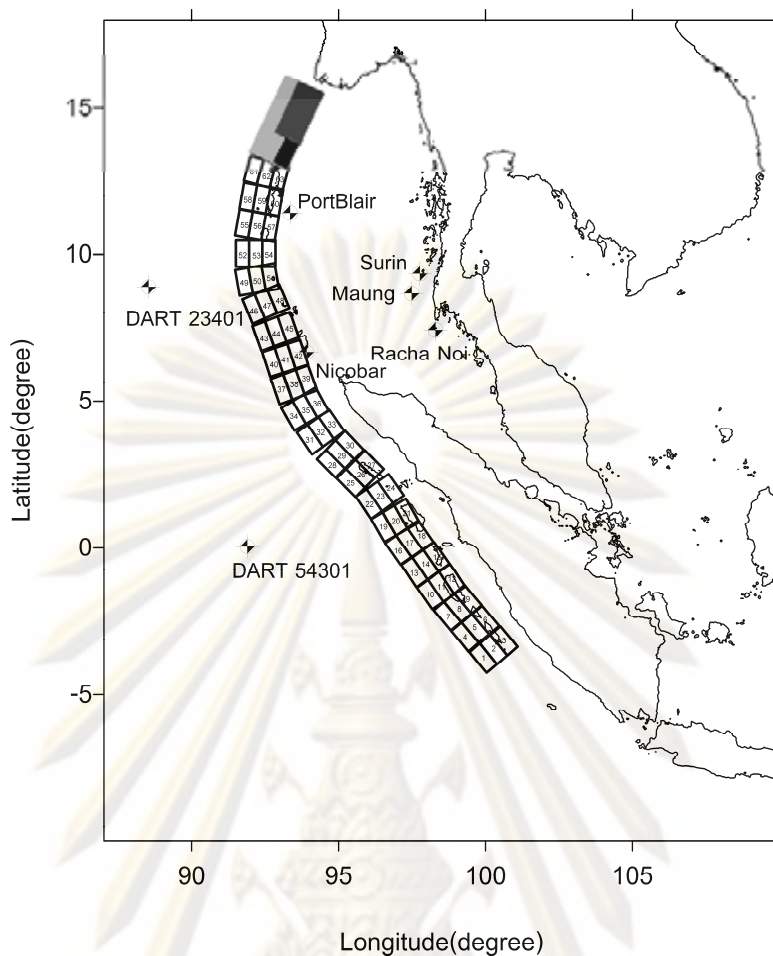
ว่าตัวคุณขยายคลื่นที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของแต่ละสถานีอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3.5 ค่าคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากผลเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดของแต่ละสถานีซึ่งเท่ากับ 3.29 ดังนั้นจะสรุปได้ว่ารอยเลื่อนจากแบบจำลองที่ 2 มีการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.29 เมตร



รูปที่ 6.17 ตำแหน่งรอยเลื่อนสำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw 8.3 ที่มีตำแหน่งไม่ตรงกับรอยเลื่อนขนาดหนึ่งหน่วย

ตารางที่ 6.15 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หารอยเลื่อนจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

แบบจำลองที่	รอยเลื่อนจากแบบจำลอง ANN	รอยเลื่อนที่ร่วมกัน
แบบจำลองที่ 1	66	66
แบบจำลองที่ 2	146	68 / 69 / 71 / 72
แบบจำลองที่ 3	1022	64 / 65 / 66 / 67 / 68 / 69 / 70 / 71 / 72



รูปที่ 6.18 ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 6.16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

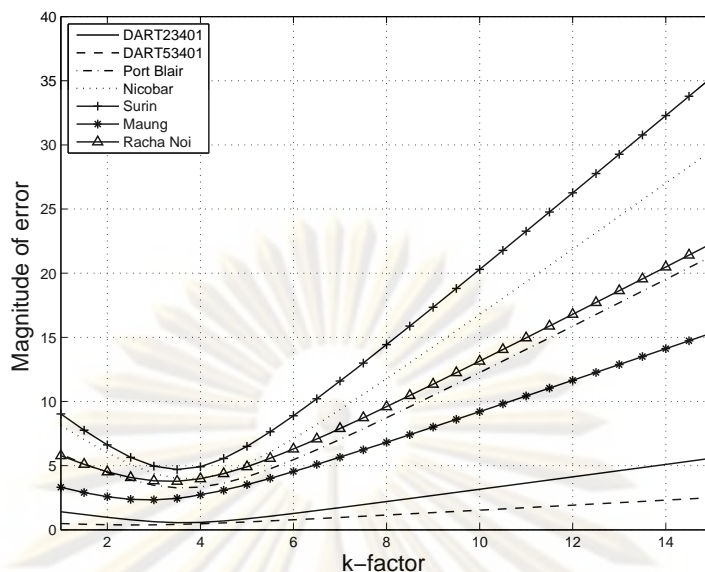
แบบจำลองที่	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ณ สถานีวัดน้ำทั้ง 7 สถานี						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
แบบจำลองที่ 1	0.048464	0.560813	-0.081580	0.23043	0.12515	0.05803	-0.015740
แบบจำลองที่ 2	0.956372	0.806650	0.900668	0.92657	0.91644	0.84138	0.857333
แบบจำลองที่ 3	0.594711	0.754546	0.259519	0.62695	0.30305	0.30023	0.198835

ตารางที่ 6.17 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณ ขยายคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
1	1.405942	0.486674	5.889098	8.143352	9.025222	3.312817	5.778421
1.5	1.184008	0.429511	5.141369	7.032940	7.763637	2.899556	5.100236
2	0.973102	0.389867	4.462226	5.999992	6.613965	2.573880	4.518115

ตารางที่ 6.17 (ต่อ) ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

ตัวคูณ ขยายคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความสูงคลื่น (ซม)						
	DART23401	DART53401	Port Blair	Nicobar	Surin	Maung	RachaNoi
2.5	0.782198	0.373363	3.887780	5.091871	5.645002	2.372142	4.073452
3	0.629756	0.383004	3.470416	4.386797	4.963730	2.326805	3.814623
3.5	0.548819	0.416980	3.270829	3.993798	4.697044	2.446578	3.779997
4	0.570670	0.470043	3.328429	4.005802	4.912930	2.709656	3.975437
4.5	0.685549	0.536559	3.630998	4.419509	5.555411	3.079528	4.370185
5	0.856822	0.612160	4.124977	5.138801	6.499180	3.522713	4.916464
5.5	1.057432	0.693882	4.751032	6.055747	7.633291	4.015008	5.569867
6	1.273590	0.779803	5.463951	7.094115	8.885155	4.540466	6.297135
6.5	1.498584	0.868677	6.234004	8.207950	10.21155	5.088826	7.075528
7	1.728967	0.959685	7.042473	9.370380	11.58692	5.653426	7.889928
7.5	1.962843	1.052274	7.877540	10.56537	12.99572	6.229852	8.730265
8	2.199098	1.146059	8.731576	11.78303	14.42816	6.815105	9.589723
8.5	2.437040	1.240771	9.599521	13.01700	15.87784	7.407093	10.46359
9	2.676218	1.336211	10.47791	14.26303	17.34044	8.004321	11.34854
9.5	2.916330	1.432235	11.36434	15.51824	18.81295	8.605699	12.24216
10	3.157161	1.528732	12.25705	16.78055	20.29321	9.210413	13.14270
10.5	3.398559	1.625617	13.15477	18.04848	21.77963	9.817848	14.04882
11	3.640411	1.722827	14.05654	19.32092	23.27105	10.42752	14.95950
11.5	3.882632	1.820308	14.96162	20.59703	24.76655	11.03907	15.87397
12	4.125158	1.918019	15.86946	21.87618	26.26544	11.65220	16.79159
12.5	4.367937	2.015927	16.77959	23.15785	27.76717	12.26668	17.71189
13	4.610930	2.114004	17.69167	24.44166	29.27131	12.88230	18.63446
13.5	4.854104	2.212228	18.60542	25.72728	30.77749	13.49891	19.55899
14	5.097433	2.310580	19.52059	27.01446	32.28544	14.11639	20.48521
14.5	5.340897	2.409045	20.43699	28.30298	33.79491	14.73461	21.41289
15	5.584477	2.507608	21.35448	29.59266	35.30572	15.35351	22.34186



รูปที่ 6.19 ค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีต่างๆ

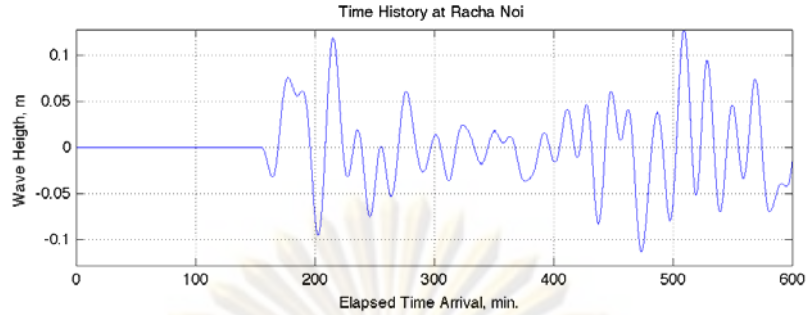
4) จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นสามารถสรุปการหาคุณลักษณะของรอยเลื่อนได้ดังนี้

ตารางที่ 6.18 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ใช้วิเคราะห์กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง ANN

	สำหรับใช้วิเคราะห์	จากแบบจำลอง ANN	ค่าคลาดเคลื่อน
ความยาว/ความกว้าง (กม)	200 / 100	200 / 100	-
จุดกำเนิด(ละติจูด/ ลองจิจูด)	8.60N / 91.64E	8.60N / 91.64E	-
ระยะการเคลื่อนตัว (ม)	3.50	3.29	-6.00%

6.3.1 ผลของระยะเวลาเดินทางของคลื่นต่อความถูกต้องของแบบจำลองฯ

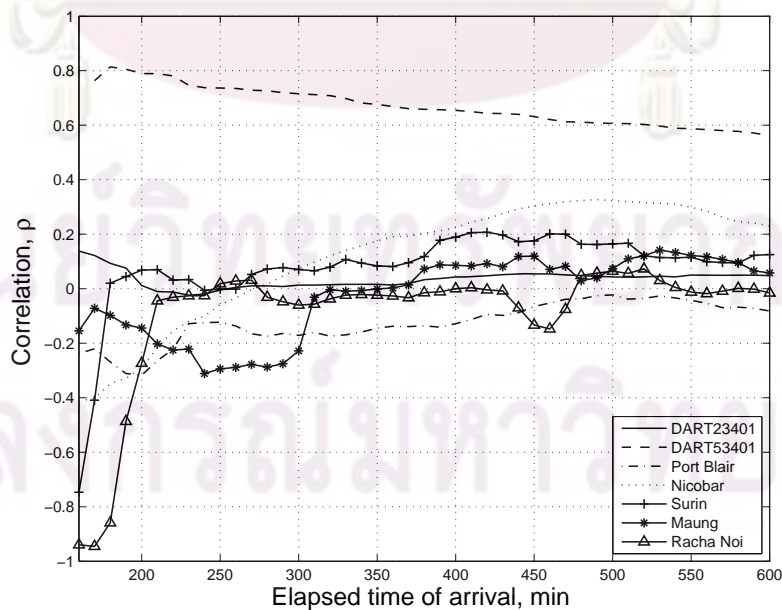
ที่ผ่านมาเป็นการทำนายโดยใช้คลื่นที่มีเวลาเดินทางยาว 600 นาที นับจากการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการเตือนภัยไม่สามารถรอเวลาเดินทางของคลื่นได้ยาวนานขนาดนั้น ในหัวข้อนี้จึงศึกษาว่าหากลดเวลาเดินทางของคลื่นลงจะมีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองเพียงใด เมื่อพิจารณาเวลาเดินทางมาถึงของคลื่น ณ สถานีสุดท้ายที่มาถึงคือ สถานีราชาน้อย เมื่อเวลา 156.22 นาที หลังจากเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงจะทดสอบใช้เวลาเดินทางของคลื่นเริ่มต้นที่ 160 นาที และเพิ่มทีละ 10 นาที จนถึง 600 นาที



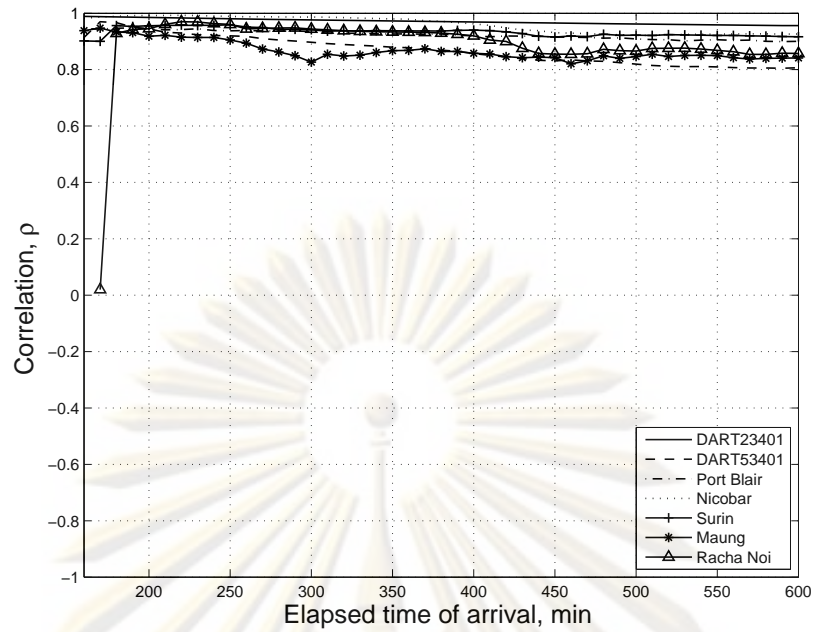
รูปที่ 6.20 ความสูงคลื่น ณ สถานีราชาน้อย

จากการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองกับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองที่ 2 ยังให้ค่าใกล้เคียง 1 เช่นเดียวกับการนำคลื่นมาใช้คำนวณทั้ง 600 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ถึง รูปที่ 6.15

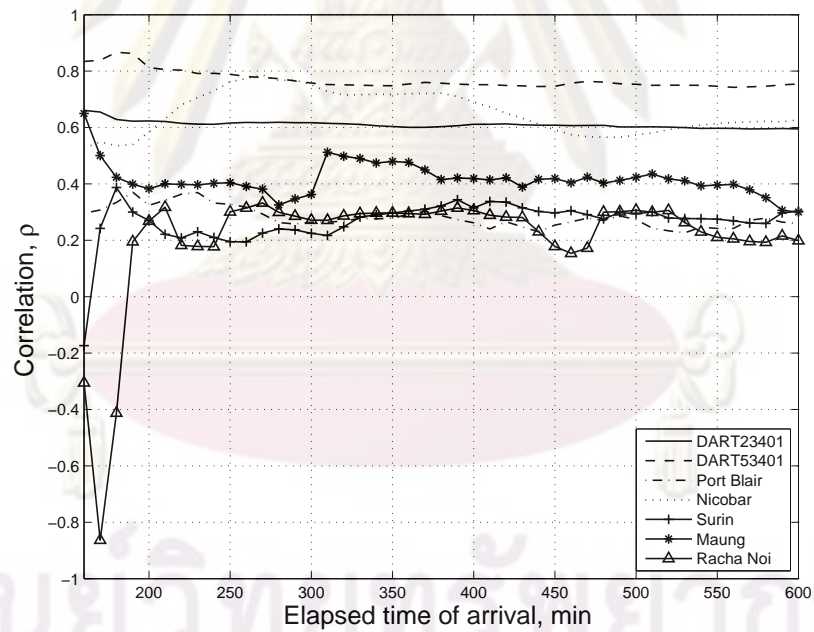
เมื่อเลือกขนาดของรอยเลื่อนได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้แล้ว คือรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนของแบบจำลองที่ 2 นั้นมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5 เมตรทุกๆ ระยะเวลาของคลื่นที่ใช้คำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 จะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนมีค่าใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนตัวจริงเมื่อใช้ระยะเวลาเดินทางของคลื่นที่ 180 นาทีหลังเกิดแผ่นดินไหว หรือ 23.78 นาทีนับจากคลื่นเดินทางถึงสถานีราชาน้อย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ระยะเวลาเดินทางถึงของคลื่นอย่างน้อย 25 นาที หลังจากคลื่นเดินทางถึง ณ สถานีสุดท้าย



รูปที่ 6.21 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 1 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

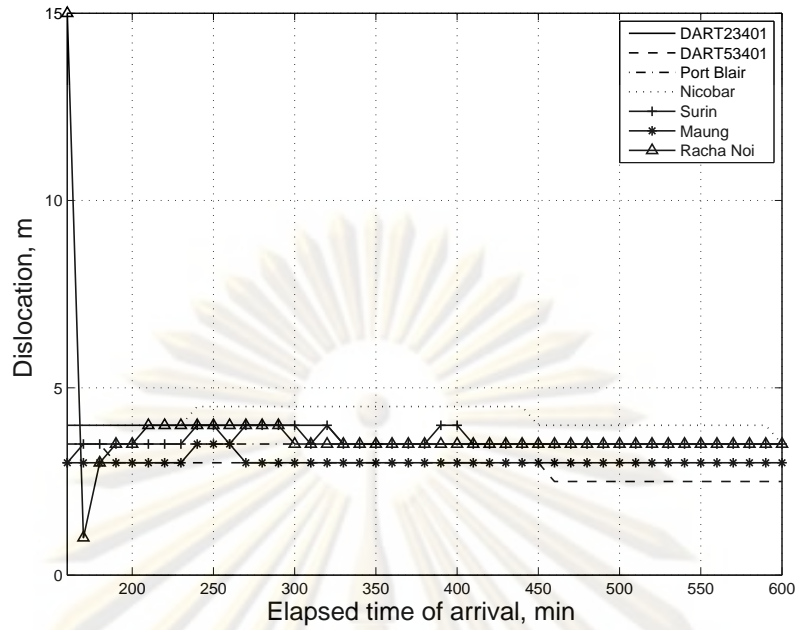


รูปที่ 6.22 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 2 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ



รูปที่ 6.23 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคลื่นจากแบบจำลองที่ 3 กับคลื่นจริง ณ สถานีวัดน้ำต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.24 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในแบบจำลองที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผล

การพยากรณ์สึนามิในงานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ การใช้แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม ในการพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อน และการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนด้วยหลักการซ้อนทับ จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

7.1 สรุปผล

- 1) การศึกษานี้ได้ใช้โครงข่ายใยประสาทเทียม เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นกับตำแหน่งของรอยเลื่อน ด้วยการใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่น 7 สถานีทั้งบริเวณกลางมหาสมุทร และบริเวณชายฝั่งประเทศไทยเป็นชุดข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนเป็นชุดข้อมูลส่งออกสำหรับการฝึกแบบจำลอง และสามารถใช้งานแบบจำลองที่ได้รับการฝึกแล้วพยากรณ์ตำแหน่งของรอยเลื่อนได้จากการใช้ค่าเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 7 สถานี อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของเวลาเดินทางมาถึงของคลื่นมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนในช่วง ± 5 นาที ยังไม่มีผลต่อการทำนายตำแหน่งของรอยเลื่อน
- 2) ในการศึกษาได้แบ่งกลุ่มรอยเลื่อนออกเป็น 3 กลุ่มตามขนาดของรอยเลื่อนเพื่อให้ครอบคลุมขนาดแผ่นดินไหวตั้งแต่ขนาด 7.5 ถึง 9.0 ขนาดของรอยเลื่อนที่ต่างกันทำให้เฟสของคลื่นที่สถานีวัดน้ำแตกต่างกัน โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถใช้งานได้สำหรับคลื่นที่วัดได้มาจากกลุ่มรอยเลื่อนแบบใด
- 3) จากการศึกษาหลักการซ้อนทับพบว่าความสูงคลื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน โดยค่ารากของผลรวมผลต่างกำลังสองเป็นตัวบ่งชี้ที่เหมาะสม โดยทดสอบกับกรณีศึกษาสำหรับแผ่นดินไหวขนาด 8.3 และ 8.6 ให้ค่าความผิดพลาดระหว่าง -2.8 % ถึง -14.3 %
- 4) ระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่จะใช้ในการพยากรณ์ต้องมากกว่าระยะเวลาที่เดินทางถึงของคลื่น สถานีวัดน้ำสุดท้ายที่วัดได้ แต่จากการศึกษาพบว่า ควรใช้ระยะเวลาเดินทางถึงของคลื่นอย่างน้อย 30 นาที หลังจากคลื่นเดินทางถึง ณ สถานีสุดท้าย ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของแบบจำลอง

7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม

- 1) เนื่องจากสถานีวิัดน้ำที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้านั้นมี 3 สถานีเป็นสถานีที่อยู่ใกล้ชายฝั่งประเทศไทย เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงอาจจะไม่ทันต่อการเตือนภัยสำหรับประเทศไทย ดังนั้นควรมีการศึกษาตำแหน่งของสถานีวิัดน้ำที่เหมาะสมกับการเตือนภัยในประเทศไทย
- 2) ควรมีการการศึกษาแบบจำลองโดยใช้สถานีวิัดน้ำกลางทะเลของประเทศเพื่อนบ้านเพิ่มเติม เช่น สถานี Padang, สถานี Sibolga, สถานี Sabang ของประเทศอินโดนีเซีย และ สถานี Moulmein, สถานี Sittwe ของประเทศพม่า เป็นต้น เพื่อศึกษาการใช้ข้อมูลจากสถานีวิัดน้ำให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ต้องการเตือนภัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2551. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548. รายงานฉบับสมบูรณ์ กิจกรรมที่ 9 การศึกษาและประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากพิบัติภัยคลื่นยักษ์สึนามิ และให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับระบบติดตามและป้องกันภัยสึนามิ ภายใต้โครงการสำรวจ วิจัยและศึกษาเพื่อฟื้นฟูบูรณะทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : 300 หน้า.

วินัย ศรีอำพร. 2541. กลศาสตร์ของไหล. จำนวน 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาษาอังกฤษ

Ammon, C.J., Ji, C., Thio, H.K., Robinson, D., Ni, S.D., Hjorleifsdottir, V., Kanamori, H., Lay, T., Das, S. HelMBERGER, D., Ichinose, G., Polet, J., Wald, D. 2005. Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. Science. 308 : 1133-1139.

Chlieh, M., Avouac, J.P., Hjorleifsdottir, V., Song, T.R.A., Ji, C., Sieh, K., Sladen, A., Hebert, H., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Galetzka, J. 2007. Coseismic slip and afterslip of the great M_w 9.15 Sumatra-Andaman earthquake of 2004. Bulletin of the Seismological Society of America. 97,1A : S152-S173.

Curry, J.P. 2005. Tectonics and history of the Andaman Sea region. Journal of Asian Earth Sciences. 25 : 187-232.

Finnemor, E.J., Franzini, J.B. 2002. Fluid Mechanics with Engineering Application. 10th Edition. New York : McGraw Hill.

Fredric, M.H., Ivica, K. 2000. Principles of Neurocomputing for Science and Engineering. International Edition. Singapore : McGraw-Hill.

Fujii, Y., Stake, K. 2006. Tsunami source of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake inferred from tide gauge and satellite data. Bulletin of the Seismological Society of America. 97,1A : S192-S207.

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Available Online. 2006.

Gudmundsson, O., Sambridge, M. 1998. A regionalized upper mantle (RUM) seismic

- model. Journal of Geophysical Research. 103 : 7121-7136.
- Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M. 1996. Neural Network Design. New York.
- Hanks, T.C., Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale. Journal of geophysical research. 84,B5 : 2348-2350.
- Imamura, F. 1992. Review of tsunami simulation with a finite difference method in long-wave runup models. Yeah, H., Liu, P., Synolakis, C. World Scientific. : 25-42.
- Imamura, F., Yalciner, A.C., Ozyurt, G. 2006. Tsunami Modeling Manual. Available Online. 2006.
- Intergovernmental Oceanographic Commission. 1997. IUGG/IOC Time Project Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. UNESCO.
- Kanamori, H. 1977. The energy release in great earthquakes. Journal of geophysical research. 82,20 : 2981-2987.
- Koike, N., Kawata, Y., Imamura, F. 2003. Far-field tsunami potential and a real-time forecast system for the pacific using the inversion method. Natural Hazards. 29 : 423-436.
- Kundu, P.K., Cohen, I.M. 2004. Fluid Mechanics. 3rd Edition. New York : Academic Press.
- Lee, H.J., Cho, Y.S., Woo, S.B. 2005. Quick tsunami forecasting based on database. Stake, K. Tsunami Case Studies and Recent Developments. : 129-146.
- Lui, S.W., Huang, J.H., Sung, J.C., Lee, C.C. 2002. Detection of crack using neural networks and computational mechanics. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering. 191 : 2831-2845.
- Mansinha, L., Smylie, D.E. 1971. The displacement fields of inclined faults. Bulletin of the Seismological Society of America. 61,5 : 1433-1440.
- Nagano, O., Imamura, F., Shuto, N. 1991. A numerical method for far-field tsunami and its application to predict damages done to aquaculture. Nature Hazards. 4 : 235-255.
- Romano, M., Liong, S.Y., Vu, M.T., Zemsky, P., Doan C.D., Dao, M.H., Tklich, P. 2008. Artificial neural network for tsunami forecasting (Article in press). Journal of asian earth sciences. Available Online on April 2009.
- Shuto, N. 1991. Numerical simulation of tsunami – its present and near future. Natural

Hazards. 4 : 171-191.

- Shuto, N., Suzuki, T., Hasegawa, K., Inagaki, K. 1986. A study of numerical technique on tsunami propagation and run-up. Science of Tsunami Hazards. 4,2 : 111-124.
- Stavroulakis, G.E., Antes, H. 1998. Neural crack identification in steady state elastodynamic. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 165 : 129-146.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B. 1979. Fluid Mechanics. 7th Edition. New York : McGraw Hill.
- Supharatid, S. 2008. Assimilation of real-time deep sea buoy data for tsunami forecasting along Thailand's Andaman coastline. Science of tsunami hazards. 27,3 : 30-47.
- Tatsumi, D., Tomita, T. 2007. Real-time tsunami prediction based on inversion method using earthquake information. APCOM'07.
- Titov, V.V., Mofjeld, H.O., Gonzalez, F.I., Newman, J.C. 1999. Offshore forecasting of Hawaiian tsunamis generated in Alaskan-Aleutine subduction zone. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-114.
- Tomita, T., Tatsumi, D., Takahashi, S. 2006. Improvement of real-time tsunami prediction based on earthquake information and spatial distribution of wave surface elevation. Kaiyo Kogaku Shinpojiumu (CD-ROM). 19.
- Xu, Y.G., Liu, G.R., Wu, Z.P., Huang, X.M. 2001. Adaptive multilayer perceptron networks for detection of cracks in anisotropic laminate plates. International Journal of Solids and Structures. 38 : 5625-5645.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



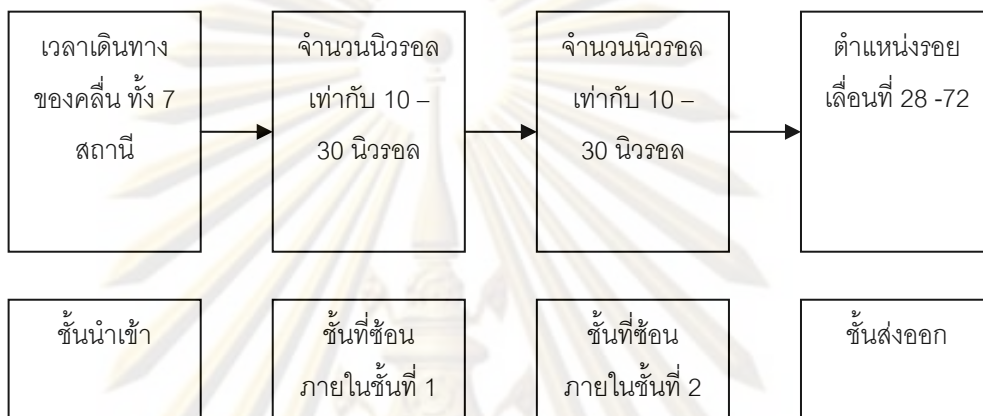
ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมแบบต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 การหาจำนวนนิรโรคของชั้นที่ซ่อนภายใน

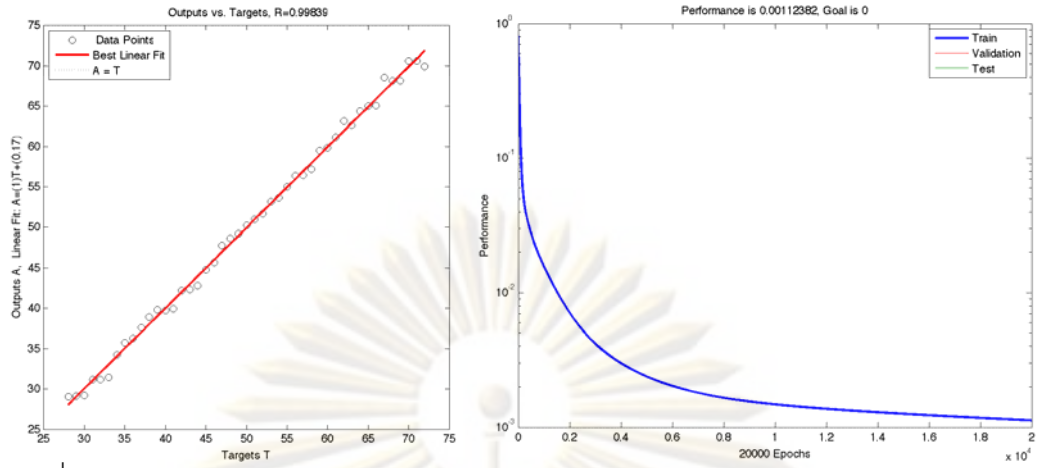
โครงข่ายใยประสาทเทียมถูกฝึกโดยให้มีจำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้นและมีการแปรผันจำนวนนิรโรค 10 20 และ 30 นิรโรคตามลำดับ โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 7 สถานีเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ 28 ถึง 72 เป็นชุดข้อมูลส่งออก ดังแสดงในรูปที่ ก.1



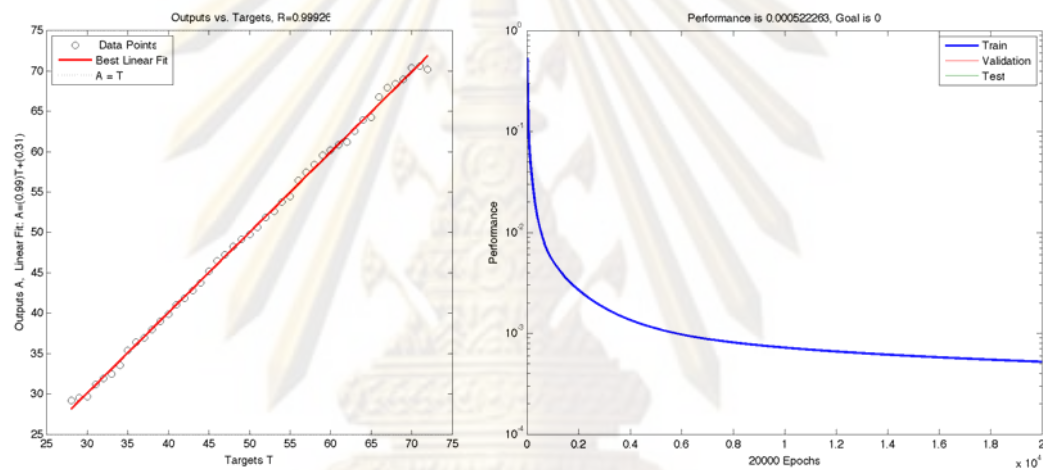
รูปที่ ก.1 โครงข่ายใยประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

ตารางที่ ก.1 ตารางสรุปการวิเคราะห์โครงข่ายใยประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

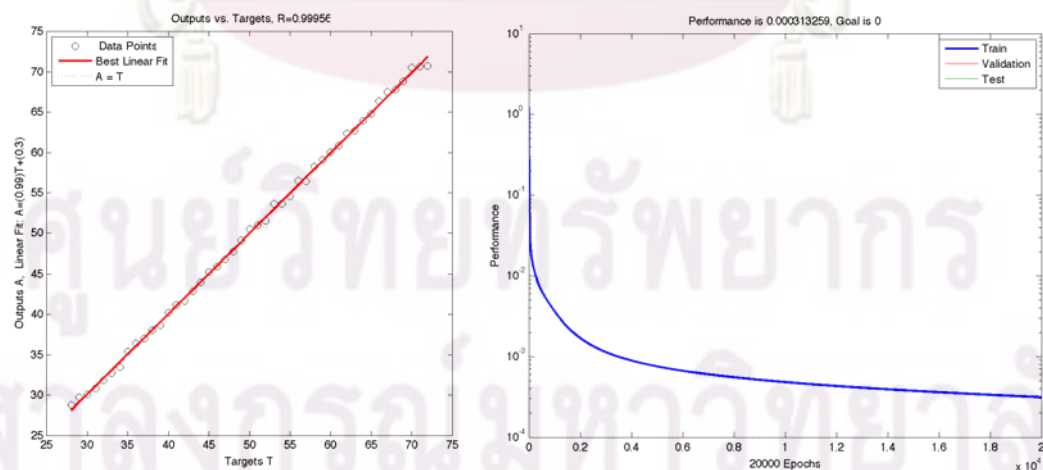
Network number	Networks model	Epochs	R ²	RMSE
1	10-10-1	20000	0.99839	0.7375
2	20-20-1	20000	0.99926	0.5028
3	30-30-1	20000	0.99956	0.3894
4	10-10-1	40000	0.99885	0.6233
5	20-20-1	40000	0.99947	0.4277
6	30-30-1	40000	0.99974	0.3026
7	10-10-1	60000	0.99942	0.4459
8	20-20-1	60000	0.99977	0.2828
9	30-30-1	60000	0.99982	0.251
10	10-10-1	100000	0.99936	0.467
11	20-20-1	100000	0.99972	0.3131
12	30-30-1	100000	0.99989	0.197



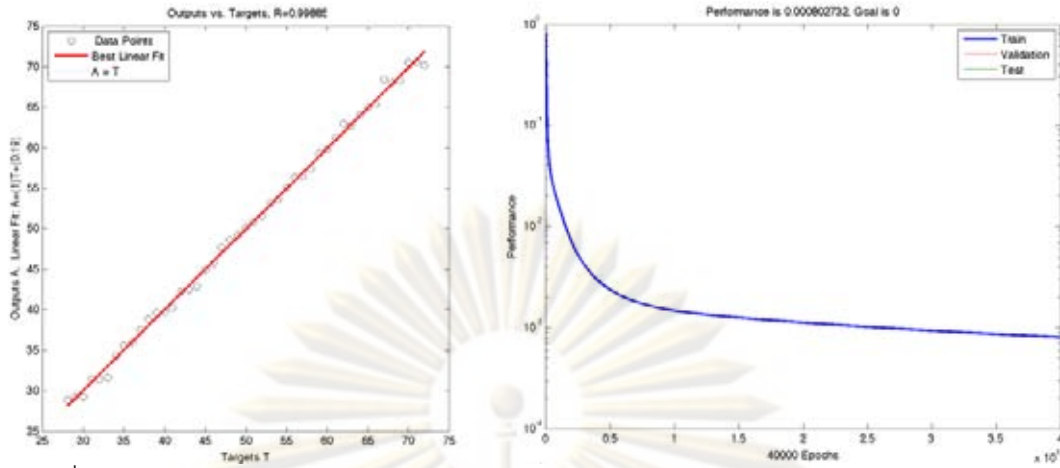
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 1



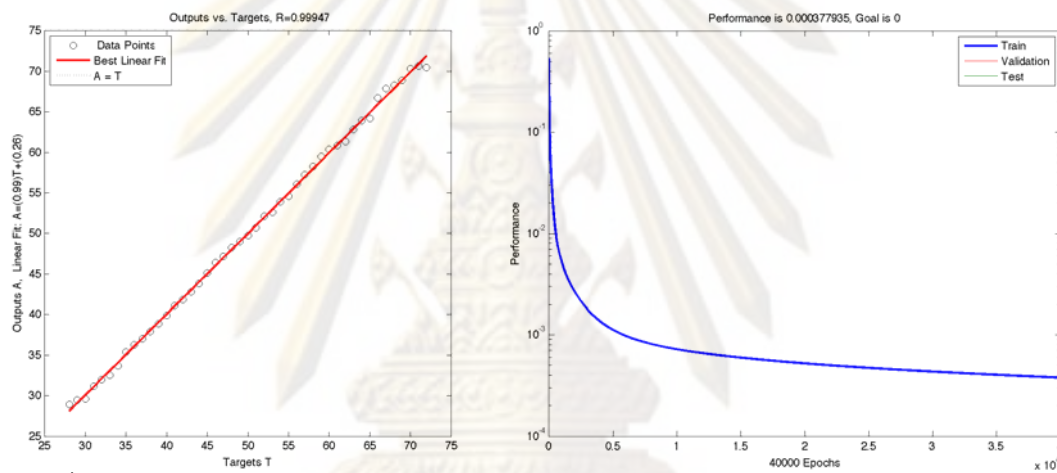
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 2



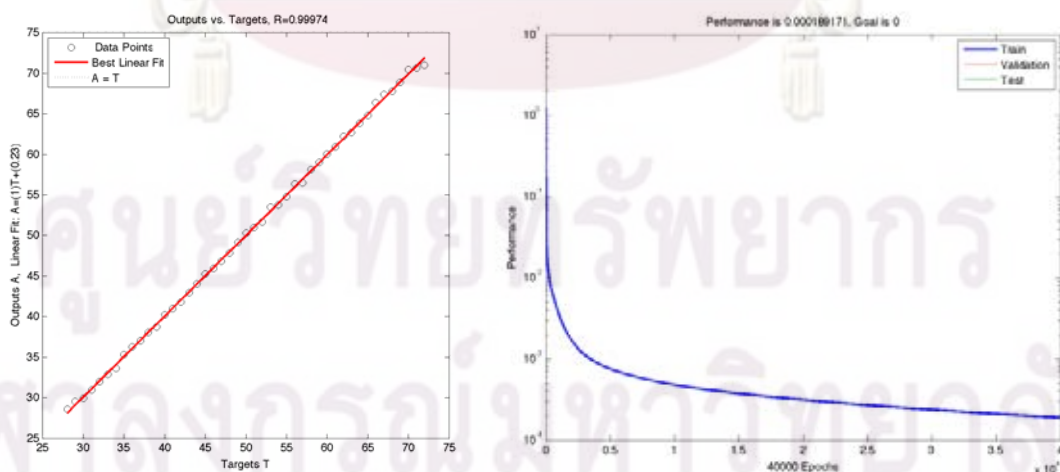
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 3



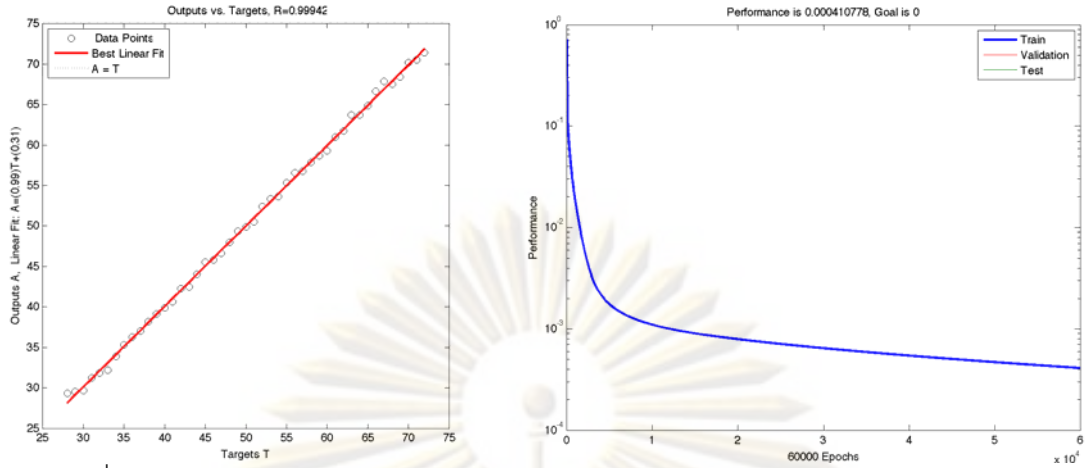
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 4



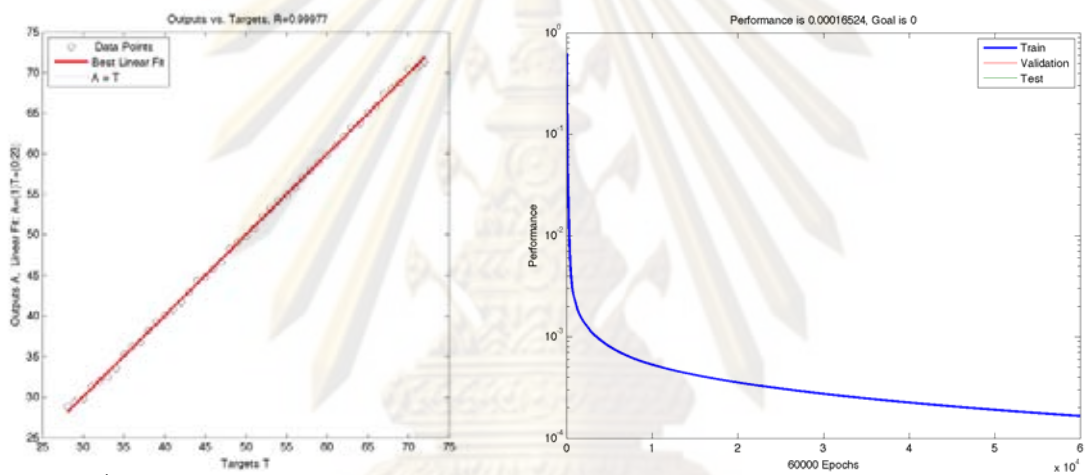
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 5



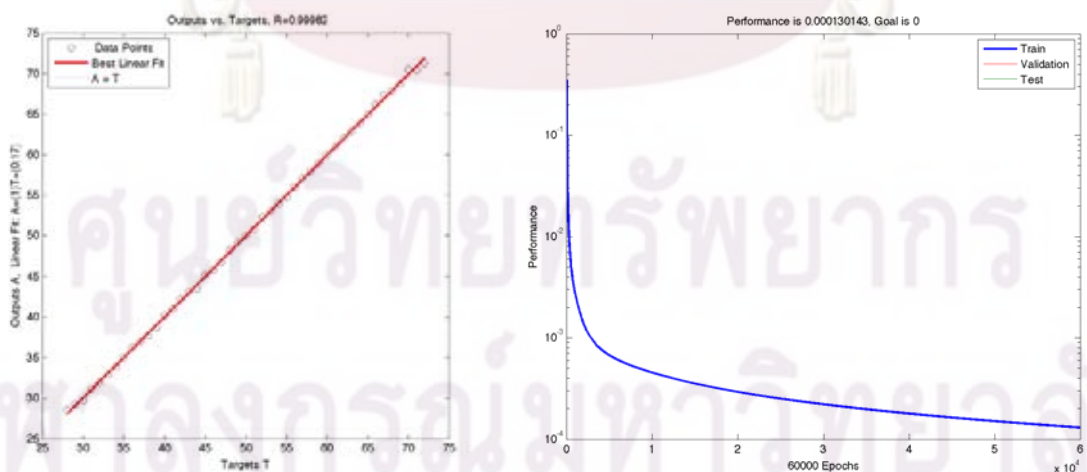
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 6



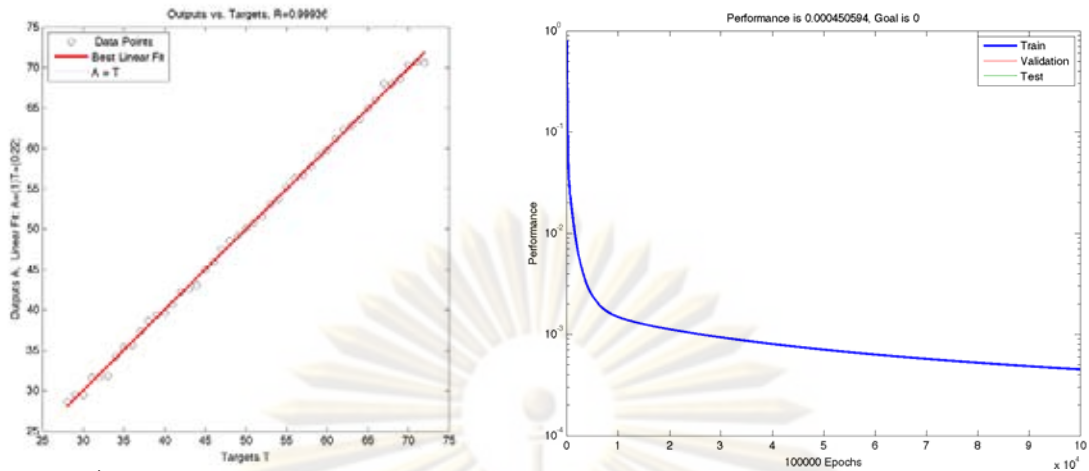
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 7



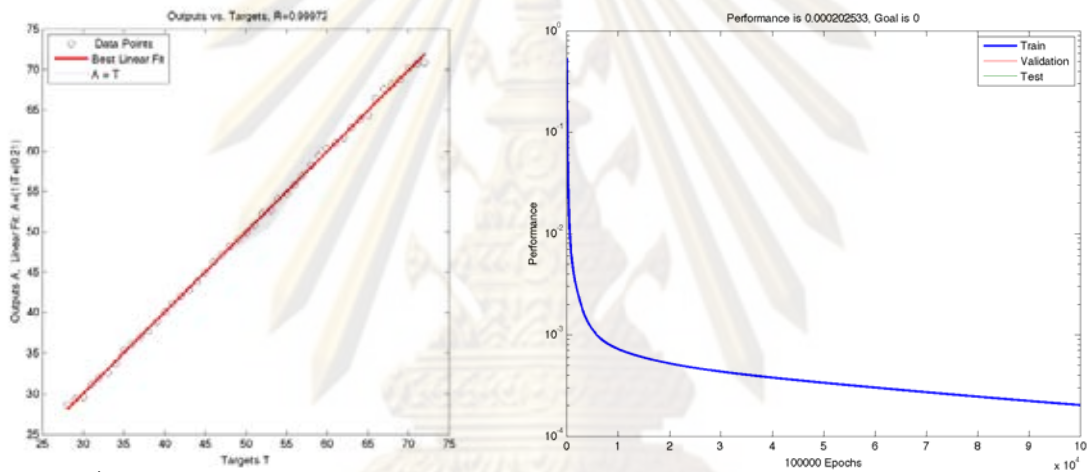
รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 8



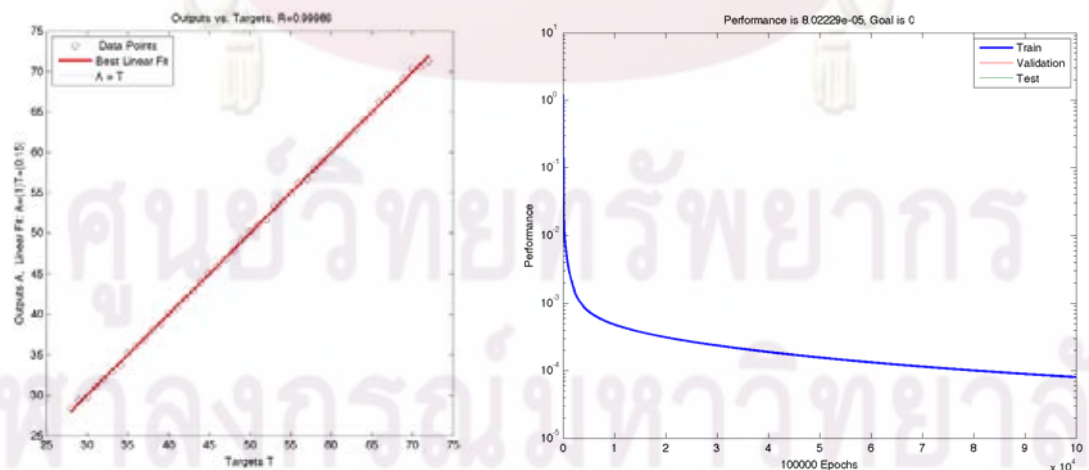
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 9



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 10



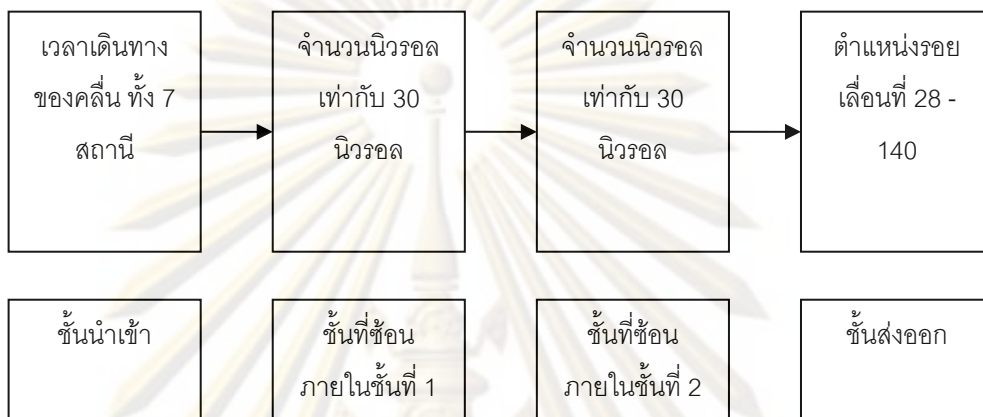
รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 11



รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 12

ก.2 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลส่งออก 9 นีวรอล

โครงข่ายประสาทเทียมถูกฝึกโดยให้มีจำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้นและในแต่ละชั้นมี 30 นีวรอล โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 7 สถานีเป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ 28 ถึง 72 เป็นชุดข้อมูลส่งออก ดังแสดงในรูปที่ ก.14

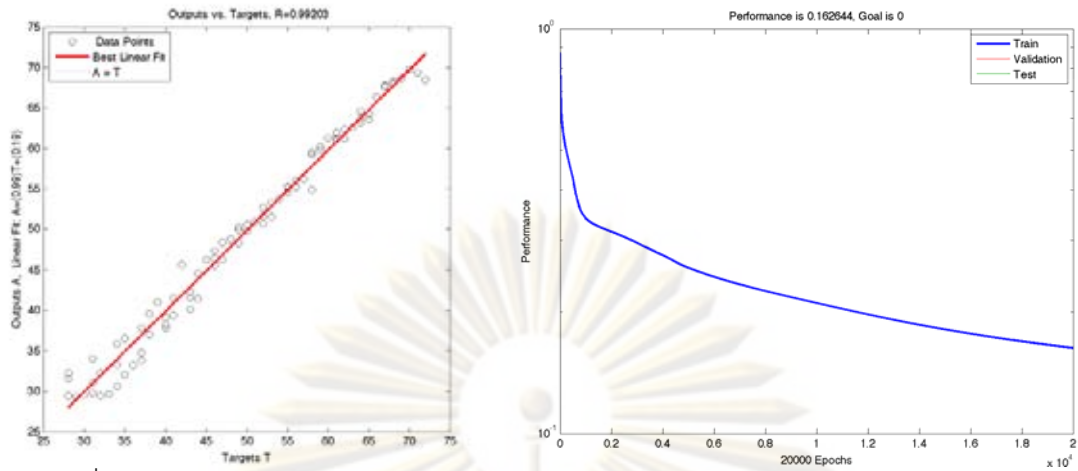


รูปที่ ก.14 โครงข่ายประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

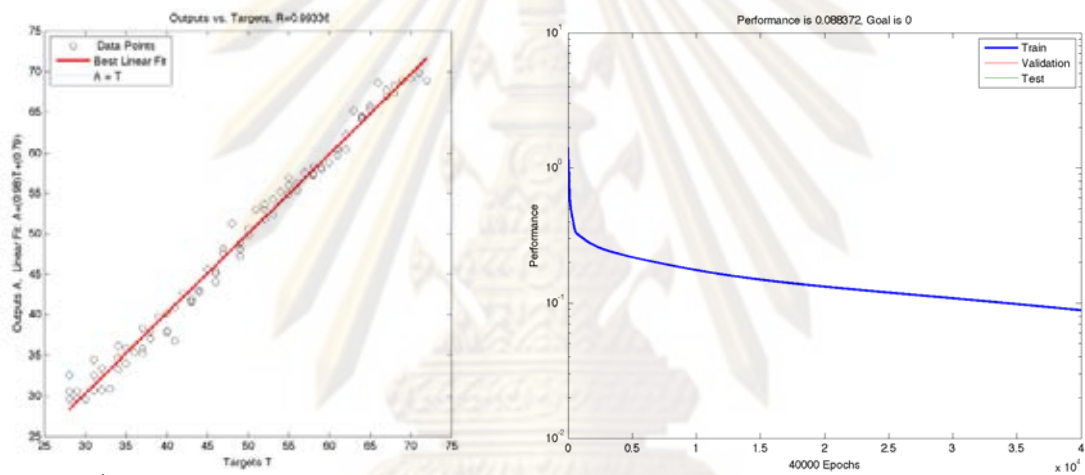
ตารางที่ ก.2 ตารางสรุปการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

Network number	Networks model	Epochs	R ²	RMSE
1	30-30-9	20000	0.99203	14.1666
2	30-30-9	40000	0.99336	10.4275
3	30-30-9	60000	0.99381	8.9935
4	30-30-9	100000	0.9948	6.6959
5	30-30-9	200000	0.99766	3.3618
6	30-30-9	500000	0.99827	1.4996
7	30-30-9	1000000	0.99907	1.097
8	30-30-9	2000000	0.99926	0.9687

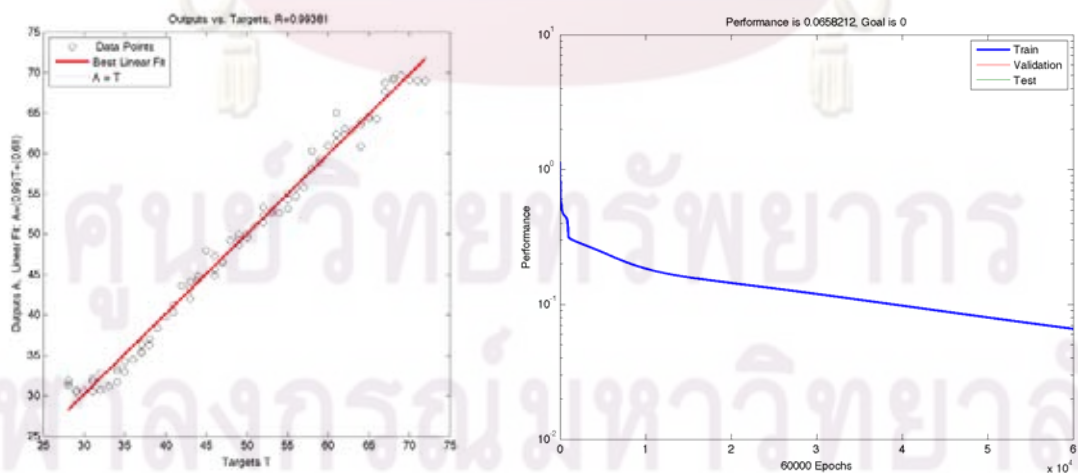
ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางธรณีวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



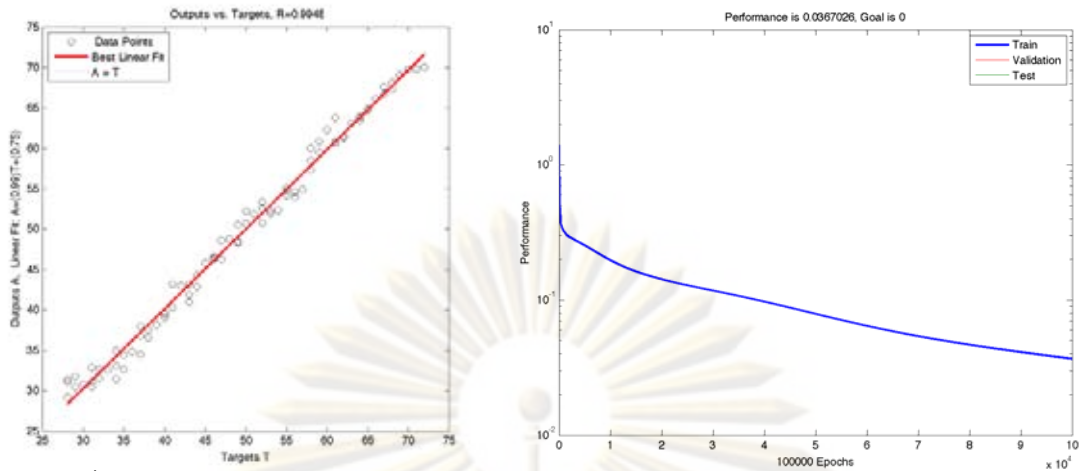
รูปที่ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 1



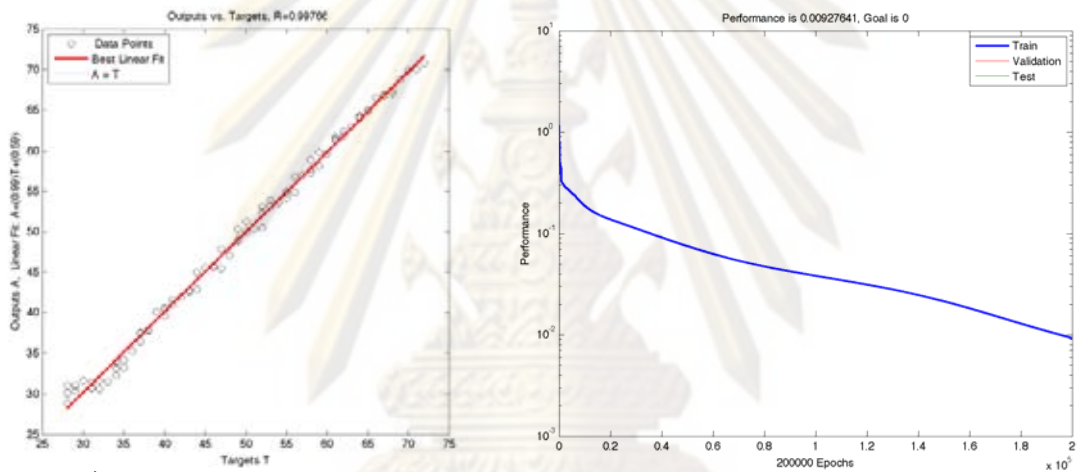
รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 2



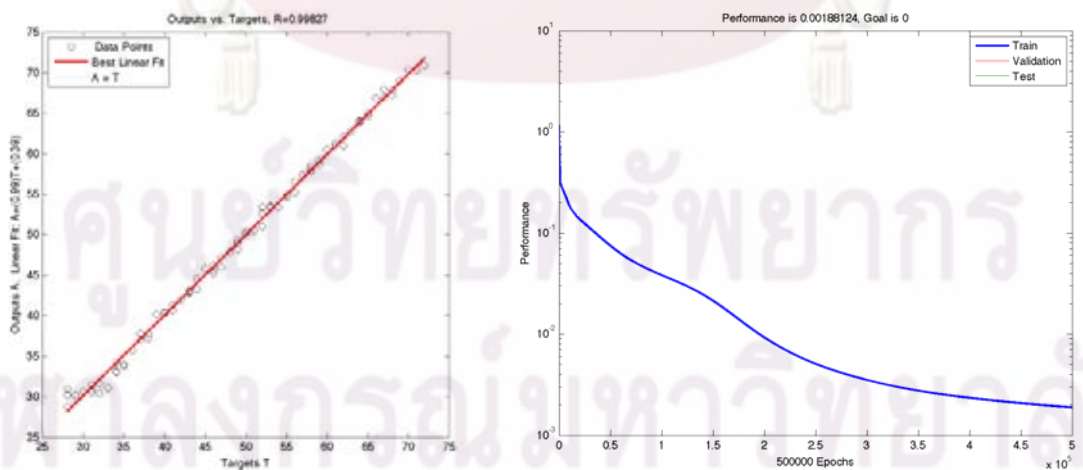
รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 3



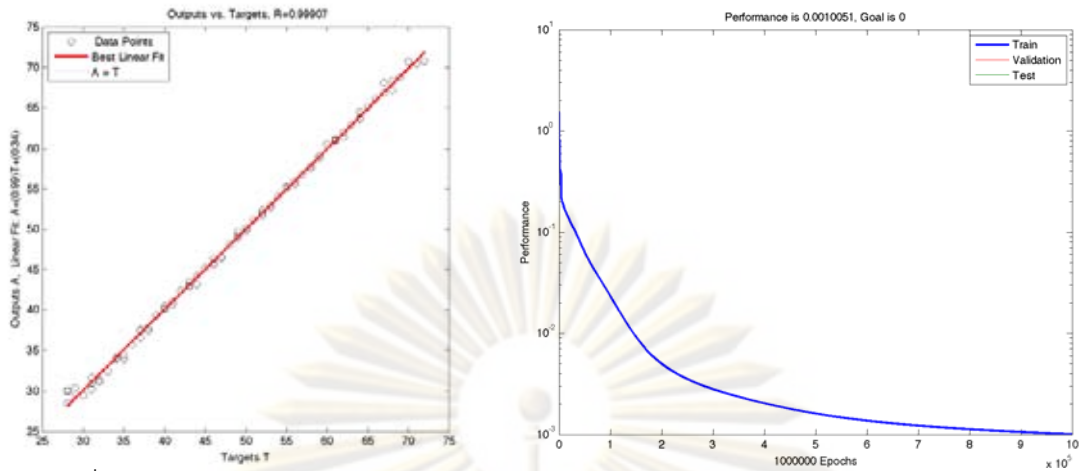
รูปที่ ก.18 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 4



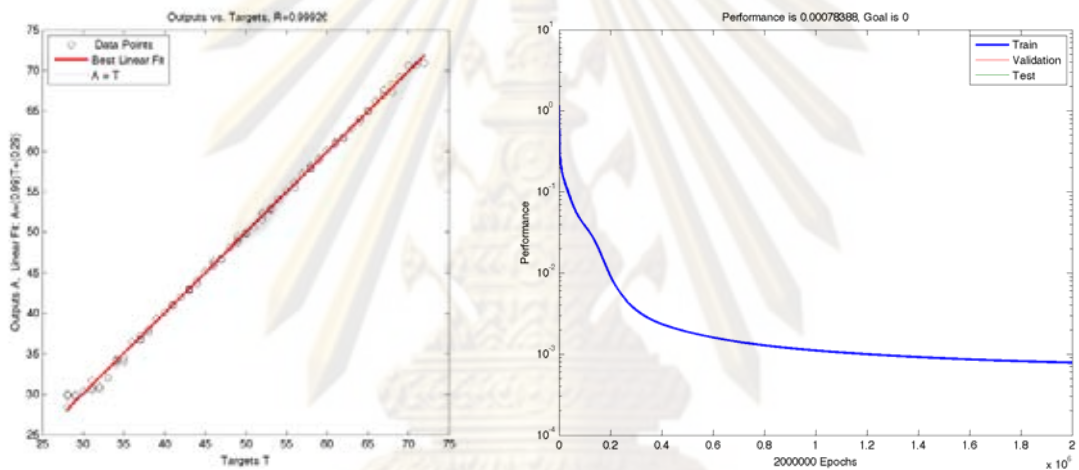
รูปที่ ก.19 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 5



รูปที่ ก.20 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 6



รูปที่ ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 7

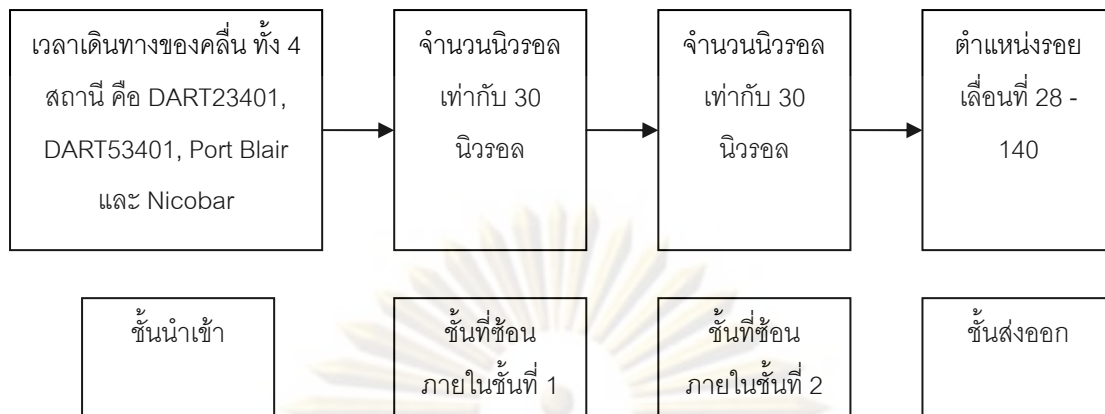


รูปที่ ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 8

ก.3 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลนำเข้า 4 นีวรอล และข้อมูลส่งออก 9 นีวรอล

โครงข่ายประสาทเทียมถูกฝึกโดยให้มีจำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้นและในแต่ละชั้นมี 30 นีวรอล โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 4 สถานีคือ สถานี DART23401 สถานี DART53401 สถานี Port Blair และ สถานี Nicobar เป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนที่ 28 ถึง 72 เป็นชุดข้อมูลส่งออก ดังแสดงในรูปที่ ก.23

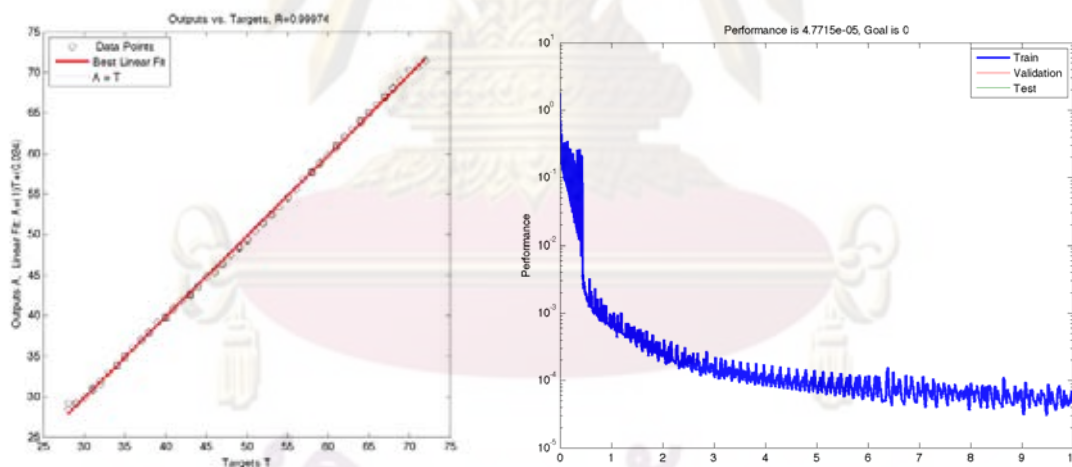
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



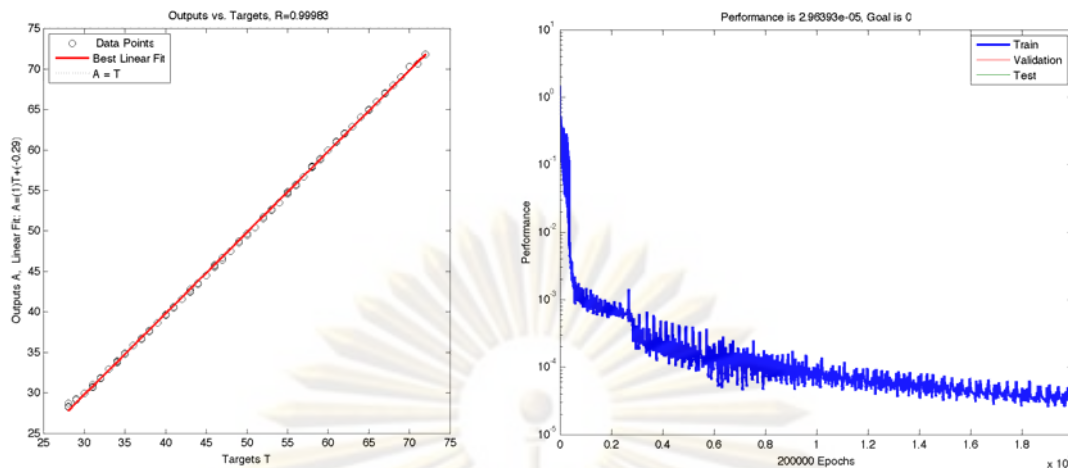
รูปที่ ก.23 โครงข่ายใยประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

ตารางที่ ก.3 ตารางสรุปการวิเคราะห์โครงข่ายใยประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

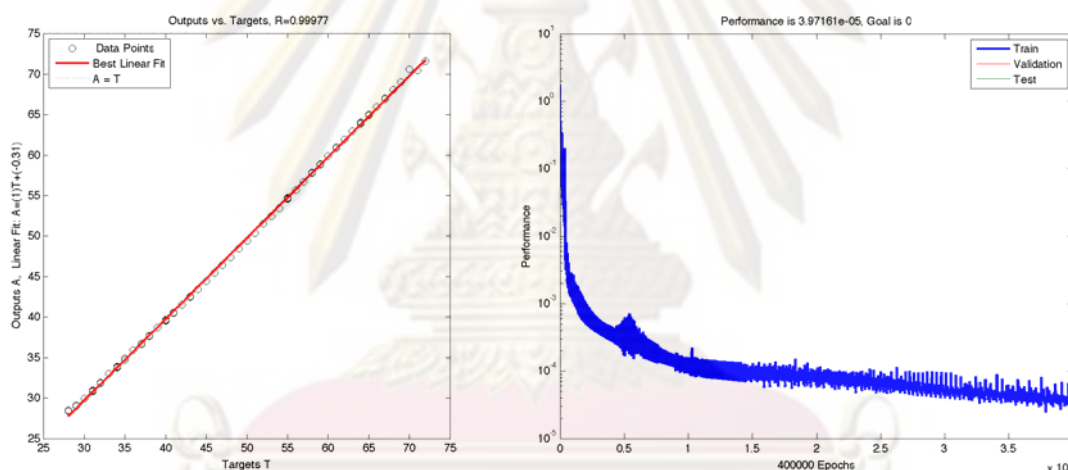
Network number	Networks model	Epochs	R^2	RMSE
1	30-30-9	100000	0.99974	0.1954
2	30-30-9	200000	0.99983	0.1454
3	30-30-9	400000	0.99977	0.1633



รูปที่ ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 1



รูปที่ ก.25 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 2

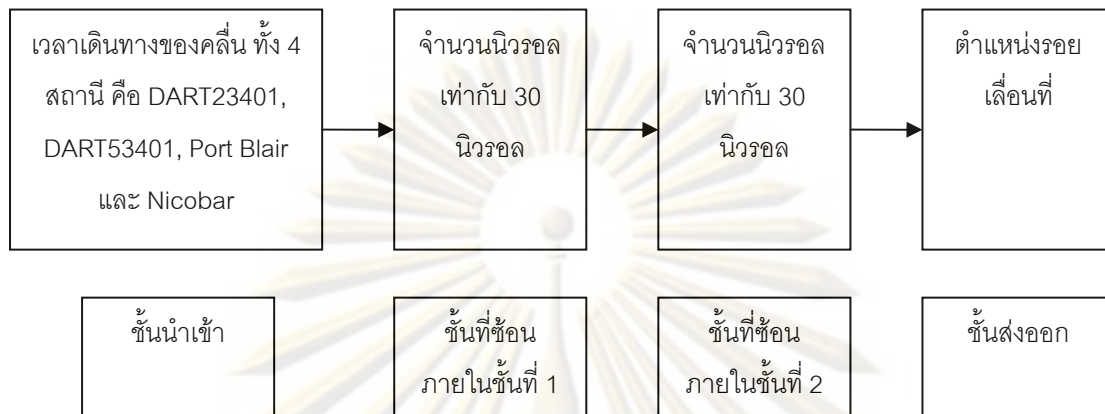


รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของโครงข่ายที่ 3

ก.4 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลนำเข้า 4 นีวรอล และข้อมูลส่งออก 1 นีวรอล

โครงข่ายประสาทเทียมถูกฝึกโดยให้มีจำนวนชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้นและในแต่ละชั้นมี 30 นีวรอล โดยใช้เวลาเดินทางมาถึงของคลื่นทั้ง 4 สถานีคือ สถานี DART23401 สถานี DART53401 สถานี Port Blair และ สถานี Nicobar เป็นชุดข้อมูลนำเข้า และใช้ตำแหน่งของรอยเลื่อนเป็นชุดข้อมูลส่งออกดังแสดงในรูปที่ ก.27 โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 กลุ่มรอยเลื่อนคือ กลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว กลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน และ กลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว กลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน โดยทั้งสามกลุ่มนั้นสามารถฝึกแบบจำลองแล้วให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่ดี

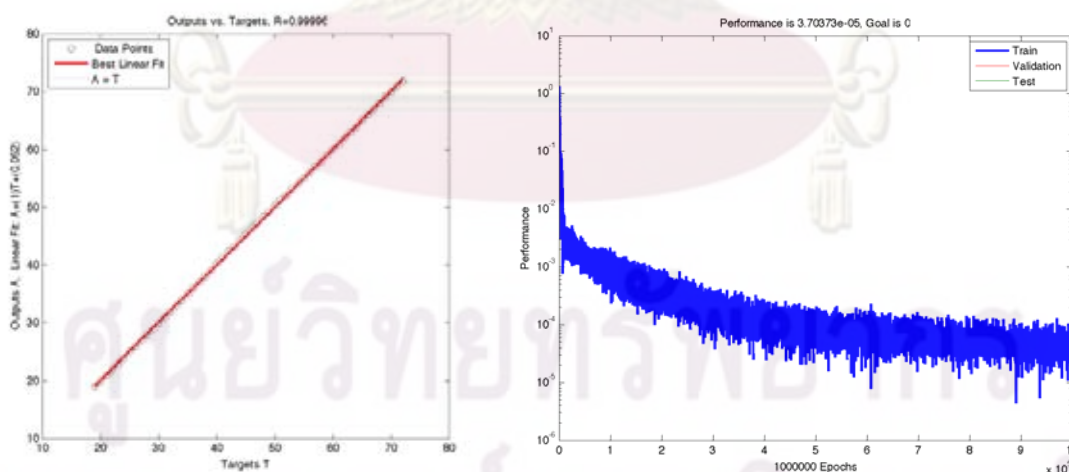
ได้ ดังแสดงในรูปที่ ก.28 ถึงรูปที่ ก.30 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อนแล้วพบว่า ความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นที่มีค่าน้อยกว่า ± 2 นาทีมีผลที่ไม่ดีต่อการพยากรณ์รอยเลื่อนเป็นอย่างมากดังแสดงใน



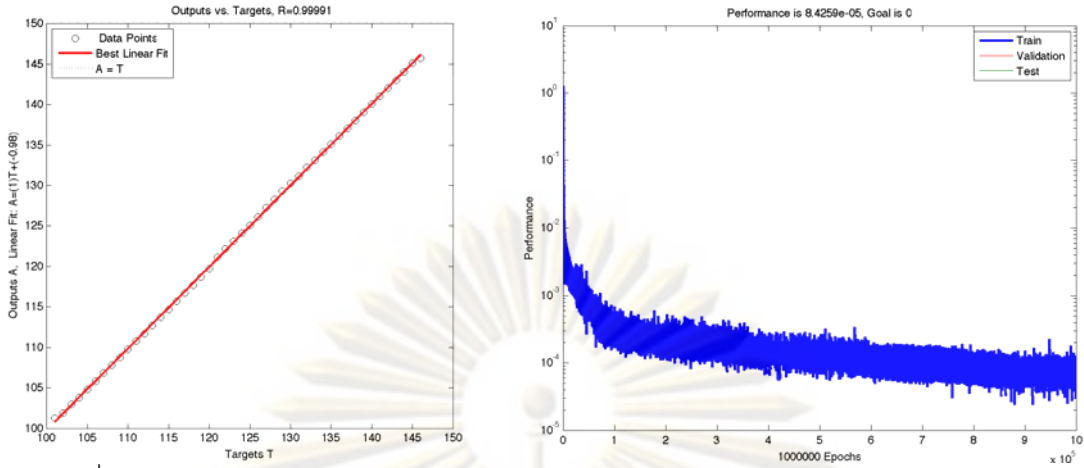
รูปที่ ก.27 โครงข่ายใยประสาทเทียม ที่มีชั้นที่ซ่อนภายใน 2 ชั้น

ตารางที่ ก.4 ตารางสรุปการวิเคราะห์โครงข่ายใยประสาทเทียมทั้ง 3 กลุ่มรอยเลื่อน

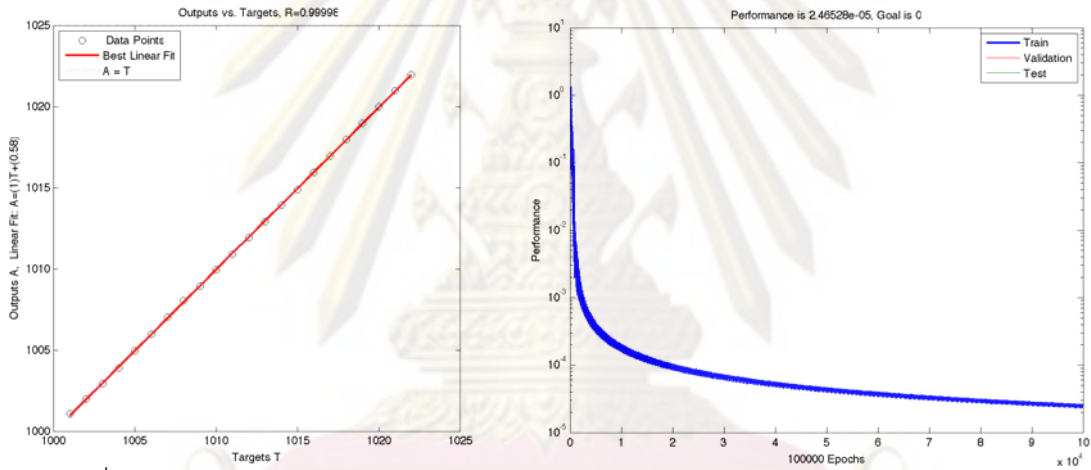
	Networks model	Epochs	R ²	RMSE
Single fault	30-30-1	1000000	0.99996	0.1613
4 fault combination	30-30-1	1000000	0.99991	0.2065
9 fault combination	30-30-1	100000	0.99998	0.0521



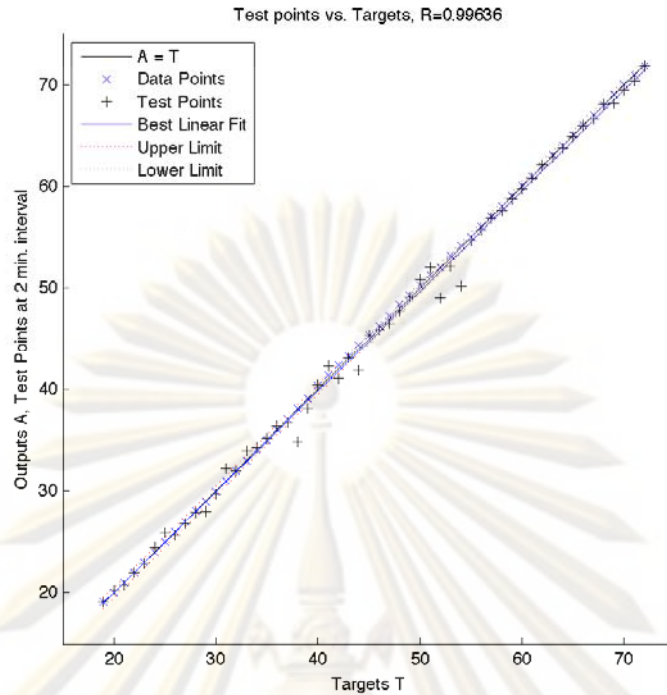
รูปที่ ก.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับคำตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว



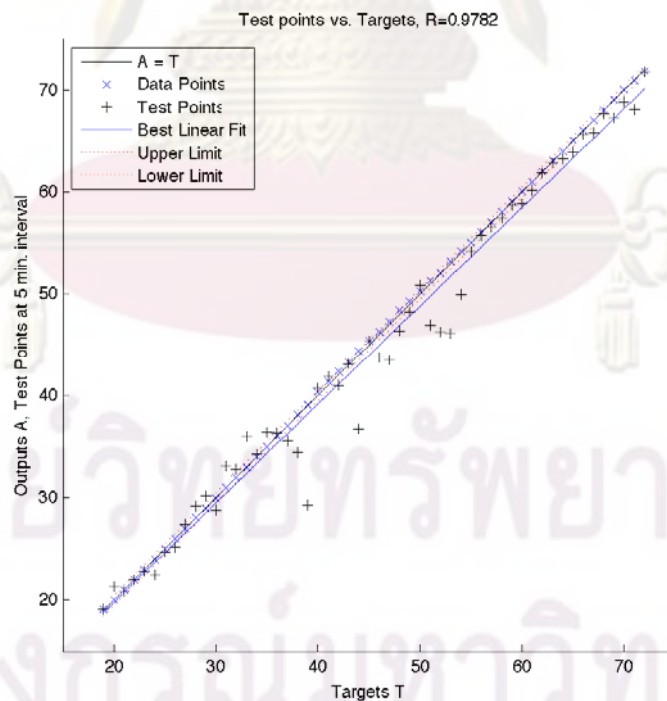
รูปที่ ก.29 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



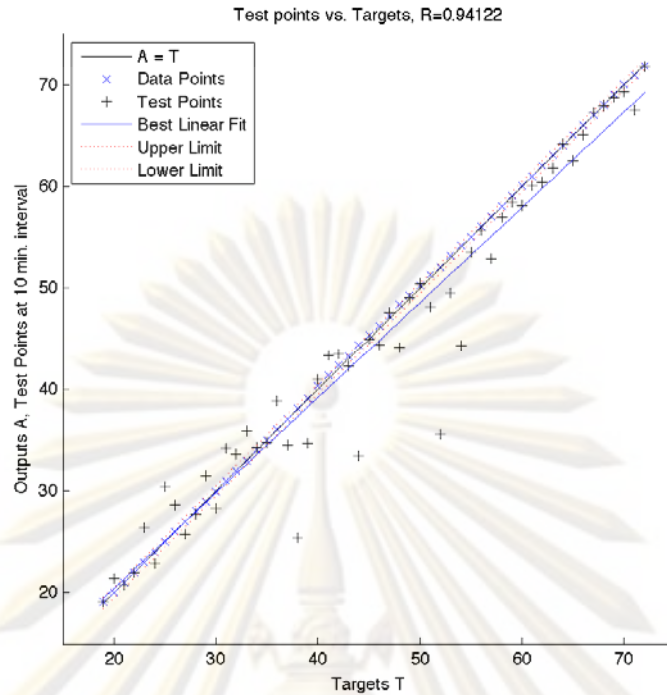
รูปที่ ก.30 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าตอบเป้าหมาย (ซ้าย) และค่าคลาดเคลื่อน (ขวา) ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน



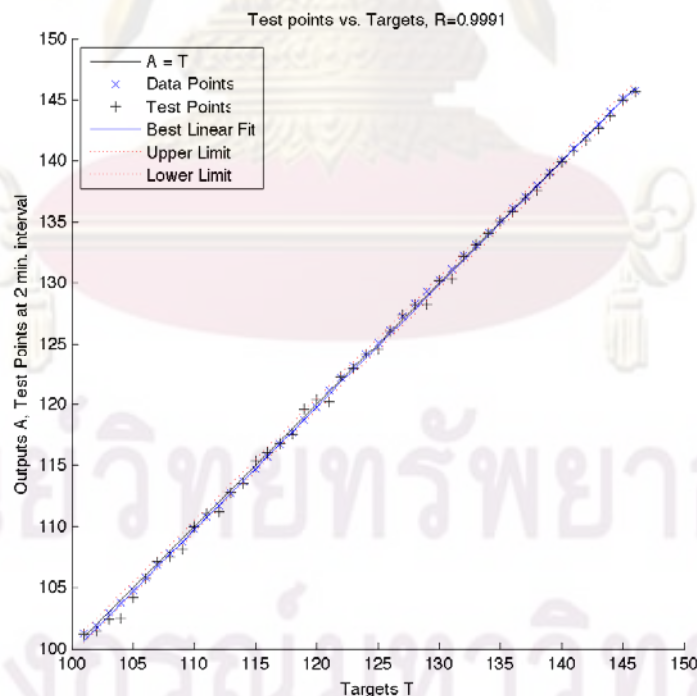
รูปที่ ก.31 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 2 นาที ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว



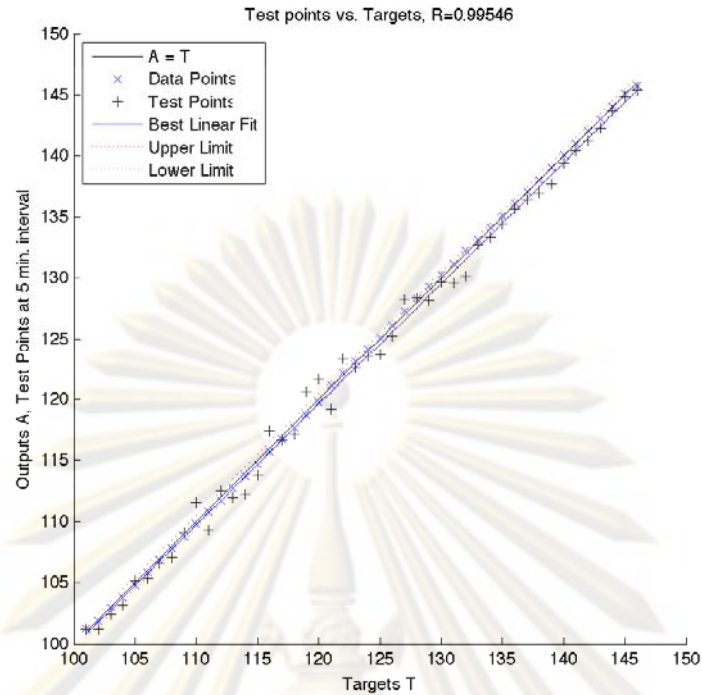
รูปที่ ก.32 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 5 นาที ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว



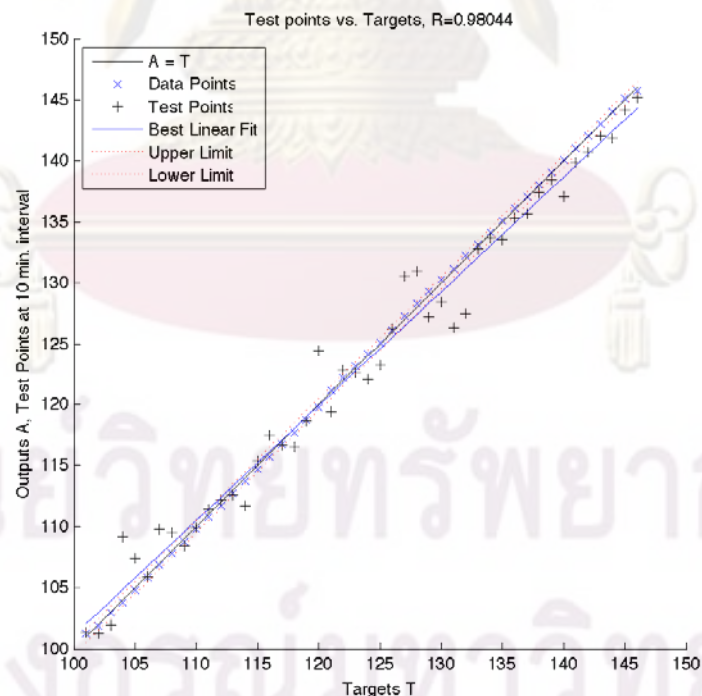
รูปที่ ก.33 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ม ± 10 นาที ของกลุ่มรอยเลื่อนเดี่ยว



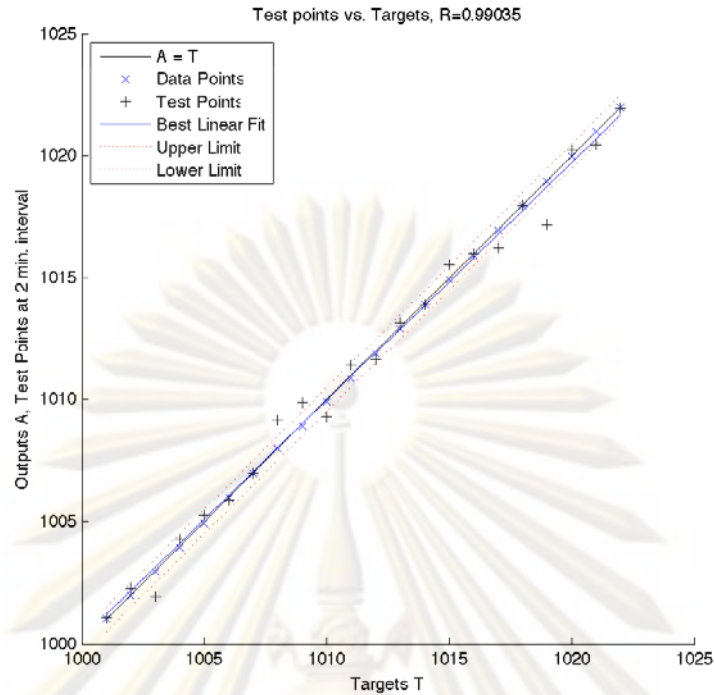
รูปที่ ก.34 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ม ± 2 นาที ของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



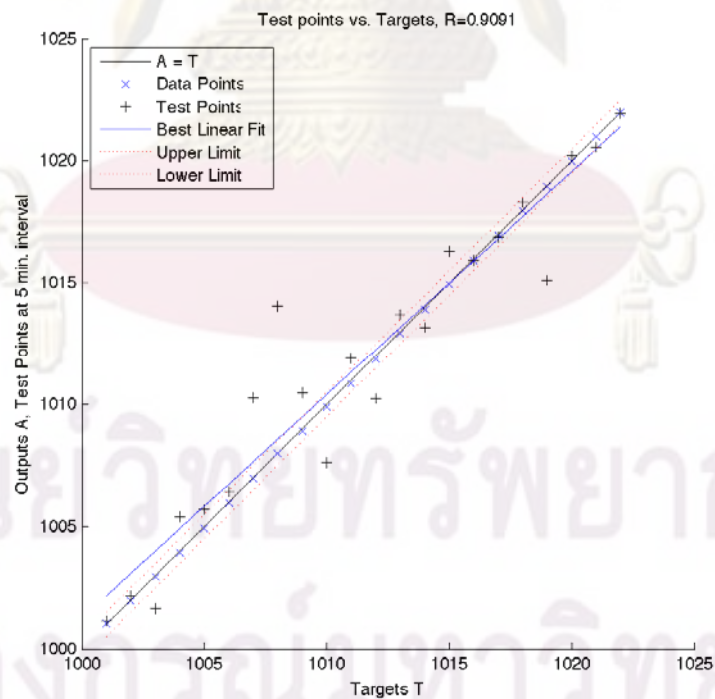
รูปที่ ก.35 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 5 นาที ของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



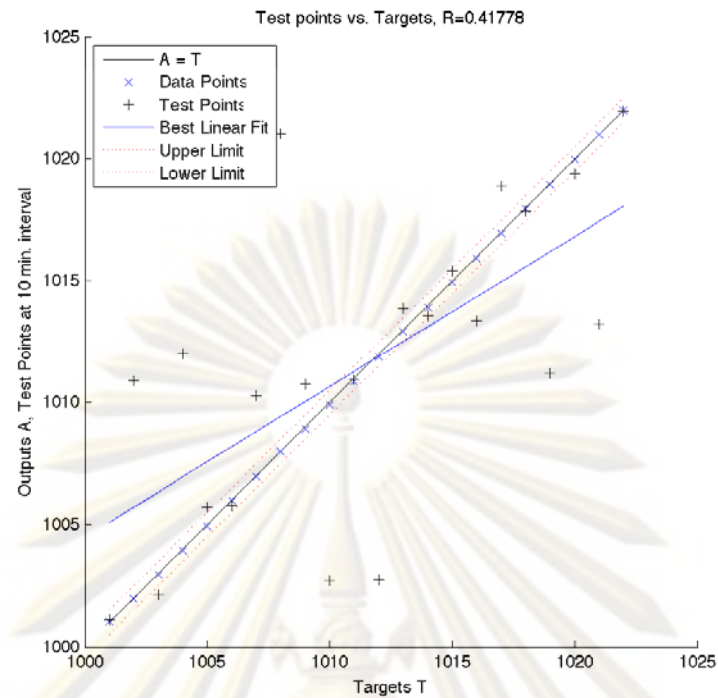
รูปที่ ก.36 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 10 นาที ของกลุ่ม 4 รอยเลื่อนร่วมกัน



รูปที่ ก.37 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 2 นาที ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน



รูปที่ ก.38 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสู่ ± 5 นาที ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน



รูปที่ ก.39 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของเวลามาถึงของคลื่นต่อการพยากรณ์รอยเลื่อน เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าสุ่ม ± 10 นาที ของกลุ่ม 9 รอยเลื่อนร่วมกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาทิตย์ อินทวี เกิดวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย