



ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อการเกิดดินถล่มใน ต.เทพราช
อ.ศีขร จ.นครศรีธรรมราช

**Effects of Global Climate Change on Landslides in Theppharat Subdistrict,
Sichon District, Nakhon Si Thammarat Province**

ไชนูน ไทยเจริญ

Zainoon Thaicharoen

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



**ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อการเกิดดินถล่มใน ต.เทพราช
อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช**
**Effects of Global Climate Change on Landslides in Theppharat Subdistrict,
Sichon District, Nakhon Si Thammarat Province**

ไชนูน ไทยเจริญ

Zainoon Thaicharoen

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อการเกิดดินถล่มใน
ภาคใต้ของประเทศไทย (กรณีศึกษา : ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา
และต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช)

ผู้เขียน นายไชนูน ไทยเจริญ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)ประธานกรรมการ (ดร.โพยม สราภิรมย์)
.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุปการ)กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุปการ)
.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
(วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถลิงยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชุบอุปการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายไชนุน ไทยเจริญ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายไชยคุณ ไทยเจริญ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อการเกิดดินถล่มใน ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช
ผู้เขียน	นายไชนุน ไทยเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติเพิ่มขึ้นรวมถึงการเกิดดินถล่มในหลายพื้นที่ทั่วโลก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่มในตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยพื้นที่นี้เคยเกิดดินถล่มมาแล้วในปี ค.ศ. 2011 การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ ส่วนแรกคือการนำผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกโดยใช้แบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตในรูปของฝนรายวันแล้วทำการย่อยส่วนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโดยวิธีทางสถิติ ผลที่ได้ถูกนำมาประเมินช่วงเวลาและรูปแบบของฝนที่มีความเสี่ยงทำให้เกิดดินถล่ม ส่วนที่สองประกอบด้วย การนำคุณสมบัติทางวิศวกรรมจากผลการทดสอบในสนามและห้องทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มโดยใช้แบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน ผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนถูกนำมาประเมินการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษา ผลการศึกษาพบว่า ลาดดินที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช ถล่ม เมื่อมีฝนตกต่อเนื่องกัน 3-4 วัน แล้วมีปริมาณน้ำฝนสะสม มากกว่า 600 มิลลิเมตร ซึ่งในช่วงปีฐาน 29 ปี มีเหตุการณ์ลาดดินถล่ม 1 ครั้ง หรือกล่าวได้ว่ามีรอบปีการเกิดซ้ำ 29 ปี ผลจากการย่อยส่วนแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตแสดงให้เห็นว่า จะมีฝนเพิ่มขึ้นจากอดีต 6.3%, 12.6% และ 16.8% ในปี 2040, 2070 และ 2090 ตามลำดับ ผลจากย่อยส่วนแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่คำนวณโดยวิธีตัดส่วนและวิธีเพิ่มโอกาสการเกิดพายุ พบว่า รอบปีการเกิดซ้ำของเหตุการณ์ลาดดินถล่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลจากย่อยส่วนแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่คำนวณโดยวิธีเพิ่มวันที่ฝนตก จะทำให้โอกาสการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มเพิ่มขึ้น โดยรอบปีการเกิดซ้ำลดลงจาก 29 ปี เป็น 6 ปี

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก, PRECIS/ECHAM4, การย่อส่วนทางสถิติ
แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก, รอบปีการเกิดซ้ำ, ดินถล่ม, ตำบล
เทพราช, แบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน, แบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน

Thesis Title	Effects of Global Climate Change on Landslides in Theppharat Subdistrict, Sichon District Nakhon Si Thammarat
Author	Mr. Zainoon Thaicharoen
Major Program	Civil Engineering
Academic Year	2016

ABSTRACT

Climate change effects have apparently increased natural disasters including the landslides in southern Thailand. This study aims to evaluate the effects of global climate change on landslides in Theppharat Area, Nakhon Si Thammarat Province which experienced landslides in 2011. This study consists of two main parts: the first part is the evaluation of periods and patterns of projected rainfalls that may cause landslides using statistically downscaled rain data generated from PRECIS/ECHAM4 model results. The second part consists of analysis of the rain that may cause the landslides in the area using groundwater seepage and slope stability models. Analytical results from these two main parts were used to evaluate the possible occurrence of landslides in the study area. Analytical results reveal that the landslide took place when the cumulative rainfall was over 600 mm within 3-4 days. According to filed observation, there was only one landslide in the past 29 years which corresponded to the return period of 29 years. Rainfall projection results show that future rainfall will increase 6.3%, 12.6% and 16.8% from the base years in 2040, 2070 and 2090, respectively. Statistical downscaling results of rainfall projection by proportion and enhanced storm methods show no significant change of the landslide return period. On the other hand, landslide return period decreases from 29 to 6 years when the rainfall projection computed using add rain day method.

Keywords: Global Climate Change, PRECIS/ECHAM4, Downscaling, Return Period,
Landslide, Theppharat, Groundwater seepage models, Slope stability models

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชุบอุปการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชา ถ่ายทอดความรู้ให้ตลอด 5 ปีที่ผ่านมา คอยให้คำปรึกษา คำชี้แนะแนวทาง และช่วยแก้ไขปัญหในงานวิจัยครั้งนี้ แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START) ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลฝนในอากาศจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 ศูนย์วิจัยภัยพิบัติธรรมชาติภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NadRec) กรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลาที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลฝนตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนต่างๆของจังหวัดนครศรีธรรมราช ศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้าน โลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (T-GLOB) ที่ได้อนุเคราะห์หนังสือและงานวิจัยเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศ

ขอขอบคุณประธานบริหาร บริษัท แมเนจเม้นท์ 103 จำกัด คุณวันชัย ศิริทองถาวร ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาต่อ และอนุญาตให้ผู้วิจัยเอาเวลางานของบริษัทฯ มาใช้ในการศึกษาและทำวิจัย รวมถึงสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณน้องที่ทำงานในบริษัทท่านหนึ่งที่ได้ช่วยเหลืองานวิจัยในส่วนที่ยุ่ยากที่สุดส่วนหนึ่งให้สำเร็จไปได้ และขอขอบคุณน้องๆร่วมภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะคุณรัชพล คุณชลดา คุณชนพจน์ คุณวัชระและคุณสุรัตน์ รวมถึงท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณภรรยาและลูกสาว ที่ยอมเสียสละเวลาอันแสนสุขของครอบครัว ให้ผู้วิจัยแบ่งเอามาใช้ในการศึกษาและทำวิจัย รวมถึงสนับสนุนผู้วิจัยตั้งแต่วันแรกที่ผู้วิจัยแจ้งว่าจะจะไปศึกษาต่อ ขอขอบคุณพ่อและแม่ของภรรยา ที่ช่วยดูแลครอบครัวของผู้วิจัยในระหว่างที่ผู้วิจัยไม่ได้อยู่ทำหน้าที่หัวหน้าครอบครัว

สุดท้ายคือผู้ที่ต้องกล่าวถึงพระคุณของท่านในที่นี่มากที่สุด นั่นคือมารดาของผู้วิจัย คุณอรสา ไทยเจริญ ผู้ที่เฝ้าทุกสิ่งทุกอย่างแก่ผู้วิจัยจนเกินจะพรรณนาออกมาเป็นอักขระได้

ไชนูน ไทยเจริญ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(16)
รายการภาพประกอบ	(18)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา	5
2.1.1 ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา	5
2.1.2 สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา	9
2.2 ภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ และ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก	11
2.2.1 ภูมิอากาศและลักษณะอากาศ	11
2.2.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	12
2.2.3 แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก	13
2.2.4 ภาพจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต	17
2.2.5 การย่อส่วนของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (Downscale)	20
2.2.6 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางสถิติของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (Statistical Bias Correction)	23
2.2.6.1 การคำนวณค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor)	24
2.2.6.2 การกระจายค่าปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)	25
2.2.7 การวิเคราะห์ความถี่และรอบปีการเกิดซ้ำ	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ดินถล่ม (Landslide)	31
2.3.1 ลักษณะรูปแบบการเกิดถล่ม	31
2.3.2 ประวัติเหตุการณ์การเกิดดินถล่มภาคใต้ของประเทศไทย	35
2.4 การไหลซึมของน้ำในมวลดิน	
และแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน	36
2.4.1 ทฤษฎีการไหลซึมของน้ำในมวลดิน	37
2.4.1.1 กฎของดาร์ซี	37
2.4.1.2 ทฤษฎีการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	38
2.4.1.3 เส้นอิทธิพลของน้ำในดิน	39
2.4.1.4 สัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน	42
2.4.1.5 กระบวนการซึมลงสู่ชั้นดิน	43
2.4.2 แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน	47
2.5 กลศาสตร์กำลังเฉือนของดิน เสถียรภาพลาดดินและ	
แบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน	48
2.5.1 ทฤษฎีกลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงกำลังของดิน	
ตามความชื้นในมวลดิน	49
2.5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินและ	
แบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน	52
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58
2.6.1 งานวิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	58
2.6.2 งานวิจัยด้านดินถล่ม	60
2.6.3 งานวิจัยด้านดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก	66
3.1.1 การเก็บรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก	66
3.1.2 การเก็บข้อมูลฝนย้อนหลังจากสถานีวัดน้ำฝน	67
3.1.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก กับผลการตรวจวัดจริงในอดีต	70
3.1.4 การปรับความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จาก แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก	71
3.1.4.1 การหาเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor)	71
3.1.4.2 การกระจายค่าปริมาณฝนส่วนต่าง	72
3.2 แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินดินและ แบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน	72
3.2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นที่และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ของพื้นที่ที่ศึกษา	72
3.2.2 การวิเคราะห์ไหลซึมและเสถียรภาพ ช่วงที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม	74
3.2.2.1 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLPOE/W	74
3.2.2.2 การคำนวณโดยใช้สมการลาดอนันต์	79
3.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากแบบจำลองต่างๆเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศ	79
3.3.1 การวิเคราะห์ฝนในอนาคตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพ ภูมิอากาศจากแบบจำลอง	79
3.3.1.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ของฝนในอนาคต	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มเหตุการณ์ ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคต	81
3.3.1.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฝนจากแบบจำลอง โดยการตรวจสอบกับรอบปีการเกิดซ้ำ	82
3.3.2 ประเมินเหตุการณ์ลาดดินถล่มเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศ	82
3.3.2.1 ใช้เงื่อนไขต่างๆที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มในอดีต ไปตรวจหาความสอดคล้องกับฝนในอนาคตที่ได้จากแบบ จำลองสภาพภูมิอากาศ	83
3.3.2.2 การนำน้ำฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกในอนาคต ไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย	85
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1 ผลการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก	87
4.1.1 ผลการเก็บรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก	87
4.1.2 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลฝนย้อนหลังจากสถานีวัดน้ำฝน	91
4.1.3 ผลการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกกับ ผลการตรวจวัดจริงในอดีต	96
4.1.4 ผลการปรับความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ	104
4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินและ แบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน	119
4.2.1 ผลการศึกษาข้อมูลพื้นที่และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ของพื้นที่ที่ศึกษา	121

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ง. ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ด้วยวิธี Delta Factor แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ	203
จ. ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ด้วยวิธี Delta Factor แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน	212
ฉ. ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ด้วยวิธี Delta Factor แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน	221
ช. ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ	230
ซ. การหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor)	243
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	
การเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20	246
ประวัติผู้เขียน	255

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	28
2.2	29
2.3	30
2.4	35
2.5	54
3.1	73
4.1	89
4.2	93
4.3	94
4.4	97
4.5	106
4.6	107
4.7	117
4.8	134
4.9	137
4.10	140

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.11 เหตุการณ์ในอนาคตที่ฝนตกติดต่อกันแล้วมีปริมาณฝนสะสมมากกว่า 600 มม. จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเคลด้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่ม โอกาสเกิดพายุ	142
4.12 เหตุการณ์ในอนาคตที่ฝนตกติดต่อกันแล้วมีปริมาณฝนสะสมมากกว่า 600 มม. จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเคลด้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน	144
4.13 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) โดยพิจารณาแต่ปริมาณฝน (ไม่คำนวณถึงระยะเวลาที่ฝนตก)	145
4.14 เหตุการณ์ฝนตกหนัก ในช่วงระยะเวลาติดต่อเนื่อง 3 และ 4 วัน แล้วทำให้ได้ฝนตกสะสมเกิน 600 มิลลิเมตรขึ้นไปจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีต่างๆ	147
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสมสูงสุด (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง) และรอบปีการเกิดซ้ำ เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เปรียบเทียบกับการคำนวณจากข้อมูลฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ด้วยวิธีการต่างๆ	149
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสมสูงสุด (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง) และรอบปีการเกิดซ้ำ เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เปรียบเทียบกับการคำนวณจากข้อมูลฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ด้วยวิธีการต่างๆ โดยแบ่งพิจารณาเป็นเฟส	151

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	การเพิ่มของก๊าซเรือนกระจกทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง	2
1.2	แนวคิดถล่มอันเนื่องจากฝนตก ต.เทพราช อ.สีชล จ.นครศรีธรรมราช	2
2.1	แผนที่ ต.เทพราช อ.สีชล จ.นครศรีธรรมราช	6
2.2	แผนที่ทางธรณีวิทยา จังหวัดนครศรีธรรมราช	8
2.3	แผนภาพแสดงลมมรสุมที่มีอิทธิพลต่อภาคใต้ของไทย	10
2.4	แผนภาพแสดงการถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนต่างๆใน GCMs	14
2.5	แผนภาพแสดงการถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนต่างๆใน GCMs ที่นำเสนอโดย IPCC	15
2.6	การพัฒนาแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (General Circulation Models หรือ GCMs) ตั้งแต่ ค.ศ. 1970 และ อนาคต (IPCC, 2001a)	17
2.7	ภาพจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตจากรายงานของ IPCC	18
2.8	ภาพประกอบการคำนวณค่าเคลต้าแฟกเตอร์และการกระจายแบบสัดส่วน	24
2.9	ภาพประกอบการกระจาย เคลต้าแฟกเตอร์แบบต่างๆ	26
2.10	ชนิดของดินถล่มตามการจำแนกของ Varnes	32
2.11	รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve	40
2.12	นิยามของตัวแปรในสมการของ Fredlund and Xing	42
2.13	แบบจำลองของ Green and Ampt	44
2.14	ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป	46
2.15	แรงดันและแรงดึงที่ผิว Contractile skin	47
2.16	เส้นโค้งการพิบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) เพิ่มเติมจากเส้นโค้งการพิบัติของ Mohr-Coulomb	52
2.17	การวิเคราะห์การพิบัติแบบลาดอนันต์	55
2.18	การวิเคราะห์การพิบัติแบบ Bishop's Simplified	57

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
3.1	ภาพแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน	68
3.2	ภาพแผนที่และ dialog box ให้กรอกข้อมูลที่ต้องการจะ down load ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกจากศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START)	69
3.3	แสดงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝนที่มีข้อมูลฝนย้อนหลัง 30 ปีรอบๆ ต.เทพราช	69
3.4	แบบจำลองลาดดินแสดง Boundary Condition ที่ใช้ในการวิเคราะห์	76
3.5	ภาพแผนผังแสดงกระบวนการคำนวณย้อนกลับ	78
3.6	ภาพแผนผังแสดงกระบวนการประเมินเหตุการณ์ดินถล่มจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	84
4.1	ปริมาณฝนรายปีจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ตั้งแต่ปี 1984 ถึง ปี 2090	88
4.2	ความเข้มฝนจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อบต.ฉลอง ตั้งแต่วันที่ 22 - 30 มีนาคม 2011	92
4.3	ปริมาณน้ำฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 1984-2012	93
4.4	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือนเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ. นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012	98
4.5	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 ถึงปี 1989	99
4.6	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1990 ถึงปี 1995	100

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
4.7	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1996 ถึงปี 2001	101
4.8	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 2002 ถึงปี 2007	102
4.9	กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 2008 ถึงปี 2011	103
4.10	กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012	104
4.11	กราฟแสดง Delta Factor	105
4.12	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2013 ถึง 2022	108
4.13	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2023 ถึง 2032	109
4.14	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2033 ถึง 2042	110
4.15	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2043 ถึง 2052	111
4.16	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2053 ถึง 2062	112
4.17	กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้า แฟกเตอร์ ปี 2063 ถึง 2072	113

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แฟกเตอร์ ปี 2073 ถึง 2082	114
4.19 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แฟกเตอร์ ปี 2083 ถึง 2090	115
4.20 กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ได้จากการทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แฟกเตอร์ วิธีต่างๆในช่วงปี 1984 - 2090	118
4.21 กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศกับฝนราย ปีที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว ในช่วงปี 1984 - 2090	118
4.22 แบบจำลองลาดดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	121
4.23 กราฟเส้นอรรถลักษณะของดิน SM (Soil-water characteristic curve ,SWCC)	121
4.24 ฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำในมวลดิน SM (Permeability function)	122
4.25 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 1	123
4.26 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 72	124
4.27 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 90	124
4.28 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 105	125
4.29 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 117	125
4.30 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-01 ที่ Time Step ต่างๆ	127
4.31 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-02 ที่ Time Step ต่างๆ	127
4.32 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-03 ที่ Time Step ต่างๆ	128
4.33 กราฟการเพิ่มขึ้นของน้ำฝนของสถานี อบต.จลอง ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2011 ถึง วันที่ 30 มีนาคม 2011 ที่ Time step ต่างๆจนถึงจุดที่ดินถล่ม	130
4.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ฝนตก (Time Step)	130
4.35 แสดงรูปแนวพืดกับระดับน้ำในมวลดินช่วงที่เกิดดินถล่ม	131
4.36 แสดงการวิเคราะห์การพืดแบบลาดอนันต์ (Infinite slope Analysis)	132

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในชั้นดิน (Z_w) และอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินของ ต.เทพราช อ.สีชล	132
4.38 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอดีต (ปี 1984 – 2012) ที่ได้จากการตรวจวัดจริง ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช	138
4.39 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบสัดส่วน	139
4.40 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ	141
4.41 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน	141
4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฝนสะสมสูงสุดจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก จำนวนวันที่ฝนตกและรอบปีการเกิดซ้ำ ที่วิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธีของ Gumbel โดยใช้ข้อมูลฝนจากการตรวจวัดจริงของ สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา	146
4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสูงสุด(เหตุการณ์ฝนตกหนัก)และรอบปีการเกิดซ้ำ (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกสะสม) เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เทียบกับอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ	152

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
4.44	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสูงสุดและรอบปีการเกิดซ้ำ (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกสะสม) เมื่อคำนวณจากการข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เทียบกับอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ โดยแบ่งพิจารณาเป็นช่วงเวลา	153
4.45	ปริมาณฝนตกสะสมของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 1 – 6 ธันวาคม 2016	156
4.46	ปริมาณฝนตกสะสม 3 วัน ของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 1 – 6 ธันวาคม 2016	157
4.47	ปริมาณฝนตกสะสมของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 28 ธันวาคม 2559 ถึงวันที่ 10 มกราคม 2017	157
4.48	ปริมาณฝนตกสะสม 3 วัน ของ 3 สถานีวัดน้ำฝนช่วงวันที่ 28 ธันวาคม 2559 ถึง 10 มกราคม 2017	158
4.49	ความชื้นฝนของเดือนตุลาคม 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES	160
4.50	ความชื้นฝนของเดือนพฤศจิกายน 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES	160
4.51	ความชื้นฝนของเดือนธันวาคม 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES	161
4.52	ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนตุลาคม 2074	161
4.53	ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนพฤศจิกายน 2074	162
4.54	ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนธันวาคม 2074	162

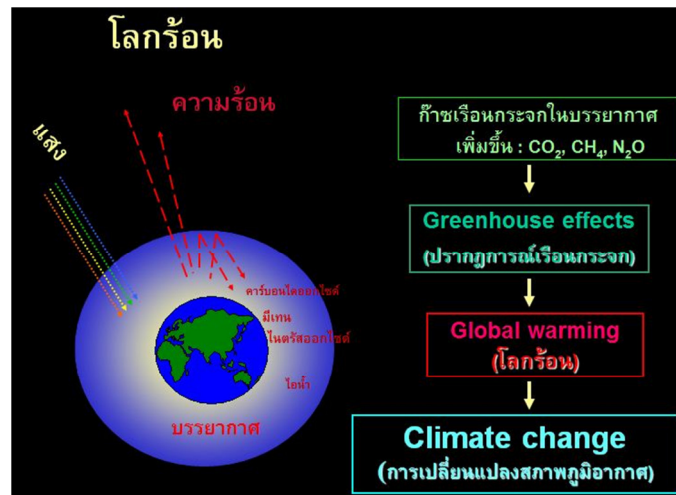
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่า โลกมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากในอดีต เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ทำให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากข้อมูลที่คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ได้นำเสนอในที่ประชุมระหว่างประเทศตามวาระต่างๆ ในรูปที่ 1.1 เป็นการแสดงให้เห็นลำดับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกอันมีที่มาจากปรากฏการณ์เรือนกระจก และข้อสรุปจากการประชุม IPCC เมื่อปี พ.ศ. 2550 ที่แสดงให้เห็นว่าโลกร้อนขึ้นทุกปี ผลจากการที่โลกร้อนขึ้นทำให้สภาพภูมิอากาศโลกทุกภาคส่วนเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต เช่น บ้านเกาะกลาง ต.คลองประสังข์ อ.เมือง จ.กระบี่ มีลมมรสุมกรร โขกแรง แนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นทั้งความเร็วสูงสุดและความถี่ โดยอาจหนุนให้ระดับน้ำสูงสุดในรอบ 30 ปีเพิ่มจาก 1.94 เมตร(ช่วงปี 2523-2549) เป็น 2.22 เมตร (ในปี 2553-2582) จากระดับน้ำทะเลปานกลาง (ศุภกร และคณะ, 2554) แต่ ต.ทุ่งหลวง อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด กลับปรากฏว่ามีปัญหาภัยแล้ง ปริมาณฝนในฤดูฝนของกลุ่มน้ำชีในภาพรวมลดลง และแปรปรวนในระหว่างปีมากขึ้น รูปแบบฝนทิ้งช่วง ทำให้ปัจจุบันขาดแคลนน้ำเพื่อการทำนาในช่วงฤดูฝน (ศุภกร และคณะ, 2554) เป็นต้น

เหตุการณ์ดินถล่มเป็นภัยธรรมชาติที่สร้างความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ได้อย่างรุนแรง เหตุการณ์ดินถล่มเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของลาดดิน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงความชื้นในลาดดินอันเกิดจากฝนที่ไหลซึมลงไปในพื้นที่ดิน ทำให้การยึดเกาะของอนุภาคเม็ดดินลดลง และเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้มวลดิน ทำให้มวลดินนั้นไม่มีเสถียรภาพ การใช้ประโยชน์ที่ดินของมนุษย์โดยการตัดลาดดินให้มีความชันมากจนไม่มีเสถียรภาพ การแผ้วถางป่าปกคลุมดินซึ่งเคยทำหน้าที่เป็นตัวยึดมวลดินให้มีความเสถียรภาพ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การเพิ่มของก๊าซเรือนกระจกทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (กัณฑ์, 2550)



รูปที่ 1.2 แนวดินถล่มอันเนื่องจากฝนตก ต.เทพราช อ.ติชล จ.นครศรีธรรมราช (ปลายเดือนมีนาคม 2011)

เหตุการณ์ดินถล่มในภาคใต้จากที่มีการบันทึกไว้ พบว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากพายุฝน เช่น เหตุการณ์ดินถล่มเมื่อเดือนพฤศจิกายน 1988 ที่บ้านกะทูนเหนือ อ.พิปูน จ.นครศรีธรรมราช เกิดจากฝนตกต่อเนื่องหลายวันจนดินอุ้มน้ำไว้ไม่ไหว และกลายสภาพเป็นโคลนถล่มลงมาสร้างความเสียหายรุนแรงจนเป็นโศกนาฏกรรม และ อีกเหตุการณ์คือ เหตุการณ์ลาดดินถล่มเมื่อเดือนมีนาคม 2011 ที่บ้านเขียน ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช (รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นปรากฏการณ์ดินถล่มในพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช) สาเหตุหลักก็มาจากฝนที่ตกต่อเนื่องเป็นเวลาหลายวัน

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน เช่น รูปแบบ เวลา ปริมาณ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักรุนแรง (Extreme events) (ข้อมูลจาก Greenpeace Thailand <http://www.greenpeace.org/seasia/th/solargen/climate-change/impacts/impacts-thailand/>) ซึ่งอาจส่งผลให้อาจเกิดเหตุการณ์ดินถล่มในอนาคตได้มากขึ้น การวิจัยนี้ต้องการศึกษาประเมินแนวโน้มการเกิดลาดดินถล่มในอนาคตโดยพิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก โดยพื้นที่ศึกษาเป็นลาดดินบริเวณ ต.เทพราช อ.สิชล ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของเทือกเขาหลวงในจังหวัดนครศรีธรรมราช

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อประเมินปริมาณฝนในอนาคต ของพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
2. เพื่อประเมินแนวโน้มการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม บริเวณพื้นที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีผลต่อปริมาณและรูปแบบฝนเท่านั้น
2. คุณสมบัติของดินและลาดดินในพื้นที่ศึกษาคงที่
3. การวิเคราะห์แบบจำลองลาดดิน เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองสองมิติ
4. ใช้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 ตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) A2 เพียงแบบจำลองเดียว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ฝนรายวันในอนาคต (ปี 2018 – 2090) ของ อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
2. ได้รับรู้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตของพื้นที่ อ.ท่าศาลา และ อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช
3. ได้กราฟรอบปีการเกิดซ้ำของฝนสูงสุดที่ อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เพื่อไว้ใช้งาน ออกแบบ
4. ได้แบบจำลองลาดดินที่เหมาะสมกับลาดภูเขา ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช
5. สามารถนำผลการศึกษา เช่น เงื่อนไขฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มไปประเมินลักษณะ โอกาส และปริมาณน้ำฝนในอนาคตของพื้นที่ที่ศึกษา อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันได้
6. หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการศึกษาไปใช้กำหนดแผนและนโยบายที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้
7. สามารถนำผลการศึกษาไปใช้วางแผนเตรียมรับมือและปรับตัวให้เข้ากับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่เคยเกิดเหตุการณ์ดินถล่มอันเนื่องมาจากฝนตกหนักช่วงปลายเดือนมีนาคม 2554 (2011) ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เคยทำการสำรวจและหาข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมปฐพีไว้แล้ว

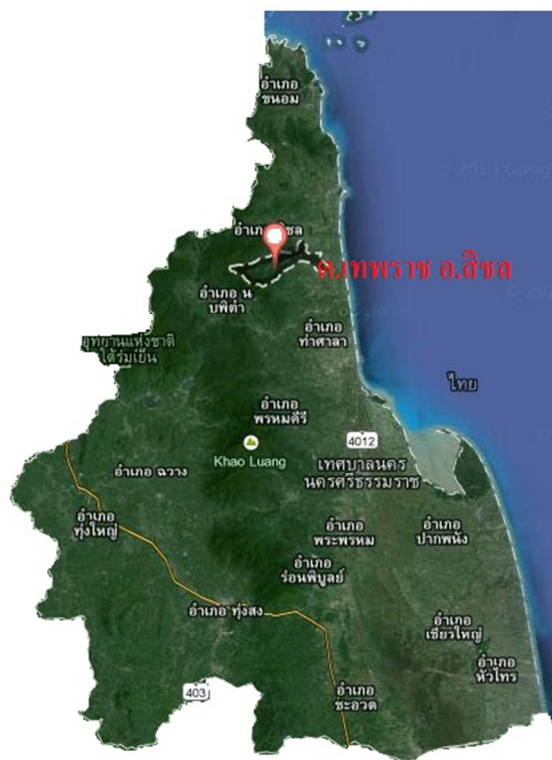
2.1.1 ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่ ข้อมูลสถานที่ตั้ง สภาพภูมิประเทศและสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่

ที่ตั้งและสภาพภูมิประเทศ

ที่ตั้งของตำบลเทพราช ตั้งอยู่ประมาณละติจูด $8^{\circ}51'$ องศาเหนือและลองจิจูด $99^{\circ}46'$ ตะวันออก ดูรูปที่ 2.1 เป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของเทือกเขานครศรีธรรมราช ข้อมูลจากเว็บไซต์สำนักงานจังหวัดนครศรีธรรมราช (<http://www.nakhonsithammarat.go.th/geography.php>) ระบุว่า เทือกเขานครศรีธรรมราชมีลักษณะตั้งเป็นแกนกลางของคาบสมุทรภาคใต้ตอนกลาง ทอดตัวในแนวเหนือ - ใต้ แนวเทือกเขานครศรีธรรมราช นับเป็นเทือกเขาที่ใหญ่ที่สุดและยาวที่สุดในภาคใต้ โดยมี ยอดเขาหลวง ซึ่งมีความสูงประมาณ 1,835 เมตร จากระดับน้ำทะเล ถือเป็นยอดเขาที่สูงที่สุดของแนวเทือกเขานี้ และข้อมูลจากเว็บไซต์องค์การบริหารส่วนตำบลเทพราชอำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช (www.theppharat.go.th/general1.php) ระบุว่าตำบลเทพราช อยู่ห่างจากตัวอำเภอสิชลไปทางทิศใต้ประมาณ 14 กิโลเมตร ทางทิศเหนือติดต่อกับตำบลฉลอง ทิศใต้ติดต่อกับตำบลเป็ลียน ตำบลนบพิตร ตำบลกรุงชิง ทิศตะวันออกติดต่อกับตำบลเป็ลียน และทิศตะวันตกติดต่อกับตำบลเสภา กรมทรัพยากรธรณี (แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน ต.เทพราช, 2558) อธิบายลักษณะภูมิประเทศของตำบลเทพราชว่า มีลักษณะเป็นที่ราบเชิงภูเขา โดยด้านทิศตะวันตกเป็นภูเขา

สูงสลับซับซ้อน (เทือกเขานครศรีธรรมราช-เขาพนมเต่า) เป็นแหล่งกำเนิดของคลองสำคัญต่างๆ ส่วนในตอนกลางเรื่อยมาทางด้านตะวันออกของพื้นที่ตำบล เป็นที่เนิน ที่ราบลุ่มแม่น้ำสายต่างๆ ที่มีทิศทางการไหลจากแนวเขาสูงทางด้านฝั่งตะวันตกของตำบล



รูปที่ 2.1 แผนที่ ต.เทพราช อ.ลิซด จ.นครศรีธรรมราช (<https://maps.google.co.th/>)

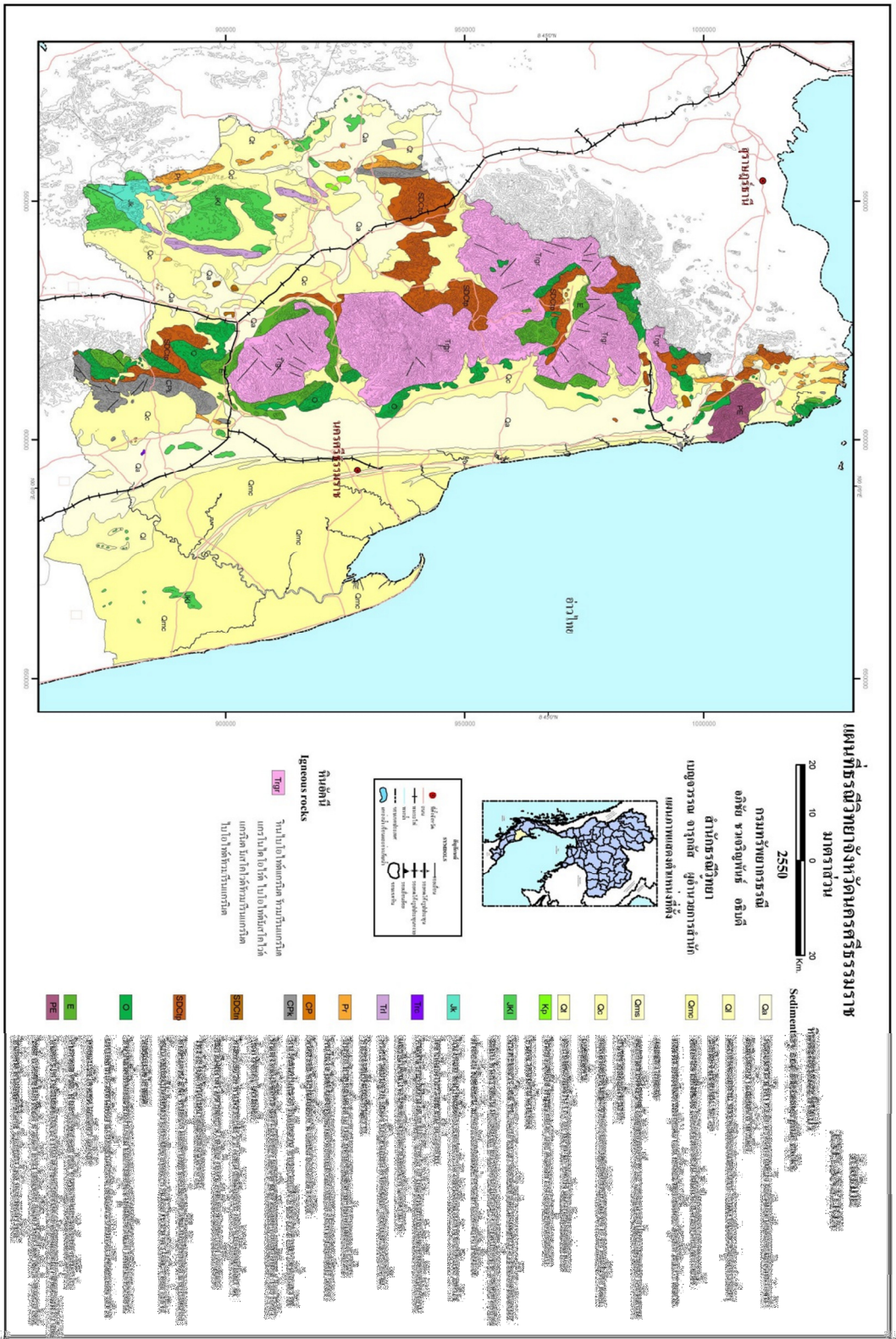
สภาพทางธรณีวิทยา

กรมทรัพยากรธรณี (2550) ได้กล่าวถึงลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของจังหวัดนครศรีธรรมราชว่ามีเทือกเขาสูงบริเวณตอนกลางของจังหวัด ซึ่งรองรับด้วยหินแข็งอายุตั้งแต่มากกว่า 570 ล้านปีจนถึงตะกอนปัจจุบัน มีทั้งหินตะกอน หินแปร หินอัคนี และตะกอนร่วน ดังรูปที่ 2.2 จากแผนที่ธรณีวิทยาของจังหวัดนครศรีธรรมราช ในรูปที่ 2.2 พบว่าพื้นที่บริเวณตำบลเทพราช เป็นหินอัคนีแทรกซอนชนิดหินแกรนิตยุคไทรแอสซิก (TRgr) หินกลุ่มนี้มีอายุประมาณ 245-

210 ล้านปี หินแกรนิตที่พบจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่ 1 (TRgr1) ประกอบด้วย หินไบโอไทต์แกรนิต และหินมัสโคไวต์-ไบโอไทต์แกรนิตหินไบโอไทต์แกรนิตมีเนื้อสม่ำเสมอ เนื้อดอกเม็ดปานกลางถึงหยาบ หินมัสโคไวต์-ไบโอไทต์แกรนิตมีเนื้อสม่ำเสมอ เม็ดละเอียดถึงปานกลาง บางบริเวณมีการแปรสภาพ กลุ่มที่ 2 (TRgr2) ประกอบด้วย หินทัวร์มารินแกรนิต และหินทัวร์มาลิน-มัสโคไวต์แกรนิต หินทัวร์มารินแกรนิตมีเนื้อละเอียด หินทัวร์มาลิน-มัสโคไวต์แกรนิตมีเนื้อสม่ำเสมอถึงค่อนข้างเนื้อดอก เม็ดปานกลางถึงหยาบ

กรมทรัพยากรธรณี (แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน ต.เทพราช, 2558) ได้กล่าวถึงลักษณะธรณีวิทยาตำบลเทพราช ไว้ดังนี้ ในด้านทิศตะวันตกของพื้นที่เป็นแนวเขาสูงสลับซับซ้อน พบหินแกรนิต ยุคไทรแอสซิก (TRgr1) ในพื้นที่หมู่ต่างๆ จำนวนมาก พบหินโคล์บริเวณหมู่ 4 บ้านเขายวนเต่า หมู่ 5 บ้านเขียนล่าง หมู่ 10 บ้านเขียนบน หมู่ 14 บ้านวาโย และหมู่ 15 บ้านสามเทพ บริเวณตอนกลางของตำบลรองรับด้วยหน่วยตะกอนเศษหินเชิงเขา และตะกอนผุพังอยู่กับที่ (Qc) หน่วยตะกอนที่ราบลุ่มแม่น้ำ (Qff) ประกอบด้วยตะกอนทรายหยาบถึงละเอียด ทรายแป้ง และดินเหนียว และหน่วยตะกอนน้ำพา (Qa) ยุคควอเทอร์นารี โดยครอบคลุมพื้นที่ราบลุ่มตอนกลางเรื่อยมาตลอดถึงด้านตะวันออกของตำบลพบหน่วยตะกอนดังกล่าว ในพื้นที่หมู่ 1 บ้านต่อเรือ หมู่ 2 บ้านเทพราช หมู่ 3 บ้านต้นเนียง หมู่ 5 บ้านเขียนล่าง หมู่ 6 บ้านไสน้อย หมู่ 7 บ้านไสแพ หมู่ 8 บ้านน้ำฉา หมู่ 9 บ้านป่าสงวนเขาคา หมู่ 11 บ้านสระยุง หมู่ 12 บ้านสวนหัวแหวน หมู่ 13 บ้านคลองคุดที่ตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มด้านตะวันออกของตำบล นอกจากนี้ กรมทรัพยากรธรณี ได้วิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดินถล่ม ซึ่งได้แก่ ลักษณะทางธรณีวิทยา ความลาดชัน และพืชพรรณที่ปกคลุม เพื่อแสดงพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่ม พบว่าที่ตำบลเทพราช ซึ่งประกอบด้วย 15 หมู่บ้าน มีโอกาสที่จะเกิดดินถล่มในระดับสีเหลืองและสีแดง คือมีโอกาสถล่มเมื่อมีปริมาณฝนมากกว่า 200 มิลลิเมตร/วันขึ้นไป

รัชพลและคณะ (2556) ได้มีการเก็บตัวอย่างดินที่ ตำบลเทพราช มาทดสอบปรากฏว่าเป็นดินประเภท SW (Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines), SP (Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines) และ SM (Silty sands, sand-silt mixtures) อ้างอิงตามการจำแนกประเภทของดินแบบ USCS



รูปที่ 2.2 แผนที่ทางธรณีวิทยา จังหวัดนครศรีธรรมราช (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

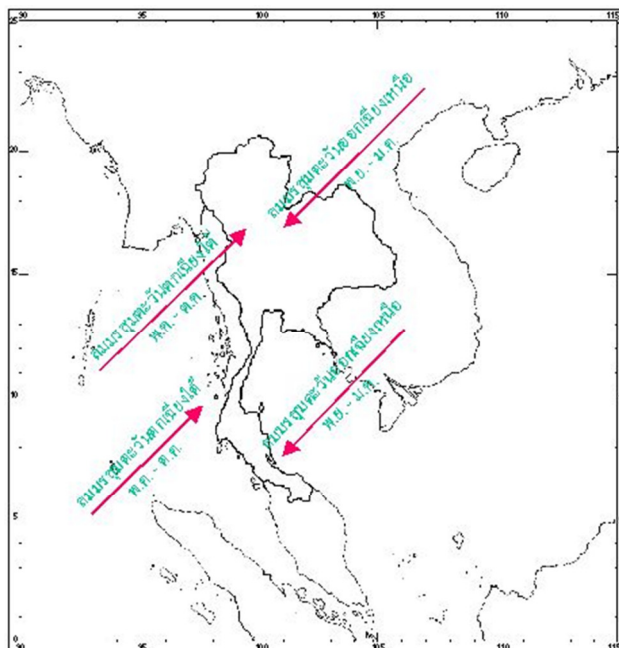
2.1.2 สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา

ตำบลเทพราช อยู่ติดฝั่งอ่าวไทย และตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมที่พัดผ่านอ่าวไทยเป็นหลัก ฤดูกาลจึงเหมือนกับพื้นที่ภาคใต้คือมี 2 ฤดูกาล

ฤดูกาลและมรสุม

ตำบลเทพราชได้รับอิทธิพลมรสุมจากมหาสมุทรอินเดีย และพายุหมุนเขตร้อน มีลมมรสุมที่พัดประจำ 2 ชนิด คือมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดมาจากมหาสมุทรอินเดีย ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้มีลักษณะภูมิอากาศแบบโซนร้อน มีฝนตกชุกเกือบตลอดปี และมีฤดูกาลเพียง 2 ฤดู คือ ฤดูฝนและฤดูร้อน โดยฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึง เดือน มกราคม และสามารถแบ่งฤดูฝนออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม เป็นช่วงที่ได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนมกราคม เป็นช่วงที่ได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ช่วงที่สองนี้ฝนตกหนักกว่าช่วงที่หนึ่ง เดือนที่มีฝนตกมากที่สุดคือเดือนพฤศจิกายน ฤดูที่สองคือ ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ถึง เดือน เมษายน ในช่วงเดือนเมษายน จะมีอุณหภูมิสูงสุด ประมาณ 40 องศาเซลเซียส

เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของตำบลเทพราชมีแนวภูเขาอยู่ทางทิศตะวันตก และมีทะเลฝั่งอ่าวไทยอยู่ทางทิศตะวันออก ทำให้พื้นที่นี้ได้รับผลกระทบจากลมมรสุมและพายุที่พัดมาจากฝั่งอ่าวไทยมากกว่าลมมรสุมและพายุที่พัดมาจากทิศตะวันตก ผู้วิจัยไม่สามารถหาข้อมูลการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในอดีตที่ตำบลเทพราชได้ ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนย้อนหลังไปจนถึงปี พ.ศ. 2527 (1984) ของสถานีวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา พบว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปีมีค่าอยู่ระหว่าง 1,400-3,300 มิลลิเมตร และ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของ อ.สิชล มีค่าระหว่าง 2,500 – 4,000 มิลลิเมตรต่อปี (ชลดา ,2559)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงลมมรสุมที่มีอิทธิพลต่อภาคใต้ของไทย
(เว็บไซต์กรมอุตุนิยมวิทยา <http://www.tmd.go.th>)

ประวัติการเกิดพายุฝนหมุนเขตร้อนที่เข้าสู่ภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย

ในอดีตตั้งแต่ พ.ศ. 2505 เป็นต้นมาจนถึง พ.ศ. 2550 มีพายุหมุนเขตร้อนเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย มีกำลังแรงถึงขั้นพายุโซนร้อน 5 ลูก และไต้ฝุ่น 1 ลูก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. พายุโซนร้อน แฮเรียต (HARRIET 6225)
ขึ้นฝั่งที่แหลมตะลุมพุก จ.นครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2505
2. พายุโซนร้อน รุธ (RUTH 7026)
ขึ้นฝั่งที่ จ. สุราษฎร์ธานี เมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน 2513
3. พายุไต้ฝุ่น แซลลี่ (SALLY 7229)
ขึ้นฝั่งที่ จ. สุราษฎร์ธานี เมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2515 ตอนขึ้นฝั่งลดกำลังลงเป็นพายุโซนร้อน
4. พายุไต้ฝุ่น เกย์ (GAY 8929)
ขึ้นฝั่งที่ จ. ชุมพร เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2532

5. พายุโซนร้อน ฟอร์เรสต์ (FORREST 9229)

ขึ้นฝั่งที่ จ.นครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2535

6. พายุไต้ฝุ่น ลินดา (LINDA 9728)

ขึ้นฝั่งที่ อ.ทับสะแก จ.ประจวบคีรีขันธ์ เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2540 ตอนขึ้นฝั่งลดกำลังลงเป็น พายุโซนร้อน (วารสารอุตุนิยมวิทยา ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม ถึง สิงหาคม 2551)

สำหรับพายุฝนช่วงปลายเดือนมีนาคม 2554 ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่ ตำบลเทพราช เกิดจากสภาวะการรวมตัวกันของความกดอากาศต่ำ จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ตั้งแต่วันที่ 18 มีนาคม 2554 กับหย่อมความกดอากาศต่ำในอ่าวไทย เมื่อวันที่ 24 – 25 มีนาคม 2554 ทำให้เกิดพายุฝนคล้ายพายุดีเปรสชัน ส่งผลให้มีฝนตกหนักตั้งแต่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ถึง จังหวัดพัทลุง มากกว่า 200 มิลลิเมตร (ข้อมูลจากเว็บไซต์หนังสือพิมพ์คมชัดลึก วันที่ 27 มีนาคม 2554 : <http://www.komchadluek.net/news/regional/92870>)

2.2 ภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ และ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก

การตื่นตัวของสังคมเรื่องภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ทำให้เราได้ยินและได้เห็นคำว่า ภูมิอากาศ (Climate) อย่างแพร่หลายและหลายคนมักใช้ในความหมายเดียวกับคำว่า ลักษณะอากาศ (Weather) แต่ความหมายในทางอุตุนิยมวิทยา คำทั้งสองมีความหมายต่างกันเป็นอย่างมาก

2.2.1 ภูมิอากาศ (Climate) และ ลักษณะอากาศ (Weather)

ลักษณะอากาศ (Weather) เป็นเรื่องของความแปรปรวนของสภาพอากาศที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดเวลาหนึ่งในช่วงสั้นๆ โดยมากเมื่อนึกถึงสภาพอากาศเรามักนึกถึง อุณหภูมิ ฝน ลม ความกดอากาศ และ ความชื้นสัมพัทธ์ ลักษณะอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในระดับ นาทีต่อนาที ชั่วโมงต่อชั่วโมง และฤดูกาลต่อฤดูกาล ซึ่งยากต่อการพยากรณ์ให้ถูกต้องแม่นยำ

ภูมิอากาศ (Climate) คือรูปแบบในระยะยาวของลักษณะอากาศ (Weather) ในพื้นที่เฉพาะหนึ่งๆ นักวิทยาศาสตร์และนักอุตุนิยมวิทยามักอธิบายว่าภูมิอากาศ คือ ค่าเฉลี่ยของสภาพอากาศ ใน

ภูมิอากาศหนึ่งๆในช่วงเวลาหนึ่งๆซึ่งต้องมากกว่า 30 ปี (เป็นคำจำกัดความของกรมอุตุนิยมวิทยาโลก , World Meteorological Organization หรือ WMO) เมื่อนักวิทยาศาสตร์หรือนักอุตุนิยมวิทยา ทำการศึกษาเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศ พวกเขาจะมองไปที่ ค่าเฉลี่ยของน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้น สัมพัทธ์ ความเร็วลมหรือการตรวจวัดสภาพอากาศอื่นๆที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานในพื้นที่เฉพาะ หนึ่งๆ หรือกล่าวได้ว่า ภูมิอากาศ (Climate) เป็นการพิจารณาภาพรวมของสภาพอากาศในระยะเวลายาวนาน คือพิจารณาในระยะเวลา 30 ปีขึ้นไป จึงทำให้ความแปรปรวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังนั้น ถูกขจัดออกไป ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ลักษณะอากาศ (Weather) และภูมิอากาศ (Climate) แตกต่างกันที่ระยะเวลาในการพิจารณา

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change)

ตามคำจำกัดความของอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงใดๆ ของภูมิอากาศที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม อันทำให้ส่วนประกอบของบรรยากาศโลกเปลี่ยนแปลงไป นอกเหนือจากการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติในช่วงเวลาเดียวกัน กัณฑ์ริย์และคณะ (2553) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) เป็นลักษณะของสภาพอากาศที่เบี่ยงเบนไปจากค่าปกติ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน (อำนาจ, 2553) และในการประชุมวิชาการระดับชาติเรื่องประเทศไทยกับภูมิอากาศโลกครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2554 ณ ศูนย์ประชุมอิมแพ็ค เมืองทองธานี กัณฑ์ริย์และคณะ (2554) ได้อธิบายสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศว่า เกิดจากการที่ระบบภูมิอากาศพยายามรักษาสมดุลของพลังงานระหว่างองค์ประกอบที่สำคัญของระบบภูมิอากาศโลก ได้แก่ 1.) บรรยากาศ 2.) พื้นดินและหิน 3.) ชารน้ำแข็งและหิมะ 4.) มหาสมุทรและแหล่งน้ำ และ 5.) สิ่งมีชีวิต โดยมีพลังงานจากดวงอาทิตย์เป็นแรงขับเคลื่อน การที่โลกมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นทำให้บรรยากาศโลกมีการดูดซับความร้อนจากดวงอาทิตย์มาสะสมไว้มากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนต่างๆทั้งห้า เพื่อปรับสมดุลขึ้นใหม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

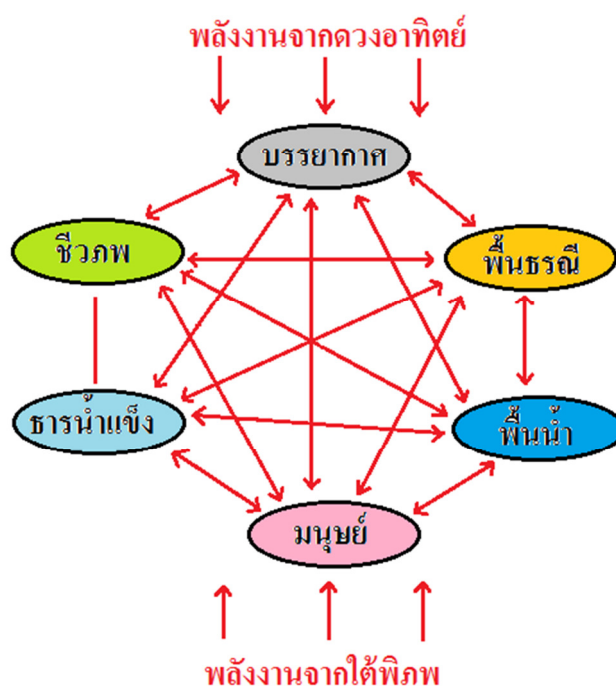
แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของไทยในอดีต จากข้อมูลการตรวจวัดของ สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศ บ่งชี้ว่าประเทศไทยในรอบ 55 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ 2498 ถึง 2552) อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยในอ่าวไทย และ ทะเลอันดามัน มีแนวโน้มสูงขึ้น 0.1 องศาเซลเซียสต่อทศวรรษ แต่ปริมาณฝนสะสมรายปีกลับไม่ ปรากฏแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (กัณฑ์ธีร์และคณะ , 2554)

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของไทยในอนาคต คาดการณ์ได้จากแบบจำลอง สภาพภูมิอากาศโลก (GCMs) ซึ่งผลจากแบบจำลอง GCMs 4 แบบจำลอง คือแบบจำลอง GFDL-R30, MM5-RCM, PRECIS และ RegCM3 ให้ผลสอดคล้องกันว่า อุณหภูมิโดยรวมเพิ่มขึ้นแต่อัตราการ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่างกันในแต่ละแบบจำลอง ส่วนปริมาณฝน ยังไม่ปรากฏแนวโน้ม ที่ชัดเจนนัก แต่แบบจำลองส่วนใหญ่คาดการณ์ว่าจะมีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น (กัณฑ์ธีร์และคณะ , 2554)

2.2.3 แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Model)

แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (General Circulation Models หรือ Global Climate Models) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติของระบบภูมิอากาศโลก จีรธรรมและเจียมใจ (2554) ได้กล่าวว่าแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วนได้แก่ พื้นน้ำ (hydrosphere) พื้นธรณี (geosphere) บรรยากาศ (atmosphere) ชีวภพ (biosphere) และธารน้ำแข็ง (cryosphere) ถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน กัณฑ์ธีร์ (2553) อธิบายว่าแบบจำลองสภาพภูมิอากาศเป็น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูลเชิงปริมาณในการลอกเลียน (simulate) ปฏิสัมพันธ์ของ พลังงานจากดวงอาทิตย์ พลังงานใต้พิภพ บรรยากาศ พื้นน้ำ พื้นดิน ธารน้ำแข็ง ชีวภพและมนุษย์ ดัง รูปที่ 2.4 แบบจำลองนี้นำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น การศึกษาพลวัตของภูมิอากาศ (weather) และระบบภูมิอากาศ (climate system) ซึ่งปัจจุบันถูกนำมาใช้ในการสร้างสภาพเหตุการณ์ ภูมิอากาศในอนาคตที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศแบบจำลอง สภาพภูมิอากาศทุกชนิดใช้หลักการของสมดุลของพลังงานโลก คือ พลังงานที่โลกได้รับในสภาพ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นสั้น สมดุลกับการส่งถ่ายพลังงานออกไปนอกบรรยากาศโลกใน สภาพรังสีความร้อนในช่วงคลื่นยาว (far-infrared) ความไม่สมดุลของพลังงานนำเข้าและพลังงาน

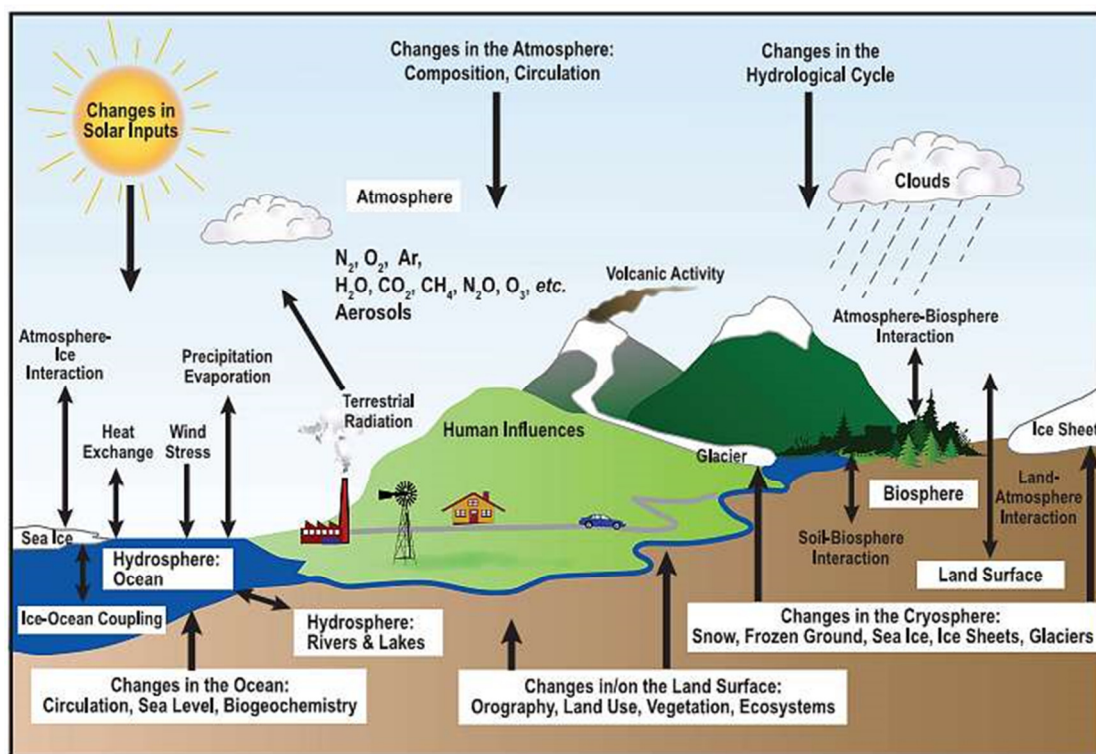
ส่งออกทำให้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิโลกเปลี่ยนแปลง เช่น การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกซึ่งดูดกลืนพลังงานความร้อนทำให้บรรยากาศโลกดูดซับความร้อนไว้มากขึ้น ศุภกรและคณะ (2552) กล่าวว่าในแบบจำลองมีการถ่ายเทพลังงานความร้อน ความชื้น และโมเมนตัมระหว่างกัน ซึ่ง IPCC (2007) ได้นำเสนอในการประชุมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนต่างๆใน GCMs

พัฒนาการของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก กัทธรีย์ (2553) กล่าวว่า แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก หรือ General Circulation Models (GCMs) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเครื่องมือที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบันในการจำลองกระบวนการทางกายภาพของบรรยากาศ มหาสมุทร น้ำแข็ง (cryosphere) และผิวดินต่อการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก ซึ่งใช้ในการสร้างเหตุการณ์จำลองของสภาพภูมิอากาศในอนาคต แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกแสดงภูมิอากาศใน 3 มิติของพื้นที่หรือตารางกริด (grid) ปกติมีขนาดประมาณ 250 x 600กม. มีชั้นในแนวตั้ง 20-30 ชั้น และชั้นในมหาสมุทรอาจสูงถึง 30 ชั้น ขนาดของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกจึงค่อนข้างกว้าง แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกประสานข้อมูลที่มีปริมาณมากในสามมิติให้สามารถเข้าใจได้ด้วย

ทัศนภาพของมนุษย์ เริ่มมีการพัฒนาตั้งแต่ก่อน ค.ศ.1955 โดยเริ่มจากแบบจำลองที่ใช้ทำนาย ภูมิอากาศท้องถิ่น

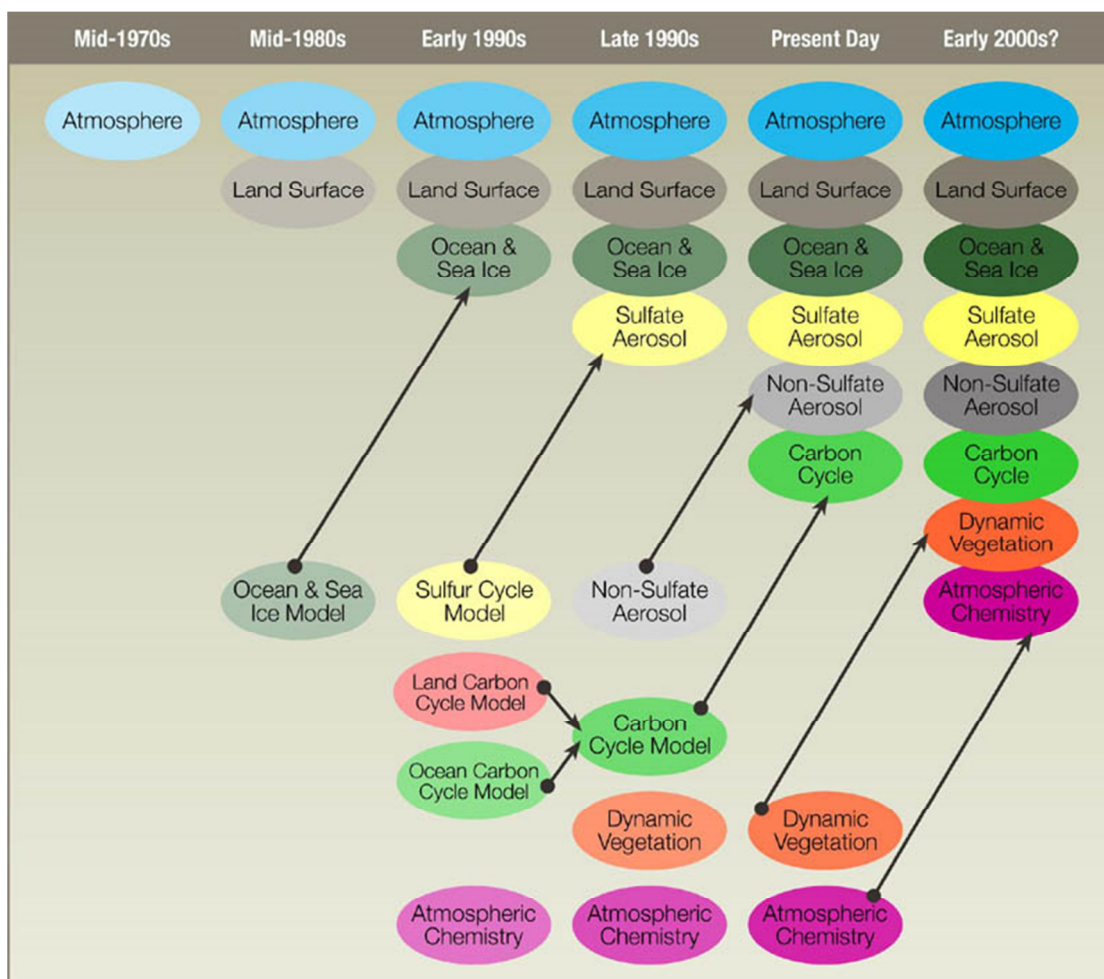


รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการถ่ายเทพลังงานระหว่างส่วนต่างๆใน GCMs ที่นำเสนอโดย IPCC (IPCC, 2007)

ต่อมาในช่วงทศวรรษที่ 60 (1960-1969) เมื่อเครื่องประมวลผลหรือคอมพิวเตอร์มี ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองให้ครอบคลุมถึงการหมุนเวียนของพลังงาน และสสารในอากาศทั่วโลก รวมทั้ง สามารถจำลองภูมิอากาศเฉลี่ยได้ในระยะยาวเป็นทศวรรษหรือ ศตวรรษ โดยในทศวรรษที่ 70 (1970-1979) แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกเป็นที่นิยมอย่าง กว้างขวางในการใช้ทำนายและคาดการณ์ภูมิอากาศในท้องถิ่นและภูมิภาค ในระยะเวลาเดียวกันนี้ นักวิทยาศาสตร์ภูมิอากาศ (climate scientist) เริ่มมีความกังวลถึงผลกระทบในระยะยาวของปริมาณ ก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศ จึงเริ่มมีการนำกิจกรรมของมนุษย์มาเป็นตัวแปรในการ

ประมวลผลด้วย ซึ่งต่างจากในระยะแรกประมาณปีค.ศ.1970 เป็นการใช้ข้อมูลด้านบรรยากาศเพียงอย่างเดียว ผลลัพธ์ที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนจากสภาพความเป็นจริงมากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกมีการพัฒนาให้ใช้การได้ดีขึ้น โดยแบบจำลองรุ่นแรกใช้ข้อมูลภูมิอากาศเป็นหลัก เรียกว่า Atmospheric GCM หรือ AGCM ต่อมาได้มีการเพิ่มข้อมูลด้านอื่นๆ ที่มีปฏิสัมพันธ์กับบรรยากาศเข้าไป เช่น มหาสมุทร โดยการพัฒนา Oceanic General Circulation Models (OGCMs) และนำแบบจำลองนี้ควบ (couple) เข้าด้วยกัน เรียกว่า Ocean Atmospheric General Circulation Models (AOGCMs) โดยเริ่มพัฒนาเป็นครั้งแรกที่ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) แห่ง National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) สหรัฐอเมริกา ในช่วงท้ายของทศวรรษ 1960s ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่เป็น AOGCM มีความใกล้เคียงความจริงมากขึ้น และตั้งแต่ 1980s เป็นต้นมา มีการพัฒนา AOGCMs จากสถาบันต่างๆ ได้แก่ แบบจำลอง HadCM3, GFDLCM2.x, GISS, ECHAM เป็นต้น ซึ่งนับเป็นต้นแบบ (มาตรฐาน) ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ถึงแม้จะยังมีข้อบกพร่องที่ต้องทำการพัฒนาต่อไปอีก แต่ก็มีการปรับปรุงโดยนำแบบจำลองลูกอื่นๆ เช่น ละอองลอยซัลเฟต ละอองลอยที่ไม่ใช่ซัลเฟต วัฏจักรคาร์บอน แบบจำลองพลวัตรีซ เป็นต้น เข้ามาควมรวมด้วย ดังรูปที่ 2.6 จนกระทั่งในปัจจุบัน ผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศมีความชัดเจนขึ้นมาก สามารถสร้างภูมิอากาศในอดีตได้ ใกล้เคียงความจริง

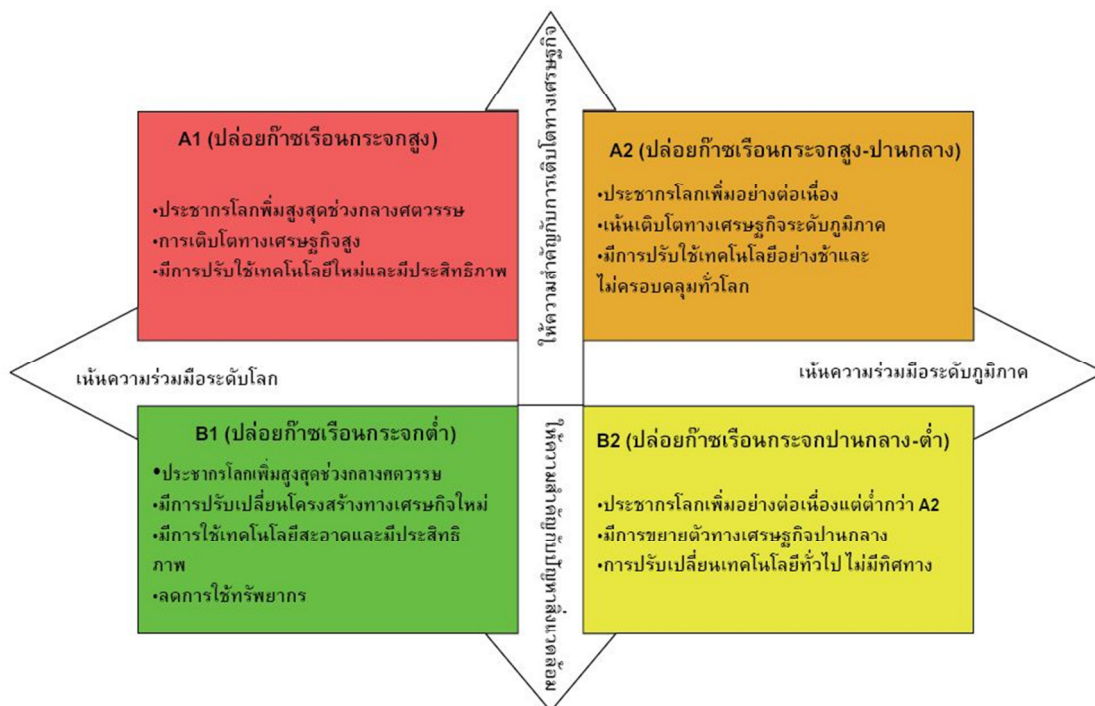
สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 โดยที่ PRECIS ย่อมาจาก Providing Regional Climates for Impacts Studies เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย The Met Office Hadley Centre for Climate Prediction and Research ประเทศอังกฤษ มีเป้าหมายเพื่อการจำลองสภาพภูมิอากาศที่มีความละเอียดสูง (ใช้วิธีการเพิ่มความละเอียดของแบบจำลองโดยวิธีการทางพลวัต _Dynamic downscale) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ



รูปที่ 2.6 การพัฒนาแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (General Circulation Models หรือ GCMs) ตั้งแต่ ค.ศ. 1970 และ อนาคต (IPCC, 2001a)

2.2.4 ภาพจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต (Emission Scenario)

กัทซ์รี่ (2553) กล่าวถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศในอนาคตว่าเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก ปริมาณก๊าซเรือนกระจกอาจจะเปลี่ยนแปลงไปในอนาคตตามแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในทิศทางต่าง ๆ กัน ซึ่งคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC) ได้กำหนดความเป็นไปได้ของการพัฒนาเป็น 4 รูปแบบหลัก ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตจากรายงานของ IPCC (กัททรีย์, 2553)

แบบ A เป็นการพัฒนาโดยให้ความสำคัญกับการเติบโตทางเศรษฐกิจเป็นหลัก โดยแบ่งย่อยเป็น

- แบบ A1 คือ อนาคตการเติบโตทางเศรษฐกิจสูง ประชากรโลกสูงสุดในกึ่งศตวรรษ และลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น มีเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง มีการพัฒนาบุคลากร มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฒนธรรม ความแตกต่างของรายได้ประชาชาติระหว่างภูมิภาคลดลง ภาพจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission scenario) แบบ A1 นี้ ยังแยกออกเป็นภาพจำลองย่อยต่างๆ คือ

- A1FI (Fossil intensive) เป็นการพัฒนาที่ขึ้นอยู่กับพลังงานฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหินอย่างมาก

- A1T (Non-fossil energy sources and technology) เป็นการพัฒนาโดยไม่ใช้พลังงานฟอสซิลเป็นหลักแต่ใช้เทคโนโลยีอื่นๆ แทน

- A1B (Balance of all sources) พัฒนาโดยมีความสมดุลของแหล่งพลังงานที่ใช้ ไม่เน้นการใช้พลังงานฟอสซิล หรือพลังงานหมุนเวียน แต่ให้มีการผสมผสานระหว่างพลังงานทั้งสองแบบ

- แบบ A2 คือ การพัฒนาในอนาคตของโลกมีความหลากหลาย พึ่งตนเองมากขึ้นภายในภูมิภาค มีการอนุรักษ์เอกลักษณ์ท้องถิ่น จำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเศรษฐกิจขึ้นอยู่กับภูมิภาค การเติบโตทางเศรษฐกิจและการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีช้ากว่าแบบอื่น และกระจายตามท้องถิ่นและภูมิภาค

แบบ B เป็นการพัฒนาโดยให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าการพัฒนาแบบ A โดยแบ่งย่อยเป็น

- แบบ B1 เป็นภาพจำลองการพัฒนาที่ในอนาคต ประชากรเพิ่มสูงในตอนกึ่งกลางศตวรรษ เช่นเดียวกับแบบ A1 และลดลงหลังจากนั้น แต่โครงสร้างเศรษฐกิจเปลี่ยนอย่างรวดเร็วไปเป็นภาคบริการและสารสนเทศ ลดการใช้วัตถุ มีการใช้เทคโนโลยีที่สะอาด เน้นที่การแก้ปัญหาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนในระดับนานาชาติมีความเสมอภาค แต่ไม่มีการนำประเด็นด้านภูมิอากาศเป็นแรงจูงใจ

- แบบ B2 เป็นภาพจำลองการพัฒนาที่เน้นการแก้ปัญหาด้านเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนในระดับท้องถิ่นหรือภูมิภาค ประชากรเพิ่มขึ้นต่อเนื่องแต่น้อยกว่า A2 มีการพัฒนาเศรษฐกิจปานกลาง การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีหลากหลายและช้าลงกว่า B1 และ A1 โดยมีการปกป้องสิ่งแวดล้อม และความเสมอภาคของสังคมที่เน้นที่ท้องถิ่นและภูมิภาค

นอกจากนี้ยังมีภาพจำลองของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เรียกว่า IS92 Scenario ซึ่งเป็นภาพจำลองที่กำหนดให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนคงที่ในแต่ละปี เช่น

IS92a มีการเพิ่มขึ้นของของก๊าซเรือนกระจกปีละ 1 % (เฉพาะก๊าซเรือนกระจกและหรือละอองลอยซัลเฟต

IS92d มีการเพิ่มขึ้นของของก๊าซเรือนกระจก 0.5 %

2.2.5 การย่อส่วนของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (Downscale)

การย่อส่วนของแบบจำลอง หรือ การเพิ่มความละเอียดของแบบจำลอง ภาษาอังกฤษใช้คำว่า Downscale จีรสรณ์และเจียมใจ (2554) ได้อธิบายว่า เป็นเทคนิคเพื่อใช้จำลองข้อมูลระดับภูมิภาคในมาตราส่วนที่ละเอียดจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Model, GCMs) เฉพาะในบางพื้นที่ โดยพื้นที่ส่วนอื่นที่ไม่ได้พิจารณายังคงมีมาตราส่วนปกติ เป็นการใช้แนวคิดและเทคนิคที่สามารถจำลองสภาพภูมิอากาศโลกให้มีความละเอียดสูงในบางพื้นที่และบางเวลา โดยไม่ต้องประมวลผล GCMs แต่ใช้ข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ค่าการตรวจวัด อุณหภูมิผิวน้ำทะเล แร้งบังคับจากก๊าซเรือนกระจก ละอองลอยในอากาศ

IPCC (2007) ในรายงานครั้งที่ 4 ได้กล่าวถึงวิธีการ Downscale ของ GCMs ว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ วิธีการย่อส่วนทางพลวัต (Dynamic Downscale) และวิธีการย่อส่วนทางสถิติ (Statistical Downscale)

ศุภกรและคณะ(2552) ได้กล่าวถึงวิธีการ Downscale ว่าในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ วิธีการย่อส่วนทางสถิติ (Statistical Downscale) วิธีการย่อส่วนทางพลวัต (Dynamic Downscale) และวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีการย่อส่วนทางสถิติและวิธีการย่อส่วนทางพลวัต

ดังนั้น พอสรุปได้ว่าปัจจุบันมีวิธีการย่อส่วน (Downscale) อยู่ 3 วิธี คือ วิธีการย่อส่วนทางสถิติ วิธีการย่อส่วนทางพลวัต และวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีการย่อส่วนทางสถิติและวิธีการย่อส่วนทางพลวัต

วิธีการย่อส่วนทางสถิติ (Statistical Downscale)

ศุภกรและคณะ (2552) ได้กล่าวว่าวิธีการย่อส่วนทางสถิติ มีพื้นฐานบนความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองขนาดใหญ่ความละเอียดต่ำ กับปัจจัยที่ได้จากผลการตรวจอากาศในอดีตของพื้นที่ที่จะศึกษา โดยอยู่บนสมมุติฐาน 2 ข้อ ได้แก่ หนึ่ง. ผลการคำนวณและผลการตรวจอากาศในช่วงเวลาเดียวกัน จะต้องมีการเก็บมายาวนานเพียงพอที่จะนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทั้ง 2 ชุด สอง. ความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณและผลการตรวจอากาศในอดีตจนถึงปัจจุบันจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในอนาคต ดังนั้นสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- 1) จัดเตรียมข้อมูลภูมิอากาศท้องถิ่นจากสถานีตรวจวัดอากาศ
- 2) จัดเตรียมข้อมูลจากแบบจำลอง GCMs
- 3) กำหนดรูปแบบฟังก์ชันความสัมพันธ์ทางสถิติและการวิเคราะห์ เช่น ความสัมพันธ์ในลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) และการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เป็นต้น
- 4) ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์
- 5) ประมาณค่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระดับท้องถิ่น
- 6) ประมาณค่าข้อมูลภูมิอากาศในอนาคตของหน่วยแยกต่าง
- 7) สอบเทียบค่าข้อมูลที่ประมาณค่าได้
- 8) จัดทำฐานข้อมูลภูมิอากาศในอนาคต

วิธีการย่อส่วนทางพลวัต (Dynamic Downscale)

ศุภกรและคณะ (2552) เป็นการรวบรวมเอาความรู้ทางด้านพลศาสตร์ฟิสิกส์ของบรรยากาศเพื่อจำลองสภาวะภูมิอากาศแบบเดียวกับที่ใช้ใน GCMs มาสร้างเป็นแบบจำลอง โดยให้บรรยากาศได้มีปฏิสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ที่จะศึกษาในเชิงภูมิอากาศ การ Downscale ด้วยวิธีนี้จะเป็นการคำนวณด้วยแบบจำลอง 2 ครั้งได้แก่ การคำนวณด้วย GCMs เพื่อให้ได้ผลเพื่อใช้ศึกษาในภาพกว้าง สร้างเงื่อนไขเริ่มต้น (InitialCondition) และข้อมูลในบริเวณพื้นที่ขอบ (Boundary Condition) ให้กับการคำนวณด้วยความละเอียดที่สูงขึ้นในพื้นที่เฉพาะที่จะศึกษาต่อไป แบบจำลองความละเอียดสูงที่ใช้คำนวณในพื้นที่เฉพาะจะมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า Regional Climate Models: RCMs หรือแบบจำลองสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาค ซึ่งเป็นแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่มีความละเอียดสูงสำหรับใช้ศึกษาในพื้นที่ขนาดจำกัด ด้วยความละเอียดในทางราบประมาณ 20-50 กม. สร้างบนพื้นฐานของกระบวนการทางฟิสิกส์ของบรรยากาศที่มีความสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพทางภูมิอากาศ เช่น เมฆ การแผ่รังสี ฝน ระบบน้ำและดิน ซึ่งบางกระบวนการที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ จะถูกแก้ปัญหาคด้วยวิธีการที่เรียกว่า “Parameterization” โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางด้านพื้นที่และเวลาเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่ย่อยๆ ของการคำนวณนำไปสู่การไหลเวียนในพื้นที่ขนาดใหญ่ต่อไปเมื่อ RCMs ได้รับข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้นและข้อมูลพื้นที่ขอบจาก GCMs ก็จะนำไปคำนวณใหม่อีกครั้งบนพื้นฐานทางกายภาพของพื้นที่ที่สนใจ โดยมีรายละเอียดต่างๆ มากยิ่งขึ้นเช่น ลักษณะของเส้นขอบฝั่ง ลักษณะ

ทางภูมิประเทศ การใช้ประโยชน์จากพื้นดิน ชนิดของวัสดุที่ปกคลุมดิน ฯลฯ ด้วยสมการและเงื่อนไขทางพลศาสตร์ฟิสิกส์เหมือนกับที่ใช้ใน GCMs ข้อเสียของการ Down scale ด้วยวิธีนี้ได้แก่ ความสิ้นเปลืองทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ ถ้าการคำนวณมีความละเอียดสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งก็จะยิ่งยาวนานขึ้น และความผิดพลาดที่สืบทอดมาจากผลการคำนวณใน GCMs ที่มีกริดของการคำนวณขนาดใหญ่ทำให้ RCMs ไม่สามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะของพื้นที่ในการคำนวณได้ดีเพียงพอ รวมถึงการคำนวณ RCMs แต่ละครั้งมีความต้องการข้อมูลตั้งต้นเป็นจำนวนมากจาก GCMs ทำให้มีปัญหาในเรื่องของการจัดการฐานข้อมูล

กัณษัตรี (2553) กล่าวถึง การเพิ่มความละเอียดด้วยวิธีการทางพลวัต (dynamic downscale) หรือการใช้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาค (regional climate model หรือ RCM) ว่าเป็นวิธีการที่มีความละเอียดสูงที่นำความซับซ้อนของภูมิอากาศมาเป็นตัวแปร แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานและต้องใช้เครื่องประมวลผลที่มีประสิทธิภาพ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาคส่วนมากฝัง (nested) อยู่ในแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกแต่ละแบบซึ่งมีพื้นที่แสดงผลขนาดใหญ่ เช่น 200 X 250 กม. โดยพื้นที่แสดงผลของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาคส่วนใหญ่มีขนาด 50 กม. บางชนิดอาจเล็กถึง 36 X 36 กม. หรือ 10 X 10 กม. ซึ่งต้องมีการป้อนข้อมูลรายละเอียดของพื้นที่เพิ่มตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้นแบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาค ประมวลผลโดยใช้ขอบเขต (boundary) ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก โดยแบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาคมีความละเอียดที่ตรวจจับลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่เป็นตัวแปรท้องถิ่น (regional forcing) เช่น ภูเขา ทะเลสาบ ชายฝั่ง และการใช้พื้นที่ที่หลากหลาย นอกจากนี้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาคยังสามารถพัฒนาการจำลองสถานการณ์ที่รุนแรง เช่น ฝนตกหนัก พายุ ได้ดีขึ้น ให้ข้อมูลด้านภูมิศาสตร์และกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในพิกัดเล็ก และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาผลกระทบได้ชัดเจนขึ้น แบบจำลองสภาพภูมิอากาศภูมิภาคส่วนใหญ่พัฒนาโดยสถาบันที่ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกมาแล้ว โดยการใช้ข้อมูลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกเป็นขอบเขต

วิธีการย่อส่วนทางสถิติ-พลวัต (Statistic and dynamic downscale)

ศุภกรและคณะ (2552) กล่าวว่าเป็นการรวบรวมเอาข้อดีของทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เข้าด้วยกัน โดยการใช้ความสัมพันธ์จากผลการคำนวณด้วย RCMs 2 ครั้ง ดังนี้

1. คำนวณ RCMs ด้วยเงื่อนไขตั้งต้นและขอบเขตที่ได้จากข้อมูลผลการตรวจอากาศ จากปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมวิทยาที่มีขนาดใหญ่และได้รับการตรวจสอบยืนยันแน่นอน ร่วมกับข้อมูลจาก GCMs ในช่วงเวลาที่ไม่มีปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมวิทยาเด่นชัดเพียงพอที่จะใช้กับ RCMs

2. คำนวณ RCMs ด้วยเงื่อนไขตั้งต้นและขอบเขตที่ได้จาก GCMs ตามปกติ ในช่วงเวลาเดียวกันกับวิธีการตามข้อ 1 หลังจากนั้นนำผลของ RCMs ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 ครั้งมาหาความสัมพันธ์ และนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้เป็นเงื่อนไขในการคำนวณเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตด้วย RCMs ต่อไป ข้อดีและข้อเสียของตัวแปรแรกก็นำมาใช้หาความสัมพันธ์จะเหมือนกับข้อดีและข้อเสียของวิธีการทางสถิติเพียงอย่างเดียว คือเรื่องการจำกัดของข้อมูลตรวจอากาศ ทั้งในเรื่องของความหนาแน่นและความยาวนานของข้อมูล แต่เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของผลที่ได้ทั้งหมดจะสามารถให้ผลการทำนายที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำผลลัพธ์จากแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 scenario A2 ซึ่งถือเป็นแบบจำลองระดับภูมิภาค (RCMs) แล้ว แต่เมื่อนำผลลัพธ์มาเทียบกับข้อมูลในอดีตที่ได้จากสถานีวัดน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา ปรากฏว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจำเป็นต้องใช้หลักการทางสถิติมาทำการย่อส่วน (Downscale) ในความหมายของการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน (Calibration) อีกครั้ง ผู้วิจัยเลือกวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta factor) ในการปรับความคลาดเคลื่อน ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.6

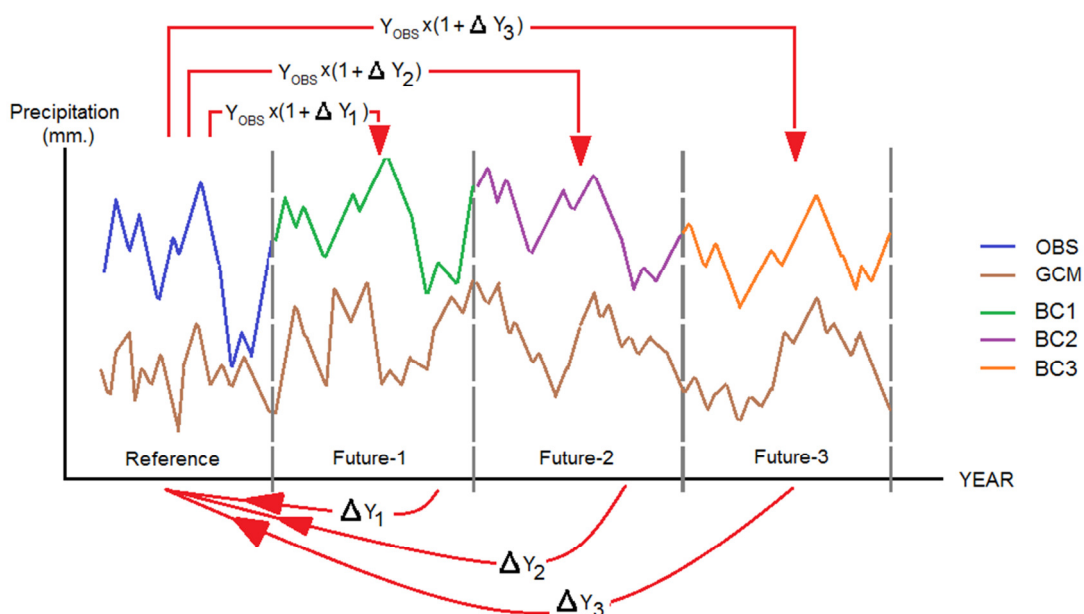
2.2.6 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (Statistic Bias Correction)

การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ โดยใช้วิธีเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta factor) ซึ่งถือเป็นวิธีการทางสถิติวิธีการหนึ่ง Wilby et al. (2010) ได้อธิบายไว้ว่าวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ คือ การหาค่าแฟกเตอร์ของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกในส่วนของอนาคต (ช่วงปีในอนาคต) กับส่วนที่ควบคุม (ช่วงปีฐานหรือ Baseline) รายละเอียดของการคำนวณหาค่าเดลต้าแฟก

เตอร์ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.6.1 เมื่อได้ค่าเดลต้าแฟกเตอร์แล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการกระจายเดลต้าแฟกเตอร์ที่คำนวณได้ไปยังฝนรายวันที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีวัดน้ำฝน ซึ่งแบ่งการกระจายเดลต้าแฟกเตอร์ออกเป็น 3 แบบ ตามที่ Prudhomme et al. (2002) ได้เสนอไว้ คือ แบบสัดส่วน (Proportion) แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) และแบบเพิ่มวันที่ฝนตก (Add rain day) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แบ่งเป็น แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) รายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.6.2

2.2.6.1 การคำนวณค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor)

วิธีการคำนวณหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์อธิบายได้โดยรูปที่ 2.8 เส้นสีน้ำเงิน (OBS) คือ ฝนจากการตรวจวัดจริงในช่วงเวลาในอดีต ที่ได้จากสถานีวัดน้ำฝนโดยกำหนดให้เป็นปีฐาน (Baseline หรือ Reference) และเส้นสีน้ำตาล (GCM) คือ ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก ซึ่งมีทั้งช่วงเวลาในอดีต (Baseline หรือ Reference) และช่วงเวลาในอนาคต จำนวนปีของข้อมูลฝนที่ตรวจวัดได้ในอดีตจากสถานีวัดน้ำฝนจะเป็นตัวกำหนดจำนวนปีของปีฐาน



รูปที่ 2.8 ภาพประกอบการคำนวณหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์และการกระจายแบบสัดส่วน (Proportion)

OBS คือ ฝนจากการตรวจวัดจริง, GCM คือ ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก,

BC1, 2, 3 คือ ฝนจากผลการทำ Bias Correction ชุดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เส้นสีเขียว (BC1) คือ ฝนจากผลการทำ Bias Correction ชุดที่ 1 หรือ อนาคตอันใกล้ (Near Future)
 เส้นสีม่วง (BC2) คือ ฝนจากผลการทำ Bias Correction ชุดที่ 2 หรือ อนาคตช่วงกลาง (Intermediate Future)
 เส้นสีเขียว (BC3) คือ ฝนจากผลการทำ Bias Correction ชุดที่ 3 หรือ อนาคตอันไกล (Far Future)

$$\Delta Y = \frac{\bar{Y}_{GCM,Future} - \bar{Y}_{GCM,Baseline}}{\bar{Y}_{GCM,Baseline}} \times 100\% \quad (2.1)$$

ΔY คืออัตราส่วนผลต่างระหว่างปริมาณฝนจาก GCM ในอนาคตกับปีฐานเทียบกับปีฐานซึ่งเป็นปีที่ตรงกับปีที่มีข้อมูลฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยาย้อนหลัง

$\bar{Y}_{GCM,Future}$ คือค่าเฉลี่ยปริมาณฝนจาก GCM ในอนาคต อาจจะเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนหรือรายปีขึ้นอยู่กับการศึกษา

$\bar{Y}_{GCM,Baseline}$ คือค่าเฉลี่ยฝนจาก GCM ในปีฐาน

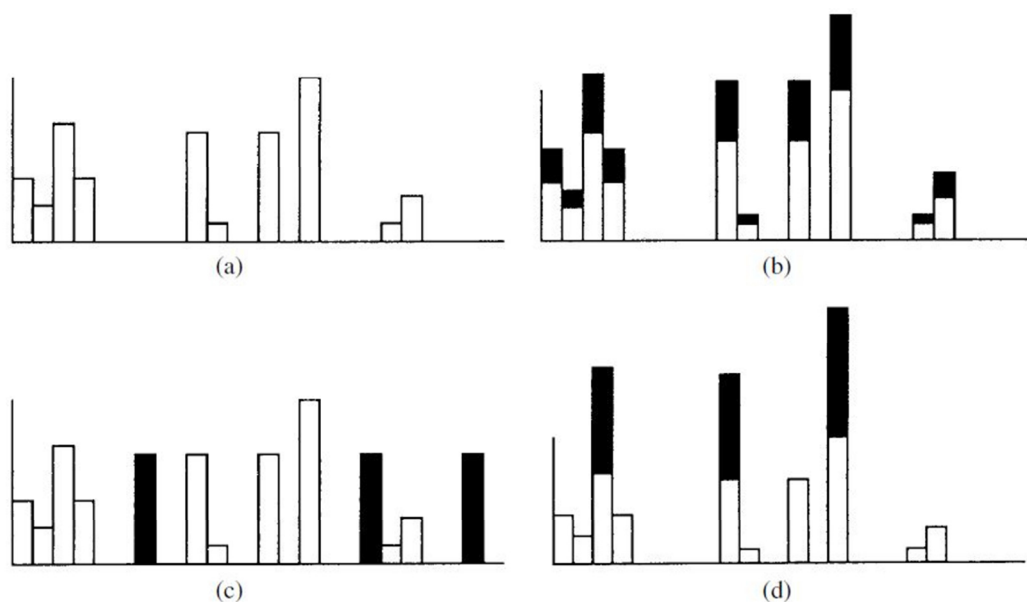
2.2.6.2 การกระจายค่าปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)

ค่าคลาดค่าแฟกเตอร์ (ΔY) ที่คำนวณได้จากหัวข้อ 2.2.6.1 เป็นแฟกเตอร์ที่แสดงผลต่างระหว่างชุดข้อมูลฝนในอนาคตกับชุดข้อมูลฝนของปีฐาน (Baseline) ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) เนื่องจากสมมติฐานของการทำ Bias Correction ที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) และผลการตรวจวัดปริมาณฝนในอดีตจนถึงปัจจุบันจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในอนาคต ดังนั้นจึงสามารถนำค่าคลาดค่าแฟกเตอร์ (ΔY) เข้าไปคูณในชุดข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตหรือปีฐาน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ คือ “ปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)” ซึ่งปริมาณฝนส่วนต่างที่ได้มานี้ จะถูกกระจายเข้าไปในชุดข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตหรือปีฐานอีกครั้งด้วยวิธีการต่างๆ

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนขึ้น Prudhomme et al. (2002) ได้ใช้รูปภาพที่ 2.9 อธิบายวิธีการกระจายคลาดค่าแฟกเตอร์ จากรูปกราฟแท่งสี่ค่าทึบ เป็นปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการนำฝนรายเดือน

ของปีฐาน (น้ำฝนที่ได้จากการตรวจวัด) คู่กับเดลต้าแฟกเตอร์ (ΔY) ที่คำนวณได้จากสมการ 2.1 ในหัวข้อ 2.2.6.1 แล้วนำไปกระจายให้กับน้ำฝนรายวันของเดือนต่างๆที่ได้จากการตรวจวัด (OBS)

วิธีแรก คือ การกระจายแบบสัดส่วน (Proportion) ในรูปที่ 2.9 (b) เป็นการนำเดลต้าแฟกเตอร์ (ΔY) ไปคูณกับฝนรายวันที่ได้จากการตรวจวัดในอดีต แล้วได้ “ปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)” จากนั้นนำฝนส่วนต่างนี้ไปบวกเพิ่มกับฝนรายวันที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตหรือปีฐาน ก็จะได้ฝนรายวันใหม่ ซึ่งเป็นฝนรายวันในอนาคต รูปที่ 2.8 ประกอบจะเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.9 ภาพประกอบการกระจาย เดลต้าแฟกเตอร์แบบต่างๆ , (a) คือ ชุดข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดจริง, (b) คือ การกระจายเดลต้าแฟกเตอร์แบบสัดส่วน (Proportion) ,(c) คือ การกระจายเดลต้าแฟกเตอร์แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) , (d) คือ การกระจายเดลต้าแฟกเตอร์แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm)

ที่มา: Prudhomme et al. (2002)

วิธีที่สอง เป็นการนำฝนส่วนต่าง (Delta) ที่แบ่งเป็น 3 ส่วนเท่ากัน ไปกระจายในวันใดก็ได้ในเดือนนั้น เพื่อให้ในเดือนนั้นมีจำนวนวันที่ฝนตกเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำฝนมากขึ้น รูปที่ 2.9 (c) ประกอบ ในกรณีที่ค่าฝนส่วนต่าง (Delta) เป็นลบ ก็ไปตัดวันที่ฝนตกออก 3 วัน เพื่อลดวันที่ฝนตก

และลดปริมาณน้ำฝนลง แบบนี้ถูกเรียกว่า แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) สำหรับกรณีเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ก็ทำแบบเดียวกัน โดยไม่ต้องแบ่งฝนส่วนต่าง (Delta) ออกเป็นสามส่วน

วิธีที่สาม เป็นการนำปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) ไปแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่ากัน แล้วนำไปบวกเพิ่มในวันที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 1, 2 และ 3 ของเดือนนั้น เพื่อให้ในเดือนนั้นมีปริมาณน้ำฝนมากขึ้น รูปที่ 2.9 (d) ประกอบ ในทางกลับกัน กรณีที่ปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) เป็นลบ ก็นำปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) ไปลบในวันที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 1, 2 และ 3 ของเดือนนั้น เพื่อให้ในเดือนนั้นมีปริมาณน้ำฝนลดลง วิธีนี้ถูกเรียกว่า แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm)

2.2.7 การวิเคราะห์ความถี่ (Frequency Analysis) และ รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period)

การวิเคราะห์ความถี่ (Frequency Analysis) ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ของเหตุการณ์สุดขีด (Extreme Event) รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ โดยใช้วิธีการของ Gumbel

การวิเคราะห์ความถี่ของ Gumbel

ในปี 1941 Gumbel ได้เสนอฟังก์ชันการกระจายค่าสุดขีด (Extreme value distribution) ซึ่งใช้ในงานอุตุนิยมวิทยา เพื่อหาโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์สุดขีด (Extreme Event) หรือมากกว่า เหตุการณ์สุดขีดที่พิจารณา ดังสมการที่ 2.2, 2.3 และ 2.4

$$I_T = \bar{I} + K\sigma \quad (2.2)$$

$$K = \frac{Y_T - \bar{Y}_n}{S_n} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(1-D)^2}{N-1}} \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวแปรเปลี่ยนรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, S_n

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	.9496	.9676	.9833	.9971	1.0095	1.0206	1.0316	1.0411	1.0493	1.0565
20	1.0628	1.0696	1.0754	1.0811	1.0864	1.0915	1.0961	1.1004	1.1047	1.1086
30	1.1124	1.1159	1.1193	1.1226	1.1255	1.1285	1.1313	1.1339	1.1363	1.1388
40	1.1413	1.1436	1.1458	1.1480	1.1499	1.1519	1.1538	1.1557	1.1574	1.1590
50	1.1607	1.1623	1.1638	1.1658	1.1667	1.1681	1.1696	1.1708	1.1721	1.1734
60	1.1747	1.1759	1.1770	1.1782	1.1793	1.1803	1.1814	1.1824	1.1834	1.1844
70	1.1854	1.1863	1.1873	1.1881	1.1890	1.1898	1.1906	1.1915	1.1923	1.1930
80	1.1938	1.1945	1.1953	1.1959	1.1967	1.1973	1.1980	1.1987	1.1994	1.2001
90	1.2007	1.2013	1.2020	1.2026	1.2032	1.2038	1.2044	1.2049	1.2055	1.2060
100	1.2065									

รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period)

โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ใดๆที่มากกว่าหรือเท่ากับเหตุการณ์ที่พิจารณา จะถูกแสดงในพจน์ของ รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period , T) โดยรอบปีการเกิดซ้ำจะแปรผกผันกับความเป็นไปได้ หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ (Probability , P) ดังสมการ 2.5

$$T = \frac{1}{P} \quad (2.5)$$

เมื่อ T = รอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period)

P = ความเป็นไปได้ (Probability)

สำหรับความเป็นไปได้ หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ (Probability) มีสมการทั่วไปดังสมการที่ 2.6

$$P = \frac{m - a}{N + b} \quad (2.6)$$

- เมื่อ m = ลำดับที่ของเหตุการณ์ (Order number of event)
 N = จำนวนข้อมูลหรือเหตุการณ์ทั้งหมด (Total Number of Event)
 a, b = ค่าคงที่ของแต่ละสมการที่เลือกใช้ ดังตารางที่ 2.3

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สมการของ Weibull ในการหาความน่าจะเป็น ดูตารางที่ 2.3 ดังนั้นเมื่อแทนค่าความน่าจะเป็น หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ (Probability , P) จากสมการของ Weibull ลงในสมการที่ 2.5 ก็จะได้สมการ 2.7

$$T = \frac{N + 1}{m} \quad (2.7)$$

ตารางที่ 2.3 สมการการหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ P

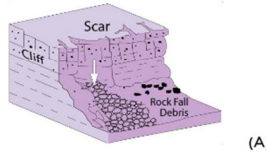
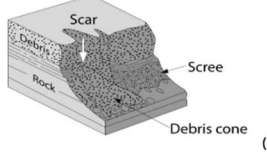
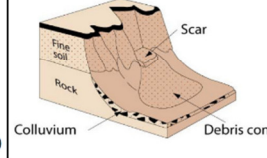
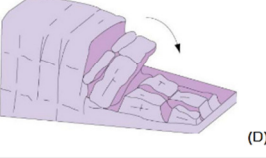
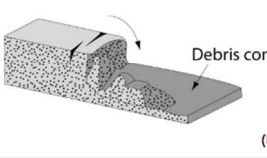
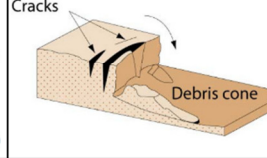
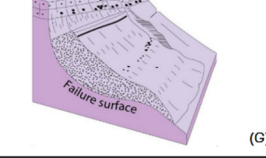
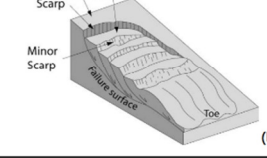
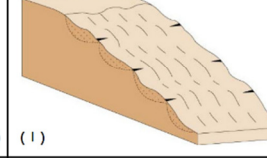
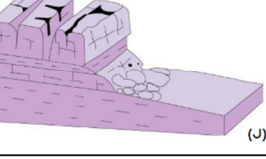
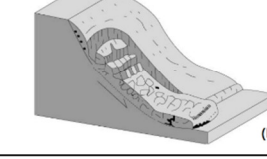
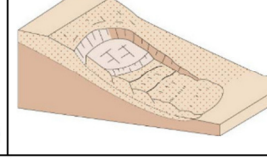
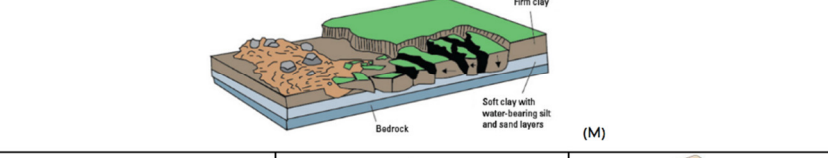
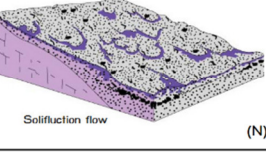
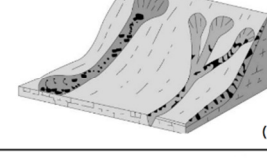
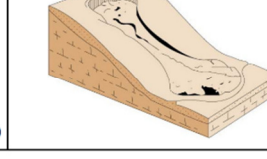
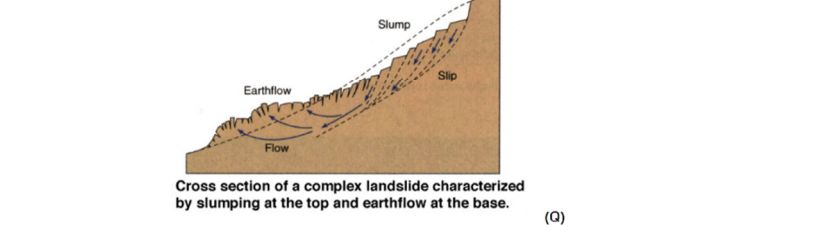
สมการของ	ปี ค.ศ	a	b	สมการหาค่า P
Hazen	1914	0.50	0.00	$\frac{m - 0.5}{N}$
California	1923	0.00	0.00	$\frac{m}{N}$
Weibull	1939	0.00	1.00	$\frac{m}{N + 1}$
Beard	1943	0.31	0.38	$\frac{m - 0.31}{N + 0.38}$
Chegodayev	1955	0.30	0.40	$\frac{m - 0.30}{N + 0.40}$
Blom	1958	0.375	0.25	$\frac{m - 0.375}{N + 0.25}$
Gringorten	1963	0.44	0.12	$\frac{m - 0.44}{N + 0.12}$
Cunnane	1978	0.40	0.20	$\frac{m - 0.40}{N + 0.20}$
Adamowski	1981	0.25	0.50	$\frac{m - 0.25}{N + 0.50}$

2.3 ดินถล่ม (Landslide)

ดินถล่ม (Landslide) เป็นกระบวนการเคลื่อนตัวของมวลดิน หรือหิน ลงมาตามความลาดชัน (Slope) ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) เป็นหลัก โดยอาจอาศัยตัวกลางในการนำพามวลดิน เช่น น้ำ, ลมและธารน้ำแข็ง เป็นต้น ซึ่งตัวกลางเหล่านี้เป็นตัวช่วยเสริมการย้ายมวลดิน ดังนั้นหากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเม็ดดินจะลดลง การย้ายมวลดินจึงเกิดขึ้นได้ดี ดินถล่มที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ส่วนใหญ่ น้ำ เป็นตัวกลางนำพาให้เกิดดินถล่ม

2.3.1 ลักษณะและรูปแบบการเกิดดินถล่ม

ลักษณะและรูปแบบของการเกิดดินถล่มมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์การจำแนกเช่น ความเร็วและกลไกในการเคลื่อนตัว ชนิดของมวลดินที่พังทลาย รูปร่างของรอยดินถล่ม และปริมาณของน้ำที่เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการดินถล่ม เป็นต้น แต่ที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันนี้ คือ การจำแนกของ Varnes หลักเกณฑ์การจำแนกของ Varnes (1978) คือ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน 1.) ชนิดของของวัสดุที่พังทลายลงมา (Type of material) และ 2.) ลักษณะการเคลื่อนที่ (Type of movement) คูรูปที่ 2.10 ประกอบ ซึ่งที่มาของรูป ได้จากการรวบรวมจากแหล่งต่างๆดังนี้ (A – P) ยกเว้น (M) ได้จากเว็บไซต์ British Geological Survey , (http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html), (M) จาก Highland&Bobrosky(2008), (Q) จากเว็บไซต์ Eastern Illinois University , <http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1300/complex.html>

Type of Movement ชนิดของการเคลื่อนตัว	Type of Material ชนิดของดินตะกอน		
	หิน (Rock)	ดินตะกอนหยาบ (Debris)	ดินตะกอนละเอียด (Earth)
FALLS (ถล่ม)			
TOPPLES (ล้มท้วม)			
SLIDES (ไถล)	ROTATIONAL (CIRCULAR) 		
	TRANSLATIONAL (PLANAR) 		
LATERAL SPREADS (เคลื่อนออกทางด้านข้าง)			
FLOWS (ถล่ม)			
COMPLEX (ซับซ้อน)	 Cross section of a complex landslide characterized by slumping at the top and earthflow at the base. (Q)		

รูปที่ 2.10 ชนิดของดินถล่มตามการจำแนกของ Varnes (1978)

Varnes (1978) แบ่งชนิดของของวัสดุที่ถล่มลงมา ออกเป็น 3 ชนิดคือ หิน (Rock) , ดิน ตะกอนหยาบ (Debris) และ ดินตะกอนละเอียด (Earth) ซึ่งความแตกต่างระหว่าง Debris และ Earth พิจารณาจากขนาดของเม็ดดินที่เป็นส่วนประกอบของตะกอนดินที่ถล่มลงมา กล่าวคือ Earth เป็น ตะกอนมวลดินที่มีขนาดของเม็ดดินเล็กกว่า 2 มิลลิเมตรตั้งแต่ 80% ขึ้นไปเป็นส่วนประกอบอยู่ใน มวลดินนั้น ส่วน Debris คือ ตะกอนมวลดินที่มีขนาดของเม็ดดินใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร เป็น ส่วนประกอบอยู่ในมวลดินนั้น ตั้งแต่ 20% ถึง 80% หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า Debris คือ เม็ดดิน ของตะกอนที่มีขนาดหยาบกว่า Earth

สำหรับชนิดของการเคลื่อนตัว สามารถแบ่งได้เป็น 6 รูปแบบ ดังนี้

การร่วงหล่น (Falls) เป็นการเคลื่อนตัวด้วยความเร็วลงมาตามลาดชัน เช่น หน้าผา ด้วย อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก อาจเกิดการตกอย่างอิสระหรือมีการกลิ้งลงมาตามลาดชัน ตะกอนดินหรือหินที่ร่วงหล่นลงมา จะกองสะสมอยู่บริเวณเชิงเขาหรือหน้าผา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (A),(B) และ (C)

การล้มคว่ำ (Topples) เป็นการเคลื่อนตัวที่มีการหมุนหรือล้มคว่ำลงมาตามลาดชัน เป็น รูปแบบของการเคลื่อนตัวเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวแบบอื่นต่อเนื่องตามมา เช่น การร่วง หล่น (Falls) หรือแบบลื่นไถล (Slides) การเคลื่อนตัวในลักษณะนี้มักพบบริเวณเชิงหน้าผาดินหรือ หินที่มีรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (D),(E) และ (F)

การลื่นไถล (Slides) การเคลื่อนตัวแบบนี้จะมีน้ำเข้ามาเป็นตัวกลางพัดพาเสมอสามารถ จำแนกตามลักษณะของระนาบพิบัติ (Failure plan) ได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

ก) **การลื่นไถลแบบหมุน (Rotational Slide)** เป็นการลื่นไถลของมวลดินที่มีระนาบพิบัติ เป็นรูปโค้งครึ่งวงกลมคล้ายช้อน (Spoon-Shaped) ทำให้มีการหมุนตัวของตะกอนดินขณะเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (G),(H) และ (I) ดินถล่มแบบนี้มักเกิดขึ้นในบริเวณที่ดินมีความเป็นเนื้อ เดียวกัน (Homogeneous Material) เช่น ดินถม และดินที่มีชั้นดินหนา

ข) **การลื่นไถลแบบระนาบ (Translational Slide)** เป็นการลื่นไถลของมวลดินมีระนาบ พิบัติเป็นระนาบตรง ซึ่งมักเป็นการเคลื่อนตัวตามระนาบของโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น ระนาบ การวางตัวของชั้นหิน (Bed Rock) และรอยต่อระหว่างชั้นดินและชั้นหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (J),(K) และ (L)

การแผ่ออกทางด้านข้าง (Lateral Spread) มักเกิดบนพื้นที่ที่มีความลาดชันน้อย ชั้นดินประกอบด้วยตะกอนละเอียดที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยมีแรงสั่นสะเทือนเป็นตัวขับ เช่นแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว เป็นต้น หรือมีสาเหตุมาจากการที่มีชั้นหินหรือชั้นดินแข็งที่ไม่อุ้มน้ำวางทับอยู่บนชั้นดินที่อุ้มน้ำ เมื่อชั้นดินที่อุ้มน้ำถูกทับด้วยน้ำหนักที่มากก็จะไหลออกด้านข้างทำให้ชั้นหินหรือชั้นดินแข็งที่อยู่ด้านบนแตกและยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (M)

การไหล (Flows) เป็นการเคลื่อนที่ของมวลดินไปบนพื้นระนาบของลาดชันลง ไปกองทับถมกันที่ด้านล่างลาดชันหรือเชิงเขา การบีบอัดของลาดดินแบบนี้มีน้ำเป็นตัวกลางพัดพามากที่สุด น้ำทำให้ตะกอนดินมีสภาพเป็นของไหล ตะกอนดินดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางไกลและความเร็วในการเคลื่อนที่อาจสูงมาก ขึ้นอยู่กับความชันของลาดดิน ดินถล่มแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.10 (N),(O) และ (P)

การพิบัติแบบผสม (Complex) เป็นการพิบัติที่มีหลายรูปแบบผสมกันในการพิบัติครั้งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (Q)

จากการศึกษาข้อมูลเหตุการณ์ดินถล่ม ในพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มในประเทศไทย ส่วนใหญ่พบว่ารอยของดินถล่มมีลักษณะเกิดร่วมกันได้หลายแบบ (Complex) และมักเกิดตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือในร่องขนาดเล็กบนลาดเขาที่น้ำมักไหลมารวมกันเมื่อมีฝนตก และมีความลาดชันสูงมากกว่า ร้อยละ 30 (วรวิฑูรี, 2535) และเมื่อพิจารณาเฉพาะจุดบนภูเขาสูงพบว่าบริเวณที่ชั้นดินหนาส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบ Debris Flow และ Rotational slide ส่วนบริเวณที่ชั้นดินบางจะเป็นแบบ Translational slide เป็นส่วนใหญ่ และจากการที่ดินถล่มในประเทศไทย ส่วนใหญ่เกิดร่วมกับปรากฏการณ์ที่มีฝนตกและมีปริมาณน้ำฝนสูง ดังนั้นชนิดของดินถล่มโดยภาพรวม จึงเป็นแบบ Flows ตะกอนดินที่พังทลายเนื่องจากดินถล่มก็จะถูกพัดพาโดยน้ำ ออกจากที่เกิดการถล่มลงไปสู่ด้านล่าง ก่อนที่จะไหลลงมากองทับถมกันบริเวณที่ราบเชิงเขาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัดหน้าหุบเขา ซึ่งเป็นรูปแบบของ Debris flow (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี, 2553) สำหรับกรณีดินถล่มที่ตำบลเทพราชเป็นแบบ Debris Slide (รูปที่ 2.10 (O)) และพัฒนาต่อไปเป็นแบบ Debris Flow (รูปที่ 2.10 (K))

2.3.2 ประวัติเหตุการณ์การเกิดดินถล่มในภาคใต้ของประเทศไทย

จากการค้นคว้าจากเอกสารและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปเหตุการณ์การเกิดดินถล่มในพื้นที่ภาคใต้จากอดีตจนถึงปีพ.ศ 2554 ได้ดังตารางที่ 2.4 จากข้อมูลดังกล่าวปรากฏว่าตลอด 50 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ 2505 ถึง 2554) มีเหตุการณ์ดินถล่มทั้งที่รุนแรงและไม่รุนแรง รวมกันแล้วเกินกว่า 30 เหตุการณ์ ทั้งนี้นับเฉพาะเหตุการณ์ที่มีบันทึกเอาไว้เท่านั้น

ตารางที่ 2.4 เหตุการณ์ดินถล่มในพื้นที่ภาคใต้ ที่มีสาเหตุมาจากฝนตก

เดือน ปี	พื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม	แหล่งข้อมูล
ต.ค 2505	อ.เขาพนม จ.กระบี่	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ต.ค 2505	แหลมตะลุมพุก จ.นครศรีธรรมราช	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
พ.ย 2513	อ.ทับสะแก จ.ประจวบคีรีขันธ์	วรากร (2549)
ม.ค 2518	อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	วรากร (2549)
พ.ศ 2518	อ.ศรีบรรพต จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
พ.ศ 2524	อ.ศรีนครินทร์ จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ธ.ค 2525	อ.ศรีบรรพต จ.พัทลุง	วรากร (2549)
พ.ย 2531	อ.นาสาร จ.สุราษฎร์ธานี	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
พ.ย 2531	ต.กะทูน อ.พิปูน, อ.ลานสะกา จ.นครศรีธรรมราช	วรากร (2549)
ส.ค 2540	อ.ละอุ่น จ.ระนอง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ส.ค 2543	ต.พะโต๊ะ อ.พะโต๊ะ จ.ชุมพร	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ต.ค 2544	ต.ป่าตอง อ.กระบุรี จ.ภูเก็ต	ชนพจน์ (2560)
ต.ค 2547	ต.เขาคราม, ต.อำวนาง อ.เมือง จ.กระบี่	วรากร (2549)
ต.ค 2547	อ.คีรีรัฐนิคม จ.สุราษฎร์ธานี	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ธ.ค 2547	อ.ธารโต จ.ยะลา	ชนพจน์ (2560)
พ.ย 2548	ต.ตะแพน อ.ศรีบรรพต, อ.เมือง, ต.คลองเฉลิม อ.กงหรา จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ธ.ค 2548	อ.บันนังสตา จ.ยะลา	ชนพจน์ (2560)

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) เหตุการณ์ดินถล่มในพื้นที่ภาคใต้ ที่มีสาเหตุมาจากฝนตก

เดือน ปี	พื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม	แหล่งข้อมูล
ธ.ค 2548	อ.บันนังสตา จ.ยะลา	ชนพจน์ (2560)
ส.ค 2549	ต.คลองสก อ.ตะกั่วป่า จ.พังงา	ชนพจน์ (2560)
ส.ค 2549	ต.กระทุ่ม อ.กระทุ่ม จ.ภูเก็ต	ชนพจน์ (2560)
ก.ย 2549	ต.บ้านส้อง อ.เวียงสระ จ.สุราษฎร์ธานี	ชนพจน์ (2560)
ม.ค 2550	อ.นาหม่อม จ.สงขลา	ชนพจน์ (2560)
พ.ย 2551	ต.บ้านนา อ.ศรีนครินทร์, ต.ตะแพน อ.ศรีบรรพต จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
ก.ค - ต.ค 2552	อ.กระบุรี, อ.สุขสำราญ, อ.เมือง จ.ระนอง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
พ.ย 2552	ต.ปากทรง อ.พะโต๊ะ จ.ชุมพร	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
พ.ย 2553	ต.ลำสินธุ์ อ.ศรีนครินทร์ จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	อ.ห้วยยอด จ.ตรัง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	อ.สวี, อ.หลังสวน จ.ชุมพร	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	หลายอำเภอ จ.ระนอง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	อ.กาญจนดิษฐ์, อ.ไชยา จ.สุราษฎร์ธานี	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	ต.เทพราช อ.ลิซล จ.นครศรีธรรมราช	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	ต.เขาพนม อ.เขาพนม จ.กระบี่	กรมทรัพยากรธรณี (2554)
มี.ค 2554	ต.ทุ่งชุมพล อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง	กรมทรัพยากรธรณี (2554)

2.4 การไหลซึมของน้ำในมวลดินและแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

น้ำใต้ดินเป็นปัจจัยหลักอันหนึ่งของปัญหาเสถียรภาพลาดดิน ความรู้เกี่ยวกับการไหลซึมของน้ำใต้ดินจึงเป็นเงื่อนไขในการวิเคราะห์และออกแบบเสถียรภาพลาดดิน ในหัวข้อนี้จะอธิบายทฤษฎีการไหลซึมของน้ำในมวลดินและแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินโดยสังเขป

2.4.1 ทฤษฎีการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

การไหลซึมของน้ำใต้ดิน ได้รับอิทธิพลมาจากพลังงานและแรงภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วงของโลก แรงดันอากาศ และแรงคูลด์ที่เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การไหลของน้ำถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของน้ำ คือการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางที่ไม่แน่นอน และการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของน้ำมีการเคลื่อนที่ตามๆกันไปอย่างช้าๆ การไหลของน้ำผ่านมวลดินที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดเล็ก และดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) เป็นการไหลแบบราบเรียบ จึงสามารถทำการวิเคราะห์และคำนวณได้ โดยอาศัยกฎของดาร์ซี

2.4.1.1 กฎของดาร์ซี

ในปี 1856 Henry Darcy ได้เสนอกฎการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง (แท่งทราย) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหล (Velocity, v) และค่าลาดระดับน้ำ (Hydraulic Gradient, i) ดังสมการ 2.8

$$v \propto i \quad (2.8)$$

หรือเขียนใหม่ได้สมการ 2.9

$$v = k \cdot i \quad (2.9)$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวกลาง (ดิน) (Hydraulic Conductivity) และอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

i = ค่าลาดระดับน้ำ (Hydraulic Gradient) เป็นความต่างศักย์ของน้ำหารด้วยความยาวช่องทางการไหล เขียนได้เป็นสมการที่ 2.10

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.9)$$

และอัตราการไหลในหนึ่งหน่วยเวลา (Q) มีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางน้ำไหล (A) คูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของการไหล ดังสมการที่ 2.11

$$Q = A \cdot v \quad (2.11)$$

หรือเขียนในรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่ากฎของดาร์ซี (Darcy 's Law)

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.12 เป็นสมการแสดงการไหลในทิศทางเดียว สำหรับการไหล 2 ทิศทาง คือ x และ y อัตราการไหลของน้ำจากกฎของดาร์ซีสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.13

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.13)$$

และสำหรับการไหล 3 ทิศทาง คือ x, y และ z อัตราการไหลของน้ำจากกฎของดาร์ซีสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.14

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่ H คือ พลังงานศักย์น้ำรวม (total head), k_x คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง x , k_y คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง y , k_z คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง z

2.4.1.2 ทฤษฎีการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ต่อมาได้มีการพัฒนาสมการที่สามารถใช้ได้กับการไหลของน้ำผ่านชั้นดินที่อิ่มตัวและดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated and unsaturated soil) ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (2.15)$$

โดยที่ H คือ พลังงานศักย์น้ำรวม (total head) , k_x คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง x , k_y คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง y , Q คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้า-ออกในระบบที่พิจารณา, m_w คือ ความชันของกราฟเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (soil-water characteristic curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (Volumetric Water Content) และแรงดูด (Matric Suction) ของน้ำในช่องว่างของดิน , u_w คือแรงดันน้ำในช่องว่างของดิน (pore water pressure) และ t คือเวลา สมการนี้เป็นการวิเคราะห์การไหลเข้า-ออกของน้ำในระบบที่พิจารณาตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง เรียกว่าวิเคราะห์แบบนี้ว่า Transient state Analysis ในกรณีที่มีการไหลเข้า-ออกนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเรียกว่า Steady state Analysis ดังสมการที่ 2.16

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.15 จะพบว่าค่าแรงดันน้ำในดินจะแปรตามปริมาณน้ำฝน คือค่า Q , ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินและลักษณะอรรถลักษณะของชั้นดิน (soil-water characteristic curve) ในรูปของ m_w ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการทั้งสองคือค่าแรงดันน้ำสำหรับการคำนวณกำลังเฉือนของดิน เพื่อไปคำนวณเสถียรภาพลาดดินต่อไป

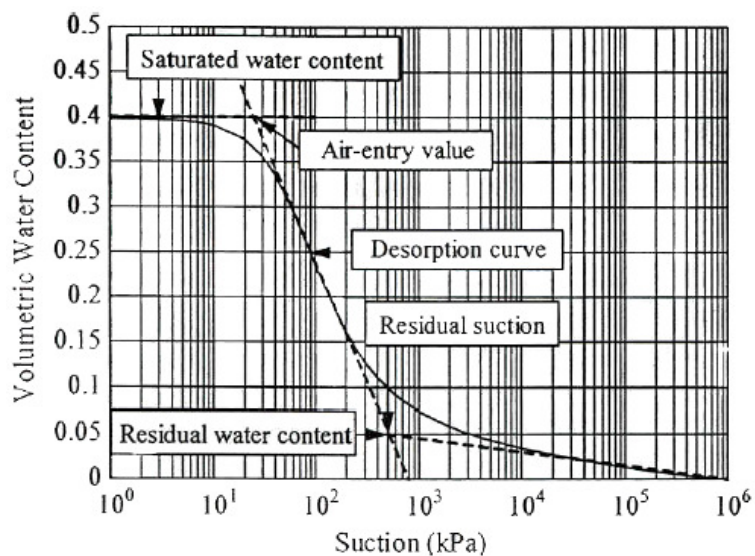
2.4.1.3 เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil-Water Characteristic Curve)

เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (soil-water characteristic curve, SWCC) รูปที่ 2.11 และ 2.12 ประกอบ เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดินเป็นคุณสมบัติทางชลศาสตร์ในด้านการกักเก็บน้ำในมวลดิน ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในมวลดิน (Volumetric Water Content) กับแรงดูด (Suction) ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นผลต่างของแรงดันอากาศและแรงดันน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ($u_a - u_w$) เรียกว่า Matric Suction

การทดสอบเพื่อหา SWCC โดยตรงสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ แต่ผู้ทดสอบต้องมีความชำนาญ และใช้เวลาในการทดสอบนาน รวมถึงมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงมีผู้เสนอวิธีการหา SWCC ทางอ้อมที่ทำได้รวดเร็วกว่าและให้ค่าที่ยอมรับได้ ได้แก่

Van Genuchten (1980) ได้เสนอสมการเส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Governing Equation) ซึ่งเป็นฟังก์ชันการประมาณความชื้นในมวลดิน (Volumetric Water Content) กับแรงดูดของน้ำใน

มวลดิน (Matric Suction) เมื่อทราบค่า ความชื้นในมวลดินที่สภาวะอิ่มตัว (Saturated Volumetric Water Content) และความชื้นในมวลดินที่คงค้าง (Residual Volumetric Water Content) ดังสมการ 2.17



รูปที่ 2.11 รูปแบบของ Soil-Water Characteristic Curve (Punrattanasin, 2002)

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m + \theta_r \quad (2.17)$$

- เมื่อ θ = ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน (Volumetric Water Content, VWC.)
- θ_s = ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว (Saturated VWC.)
- รูปที่ 2.11 ประกอบ
- θ_r = ความชื้นโดยปริมาตรที่สภาวะความชื้นคงค้าง (Residual VWC.)
- ปกติจะมีค่าอยู่ประมาณ 10% ของ Saturated VWC.
- รูปที่ 2.11 ประกอบ
- α = ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างในมวลดิน
- n = ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงอัตราการลดลงของความชื้นในดิน

หลังจากจุดที่อากาศเข้าไปในช่องว่างของมวลดิน

$$m = \text{ตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันแสดงจุดที่ความชื้นคงค้างในมวลดิน } (m = 1 - \frac{1}{n})$$

$$\psi = \text{แรงดูดของน้ำในมวลดิน (Matric Suction)}$$

Fredlund and Xing (1994) เสนอสมการเส้นอัสต์ลักษณะของน้ำในดิน ดิน (Governing Equation) ซึ่งเป็นฟังก์ชันการประมาณความชื้นในมวลดิน (Volumetric Water Content) กับแรงดูดของน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ดังสมการ 2.18

$$\theta = C_\psi \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (2.18)$$

เมื่อ $C_\psi =$ Correction Function

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + (\frac{\psi}{\psi_r}))}{\ln(1 + \frac{1,000,000}{\psi_r})} \quad (2.19)$$

$a, n, m =$ ค่าปรับแก้กราฟ (Fitting Parameters) ของ Fredlund and Xing (1994)

$$a = \psi_i \quad (2.20)$$

$$m = 3.67 \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right) \quad (2.21)$$

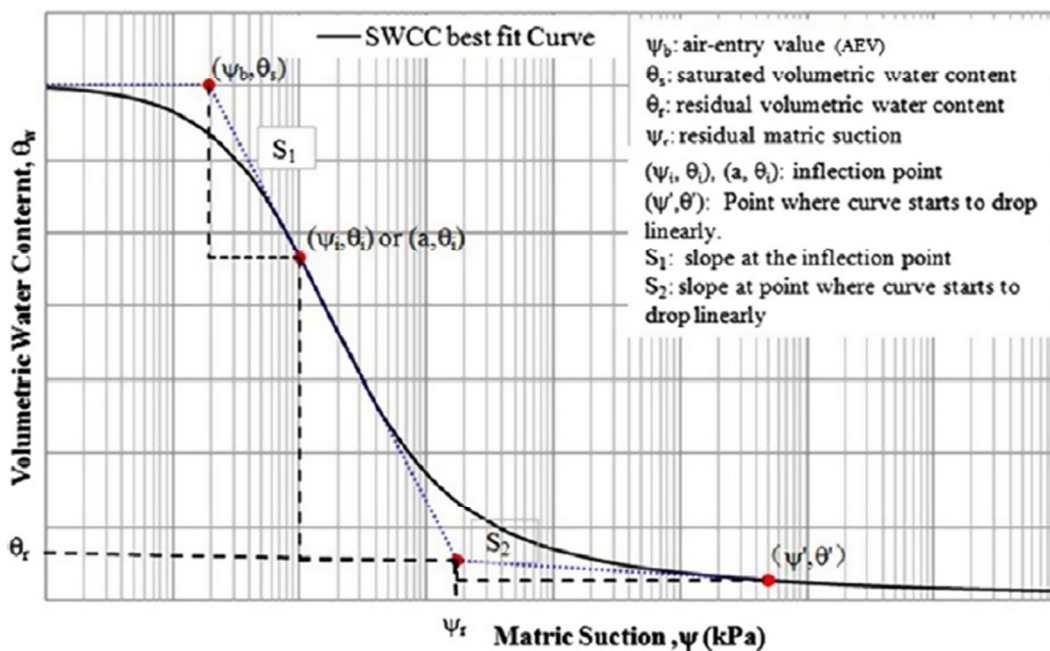
$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad (2.22)$$

$\theta_i =$ ปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร ที่จุดเปลี่ยนโค้งของกราฟ (Inflection Point) รูปที่ 2.12 ประกอบ

$\psi_i =$ แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดเปลี่ยนโค้งของกราฟ (Inflection Point) รูปที่ 2.12 ประกอบ

$\psi_r =$ แรงดึงน้ำในมวลดิน (Matric Suction) ที่จุดความชื้นคงค้างในดิน

$s =$ ความชันของกราฟ ณ จุดที่กราฟเปลี่ยนความโค้ง รูปที่ 2.12 ประกอบ



รูปที่ 2.12 นิยามของตัวแปรในสมการของ Fredlund and Xing (1994) (Zhai and Rahardjo, 2012)

2.4.1.4 สัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity, K)

ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดินมีการเปลี่ยนแปลงตามความชื้นในดิน หรือกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดูด (Matric Suction) ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เราจะหมายถึง ฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity Function) มีผู้เสนอสมการประมาณค่าฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน ดังนี้

Van Genuchten (1980) ได้เสนอสมการประมาณค่าฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity Function) ดังสมการที่ 2.23

$$k_w = k_s \frac{\left[1 - (a\psi^{(n-1)}) \left(1 + (a\psi^n)^{-m}\right)\right]^2}{\left(1 + a\psi^n\right)^{\frac{m}{2}}} \quad (2.23)$$

เมื่อ	k_w	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน (เมตร/วินาที)
	k_s	=	สัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดินที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
	a, n, m	=	ค่าปรับแก้กราฟ (Fitting Parameters) (โดยที่ $m = 1 - \frac{1}{n}$)
	ψ	=	แรงดูด (Suction) ที่ความชื้นต่างๆ

Fredlund and Xing (1994) ได้เสนอสมการประมาณค่าฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Hydraulic Conductivity Function) ดังสมการที่ 2.24

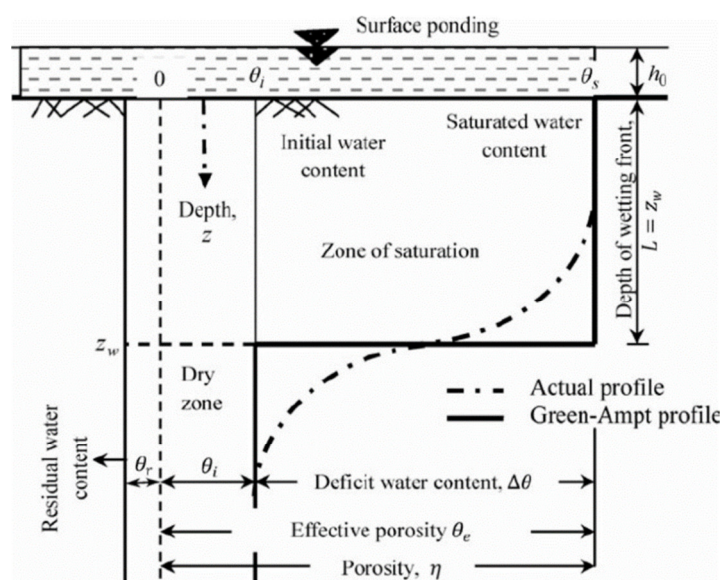
$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2.24)$$

เมื่อ	θ	=	ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดิน (VWC.)
	θ_s	=	ความชื้นโดยปริมาตรในมวลดินในสภาวะอิ่มตัว (Saturated VWC.)
	e	=	จำนวนธรรมชาติ (2.71828...)
	y	=	ตัวแปรสมมติของการอินทิเกรตแรงดันน้ำในช่องว่างที่เป็นลบ
	i	=	ช่วงตัวเลขระหว่าง j ถึง N
	j	=	ค่าต่ำสุดของแรงดันน้ำในช่องว่างที่เป็นลบ
	N	=	ค่าสูงสุดของแรงดันน้ำในช่องว่างที่เป็นลบ
	θ'	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ

2.4.1.5 กระบวนการซึมลงสู่ชั้นดิน (Infiltration Process)

กระบวนการไหลซึมจากผิวดินลงสู่ชั้นดินมีแรงภายนอกมาเกี่ยวข้อง 2 แรง ขึ้นกับสภาพความอิ่มตัวด้วยน้ำของชั้นดิน กล่าวคือ ช่วงแรกที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อมีน้ำขังบนผิวดิน น้ำใน

ส่วนนี้จะถูกดูดซึมลงไปชั้นดินด้วยแรงดูด (Matric Suction) จนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว การไหลซึมลงสู่ชั้นดินจะขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับการไหลซึมช่วงที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Green and Ampt (1911) ได้เสนอแบบจำลองและสมการคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ช่วงนี้ ดังรูปที่ 2.13 จากรูปอธิบายได้ว่าในธรรมชาติชั้นใต้ดินที่แห้งแล้งมากจะมีความชื้นน้อยที่สุดอยู่ที่ θ_r เรียกว่า Residual water content ซึ่งความชื้นจะไม่ลดลงไปกว่านี้อีกแล้ว นอกจากจะเอาดินไปอบให้แห้งด้วยความร้อน แต่โดยทั่วไปชั้นใต้ดินก่อนที่จะมีน้ำไหลซึมลงไปจะมีความชื้นที่สูงกว่า Residual water content ซึ่งเราให้เป็น θ_i เรียกว่า Initial water content หลังจากที่ผิวดินมีการสะสมของน้ำฝนจนเกิดแอ่งน้ำขัง ซึ่งมีความดัน (Pressure head, h_0) เท่ากับความลึกของแอ่ง แรงดูดจาก Metric suction จะดูดน้ำในแอ่งให้ไหลซึมลงไปข้างใต้ ทำให้ความลึกถดถอยไปจากผิวดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงระดับอิ่มตัวด้วยน้ำ คือมีความชื้นเป็น θ_s เส้นประ ในรูปที่ 2.10 แนวนี้เรียกว่า แนวเปียกชื้น (Wetting front) แต่แบบจำลองที่เสนอโดย Green and Ampt สมมติให้แนวที่เปียกชื้น (Wetting front) นี้เป็นแบบสม่ำเสมอ เส้นทึบ ในรูปที่ 2.13



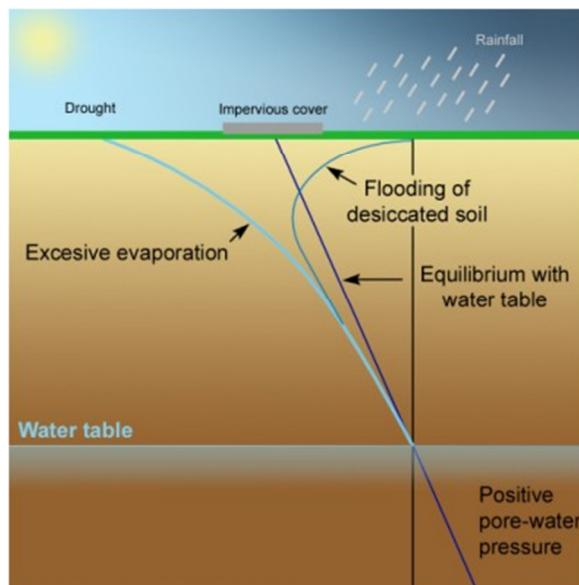
รูปที่ 2.13 แบบจำลองของ Green and Ampt (Ravindra & Bhabagrahi , 2011)

จากแบบจำลองนี้ Green and Ampt ได้อาศัยกฎการไหลของดาร์ซีสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อหาอัตราการไหลซึมลงดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ดังสมการที่ 2.25

$$f_t = K_s \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F_t} + 1 \right) \quad (2.25)$$

เมื่อ	f_t	=	อัตราการไหลซึมลงดิน (หน่วย ความลึก/เวลา)
	F_t	=	ความลึกของการไหลซึมลงดินสะสม (หน่วย ความลึก)
	K_s	=	สัมประสิทธิ์การไหลของน้ำในมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
	ψ	=	แรงดูด (Matric Suction)
	$\Delta \theta$	=	ค่าที่เปลี่ยนไปตามความลึกของความชื้นในมวลดิน

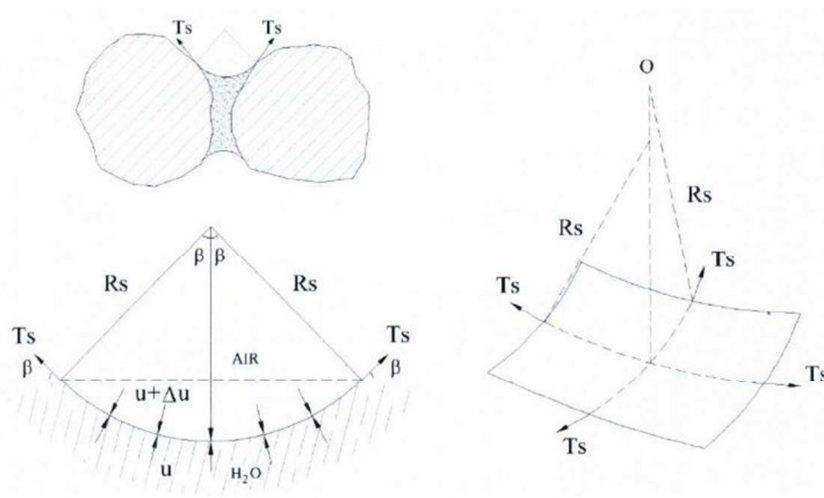
สภาพในธรรมชาติทั่วไปจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.14 คือชั้นดินจะประกอบด้วยระดับน้ำใต้ดิน (Ground water table) ที่ความลึกลงไปจากผิวดิน ชั้นดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินลงไปจะมีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ กล่าวคือช่องว่างระหว่างเม็ดดินเต็มไปด้วยน้ำ ไม่มีอากาศแทรกในระหว่างเม็ดดิน ความดันของน้ำในระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure) มีค่าเป็นบวก (Positive Pressure) และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของน้ำใต้ดิน ที่ระดับผิวน้ำใต้ดินความดันของน้ำระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure) มีค่าเป็นศูนย์ (Zero) ส่วนชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นมา มีน้ำและอากาศแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในสภาพเช่นนี้เรียกว่า เขตดินชื้น (Vadose Zone) ซึ่งเป็นเขตที่ความดันของน้ำในระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure) มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นกับสภาพแวดล้อมเหนือผิวดินด้านบน เช่น ฝนตก อากาศแห้งแล้ง อยู่ภายใต้พื้นที่ปกคลุมที่สภาพอากาศภายนอกไม่มีผล เป็นต้น อธิบายได้ว่าในเขต Vadose Zone ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีทั้งน้ำและอากาศทำให้เกิดผิวน้ำขนาดเล็กแทรกอยู่ (Contractile skin) ผิวน้ำขนาดเล็กนี้มีแรงสามแรงกระทำต่อกันคือแรงดึงผิวของน้ำ แรงดันน้ำและแรงดันอากาศ (ดูรูปที่ 2.15 ประกอบ) ทำให้เกิดความดัน (Pore water pressure) ประเภทแรงดูด (Suction) เกิดขึ้น และแรงดูดนี้มีค่าแรงดันเป็นลบ (Negative pressure) และจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม อธิบายได้โดยเส้นแรงดันน้ำใต้ดิน (Pore water pressure line) ดังนี้



รูปที่ 2.14 ลักษณะเส้นระดับน้ำของชั้นดินทั่วไป

(เวปไซต์ http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/main.htm ปรับปรุงของ Fredlund and Rahardjo (1993))

ถ้ามีฝนตกหรือมีน้ำซึมลงมาจากผิวดิน จะทำให้ผิวดินมีการอิ่มตัวด้วยน้ำ ปลายของเส้นแรงดันน้ำใต้ดินจึงมีค่าเป็นศูนย์ แต่ใต้ดินลึกลงไปยังเป็นเพียงดินชื้นเส้นแรงดันน้ำใต้ดินก็ยังมีค่าเป็นลบอยู่ ซึ่งก็คือเส้น Flooding of desiccated soil ในรูปที่ 2.14 แต่ถ้าผิวดินด้านบนมีสภาพแห้งแล้งยาวนานพอ จะเกิดการระเหยของน้ำใต้ดินบริเวณผิวดินก่อน ปลายของเส้นแรงดันน้ำใต้ดินก็จะมีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็คือเส้น Excessive Evaporation ในรูปที่ 2.14 และถ้าหากผิวดินด้านบนมีสิ่งปกคลุมจนสภาพอากาศภายนอกไม่สามารถส่งผลกระทบใดๆได้ เส้นแรงดันน้ำใต้ดินก็จะค่อยๆปรับเข้าสู่สภาพสมดุลและมีความลาดชันเท่ากับเส้นแรงดันของน้ำใต้ระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งก็คือเส้น Equilibrium line ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 แรงดันและแรงดึงที่ผิว Contractile skin

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

2.4.2 แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน

ในอดีตการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน จะพิจารณาการไหลในสถานะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated state) และไม่พิจารณาสภาพดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated state) ซึ่งเป็นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นไป เพราะเหตุแห่งความยุ่งยากในการคำนวณ แต่ในปัจจุบันที่มีคอมพิวเตอร์คอยช่วยในการวิเคราะห์คำนวณ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข (Numerical Models) จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์คำนวณการไหลซึมของน้ำในมวลดินทั้งในสถานะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แบบจำลองสามารถวิเคราะห์คำนวณหาการเคลื่อนที่ของ wetting front และการไหลซึมของฝนลงในชั้นดิน (Infiltration of precipitation) เป็นต้น งานวิจัยนี้ใช้ software แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินที่ชื่อ SEEP/W ซึ่งเป็น software สำเร็จรูปที่ใช้กันแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering)

หลักการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข SEEP/W เป็นการวิเคราะห์แบบ Finite Element ซึ่งมีสมการหลัก (The general governing differential Equation) สำหรับการวิเคราะห์การไหล (Seepage) 2 มิติ ดังสมการที่ 2.26

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.26)$$

โดยที่ γ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

ในคู่มือการใช้แบบจำลอง SEEP/W ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงการปรับเปลี่ยนสมการหลัก (The general governing differential Equation) สำหรับการวิเคราะห์การไหล (Seepage) 2 มิติ ให้อยู่ในรูปของสมการ Finite Element water flow เพื่อให้คอมพิวเตอร์นำไปสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Models) ดังสมการที่ 2.27

$$\tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{H\}, t = q \tau \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad (2.27)$$

เมื่อ	[B]	=	The Gradient Matrix
	[C]	=	The element hydraulic conductivity Matrix
	{H}	=	The vector of nodal heads
	<N>	=	The vector of interpolation function
	q	=	The unit flux across the edge of an element
	τ	=	The thickness of an element
	λ	=	Storage term for a transient seepage equals to $m_w \gamma_w$
	A	=	a designation for summation over the area of an element
	L	=	a designation for summation over the edge of an element

2.5 กลศาสตร์กำลังเฉือนของดิน เสถียรภาพลาดดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน

ดินเกิดจากการกัดกร่อน ผุพังและแตกสลายของหินต่างๆ โดยธรรมชาติ ทั้งจากอิทธิพลของดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และความกดดัน แรงดึงดูดของโลกและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแล้วมีการเคลื่อนย้ายพัดพาโดยตัวกลางต่างๆเช่น น้ำ ลม ธารน้ำแข็ง ฯลฯ ไปตกตะกอนทับถมในที่ต่างๆ จนเป็นชั้นดินขึ้นมา ทำให้คุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นและแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน

ดินในความหมายทางวิศวกรรม คือวัสดุอะไรก็ตามที่แตกตะกอนและทับถมกันไม่แน่น เช่น กรวด ทราย ตะกอนทราย และดินเหนียว หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านั้น ซึ่งอาจจะเป็นพวกที่มีความเชื่อมแน่น หรือไม่มีความเชื่อมแน่นก็ได้ (มณเฑียร,2541)

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษากลศาสตร์ของดินที่เกี่ยวข้องกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน และเสถียรภาพลาดดินเป็นหลัก ดังนี้

2.5.1 ทฤษฎีกลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงกำลังของดินตามความชื้นในมวลดิน

ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของดิน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่าง คือ

- 1.) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)
- 2.) แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction)

Coulomb (1776) ได้เสนอสมการเชิงเส้นตรง เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนดังสมการที่ 2.28

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.28)$$

เมื่อ	τ	=	หน่วยแรงเฉือนที่จุดพิบัติ หรือค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)
	σ	=	หน่วยแรงกดหรือแรงตั้งฉากทั้งหมดบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)
	c	=	แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่น (Cohesion)
	ϕ	=	มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle) หรือ มุมต้านทานต่อแรงเฉือน (Angle of shearing resistance)

ในกรณีดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ สมการที่ 2.28 สามารถเขียนได้ในเทอมของหน่วยแรงประสิทธิผลได้ดังสมการที่ 2.29

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.29)$$

เมื่อ	σ'	=	หน่วยแรงกดหรือแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน
		=	$\sigma - u$
	u	=	แรงดันน้ำ (Pore water Pressure)
	c'	=	แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่น ประสิทธิผล (Effective Cohesion)
	ϕ'	=	มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล

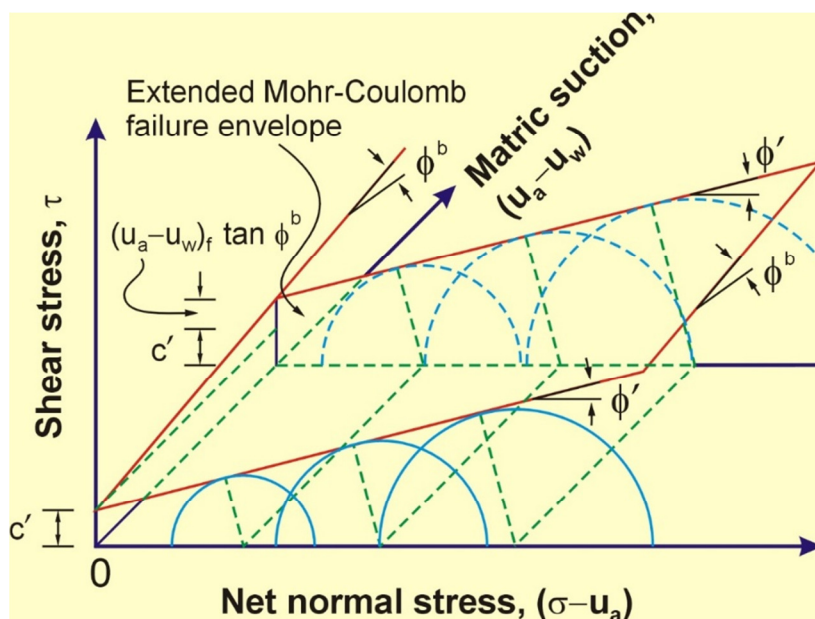
แต่ในธรรมชาติ ดินจะอยู่ในสภาพที่มีความชื้นแต่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการพิจารณาความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของดินนั้น ถูกอธิบายโดย Fredlund and Rahardjo (1993) ว่าแรงดันต่างๆในเขต Vadose Zone ซึ่งเป็นชั้นดินที่อยู่ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) ดังนี้ ช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะมีแรงกระทำ 3 แรง คือแรงดึงผิวของน้ำ (T_s ในรูปที่ 2.15) แรงดันอากาศในช่องว่างของเม็ดดิน (u_a) และแรงดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน (u_w) โดยที่บริเวณผิวน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน (Contractile skin) มีแรงดูดชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลต่างของแรงดันอากาศและแรงดันน้ำ ($u_a - u_w$) เรียกว่า Matric Suction และแรงดูดนี้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นกับความชื้นในมวลดินและมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งความสัมพันธ์นี้เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.30

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.30)$$

เมื่อ	u_a	=	แรงดันอากาศในช่องว่างของเม็ดดิน
	u_w	=	แรงดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน
	ϕ^b	=	มุมเสียดทานภายในของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

มุม ϕ^b เป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมหนึ่งของดิน ซึ่งมีค่าไม่คงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturated) มีค่าประมาณ $\frac{1}{2}\phi'$ (Geo Slope International, 2008) ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ SLOPE/W มุม ϕ^b ถูกพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน นอกจากจะสัมพันธ์กับค่ามุม ϕ^b แล้ว ยังปรากฏอีกว่ามีการเปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับ Matric Suction ด้วย Fredlund and Rahardjo (1993) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุม ϕ^b และ Matric suction พบว่ามุม ϕ^b เป็นมุมของความสัมพันธ์ระหว่าง Matric Suction กับ Cohesion (c') และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าของ Matric Suction ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) ค่าแรงดันของอากาศจะเป็นศูนย์ และค่า $\phi^b = \phi'$ สมการที่ 2.31 ก็จะกลายเป็นสมการที่ 2.29 เหมือนที่ Coulomb เสนอไว้เมื่อปี 1776

นอกจากนี้ Vanapalli et.ai. (1996) ได้อธิบายว่ามุม ϕ^b มีความสัมพันธ์กับ Volumetric Water Content และ Matric Suction ซึ่งความสัมพันธ์ของ Volumetric Water Content และ Matric Suction นี้ เรียกว่า เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (Soil - Water Caractoristic Curve, SWCC) ผู้วิจัยได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.1 Vanapalli et.ai. (1996) เขียนสมการกำลังด้านทางแรงเฉือนของดินใหม่ ได้ตั้งสมการที่ 2.31 ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Geo Slope International (SLOPE/W) จึงมีฟีเจอร์ให้ผู้ใช้ เลือกใช้ระหว่างค่ามุม ϕ^b และ ค่าฟังก์ชัน SWCC และในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าฟังก์ชัน SWCC



รูปที่ 2.16 เส้นโค้งการพิบัติของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Soil) เพิ่มเติมจากเส้นโค้งการพิบัติของ Mohr-Coulomb

ที่มา: Fredlund and Rahardjo (1993)

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \right] \quad (2.31)$$

เมื่อ θ_w = Volumetric Water Content
 θ_s = Saturated Volumetric Water Content
 θ_r = Residual Volumetric Water Content , ประมาณ 10% ของ Saturated Volumetric Water Content (Geo Slope International, 2008)

2.5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน

เมื่อดินอยู่ในสภาพที่ลาดเอียงไม่ว่าจะโดยธรรมชาติหรือเป็นการปรับให้ลาดเอียงโดยมนุษย์ก็ตาม จะมีแรงจุด (Driving force) ชุดหนึ่งที่จะทำให้ลาดดินนั้นเคลื่อนตัวจากจุดที่สูงกว่าไปยังจุดที่ต่ำกว่า ซึ่งแรงดังกล่าวได้แก่แรงดึงดูดของโลกและแรงที่เกิดจากการไหลซึมของน้ำในมวล

ดิน แรงทั้งสองนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนด้านในมวลดินขึ้น แรงเฉือนด้านนี้ประกอบด้วย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) และ แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Internal friction) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 2.28 เสถียรภาพลาดดินก็จะขึ้นกับว่าระหว่างแรงจุด (Driving force) และแรงเฉือนด้านทาน (Resisting shear force) แรงอะไรจะมากกว่ากัน กล่าวคือ ถ้าแรงจุดมีมากกว่า ลาดดินนั้นก็จะไม่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าแรงเฉือนด้านทานมีมากกว่า ลาดดินนั้นก็จะมีความเสถียรภาพ ในทางวิศวกรรมประจําจะเขียนความสัมพันธ์นี้ด้วยสมการอัตราส่วนของแรงเฉือนด้านทาน (Resisting shear force) และแรงจุด (Driving force) โดยเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) ดังสมการที่ 2.32

$$F.S = \frac{F_R}{F_D} \quad (2.32)$$

เมื่อ F_R = แรงเฉือนด้านทาน (Resisting shear force) และ
 F_D = แรงจุด (Driving force)

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S) จะแสดงเสถียรภาพของลาดดินดังนี้

ถ้า มีค่า F.S มากกว่า	1.0	แสดงว่า	ลาดดินมีเสถียรภาพ
ถ้า มีค่า F.S น้อยกว่า	1.0	แสดงว่า	ลาดดินไม่มีเสถียรภาพและพร้อมจะถล่มลงมา
ถ้า มีค่า F.S เท่ากับ	1.0	แสดงว่า	ลาดดินอยู่ในสภาพสมดุล (Limit Equilibrium)

สาเหตุที่ทำให้ลาดดินไม่มีเสถียรภาพ หรือดินถล่มพอจะสรุปโดยสังเขปได้ดังนี้คือ 1.) น้ำหนักของมวลดินเอง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 2.) มีแรงภายนอกมากระทำต่อลาดดิน 3.) แรงดันน้ำภายในมวลดิน 4.) การสูญเสียกำลังของดิน 5.) การผุพังและการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำและลม

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเกี่ยวกับเสถียรภาพลาดดินว่า ลาดดินจะมีเสถียรภาพหรือไม่ ขึ้นขึ้นกับปริมาณของ 2 แรง คือ แรงเฉือนด้านทาน (Resisting shear force) และแรงจุด (Driving

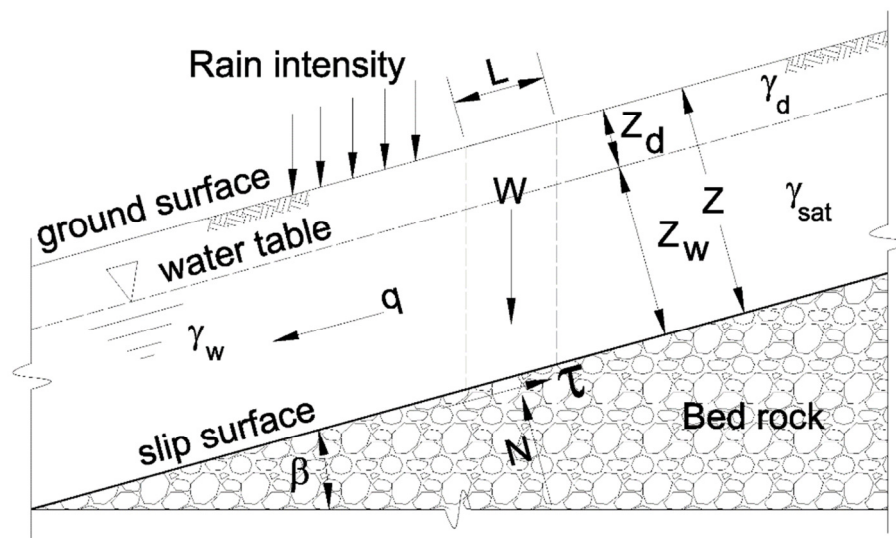
force) ภายใต้หลักการของอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ดังสมการที่ 2.32 และต่อจากนี้ จะกล่าวถึงวิธีการต่างๆในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในทางปฐพีวิศวกรรม

ปัจจุบันสามารถแบ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินออกได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีจำกัดสมดุลของแรง (Limit Equilibrium Method) กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยเฉพาะวิธีจำกัดสมดุลของแรง (Limit Equilibrium) สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 วิธีหลัก คือวิธีพื้นฐานทั่วไป (Basic Method) และวิธีแบ่งซอยเป็นชั้นเล็กๆ (Method of Slices) และวิธีทั้งสองนี้สามารถแบ่งเป็นวิธีย่อยๆได้อีกดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงวิธีการย่อยต่างๆของวิธีจำกัดสมดุลของแรง (Limit Equilibrium)

Limit Equilibrium Method	
Basic Method	Method of Slices
<ol style="list-style-type: none"> 1. Block or Wedge Method 2. Circular Arc Method 3. Friction Circle Method 4. Infinite Slope Method 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ordinary Method of slices 2. Bishop's simplified 3. Janbu's simplified 4. Corp of Engineers 5. Specer's 6. Bishop's rigorous 7. Janbu's generalized 8. Sarma's 9. Morganstern-Price

Infinite Slope Method (วิธีลาดอนันต์) เป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีความยาวของลาดดินมาก เมื่อเทียบกับความลึกของแนวพิบัติ หรือความหนาของชั้นดิน และสามารถจำลองรูปแบบของแรงต่างๆที่กระทำได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การวิเคราะห์การพังถล่มแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Failure)

เมื่อเขียนสมมูลของแรงต่างๆ ในรูปของอัตราส่วนความปลอดภัยได้ดังสมการที่ 2.33

$$F.S = \frac{c' + (\gamma_d Z_d + \gamma_{sat} Z_w - \gamma_w Z_w) \cos \beta \tan \phi'}{(\gamma_d Z_d + \gamma_w Z_w) \sin \beta} \quad (2.33)$$

- เมื่อ
- γ_d = หน่วยน้ำหนักของดินส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน
 - γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน
 - Z_d = ความลึกของดินส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ)
 - Z_w = ความลึกของน้ำใต้ดิน (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ)
 - Z = ความลึกของดินที่ถล่ม (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ)
 - β = มุมเอียงของลาดดิน

จากสมการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินแบบลาดอนันต์ (สมการที่ 2.33) สามารถนำมาพิจารณาร่วมกับสมการดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index, API) ซึ่งก็คือสมการที่ 2.34 เพื่อหาปริมาณฝนตกสะสมที่ทำให้เกิดดินถล่มได้ เนื่องจากค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินวิกฤติ Critical API (API_{cr}) ถือเป็นค่าปริมาณน้ำในช่องว่างของมวลดิน ณ ขณะที่ลาดดินเกิดการถล่ม โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นหลังจากพายุฝน (Shakir Ali et al, 2010)

$$API = n \cdot S_r \cdot Z \quad (2.34)$$

เมื่อ	n	=	ความพรุนของดิน (Porosity)
		=	$\frac{e}{1+e}$
	e	=	อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)
	S_r	=	ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน (Degree of Saturated)
	Z	=	ความหนาของชั้นดิน (ดูรูปที่ 2.17 ประกอบ)

พิจารณา Phase Diagram ของมวลดิน เพียง 1 มิติ (กว้าง 1 หน่วย ยาวหนึ่งหน่วย ลึก Z หน่วย)

ความพรุนของดิน ;	$n = \frac{V_v}{V_T}$	(2.35)
------------------	-----------------------	--------

Volumetric Water Content ;	$\theta = \frac{V_w}{V_T}$	(2.36)
----------------------------	----------------------------	--------

ระดับความอิ่มตัวในมวลดิน;	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	(2.37)
---------------------------	-------------------------	--------

เมื่อ	V_T	=	ปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน
		=	$1 \times 1 \times Z$
	V_w	=	ปริมาตรของน้ำในมวลดิน
		=	$1 \times 1 \times Z_w$
	V_v	=	ปริมาตรของช่องว่างระหว่างเม็ดดินในมวลดิน

จะได้ว่า	$Z_w = API = n \cdot S_r \cdot Z$	(2.38)
----------	-----------------------------------	--------

β	=	มุมลาดเอียงของ slice ที่พิจารณา
Δl	=	ความกว้างของ slice ที่พิจารณา
ΔT	=	ผลต่างของแรงเสียดทานด้านข้างของ slice ที่พิจารณา (ดูรูปที่ 2.18)
W	=	น้ำหนักของ slice ที่พิจารณา
U	=	แรงดันน้ำที่กระทำกับ slice ที่พิจารณา

หลักการของ Bishop's simplified จะเริ่มต้นโดยการสมมติอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S) ขึ้นมาก่อน แล้วคำนวณหา m_β จากสมการที่ 2.35 เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.34 แล้วคำนวณหา F.S จากนั้นเปรียบเทียบ F.S จากสมการที่ 2.34 กับ F.S ที่สมมติ ถ้ามีค่าแตกต่างกันมาก ให้กลับไปสมมติค่า F.S ใหม่และดำเนินการแบบเดิมไปเรื่อยๆจนกว่าค่า F.S จากสมการที่ 2.34 จะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่สมมติขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการเหตุการณ์ดินถล่มจากผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีมาตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 20 และมีเพิ่มมากขึ้นช่วงทศวรรษแรกของศตวรรษที่ 21 โดยเฉพาะในทวีปยุโรป และญี่ปุ่น สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการศึกษาวิจัยกันในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้คือ งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ งานวิจัยด้านดินถล่ม และงานวิจัยด้านดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

2.6.1 งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Easterling et al. (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาวะรุนแรง (Extreme Event) ของสภาพภูมิอากาศและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระดับภูมิภาคต่างๆของโลก และผนวกประเทศไทยในการประเมินลักษณะและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาวะรุนแรงของฝนและอุณหภูมิในภูมิภาคต่างๆของโลก ซึ่งผลการศึกษาพบว่าความถี่ของเหตุการณ์ฝนตกหนักและปริมาณฝนรวมรายฤดูกาลในประเทศไทย มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับประเทศญี่ปุ่นและจีน

Monton et al. (2001) ได้ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาวะรุนแรงของอุณหภูมิและฝนรายวันในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และแปซิฟิกใต้ ในระหว่างปี 1961 ถึง 1998 พบว่าสภาวะรุนแรงของฝนมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ผสมกันระหว่างแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงในอัตราที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยจำนวนวันฝนตกเป็นดัชนีชี้วัดสภาวะรุนแรงของฝนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในหลายสถานี และมีรูปแบบที่เหมือนกันทั้งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

Endo et al. (2009) ได้ทำการวิเคราะห์สภาวะรุนแรงของฝนจำนวน 12 ดัชนีชี้วัดในระหว่างปี 1950 ถึง 2000 จากข้อมูลฝนรายวันจำนวน 203 สถานีใน 8 ประเทศของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่าจำนวนวันฝนตกมีแนวโน้มลดลงทั้งภูมิภาครวมทั้งประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในอดีต ในขณะที่ความแรงเฉลี่ยของฝนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับดัชนีชี้วัดเหตุการณ์ฝนตกหนัก สัดส่วนของสถานีที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ มีมากกว่าสถานีที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ศุภกรและคณะ(2552) ได้จำลองสภาพภูมิอากาศด้วยแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) A2 และ B2 ใช้ข้อมูลฝนตรวจวัดจริงช่วงปี 2503 ถึง 2542 เป็นปีฐาน และฉายภาพอุณหภูมิและฝนในอนาคตช่วงปี 2553 ถึง 2642 ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งในด้านปริมาณและการกระจายตัวของพื้นที่ที่มีจำนวนวันที่ฝนตกเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะช่วงปลายศตวรรษ จำนวนวันที่ฝนตกเฉลี่ยในแต่ละปียังคงใกล้เคียงกับในอดีต ฤดูฝนในอนาคตยังคงมีความยาวนานไม่เปลี่ยนแปลงไปจากปัจจุบันที่เป็นอยู่ แต่ปริมาณน้ำฝนในแต่ละปีจะเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าฝนที่ตกในแต่ละครั้งในอนาคตจะเพิ่มสูงขึ้นหรือในแต่ละครั้งฝนตกหนักมากขึ้นกว่าที่เป็นมาในอดีต

เจียมใจและคณะ(2553) ได้จำลองสภาพภูมิอากาศด้วยแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ MMR5 RCM ตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) A2 และ A1B ใช้ข้อมูลฝนตรวจวัดจริงช่วงปี 2513 ถึง 2542 เป็นปีฐาน และฉายภาพอุณหภูมิและฝนในอนาคตช่วงปี 2553 ถึง 2583 ปรากฏว่าการเปลี่ยนแปลงฝนเฉลี่ยรายวันตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) A2 พบว่าพื้นที่ภาคใต้มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้างช่วงปี 2553 – 2562 และฝนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยช่วงปี 2563 – 2583 สำหรับการเปลี่ยนแปลงฝนเฉลี่ยรายวันตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) A1B พบว่าพื้นที่ภาคใต้มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง ตั้งแต่ 2553 – 2583

อัสมนและคณะ(2554) เป็นคณะทำงานกลุ่มที่ 1 ที่ทำงานให้กับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในหัวข้อ ข้อสรุปทางเทคนิค โดยตีพิมพ์ใน รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1 ระบุว่า การสร้างภาพจำลองของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของประเทศไทยในอนาคต 30 - 100 ปี ด้วยการย่อส่วน (Downscale) ผลลัพธ์ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกจาก 4 แบบจำลอง (GFDL-R30, MM5-RCM, PRECIS และ RegCM3) ลงบนพื้นที่ประเทศไทย ตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) ต่างๆ พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน ยังไม่เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนนัก แต่แบบจำลองส่วนมากคาดว่าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น

2.6.2 งานวิจัยด้านดินถล่ม

สันติ (2553) ได้ทำการวิจัยโอกาสการถล่มของลาดดินในภาคใต้ของประเทศไทยฝั่งอันดามัน โดยใช้วิธีการทางด้านธรณีวิศวกรรม วิเคราะห์โอกาสการเกิดดินถล่มของลาดดินจากปัจจัยปริมาณน้ำในมวลดินเนื่องจากฝนตก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนและระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำวิกฤติของน้ำในมวลดิน ในงานวิจัยนี้อธิบายว่าระยะเวลาที่ฝนตกแล้วทำให้เกิดระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำวิกฤติของน้ำในมวลดิน คือฝนตกต่อเนื่อง 4 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า ลาดดินที่เป็นกลุ่มดินอันเกิดจากหินแกรนิต มีความสามารถในการซึมน้ำสูง จะมีโอกาสเกิดดินถล่มต่ำกว่ากลุ่มดินที่เกิดจากหินตะกอน ที่มีความสามารถในการซึมน้ำต่ำกว่า แต่ในทางกลับกันเมื่อมีฝนตกเพิ่มขึ้น กลับพบว่าลาดดินที่เกิดจากกลุ่มหินแกรนิตมีโอกาสการเกิดดินถล่มสูงกว่าลาดดินในกลุ่มที่เกิดจากหินตะกอน

รัชพล (2558) ได้ศึกษาวิจัยเสถียรภาพลาดดินโดยใช้คุณสมบัติทางวิศวกรรม ศึกษาการเกิดดินถล่มที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช ในงานวิจัยดังกล่าว มีการสำรวจเก็บข้อมูลของลาดดินในพื้นที่ศึกษาแล้วนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านปฐพีวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการไหลซึมของน้ำในมวลดินและวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม SEEP/W และโปรแกรม SLOPE/W ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของลาดดินที่ ต.เทพราช อ.ติซล จ.นครศรีธรรมราช ได้แก่ ลักษณะของดินเป็นดินทรายปนตะกอนทราย (Silty Sand, SM) ในช่วงที่ดินมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 70 – 95% มีหน่วยแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') ตั้งแต่ 7.85 – 27.96 kPa ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') มีค่าตั้งแต่ 23.05 – 26.18 องศา หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) มีค่า 16.81 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินอิ่มตัว เท่ากับ 0.113 เมตรต่อชั่วโมง
2. คุณสมบัติทางกายภาพของลาดดิน ได้แก่ ความหนาของชั้นดิน มีความหนา 3.0 เมตร วางตัวบนชั้นหินผุ ความยาวของลาดดินประมาณ 70 เมตร ลาดเอียง 24-26 องศา
3. ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ปรากฏว่าจะเกิดดินถล่มเมื่อปริมาณฝนตกสะสม 644 มิลลิเมตร
4. มีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินเท่ากับ 166 - 254 มิลลิเมตร

ชลดา (2559) ได้ศึกษาความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของดินและการไหลซึมผ่านของน้ำฝนในลาดดินธรรมชาติ เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของลาดดิน ในงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้ลาดดินในพื้นที่ ต.เทพราช อ.ติซล จ.นครศรีธรรมราช เป็นกรณีศึกษา โดยการนำข้อมูลของรัฐพลและคณะ (2556) มาศึกษาเพิ่มเติม เช่น การใช้สมการของ Van Genuchten และโปรแกรม SWRC Fit curve เพื่อหากราฟเส้นอัตราค่าความชื้นของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (SWCC) และฟังก์ชันค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function)

1. ลาดดินที่ ต.เทพราช อ.ติซล จ.นครศรีธรรมราช มีค่าดัชนีความชุ่มชื้นในมวลดินเท่ากับ 380 มิลลิเมตร
2. ชลดาได้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน โดยป้อนปริมาณฝนรายชั่วโมงในอัตราเท่ากันตลอด (โดยใช้อัตราฝนรายชั่วโมงเท่ากับ 9 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ถึง 36 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ปรากฏว่าจะเกิดดินถล่มเมื่อปริมาณฝนตกสะสม 600 - 648 มิลลิเมตร จากสภาพดินแห้งสนิท
3. ลาดดินจะถล่ม เมื่อปริมาณฝนตกสะสม 380 มิลลิเมตร เมื่อเริ่มใส่ปริมาณฝนจากสภาพดินที่มีความชื้นธรรมชาติ (50% ของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ)
4. ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อเสถียรภาพลาดดิน คือ ค่ามุมความเสียดทานภายในของชั้นดิน และค่าความลาดเอียงของลาดดิน

2.6.3 งานวิจัยด้านดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Dikau and Schrott (1999) สรุปผลการดำเนินงานของ 3 ปี ของ TESLEC (Temporal Stability and activity of Landslides in Europe with respect to Climatic change) โครงการนี้ได้รับทุนจาก The European Commission in the 5th European Community Framework Programme โครงการมุ่งเน้นไปที่วัตถุประสงค์หลักสามประการ คือ (1) กำหนดค่าวิกฤติสำหรับการเตือนภัยดินถล่ม (2) ปรับโครงสร้างการกระจายของดินถล่มในอดีตและหาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดดินถล่มและตัวแปรต่างๆของสภาพภูมิอากาศ และ (3) การพัฒนาแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน รวมถึงประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่ม โครงการได้ทำการศึกษาวิจัยใน 5 ประเทศ (โดยมี 8 กรณีศึกษา) คือ ในประเทศอังกฤษ (1 กรณีศึกษา) ฝรั่งเศส (1 กรณีศึกษา) อิตาลี (2 กรณีศึกษา) โปรตุเกส (1 กรณีศึกษา) และสเปน (3 กรณีศึกษา) ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850 ถึง 2000 ผลจากการศึกษาวิจัย สรุปว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเดียว หรือมีกฎเกณฑ์เดียวเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดดินถล่มและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในยุโรป เพราะปัญหาดังกล่าวมีความซับซ้อนมาก

Andrew Collison et al. (2000) ใช้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกทำนายการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนและอุณหภูมิในภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศอังกฤษ ซึ่งแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจกและแก๊สซัลเฟอร์ในบรรยากาศโลก เขาได้ทำการ downscale ข้อมูล HADCM2 ช่วงปี ค.ศ. 1990 ถึง 2100 เพื่อนำไปใช้กับแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดินที่เนินเขาของ Lower Greensand ใกล้กับ Hyte, Kent ภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศอังกฤษ โดยแสดงผลลัพธ์ในรูปของแผนที่ GIS ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการประเมินความถี่และขนาดของดินถล่ม ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของฝนสอดคล้องกับ การเพิ่มการระเหยของไอน้ำ (evapotranspiration) จากผิวดินและการคายน้ำของพืช, แต่ผลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตปรากฏว่า ความถี่ของการเกิดดินถล่มขนาดใหญ่ไม่มีนัยสำคัญว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากอดีต ในขณะที่การกระจายตัวของระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นทำ

ให้เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของลาดดินขนาดเล็กลดลง กล่าวคือจะเกิดดินถล่มขนาด เล็กลดน้อยลงในอีก 80 ปีข้างหน้า

Martin Dehn. et al. (2000) ได้ประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อ อัตราการทรุดตัวของดิน โคลนที่ Dolomites ประเทศอิตาลี โดยกล่าวว่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพ ภูมิอากาศ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำในมวลดินและความผันผวนของความดันน้ำในมวลดิน ภาวะ โลกร้อนขึ้นเนื่องมาจากภาวะแก๊สเรือนกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการตก ของฝน และอุณหภูมิในอากาศอาจมีอิทธิพลต่อการถล่มของดินในอนาคตได้ เขาได้ทำการ Downscale แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกจากแบบจำลอง ECHAM4/OPYC3 และนำผลมาใช้กับ แบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Hydrological model) โดยสามารถคำนวณหาระดับน้ำใต้ดิน รายวันได้ และนำผลที่ได้ไปใช้กับแบบจำลองการไหลแบบหนืด-พลาสติก (Visco-Plastic rheological Model) และสามารถคำนวณหาการทรุดตัวรายวันได้ ผลของแบบจำลองสภาพ ภูมิอากาศ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณหยาดน้ำฟ้าประจำปี(หิมะ) มีแนวโน้ม ลดลง ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนตัวของดินโคลนถล่มประจำปีลดลงด้วย การวิจัยนี้ชี้ให้เห็น ว่าส่วนใหญ่ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินแบบรุนแรงมักเกิดขึ้นในฤดูใบไม้ผลิ ที่มีระดับน้ำ ใต้ดินลดลงอย่างมาก นั่นเป็นการทำให้อัตราการทรุดตัวของดินลดลง นอกจากนี้พวกเขายังให้ ความเห็นเพิ่มเติมอีกว่า สัญญาณการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตยังไม่ชัดเจน แต่ก็มี นัยสำคัญว่าจะมีการเปลี่ยนแปลง และผลจากความไม่ชัดเจนนี้ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความไม่ แน่นนอนค่อนข้างสูง ดังนั้นการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตควรใช้ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศหลายๆแบบจำลอง และควรใช้เทคนิคในการทำ Downscal ที่แตกต่าง หลากหลาย รวมถึงเงื่อนไขขอบอื่นๆมาพิจารณา เช่น รูปแบบพืชพรรณ เป็นต้น

Sidele และ Ochiai (2006), ได้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดย การประเมินค่าตัวแปรต่างๆและกระบวนการทั้งหลายที่มีผลต่อปรากฏการณ์ดินถล่ม สรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนประจำปีและปริมาณ น้ำฝนตามฤดูกาลในภูมิภาคเป็นการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อที่ดินถล่ม มากที่สุด นอกจากนี้พวกเขายังได้พิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อ พืช,

ดิน, การใช้ประโยชน์ที่ดินและวัสดุคลุมดิน แต่สิ่งที่ได้ ปรากฏว่าปัญหาที่มีความซับซ้อนมากเกินกว่าจะประเมินได้

Malet J.P et al. (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อแนวโน้มการเกิดดินถล่มที่ Ubaye Valley ประเทศฝรั่งเศส งานวิจัยดังกล่าวได้นำแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน และแบบจำลองการเกิดดินถล่มมาพิจารณาร่วมกัน โดยแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ เป็นการนำแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกตามสมมติฐาน A2 ของ GIECC มาทำการ Downscale กับพื้นที่ศึกษาเพื่อคาดเดาภูมิอากาศในอนาคต พร้อมกับนำแบบจำลอง 2 แบบจำลองของวิธีการประเมินคุณสมบัติของหิมะมาใช้พิจารณาด้วย ส่วนแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน เป็นการนำพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางอุทกนิยมนิยามมาใช้เป็นเงื่อนไขขอบในการสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและทำการประเมินพฤติกรรมทางอุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของพื้นที่ลาดสองแห่งที่ไม่มีเสถียรภาพ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลต่างๆ และแบบจำลองเสถียรภาพลาดดินเป็นการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่เปลี่ยนแปลงตาม pore water pressure ในช่วงเวลาต่างๆ ผลจากสมมติฐานของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตต่อแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน และแบบจำลองการเกิดดินถล่มที่ Malet J.-P. et al. ศึกษาชี้ให้เห็นดังนี้

1. พื้นที่บริเวณตีนของลาดดิน ; การถล่มแบบหมุนตัวของมวลดิน (Rotational slides) ของลาดดินที่ไม่มีเสถียรภาพลดลงอย่างมาก ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลการระเหยของน้ำในดินเพิ่มขึ้น ทำให้มีการลดลงของความชื้นในมวลดินและเพิ่มความพรุนให้กับดินด้านบน(Topsoil) ที่อยู่ในสภาพไม่อิ่มตัว (unsaturated)
2. พื้นที่บริเวณยอดของลาดดิน ; การเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศมีผลต่อการจำกัดการถล่มของดินโคลน (Mudslides) บนลาดดินที่ไม่มีเสถียรภาพค่อนข้างน้อย เพราะ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนโดยรวมทั้งปีมีน้อยมาก กล่าวคือ ถึงแม้ว่าความหนาของหิมะจะลดลงแต่กลับมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนแทน

พวกเขาได้กล่าวเพิ่มเติมว่า ถึงแม้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสามของงานวิจัยนี้จะไม่สามารถจำลองพฤติกรรมทุกอย่างได้ แต่มันสามารถเป็นจุดเริ่มต้นให้มีการหันมาสนใจการประเมินเสถียรภาพลาดดินจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อการศึกษาในอนาคตต่อไป การศึกษาใน

ครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าความเข้าใจอื่นๆเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของการเกิดดินถล่มและกลไกต่างๆของมัน เป็นสิ่งสำคัญมาก เพื่อช่วยให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การเฝ้าสังเกต และเก็บรวบรวมข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในระยะยาว การมีข้อมูลของพื้นที่ศึกษามาก เพียงพอ จะช่วยทำให้ลดความไม่แน่นอนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงได้

Crozier (2010) เป็นคนแรกที่ทำรายการและทำการตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อกับการเกิดดินถล่ม รวมถึงเงื่อนไขทั่วไปของ เสถียรภาพลาดดิน มีการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตต่อการเกิดดินถล่มทั้งลาดดินธรรมชาติและลาดดินที่มนุษย์สร้างขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้การดำเนินงานวิจัยนี้ ปรากฏว่า ผลลัพธ์ที่สำคัญและมีนัยยะสำคัญ คือ ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในการประเมิน ก็จะมีปัญหา เรื่องความไม่สมบูรณ์โดยธรรมชาติของการบันทึกสภาพภูมิอากาศและการเกิดดินถล่มในอดีตเสมอ ซึ่งสิ่งนี้ได้จำกัดความเป็นไปได้ในการประเมินผลกระทบของการคาดการณ์สภาวะสิ่งแวดล้อมในอนาคตและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อความถี่ในการเกิดดินถล่มและการประมาณค่าตัวแปรต่างๆของกลุ่มความเสี่ยง อีกข้อสรุปหนึ่งที่สำคัญ คือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีผลกระทบต่อเกิดดินถล่มน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบจากฝีมือของมนุษย์

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ศึกษาแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน ร่วมกับแบบจำลองเสถียรภาพของลาดดิน และส่วนสุดท้ายคือการวิเคราะห์และประเมินผลจากแบบจำลองต่างๆ เพื่อให้ได้ผลที่จะเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักแล้วทำให้เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม ซึ่งแสดงไว้ดัง Flow Chart ในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก โดยพิจารณาเฉพาะปริมาณฝน ขององค์กรที่ได้ทำการคำนวณผลลัพธ์ไว้แล้ว เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงในอดีตจากสถานีวัดน้ำฝน แล้วทำการปรับความคลาดเคลื่อน (Downscaling /Calibration) เท่านั้น

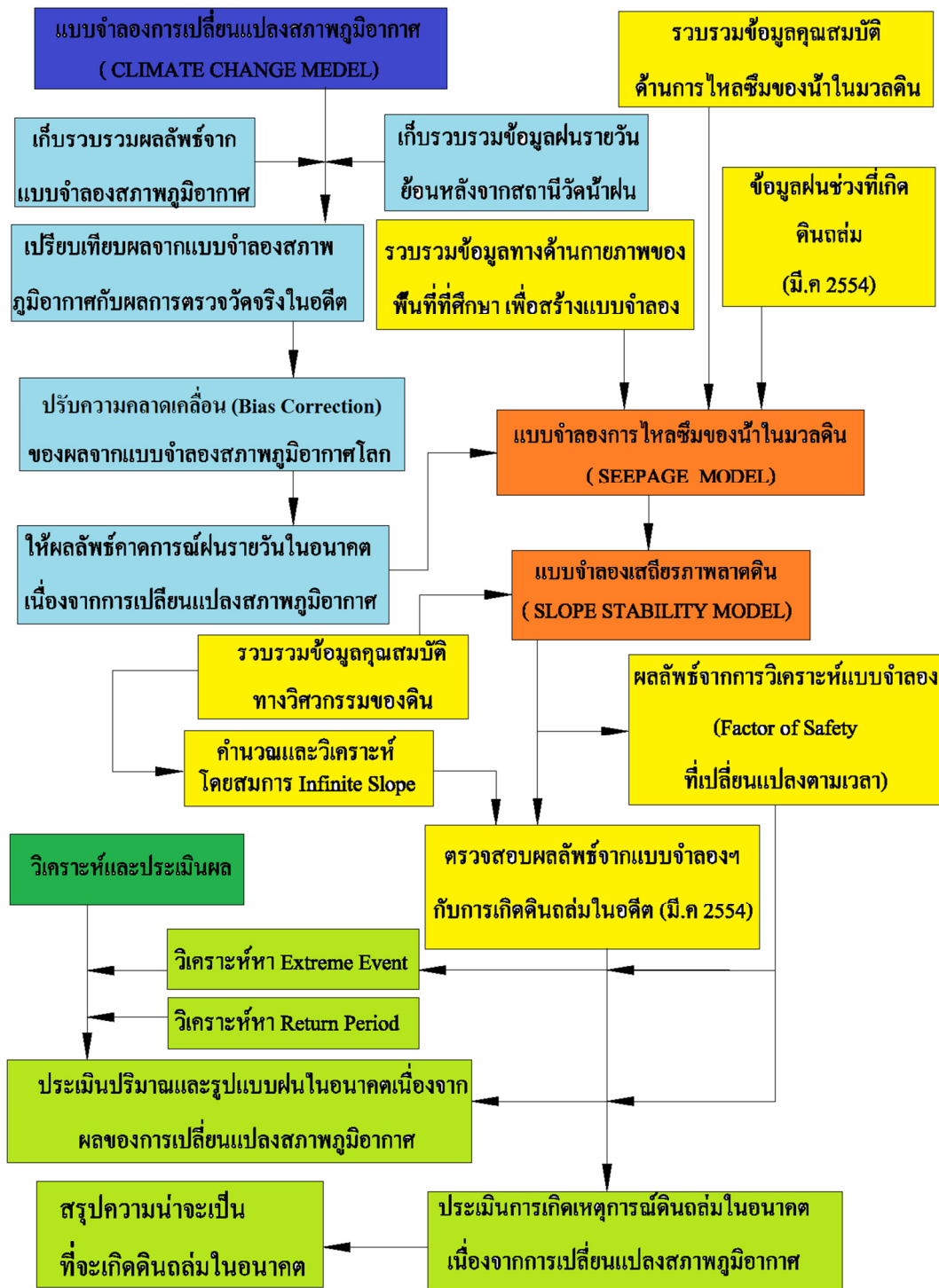
3.1.1 การเก็บรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ

งานวิจัยนี้ใช้ผลลัพธ์ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศจากแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 เพราะคาดการณ์ว่าพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเศรษฐกิจสูงจึงมีโอกาสนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Scenario A2 ผลลัพธ์ของแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 ของศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START) ดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://ccs.gms-eoc.org/climatechange/start/default.asp> ผู้วิจัยได้ทำการ Download ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2633 (2090) ระยะเวลา 107 ปี ครอบคลุมพิกัดพื้นที่ในการ Download ดังนี้ ขอบเขตบนซ้าย พิกัด 9.40,99.40 และขอบเขตล่างขวา พิกัด 7.80,100.20 (พื้นที่สีแดงในรูปที่ 3.2)

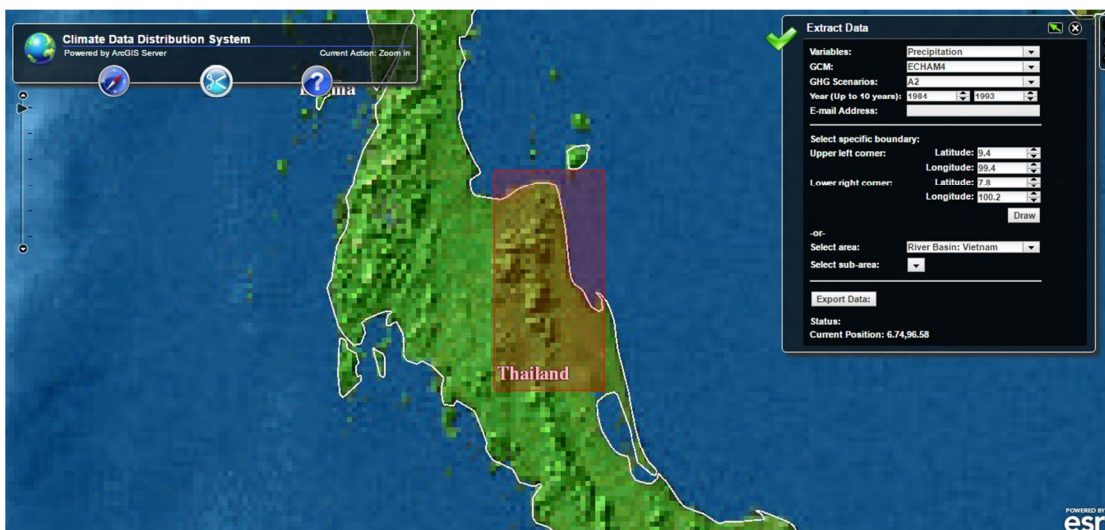
3.1.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลฝนย้อนหลังจากสถานีวัดน้ำฝน

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลฝนย้อนหลังออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นข้อมูลฝนย้อนหลังช่วงที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ช่วงปลายเดือนมีนาคม 2554 (2011) โดยได้รับข้อมูลฝนรายวันย้อนหลังจากศูนย์วิจัยภัยพิบัติธรรมชาติภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NadRec) ซึ่งเป็นข้อมูลฝนรายวันของสถานีตรวจวัดน้ำฝน อบต.ฉลอง (รหัสสถานี 5520016) ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2554 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2554

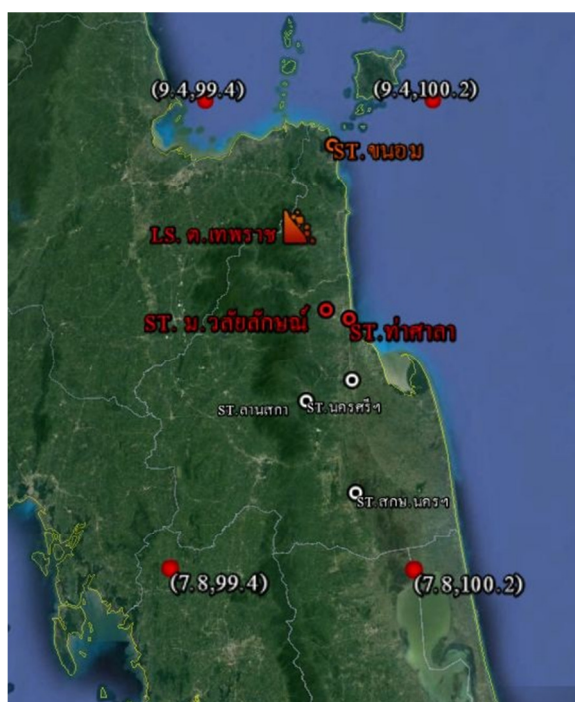
ส่วนที่สองเป็นการเก็บข้อมูลฝนรายวันย้อนหลัง 30 ปี เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก ผู้วิจัยได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออกจังหวัดสงขลา โดยเป็นข้อมูลฝนรายวันย้อนหลัง 30 ปี ของสถานีตรวจวัดน้ำฝนต่างๆในจังหวัดนครศรีธรรมราช แล้วมาทำการคัดเลือกสถานีตรวจวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับตำบลเทพราช ปรากฏว่ามี 3 สถานี คือ สถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา (รหัสสถานี 552005) สถานีตรวจวัดน้ำฝนมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (รหัสสถานี 552202) และ สถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอขนอม (รหัสสถานี 552024) จังหวัดนครศรีธรรมราช จากรูปที่ 3.3 ประกอบ แต่ปรากฏว่ามีเพียงสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา เท่านั้นที่มีข้อมูลฝนย้อนหลังมากที่สุดคือ 29 ปี ตั้งแต่ปี 2527 ถึง 2554 (1984 ถึง 2011) ในขณะที่สถานีตรวจวัดน้ำฝนมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ มีข้อมูลฝนย้อนหลัง 14 ปี ตั้งแต่ปี 2540 ถึง 2554 (1997 ถึง 2011) และสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอขนอม มีข้อมูลฝนย้อนหลัง 8 ปี ตั้งแต่ปี 2537 ถึง 2544 (1994 ถึง 2001) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลฝนย้อนหลังจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัด ละติจูดที่ 8.63 ลองจิจูดที่ 99.95 มาเป็นตัวแทนของปริมาณน้ำฝนที่ตำบลเทพราช พิกัด ละติจูดที่ 8.88 ลองจิจูดที่ 99.76 (คิดเป็นระยะห่าง 36 กิโลเมตรในแนวเส้นตรง) เพื่อทำการวิเคราะห์และตรวจสอบผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยที่ไม่ได้พิจารณาหลักการตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความสอดคล้องของข้อมูลด้วยวิธีการกราฟทับทวี (Double mass curve) เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล



รูปที่ 3.1 ภาพแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน



รูปที่ 3.2 ภาพแผนที่และ dialog box ให้กรอกข้อมูลที่ต้องการจะ download ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกจากศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START)



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝนที่มีข้อมูลฝนย้อนหลัง 30 ปีรอบๆ ต.เทพราช ST. คือสถานีตรวจวัดน้ำฝน, LS. คือสถานที่เกิดดินถล่ม (Land slide) (ที่มาของรูป : google earth)

3.1.3 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ กับผลการตรวจวัดจริงในอดีต

การศึกษาในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการเปรียบเทียบข้อมูลฝนระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกและข้อมูลฝนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา ในช่วงปี 2527 ถึง 2554 (1984 ถึง 2011) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าปีฐาน ออกเป็น 3 แบบ คือแบบที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบฝนรายเดือนแต่ละเดือน ในทุกๆปี แบบที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบฝนรายเดือนเฉลี่ยใน 29 ปี ของแต่ละเดือน แบบที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบฝนรายปีใน 29 ปี ดังนี้

แบบที่ 1 เปรียบเทียบฝนรายเดือนแต่ละเดือน ในทุกๆปี โดยทำการรวมปริมาณฝนรายวันในแต่ละเดือน (ทั้งฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกและฝนที่ตรวจวัดจริง) จนได้ฝนรายเดือน 12 เดือนในแต่ละปี จากนั้นทำการเขียนกราฟแท่งจากข้อมูลฝนรายเดือนดังกล่าว จนครบ 29 ปี

แบบที่ 2 เปรียบเทียบฝนรายเดือนเฉลี่ยใน 29 ปี ของแต่ละเดือน เป็นการนำฝนรายเดือนแต่ละเดือนในระยะเวลา 29 ปี (ทั้งฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกและฝนที่ตรวจวัดจริง) มาหาค่าเฉลี่ย เช่น ต้องการหาค่าเฉลี่ยของฝนเดือนมกราคม โดยการรวมฝนของเดือนมกราคม ตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2012 (รวมทั้งสิ้น 29 ปี)หารด้วยจำนวน 29 ก็จะได้ค่าเฉลี่ยของฝนเดือนมกราคมใน 29 ปี และทำเช่นเดียวกันนี้กับเดือนอื่นๆ จนครบ 12 เดือน

แบบที่ 3 เปรียบเทียบฝนรายปีใน 29 ปี เป็นการรวมปริมาณฝนรายวันทุกวันใน 1 ปี (ทั้งฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกและฝนที่ตรวจวัดจริง) ก็จะได้ฝนรายปีตั้งแต่ปี 1984 จนถึงปี 2011 จากนั้นทำการเขียนกราฟ

กราฟแท่งที่ได้ จะใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณและรูปแบบของฝนระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกและข้อมูลฝนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา ในช่วง 29 ปีในอดีต

ในการศึกษานี้จะไม่มีเปรียบเทียบข้อมูลฝนรายวันเนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากและไม่เหมาะสมกับหัวข้อวิจัย เพราะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate Change) เป็นการพิจารณาในกรอบของเวลาเป็นปี หลายสิบปีขึ้นไป ไม่ใช่สภาพอากาศ (Weather) ที่พิจารณาในกรอบเวลารายวัน ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1

3.1.4 การปรับความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการปรับความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ด้วยวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta factor) เพราะเป็นวิธีการที่สะดวก ไม่ซับซ้อน และสามารถปรับแก้ปริมาณฝนรายเดือน ซึ่งมี 2 ขั้นตอนหลักคือ การหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์และการกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) ดังหลักการที่อยู่ในหัวข้อที่ 2.2.6

3.1.4.1 การหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์

ในขั้นตอนนี้สิ่งแรกที่ต้องทำคือการกำหนดปีฐาน (Baseline) ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลฝนที่ตรวจวัดได้ในอดีตว่ามีกี่ปี สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อมูลฝนที่ตรวจวัดได้ในอดีต 29 ปี ดังนั้นจำนวนปีฐานจึงเท่ากับ 29 ปี หลังจากนั้นจึงทำการแบ่งชุดข้อมูลหรือช่วงเวลาของผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก ECHAM4 ออกเป็น 3 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 29 ปี โดยผู้วิจัยได้หาค่าเดลต้าแฟกเตอร์รายเดือนของแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

1. หาค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือน ($Y_{GCM,FUTURE}$) ทั้ง 12 เดือนของผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกช่วงปีในอนาคต (ช่วงเวลาที่ 1,2 และ3) ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในตาราง ซ.1 ในภาคผนวก ซ.
2. หาค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือน ($Y_{GCM,BASELINE}$) ทั้ง 12 เดือนของผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกช่วงปีฐาน (1984 ถึงปี 2012) ดังตาราง ซ.2 ในภาคผนวก ซ.
3. นำค่าที่ได้จากข้อ 1 และ 2 มาคำนวณหาเดลต้าแฟกเตอร์ (ΔY) ตามสมการที่ 2.1 ดูตัวอย่างการคำนวณท้ายตาราง ซ.2 ในภาคผนวก ซ.
4. นำค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (ΔY) นำไปคูณกับปริมาณฝนที่ได้จากการตรวจวัดในอดีต (ฝนในปีฐาน) ผลลัพธ์ที่ได้คือ “ปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)”

3.1.4.2 การกระจายค่าปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)

จากสมมติฐานของการทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (Statistical Bias Correction) ที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) และผลการตรวจวัดฝนในอดีตจนถึงปัจจุบันจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในอนาคต ดังนั้นเมื่อได้ “ปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta)” จากหัวข้อที่ 3.1.4.1 แล้ว ก็นำไปกระจายในชุดข้อมูลฝนในอดีตที่ได้จากการตรวจวัดจริง ด้วยวิธีการต่างๆดังที่นำเสนอไปในหัวข้อที่ 2.2.6.2 ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าชุดข้อมูลฝนในอนาคตที่ปรับแก้ให้สอดคล้องกับชุดข้อมูลฝนในอดีตที่ได้จากการตรวจวัดจริงแล้ว

3.2 แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน

การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจากบริษัท GEO-SLOPE International จำกัด ซึ่งประกอบด้วย 1.) โปรแกรม SEEP/W เป็นโปรแกรมวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดิน โดยใช้หลักการไฟไนต์อิลเมนต์ (Finite Element) ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นและการไหลซึมของน้ำในลาดดินเนื่องจากฝนที่ตก และ 2.) โปรแกรม SLOPE/W เป็นโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยวิธีแบ่งส่วนของดินออกเป็นชิ้นเล็กๆ (Slice Method) เพื่อคำนวณเสถียรภาพลาดดิน โดยการหาอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆดังนี้

3.2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นที่และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ของพื้นที่ที่ศึกษา

เนื้อหาของงานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของลาดดินที่เกิดดินถล่มที่ ต.เทพราช อ.สีชล จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นจุดที่ผู้วิจัยนำมาทำการวิเคราะห์คำนวณย้อนกลับ เพราะเป็นพื้นที่ที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม (Sensitive Area) ข้อมูลทางกายภาพก่อนการเกิดเหตุการณ์ดินถล่ม พบว่าพื้นที่ดังกล่าวมีปัจจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use change) ของคนในพื้นที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงผืนป่าธรรมชาติมาเป็นสวนยางพารา แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัจจัยทางด้านปฐพีวิศวกรรมเป็นหลัก จึงได้นำปัจจัยเรื่องการเปลี่ยน-

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นที่และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ของพื้นที่ที่ศึกษา

ประเภทข้อมูล	รายละเอียดข้อมูล	แหล่งข้อมูล
1.) ข้อมูลเชิงกายภาพของพื้นที่	เป็นดินทรายปนตะกอนทราย (Silty Sand, SM)	รัชพลและคณะ(2556)
	หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) มีค่า 16.81 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	
	อัตราส่วนช่องว่างของมวลดิน (e) เท่ากับ 0.66	
	ชั้นดินมีความหนา 3.0 เมตร วางตัวบนชั้นหินผุ	
	ความยาวของลาดดินประมาณ 70 เมตร	
	ลาดดินเอียงทำมุมกับแนวราบ 24-26 องศา	
2.) ข้อมูลคุณสมบัติของดินในส่วนของความแข็งแรง	หน่วยแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') มีค่าอยู่ในช่วง 7.85 – 27.96 kPa	รัชพลและคณะ(2556)
	ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') มีค่าอยู่ในช่วง 23.05 – 26.18 องศา	
3.) ข้อมูลคุณสมบัติของดินในส่วนความสามารถในการไหลซึมของน้ำ	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินอิ่มตัว (K_{sat}) เท่ากับ 0.1113 เมตรต่อชั่วโมง	รัชพลและคณะ(2556)
	ระดับความอิ่มตัวของมวลดินในธรรมชาติ ($S_{r,n}$) เท่ากับ 60%	
	กราฟเส้นอัตราลักษณะของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (SWCC)	ชลดา (2559)
	ฟังก์ชันค่าความสามารถในการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function)	

แปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use change) ผนวกเข้าไปในส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์ทางด้านวิศวกรรมของดิน ได้แก่ หน่วยแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล เป็นต้น ในการศึกษาข้อมูลหลักๆทางด้านวิศวกรรมของดิน ผู้วิจัยได้ศึกษาจากงานวิจัยของ รัชพลและคณะ (2556) และชลดดา (2559) ซึ่งรัชพลและคณะ(2556) ได้ทำการทดสอบทั้งภาคสนามและห้องปฏิบัติการตั้งแต่ปี 2554 เพื่อให้ได้ข้อมูลของพื้นที่และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ส่วนชลดดา (2559) ได้นำข้อมูลของรัชพลและคณะ (2556) มาวิเคราะห์ต่อโดยใช้หลักการทางวิศวกรรมปฐพี ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพิ่มเติม ผู้วิจัยเริ่มต้นโดยการศึกษาข้อมูลทั้งหมดจากทั้งสองงานวิจัยดังกล่าว รายละเอียดดังตารางที่ 3.1

3.2.2 การวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพลาดดิน ช่วงที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม

เนื้อหาในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และโปรแกรม SLOPE/W เพื่อกำหนดแบบจำลองของลาดดิน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เหมาะสม และหาความสัมพันธ์ของปริมาณฝนตกสะสมและระยะเวลาที่ทำให้ลาดดินถล่ม โดยการป้อนปริมาณฝนรายวันที่ตรวจวัดได้ช่วงที่เกิดดินถล่มให้กับโปรแกรมทั้งสองทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนปลอดภัย ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 รายละเอียดถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ส่วนที่ 2 เป็นการคำนวณโดยใช้สมการเสถียรภาพของลาดดินแบบอนันต์ (Infinite Slope Stability Equation) เพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลองลาดดินและผลการคำนวณจากส่วนที่ 1 รายละเอียดในการดำเนินการเป็นดังนี้

3.2.2.1 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และโปรแกรม SLOPE/W

ในการวิเคราะห์และคำนวณโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และโปรแกรม SLOPE/W เพื่อคำนวณหา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของลาดดินที่สอดคล้องกับเหตุการณ์ดินถล่มช่วงปลายเดือน มีนาคม 2554 และหาปริมาณฝนสะสมที่ทำให้เกิดดินถล่มในช่วงเวลาดังกล่าว สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นส่วยย่อยดังนี้

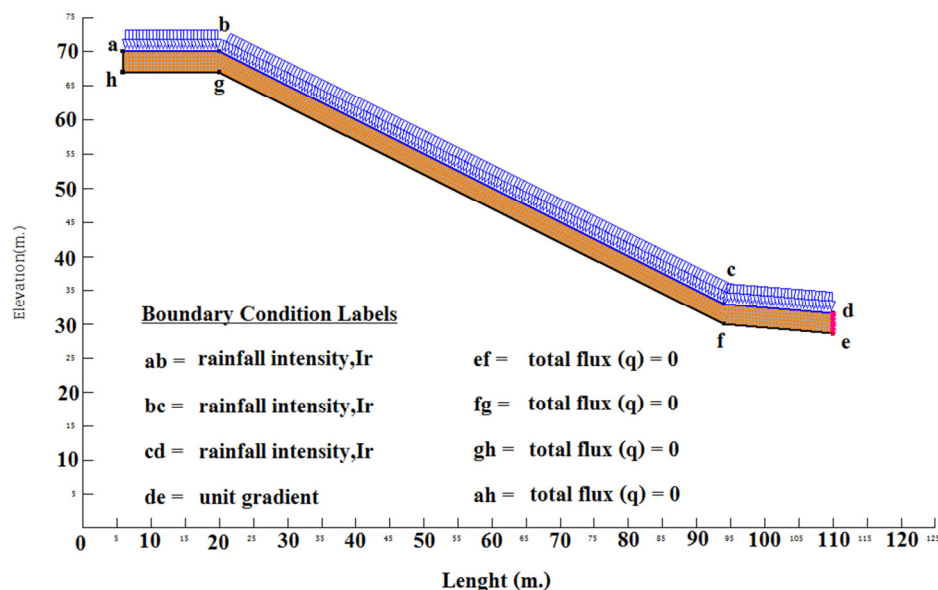
1.) การสร้างแบบจำลองลาดดิน และกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition)

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองลาดดินเป็นแบบจำลอง 2 มิติ โดยใช้ข้อมูลทางกายภาพจากตารางที่ 3.1 และกำหนดเงื่อนไขขอบ Boundary condition ดังนี้ ผิวดินได้รับฝนสม่ำเสมอตลอดทั้งแนว (แนว abcd ในรูปที่ 3.4) ดินของลาดดินกำหนดให้น้ำสามารถไหลออกได้อย่างอิสระภายใต้คุณสมบัติการไหลซึมของดินเอง จึงกำหนด Boundary condition ให้เป็น unit gradient (แนว de ในรูปที่ 3.4) ใต้ชั้นดินถูกพิจารณาให้เป็นชั้นหินทึบน้ำ นั่นคือไม่มีน้ำไหลออกจากแนวนี้ จึงกำหนด Boundary condition ให้เป็น total flux เท่ากับศูนย์ (แนว efgh ในรูปที่ 3.4) ด้านยอดของลาดดินกำหนดให้น้ำไม่สามารถไหลเข้า-ออกได้จึงกำหนด Boundary condition ให้เป็น total flux เท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน (แนว ah ในรูปที่ 3.4)

ชั้นดินในแบบจำลองถูกแบ่งย่อย (Generate mesh) ออกเป็น element ขนาด 0.5×0.5 ตารางเมตรตลอดหน้าตัด ถึงแม้ว่าโปรแกรม SEEP/W จะสามารถ Generate mesh ได้ละเอียดกว่านี้ แต่ก็ส่งผลให้คอมพิวเตอร์ทำงานหนักขึ้น ประกอบกับขนาดของไฟล์ก็จะใหญ่ขึ้นตามไปด้วย สำหรับงานวิจัยนี้การ Generate ด้วยขนาดดังกล่าว ให้ผลลัพธ์ที่เพียงพอต่อความต้องการแล้ว คือสามารถหาความดันของน้ำในชั้นดิน (Pore water pressure) ตามความลึกต่างๆ ที่เวลาต่างๆได้ สามารถหาระดับน้ำใต้ดินที่เวลาต่างๆได้

2.) การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้แบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่นำไปกำหนดให้กับแบบจำลอง ได้ข้อมูลจากตารางที่ 3.1 โดยพบว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรม หรือค่าพารามิเตอร์บางชนิดไม่ได้มีค่าเดียว กล่าวคือมีค่าเป็นช่วงๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงของข้อมูลตามที่ปรากฏในตารางที่ 3.1 ป้อนเข้าไปในโปรแกรม SEEP/W และโปรแกรม SLOPE/W แล้วปรับค่าไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (ดินถล่ม) ณ เวลาที่สอดคล้องกับเวลาที่เกิดดินถล่มจริง คือ ช่วงวันที่ 26-27 มีนาคม 2011 และยึดถือเอาแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของแบบจำลองลาดดินที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช และใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาผลลัพธ์จากชุดข้อมูลฝนอื่นๆต่อไป



รูปที่ 3.4 แบบจำลองลาดดินแสดง Boundary Condition ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.) การคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis)

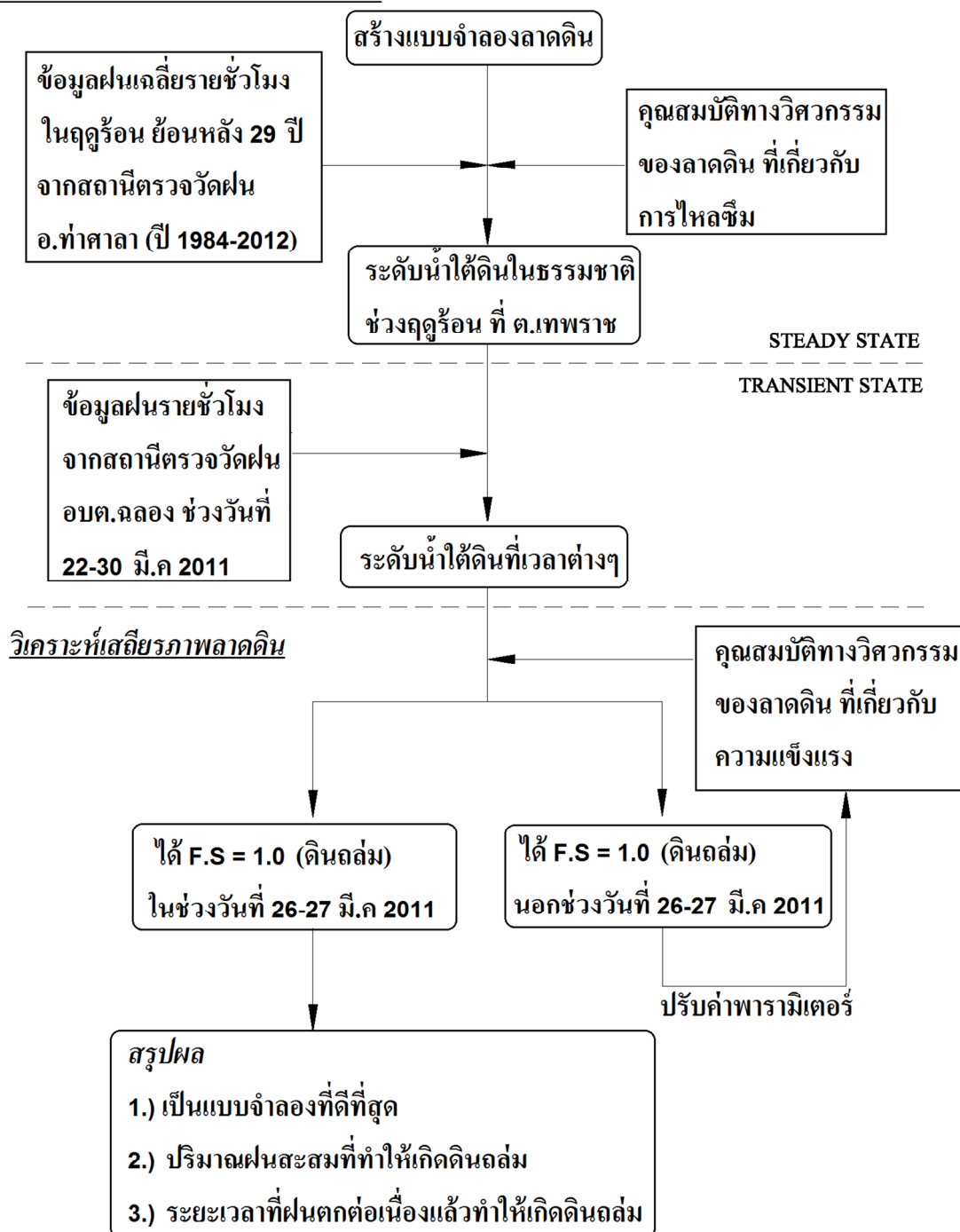
ขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับ สามารถแบ่งกระบวนการนี้ออกเป็น 3 กระบวนการ คือ กระบวนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแบบการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady State) กระบวนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแบบการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient State) และกระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เพื่อหาอัตราส่วนความปลอดภัยในเวลาต่างๆ (ดู Flow Chart ในรูปที่ 3.5 ประกอบ)

กระบวนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแบบการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady State) เป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติ ก่อนที่จะเกิดฝนตก และเป็น Initial input ให้กับกระบวนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแบบการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient State) โดยผู้วิจัยได้นำข้อมูลฝนรายวันช่วงฤดูร้อน (เดือนมกราคม ถึง เมษายน) ย้อนหลัง 29 ปี มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยฝนรายชั่วโมง แล้วนำค่าที่ได้ไปป้อนในส่วน Boundary Condition ในแนว abcd รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณจะได้ระดับน้ำใต้ดินธรรมชาติ ซึ่งผู้วิจัยจะนำผลลัพธ์นี้ไปเป็น initial input ให้กับการคำนวณการไหลซึมของน้ำใต้ดินแบบการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient state) ต่อไป

กระบวนการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแบบการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient State) ในกระบวนการนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลฝนรายชั่วโมงของสถานี อบต.ฉลอง (รหัสสถานี 5520016) ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2554 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2554 ไปป้อนในส่วนของ Boundary Condition ในแนว abcd รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณจะได้ระดับน้ำใต้ดิน และความชื้นที่จุดต่างๆ ในแต่ละชั่วโมง ซึ่งผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์นี้ไปเป็น initial input ให้กับการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม SLOPE/W ต่อไป

กระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องจากการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำใต้ดินแบบการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient state) ผู้วิจัยกำหนดให้โปรแกรม SLOPE/W ใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธี Bishop 's Simplify ในการหาอัตราส่วนความปลอดภัยแต่ละชั่วโมง (Time Step) แล้วเลือก Time Step ที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (ดินถล่ม) มาพิจารณาว่าอยู่ในช่วงวันที่ 26-27 มีนาคม 2011 หรือไม่ ถ้าอยู่ในช่วงนี้ ก็จะสรุปว่าแบบจำลองที่สร้างเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด แล้วหาปริมาณฝนตกสะสมและระยะเวลาที่ฝนตกจนถึง Time Step ต่อไป แต่หากว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (ดินถล่ม) ไม่อยู่ในช่วงวันที่ 26-27 มีนาคม 2011 ก็จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ แล้วให้โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยแต่ละชั่วโมงใหม่ ทำแบบนี้เรื่อยๆจนกว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (ดินถล่ม) จะอยู่ในช่วงวันที่ 26-27 มีนาคม 2011

วิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดิน



รูปที่ 3.5 ภาพแผนผังแสดงกระบวนการคำนวณย้อนกลับ

3.2.2.2 การคำนวณโดยใช้สมการลาดอนันต์ (Infinite Slope Stability Equation)

เนื่องจากข้อมูลทางกายภาพของลาดดินที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัด นครศรีธรรมราช มีลักษณะที่เป็นชันดินบาง (หนา 3 เมตร) เมื่อเทียบกับความยาวของลาดดิน (ยาว 70 เมตร) ดังตารางที่ 3.1 ทำให้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยวิธีพื้นฐานอีกหนึ่งวิธี คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (คำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย) โดยใช้สมการลาดอนันต์ (สมการที่ 2.33) ในหัวข้อที่ 2.5.2 ในกระบวนการนี้ผู้วิจัยได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ 2.33 ตามค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ในโปรแกรม SLOPE/W ทุกประการ ยกเว้น ค่าความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่วัดจากชั้นหินที่น้ำขึ้นไป (Z_w) เท่านั้นที่ปล่อยให้เปลี่ยนแปลงได้ ในการคำนวณจะกำหนดค่าระดับน้ำใต้ดิน (Z_w) จาก 0 เมตร (ไม่มีน้ำใต้ดิน) ไปจนถึงที่ระดับ 3.0 เมตร ซึ่งเป็นระดับผิวดิน แล้วคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) จากนั้นนำคู่อันดับระหว่าง ระดับน้ำใต้ดิน กับ อัตราส่วนความปลอดภัย มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ เพื่อพิจารณาหาว่า ที่ อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 (ดินถล่ม) ระดับน้ำใต้ดิน (Z_w) เป็นเท่าไร

เมื่อทราบระดับน้ำใต้ดิน (Z_w) ที่ทำให้เกิดดินถล่มแล้ว ก็นำระดับน้ำใต้ดินดังกล่าวไป คำนวณปริมาณฝนตกสะสมได้จากสมการที่ 2.38

3.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากแบบจำลองต่างๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน และแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน มาวิเคราะห์และ ประเมินร่วมกัน เพื่อหาเหตุการณ์สำคัญ 2 เหตุการณ์ คือ จำนวนเหตุการณ์ฝนหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และ จำนวนเหตุการณ์ดินถล่มเนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

3.3.1 วิเคราะห์ฝนในอนาคตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากแบบจำลอง

ภาพฉาย (Projection) หรือผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคต (GCM) ที่ทำ การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้วตามวิธีการในหัวข้อ 3.1.4 คือ ปริมาณฝนรายวันในอนาคต 78 ปี ข้างหน้า (2013 – 2090) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้กำหนดกรอบในการวิเคราะห์ฝนในอนาคตดังกล่าว

ออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น ปริมาณฝน ช่วงเวลาของปีที่ฝนตก เป็นต้น) ของฝนในอนาคต โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลฝนในอดีตที่ได้ จากตรวจวัดจริง ส่วนที่สองคือการหาเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มี อิทธิพลต่อการเกิดลาดดินถล่มที่ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช โดยรายละเอียดจะกล่าวถึง ในหัวข้อที่ 3.3.1.2 ส่วนที่สาม คำนวณหารอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) ของเหตุการณ์ฝนตก หนัก (Extreme Rain) ในอนาคต โดยใช้วิธีทางสถิติ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3.1.3 ต่อไป

3.3.1.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฝนในอนาคต

ฝนรายวันในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) หลังจากได้ทำการ ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว จะถูกทำให้เป็นฝนรายเดือน และฝนรายปีเสียก่อน จึงจะนำมา วิเคราะห์และประเมินได้ เนื่องจากฝนรายเดือน และฝนรายปี จะแสดงแนวโน้มของฝนในอนาคต ได้ชัดเจนกว่าฝนรายวัน และการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) จะไม่ พิจารณาฝนรายวันดังที่อธิบายแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1

เมื่อได้ฝนรายเดือน (ได้จากการรวมฝนรายวันทุกๆ 30 วัน) และฝนรายปี (ได้จากการรวม ฝนรายวันทุกๆ 360 วัน) ในอนาคตแล้ว นำฝนในอนาคตดังกล่าวมาเขียนกราฟ โดยฝนรายเดือนจะ เขียนเป็นกราฟแท่ง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในช่วงฤดูต่างๆของปีได้สะดวก ส่วนฝนรายปีจะเขียน เป็นกราฟเส้นเพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงได้ง่ายกว่า จากนั้นจึงมาวิเคราะห์ข้อมูล จาก กราฟใน 3 ประเด็น คือ

- 1.) แนวโน้มรูปแบบฝนในแต่ละเดือนของปี ตลอด 78 ปีข้างหน้าเป็นอย่างไร
- 2.) แนวโน้มปริมาณฝนในแต่ละฤดูกาลของปี ตลอด 78 ปี ข้างหน้ามีการเปลี่ยนแปลงจาก อดีตหรือไม่
- 3.) แนวโน้มปริมาณฝนรายปี ในอนาคต 78 ปีข้างหน้าจะเพิ่มขึ้น หรือลดลง

3.3.1.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ใน อนาคต

ฝนรายวันในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) หลังจากได้ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว และฝนรายวันในอดีตที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกนำมาเรียงจากวันแรกไปจนถึงวันสุดท้ายของแต่ละปี เพื่อวิเคราะห์หาเหตุการณ์ฝนตกหนัก และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตเมื่อเทียบกับช่วงเวลาในอดีต (1984 – 2012) โดยมีรายละเอียดการหาเหตุการณ์ฝนตกหนักดังนี้

- 1.) นำฝนรายวันในอดีตที่ได้จากการตรวจวัดจริงของปีฐาน (1984 – 2012) มาเรียงจากวันแรกไปจนถึงวันสุดท้ายของแต่ละปี
- 2.) จัดกลุ่มช่วงเวลาที่ฝนตกต่อเนื่องกันหลายวัน แล้วทำให้ปริมาณฝนตกสะสมมากที่สุดมากที่สุดอันดับสอง และมากที่สุดอันดับสาม ของแต่ละปี
- 3.) บันทึกปริมาณฝนตกสะสมมากที่สุด พร้อมกับจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง และทำเช่นเดียวกันกับกรณีฝนตกสะสมมากที่สุดอันดับสอง และสาม ของแต่ละปี
- 4.) นำปริมาณฝนตกสะสมมากที่สุด มากที่สุดอันดับสองและมากที่สุดอันดับสาม ของแต่ละปีไปเขียนกราฟแท่ง เพื่อจะได้ง่ายในการเปรียบเทียบและหาเหตุการณ์ฝนตกหนักต่อไป
- 5.) นำฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองมาทำแบบเดียวกับฝนในอดีตโดยเริ่มจากข้อ 1 - 4
- 6.) กำหนดให้เหตุการณ์ที่มีฝนตกสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไปเป็นเหตุการณ์ฝนตกหนัก (ค่าฝนตกสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตร ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับ, Back Analysis, เหตุการณ์ลาดดินถล่มที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011 ซึ่งปรากฏว่าลาดดินถล่ม เมื่อปริมาณฝนตกสะสม 682 มิลลิเมตร)
- 7.) นำกราฟแท่งที่ได้จากข้อ 4 และ 5 มาวิเคราะห์หาว่ามีเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไปมีกี่ครั้ง

- 8.) เปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคต เทียบกับในอดีต เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

3.3.1.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฝนจากแบบจำลองโดยการตรวจสอบกับรอบปีการเกิดซ้ำ (Return period)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก เพื่อตรวจสอบสอดคล้องตรงกัน โดยการใช้อายุรอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) มาตรวจสอบอีกครั้ง สำหรับวิธีการตรวจสอบ เป็นดังนี้

- 1.) หาปริมาณฝนสูงสุดในแต่ละปีจากฝนที่ตรวจวัดจริงในอดีต (ปี 1984 – 2012)
- 2.) ใช้วิธีการกระจายของ Gumbel ดังที่อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.7 เพื่อหาอายุรอบปีการเกิดซ้ำ (Return period)
- 3.) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฝนสูงสุด วันที่ฝนตกต่อเนื่อง และรอบปีการเกิดซ้ำ
- 4.) เลือกเงื่อนไขในการตรวจสอบฝนจากแบบจำลอง จากผลการวิเคราะห์ย้อนกลับ เหตุการณ์การดินถล่มที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011 คือ ฝนตกต่อเนื่องติดต่อกัน 3 วันแล้วได้ปริมาณฝนสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไป
- 5.) ตรวจสอบจำนวนเหตุการณ์ที่ฝนตกต่อเนื่องติดต่อกัน 3 วันแล้วได้ปริมาณฝนสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไปจากฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองว่าเกิดขึ้นในปีใดบ้าง
- 6.) เปรียบเทียบรอบปีการเกิดซ้ำระหว่างกราฟในข้อ 3.) กับผลการตรวจนับในข้อ 5.)

3.3.2 ประเมินเหตุการณ์ลาดดินถล่มเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

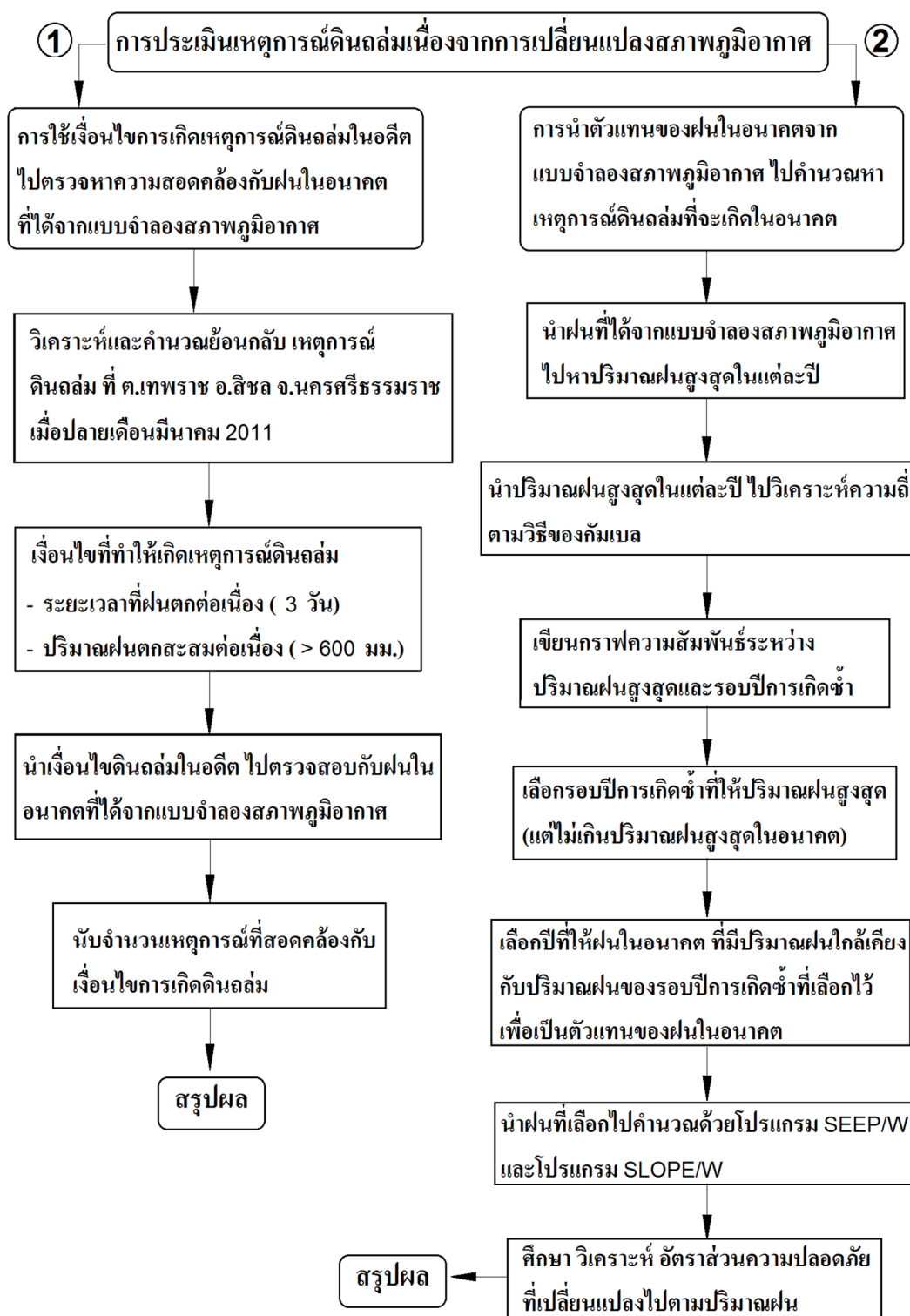
การประเมินเหตุการณ์ลาดดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีหลากหลายแนวทางให้เลือกประเมิน และสำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ 2 แนวทาง ในการประเมินหาแนวโน้มที่จะเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม ที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

3.3.2.1 ใช้เงื่อนไขต่างๆที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มในอดีตไปตรวจหาความสอดคล้องกับฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ

ผลที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเหตุการณ์ลาดดินถล่ม ที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อปลายเดือนมีนาคม 2011 ซึ่งอธิบายวิธีการไว้ในข้อที่ 3 หัวข้อ 3.2.2.1 คือ เงื่อนไขต่างๆที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่

- 1.) ระยะเวลาที่ฝนตกแล้วทำให้อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่า FS ลดไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่ FS เท่ากับ 1.0 (ลาดดินถล่ม)
- 2.) ปริมาณน้ำฝนสะสมในช่วงระยะเวลาในข้อ 1

จากนั้นใช้เงื่อนไขสองเงื่อนไขนี้ ผู้วิจัยได้นำไปตรวจสอบกับฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับความคลาดเคลื่อนแล้ว ว่ามีกี่ครั้งที่มีเหตุการณ์ตรงกับเงื่อนไขดังกล่าว ซึ่งขั้นตอนของการศึกษาในแนวทางนี้สามารถอธิบายได้ด้วย Flow Chart ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพแผนผังแสดงกระบวนการประเมินเหตุการณ์ดินถล่มจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

3.3.2.2 การนำน้ำฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกในอนาคตไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS)

การนำข้อมูลฝนรายวันที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SEEP/W และ SLOPE/W แล้วนับจำนวนเหตุการณ์ที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า 1.0 (ลาดดินถล่ม) เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ลาดดินถล่มกับผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต แต่สำหรับงานวิจัยนี้ไม่สามารถจะนำข้อมูลฝนรายวันที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศทั้งหมดไปคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ เพราะข้อจำกัดในทางศักยภาพของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกตัวแทนของฝนในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศมาหนึ่งช่วง นำมาคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย เพื่อดูความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ลาดดินถล่มกับผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต หลักในการเลือกตัวแทนของฝนในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกสรุปได้ดังนี้ (ดู Flow Chart ในรูปที่ 3.6 ประกอบ)

1. หาปริมาณฝนสูงสุดในแต่ละปี จากฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ สาเหตุที่เลือกใช้ฝนสูงสุด เพราะผู้วิจัยต้องการพิจารณาเหตุการณ์ที่ฝนตกหนัก (Extreme Event)
2. หารอบปีการเกิดซ้ำด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถี่ของกัมเบล รายละเอียดและวิธีการได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.7
3. ผลจากข้อ 2 จะได้รอบปีการเกิดซ้ำของเหตุการณ์ที่ฝนตกหนัก (ฝนสูงสุด) หลายๆ รอบปีการเกิดซ้ำ ซึ่งการเลือกรอบปีการเกิดซ้ำใดมาใช้ ก็จะขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่าสนใจพิจารณาในช่วงเวลาที่ปี แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกรอบปีการเกิดซ้ำที่ให้ปริมาณฝนสูงสุด แต่ไม่เกินปริมาณฝนสูงสุดในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ เพราะถ้าเลือกรอบปีการเกิดซ้ำที่ให้ปริมาณฝนสูงกว่านี้ จะไม่สามารถหาเหตุการณ์ฝนตกรุนแรงในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศได้
4. เมื่อได้เหตุการณ์ฝนตกหนัก (ปริมาณฝนสูงสุด) จากการวิเคราะห์รอบปีการเกิดซ้ำในข้อ 3 แล้ว ก็ไปพิจารณาเหตุการณ์ฝนตกหนัก (เหตุการณ์ที่เกิดฝนสูงสุด) ในแต่ละปีใน

อนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แล้วเลือกปีที่ทำให้ปริมาณฝนสูงสุดใกล้เคียงกับฝนสูงสุดในรอบปีการเกิดซ้ำที่เลือกจากข้อ 3 เพื่อเป็นตัวแทนฝนในอนาคตไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย

5. นำฝนรายวันของปีที่เลือกจากข้อ 4 ไปเป็นข้อมูลนำเข้าในโปรแกรม SEEP/W ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกเฉพาะฤดูฝน (เดือนตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม) ของปีนั้น เพราะจากการสังเกตแนวโน้มฝนในช่วงต่างๆของปี ปรากฏว่าในอนาคต ฝนส่วนใหญ่จะยังคงตกหนักในช่วงฤดูฝน ส่วนช่วงต้นปีจะแห้งแล้ง เมื่อนำไปคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยแล้ว ค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก (ลาดดินยังคงมีเสถียรภาพสูง)
6. ให้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W คำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝน แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว
7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์และความสอดคล้องระหว่างเหตุการณ์ลาดดินถล่มกับผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ตามขั้นตอนการดำเนินงานที่อธิบายไว้ใน บทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย ผลการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผลการศึกษาแบบจำลองลาดดิน ได้แก่ แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในลาดดินกับแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน และผลการประเมินการเกิดลาดดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก

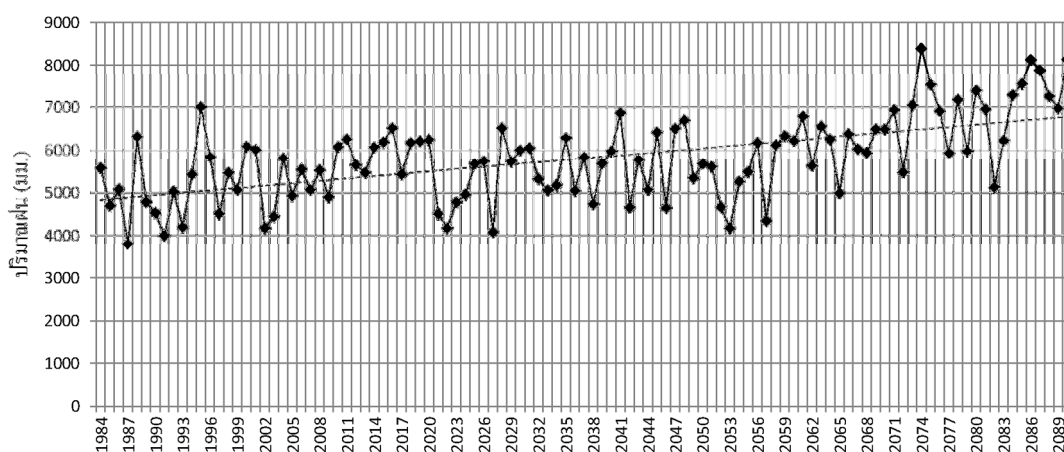
ผลการศึกษาในส่วนนี้แบ่งเป็นผลการเก็บรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก และผลการตรวจวัดจริงจากสถานีวัดน้ำฝน ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก และผลการตรวจวัดจริงจากสถานีวัดน้ำฝน และส่วนสุดท้ายคือผลการปรับความคลาดเคลื่อน (Bias Correction) ของผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก

4.1.1 ผลการเก็บรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก

แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ซึ่งได้จากศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START) เปิดให้ดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://ccs.gms-eoc.org/climatechange/start/default.asp> ผู้วิจัยได้ดาวน์โหลดผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2633 (2090) ระยะเวลา 107 ปี โดยเลือกผลลัพธ์ที่พิกัด (Lat 8.60, Lon 99.80) ซึ่งใกล้เคียงกับพิกัดของสถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช คือพิกัด (Lat 8.63, Lon 99.95) และเพื่อประหยัดเนื้อที่ของกระดาษ ผู้วิจัยได้นำเสนอในรูปของฝนรายเดือน รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ตารางที่ ก. สำหรับข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่เป็นฝนรายวันผู้วิจัยได้บรรจุลงในแผ่นบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ (CD) ที่แนบมาด้วย โดยผลลัพธ์

จากแบบจำลองดังกล่าวที่ดาวน์โหลดมาจะอยู่ในรูปของ Text file ดังนั้นต้องทำการแปลง text file ดังกล่าวให้อยู่ในรูป excel file เพื่อจะได้สะดวกในการนำไปใช้งานต่อไป

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในรูปของฝนรายปีตั้งแต่ปี ตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2090 จะพบว่าฝนรายปีเฉลี่ยอยู่ที่ 5,898 มิลลิเมตรต่อปีโดยประมาณ และแนวโน้มจะมีฝนมากขึ้นในอนาคต ดังรูปที่ 4.1 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากปีฐาน (1984-2012) 7 % , 10% และ 34% ในช่วงระหว่างปี 2013- 2041, 2041-2070 และ 2071-2090 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ปริมาณฝนรายปีจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ตั้งแต่ปี 1984 ถึง ปี 2090

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลฝนรายปีตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2090 มาพิจารณาทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าฝนรายปีต่ำสุด และค่าฝนรายปีสูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ตั้งแต่ปี 1984 ถึง 2012 เป็นช่วงปีที่มีข้อมูลการตรวจวัดจริง หรือ ปีฐาน และเป็นข้อมูลช่วงปลายของศตวรรษก่อนต่อเนื่องถึงต้นของศตวรรษนี้ ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ปี 2013 ถึง 2041 เป็นข้อมูลช่วงต้นของศตวรรษนี้เรียกว่า อนาคตอันใกล้ (Near Future) ช่วงที่ 3 ตั้งแต่ปี 2042 ถึง 2070 เป็นข้อมูลช่วงกลางของศตวรรษนี้เรียกว่า อนาคตช่วงกลาง (Intermediate Future) และช่วงที่ 4 เป็นข้อมูลช่วงท้ายของศตวรรษนี้เรียกว่า อนาคตอันไกล (Far Future) ข้อมูลดังกล่าวถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลทางสถิติของฝนรายปี ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2090

ข้อมูลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช							
ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)
1984	5574.07	2013	5464.41	2042	4654.38	2071	6932.41
1985	4694.01	2014	6073.56	2043	5772.52	2072	5473.35
1986	5074.70	2015	6187.41	2044	5060.74	2073	7050.55
1987	3794.33	2016	6521.05	2045	6414.15	2074	8388.56
1988	6315.23	2017	5421.15	2046	4643.49	2075	7527.23
1989	4787.47	2018	6170.01	2047	6507.53	2076	6920.36
1990	4524.56	2019	6208.09	2048	6701.91	2077	5931.65
1991	3996.45	2020	6235.90	2049	5331.06	2078	7176.58
1992	5025.97	2021	4507.22	2050	5672.45	2079	5982.36
1993	4200.51	2022	4179.38	2051	5606.11	2080	7385.82
1994	5426.91	2023	4778.69	2052	4662.44	2081	6957.99
1995	7008.57	2024	4955.45	2053	4174.51	2082	5119.16
1996	5837.51	2025	5671.89	2054	5256.75	2083	6229.68
1997	4519.60	2026	5739.82	2055	5478.62	2084	7287.41
1998	5463.60	2027	4087.81	2056	6175.51	2085	7539.32
1999	5063.07	2028	6519.73	2057	4345.23	2086	8119.98
2000	6089.68	2029	5730.83	2058	6121.01	2087	7872.89
2001	6009.86	2030	5995.44	2059	6338.69	2088	7252.99
2002	4181.63	2031	6045.14	2060	6223.46	2089	6980.28
2003	4448.12	2032	5314.82	2061	6787.56	2090	8127.25
2004	5808.29	2033	5053.55	2062	5625.31	-	-
2005	4925.89	2034	5168.43	2063	6553.92	-	-
2006	5537.36	2035	6287.72	2064	6245.74	-	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงข้อมูลทางสถิติของฝนรายปี ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2090

ข้อมูลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช							
ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)	ปี	ฝนรายปี (มม.)
2007	5064.04	2036	5045.18	2065	4983.56	-	-
2008	5517.45	2037	5830.86	2066	6377.68	-	-
2009	4893.82	2038	4731.69	2067	6032.89	-	-
2010	6076.64	2039	5678.74	2068	5943.41	-	-
2011	6258.92	2040	5977.01	2069	6493.04	-	-
2012	5636.52	2041	6863.73	2070	6487.01	-	-
ค่าเฉลี่ย	5232.92		5601.54		5747.27		7012.79
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	776.58		714.59		757.02		881.43
ปริมาณ ฝนรายปี ต่ำสุด	3794.33		4087.81		4174.51		5119.16
ปริมาณ ฝนรายปี สูงสุด	7008.57		6863.73		6787.56		8388.56

ข้อมูลทางสถิติที่น่าสนใจในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของฝนรายปี จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าศตวรรษที่ 20 โดยการเพิ่มจะเริ่มตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 21 (ช่วงอนาคตอันใกล้) และเพิ่มขึ้นตลอดจนถึงปลายศตวรรษ (อนาคตอันไกล) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของฝนจากค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ปรากฏว่าช่วงอนาคตอันใกล้ การกระจายตัวของฝนรายปีห่างจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่าฝนรายปีช่วงอนาคตช่วงกลางและอนาคตอันไกล ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า ช่วงอนาคตอันใกล้จนถึงอนาคตช่วงกลาง ฝนยังเป็นไปในลักษณะเดียวกัน และอนาคตช่วงกลางจนถึงอนาคตอันไกลจะเกิด

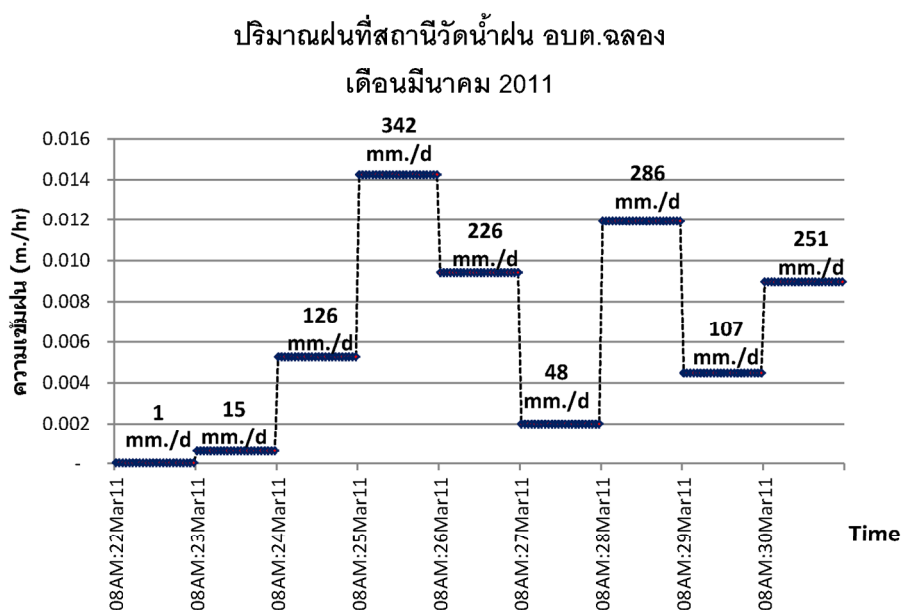
การแปรปรวนของฝนมากขึ้น (คุณลักษณะการกระจายของฝนรายปีได้จากกราฟรูปที่ 4.1 ประกอบ) ในส่วนของฝนต่ำสุดรายปี ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยฝนรายปี แต่ฝนสูงสุดรายปีกลับไม่ได้แสดงแนวโน้มแบบเดียวกับฝนต่ำสุดรายปีและฝนเฉลี่ยรายปี จากค่าฝนสูงสุดรายปีในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าจะมีลดลงในช่วงอนาคตอันใกล้ และจะลดลงอีกในอนาคตช่วงกลาง แต่จะเพิ่มสูงขึ้นช่วงอนาคตอันไกล และมีค่าสูงกว่าฝนสูงสุดรายปีของอนาคตอันไกล อธิบายได้ว่าอนาคตอันไกลจะมีเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) มากขึ้น

4.1.2 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังจากสถานีวัดน้ำฝน

การเก็บข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังแบ่งออกเป็นการเก็บข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังช่วงที่เกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษาวิจัย คือ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเกิดดินถล่มเมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2011 และการเก็บข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลัง 30 ปี เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในช่วงปีฐาน (ช่วงปี 1984 – 2012) ในการเก็บข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังในส่วนแรกนั้น ได้ข้อมูลจากศูนย์วิจัยภัยพิบัติธรรมชาติภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NadRec) ซึ่งเป็นข้อมูลฝนรายวันของสถานี อบต.ฉลอง (รหัสสถานี 5520016) ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2011 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2011 ระยะเวลารวม 9 วัน ดังตารางที่ 4.2 สถานีตรวจวัดฝนแห่งนี้เป็นสถานีที่มีข้อมูลฝนช่วงที่เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มและอยู่ห่างจากสถานที่เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม (ตำบลเทพราช) ประมาณ 10 กิโลเมตร เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4.2 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มฝน (ม./ชม.) กับระยะเวลา (ชม.) ก็จะได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดิน (SEEP/W) ต่อไป

ในการเก็บข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังในส่วนที่สองนั้น ผู้วิจัยได้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา เป็นข้อมูลฝนรายวันของสถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 1984 ถึงปี 2012 รวมระยะเวลา 29 ปี ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ห่างจากสถานที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม (ตำบลเทพราช) ประมาณ 35 กิโลเมตร และเพื่อประหยัดเนื้อที่ของกระดาษ ผู้วิจัยได้นำเสนอในรูปของฝนรายเดือน รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข. สำหรับข้อมูลฝนรายวันผู้วิจัยได้บรรจุลงในแผ่น

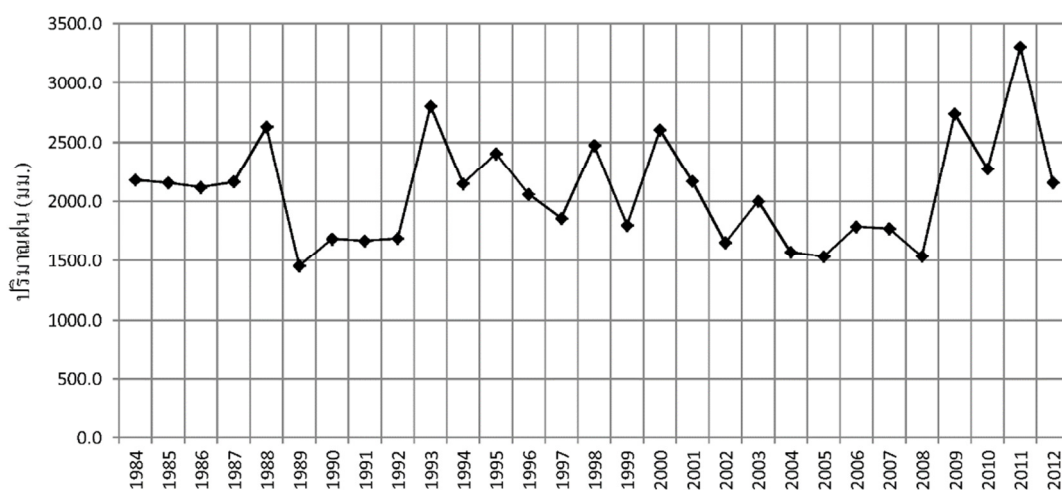
บันทึกอิเล็กทรอนิกส์ (CD) ที่แนบมาด้วย ผู้ที่สนใจศึกษาเนื้อหาในส่วนนี้จะพบว่าในหนึ่งปีไม่ได้มี 365 หรือ 366 วัน แต่มีเพียง 360 วัน เพราะจุดประสงค์ในการใช้ข้อมูลนี้คือ นำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ที่ในหนึ่งปีมีเพียง 360 วันเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการตัดข้อมูลออก 5 วันในหนึ่งปีจากข้อมูลฝนที่ได้จากสถานีตรวจวัดน้ำฝน คือ ตัดวันที่ 31 ของเดือนมกราคม มีนาคม พฤษภาคม กรกฎาคม และ สิงหาคมของทุกปี ส่วนในปีที่มี 366 วัน ผู้วิจัยได้ตัดวันที่ 29 ของเดือนกุมภาพันธ์ออก โดยมีเหตุผลในการตัดวันดังกล่าวออก คือ ช่วงปลายเดือนมกราคม ถึงสิงหาคมของปี จะเป็นช่วงที่ภาคใต้ของประเทศไทย (นครศรีธรรมราช) มีฝนตกน้อย และจากการสังเกตวันที่ตัดออกไป ส่วนใหญ่จะไม่มีฝน ดังนั้นการเลือกตัดวันออกแบบนี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลใดๆ



รูปที่ 4.2 ความเข้มฝนจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อบต.จลอง ตั้งแต่วันที่ 22 - 30 มีนาคม 2011

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลฝนรายวันของสถานี อบต.คลอง (รหัสสถานี 5520016)
ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2554 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2554

วัน/เดือน/ปี	ปริมาณฝน (มม./วัน)	ปริมาณฝนสะสม (มม.)	ระยะเวลาสะสม (ชม.)	ความเข้มฝน (ม./ชม.)
22 มีนาคม 2554	1.0	1.0	24	0.000042
23 มีนาคม 2554	15.0	16.0	48	0.000625
24 มีนาคม 2554	126.5	142.5	72	0.005271
25 มีนาคม 2554	342.0	484.5	96	0.014250
26 มีนาคม 2554	226.0	710.5	120	0.009417
27 มีนาคม 2554	48.0	758.5	144	0.002000
28 มีนาคม 2554	286.0	1044.5	168	0.011917
29 มีนาคม 2554	107.5	1152.0	192	0.004479
30 มีนาคม 2554	215.0	1367.0	216	0.008958



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
ตั้งแต่ปี 1984-2012

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลทางสถิติของฝนตรวจวัดย้อนหลังรายปี จากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ. นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 1984 ถึง 2012

ข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลัง ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช	
ปี	ฝนรายปี (มม.)
1984	2182.60
1985	2158.30
1986	2121.10
1987	2165.00
1988*	2627.50
1989	1452.80
1990	1685.80
1991	1670.60
1992	1688.30
1993	2801.00
1994	2150.80
1995	2406.50
1996	2058.70
1997	1858.40
1998	2474.60
1999	1799.90
2000	2606.30
2001	2169.40
2002	1651.20
2003	2003.70
2004	1571.30
2005	1532.90
2006	1788.10
2007	1770.90

ตารางที่ 4.3(ต่อ) ข้อมูลทางสถิติของฝนตรวจวัดย้อนหลังรายปี จากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา
จ. นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 1984 ถึง 2012

ข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลัง ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช	
ปี	ฝนรายปี (มม.)
2008	1536.80
2009	2739.00
2010	2278.10
2011*	3304.20
2012	2159.60
ค่าเฉลี่ย	2083.22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	447.10
ปริมาณฝนรายปีต่ำสุด	1452.80
ปริมาณฝนรายปีสูงสุด	3304.20

หมายเหตุ * คือ ปีที่มีการบันทึกว่าเกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่พื้นที่เทือกเขาหลวง
จ.นครศรีธรรมราช (ดูตารางที่ 2.4)

จากการพิจารณาข้อมูลฝนตรวจวัดย้อนหลังรายปี ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าในอดีตช่วง 29 ปี (1984-2012) ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีอยู่ที่ 2083 มิลลิเมตรโดยประมาณ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งถือเป็นค่ากระจายของข้อมูลที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยเพียง 447 มิลลิเมตร อธิบายได้ว่าตลอด 29 ปี ย้อนหลัง ปริมาณฝนรายปีก่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 1550 ถึง 2450 มิลลิเมตร โดยมีเพียงปีเดียวที่มีปริมาณฝนสูงถึง 3300 มิลลิเมตร คือปี 2011 เพราะมีพายุฤดูร้อนและเป็นปีที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มช่วงปลายเดือนมีนาคม ที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ส่วนปีที่แห้งแล้งที่สุด เป็นปี 1989 ซึ่งเกิดหลังจากที่ปีก่อนหน้า คือ ปี 1988 เกิดฝนตกหนักและมีเหตุการณ์ดินถล่มที่ อำเภอพิปูน จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งถือเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของแนวเทือกเขาหลวง (แนวเทือกเขาเดียวกับ ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช) และถ้าสังเกตกราฟในรูปที่ 4.3 จะพบว่าในช่วงทศวรรษสุดท้ายของศตวรรษที่ 20 จะมีคาบของฝน

รายปีที่น่าสนใจคือ ถ้าปีใดที่มีฝนรายปีสูงมากแล้ว อีก 4 ปีถัดไปจะมีปริมาณฝนลดลง หลังจากนั้นจะเกิดฝนรายปีที่สูงขึ้นอีกครั้ง แล้วอีก 4 ปีถัดไปจะมีปริมาณฝนลดลงอีก เช่น ปี 1988 มีฝนรายปีเท่ากับ 2628 มิลลิเมตร และปี 1989, 1990, 1991, 1992 มีฝนรายปีประมาณ 1600 มิลลิเมตร แต่พอถึงปี 1993 ปรากฏว่าปริมาณฝนรายปีสูงขึ้นถึง 2800 มิลลิเมตร และปี 1994, 1995, 1996, 1997 ฝนรายปีลดต่ำลงมาอีก โดยเฉลี่ยประมาณ 2000 มิลลิเมตรต่อปี

4.1.3 ผลการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศกับผลการตรวจวัดจริงในอดีต

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช มาเปรียบเทียบกับฝนรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 ถึงปี 2011 โดยการใช้ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ ฝนรายเดือนเฉลี่ย 29 ปี ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฝนรายเดือน ปริมาณฝนต่ำสุด และสูงสุดของแต่ละเดือน ในช่วงเวลา 29 ปี ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ปรากฏว่าฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดจริงช่วงเดือนมีนาคม – มิถุนายน (ฤดูร้อนของจังหวัดนครศรีธรรมราช) มีค่าอยู่ในช่วง 70 -130 มิลลิเมตร ในขณะที่ช่วงเดือนตุลาคม – ธันวาคม (ฤดูฝนของจังหวัดนครศรีธรรมราช) มีค่าอยู่ในช่วง 250 – 580 มิลลิเมตร แต่ฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศช่วงเวลาเดียวกัน คือช่วงเดือนมีนาคม – มิถุนายน มีค่าอยู่ในช่วง 400-800 มิลลิเมตร และช่วงเดือนตุลาคม – ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 290 - 320 มิลลิเมตร สิ่งนี้บ่งบอกว่า ฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ มีฝนตกมากในช่วงฤดูร้อนของภาคใต้ (เดือนมีนาคม – มิถุนายน) ในขณะที่ช่วงฤดูฝน (เดือนตุลาคม – มกราคม) มีฝนตกลดน้อยลง ซึ่งตรงกันข้ามกับฝนที่ได้จากการตรวจวัดจริง ที่พบว่าฝนส่วนใหญ่ตกมากในช่วงฤดูฝนของพื้นที่ภาคใต้ (เดือนตุลาคม – ธันวาคม) เพื่อให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นผู้วิจัยได้ใช้กราฟเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มานำเสนอเพิ่ม และจากกราฟยังปรากฏว่าฝนรายเดือนเฉลี่ยใน 29 ปี จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศมีปริมาณฝนมากกว่าฝนที่ได้จากการ

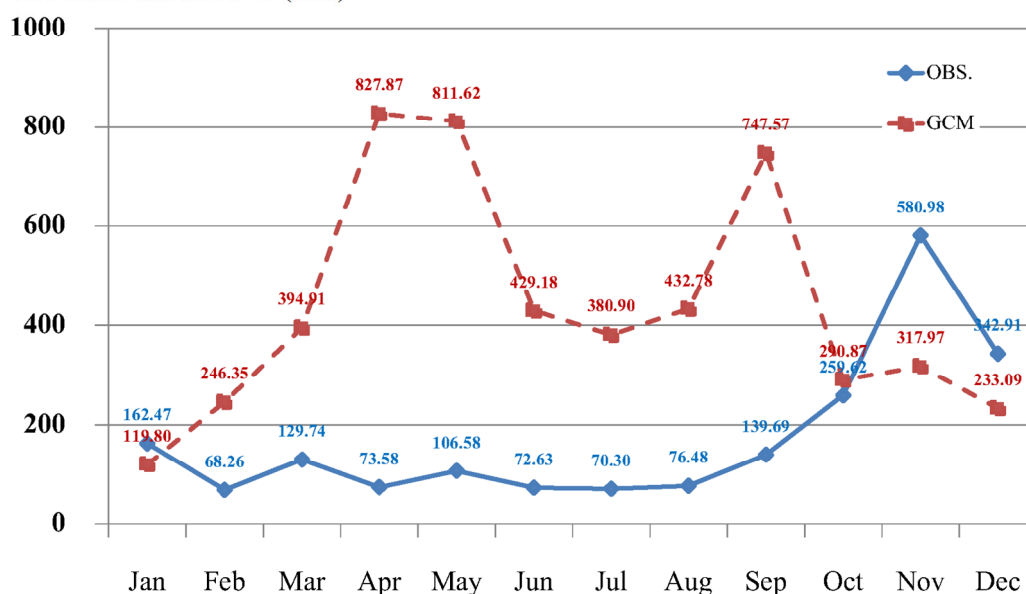
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลทางสถิติของฝนรายเดือน ในช่วงปี 1984 - 2012 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง (OBS) และข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 (GCM)

เดือน	ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าต่ำสุด		ค่าสูงสุด	
	OBS	GCM	OBS	GCM	OBS	GCM	OBS	GCM
ม.ค	162.47	119.80	155.46	157.86	0.00	3.71	703.50	651.12
ก.พ	68.26	246.35	119.11	263.31	0.00	2.13	593.80	1094.89
มี.ค	129.74	394.91	271.81	205.26	0.00	13.87	1455.60	799.33
เม.ย	73.58	827.87	66.28	318.62	0.00	120.44	302.00	1505.48
พ.ค	106.58	811.62	73.48	267.65	8.50	373.31	292.40	1455.53
มิ.ย	72.63	429.18	56.57	181.77	5.20	150.72	217.40	826.77
ก.ค	70.30	380.90	40.11	160.74	13.40	121.97	161.20	697.72
ส.ค	76.48	432.78	52.72	202.07	0.00	86.99	206.90	829.78
ก.ย	139.69	747.57	177.72	263.01	23.90	389.01	985.60	1442.15
ต.ค	259.62	290.87	147.06	199.92	57.70	40.85	689.20	757.34
พ.ย	580.98	317.97	278.63	206.13	186.60	36.21	1218.90	913.57
ธ.ค	342.91	233.09	182.90	284.17	19.30	0.99	888.60	1492.78

ตรวจวัดจริงถึง 9 เดือน และเป็นเดือนต่างๆที่อยู่ในช่วงฤดูร้อนทั้งสิ้น ในขณะที่เดือนที่เป็นฤดูฝนกลับปรากฏว่าปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดจริงมีปริมาณมากกว่าฝนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ และเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากตารางที่ 4.4 ปรากฏว่าค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ส่วนใหญ่แล้วมีค่าสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลได้จากการตรวจวัดจริง เช่น เดือนเมษายน - สิงหาคม ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลได้จากการตรวจวัดจริงมีค่าอยู่ในช่วง 40 - 73 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 160 - 320 มิลลิเมตร ประเด็นนี้อธิบายได้ว่า ค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ยังไม่สามารถเป็นตัวแทนที่แท้จริงของข้อมูล เพราะมีความผัน

แปรของข้อมูลยังอยู่ในระดับที่สูง สำหรับค่าต่ำสุดและสูงสุดจากตารางที่ 4.4 ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่าเฉลี่ย

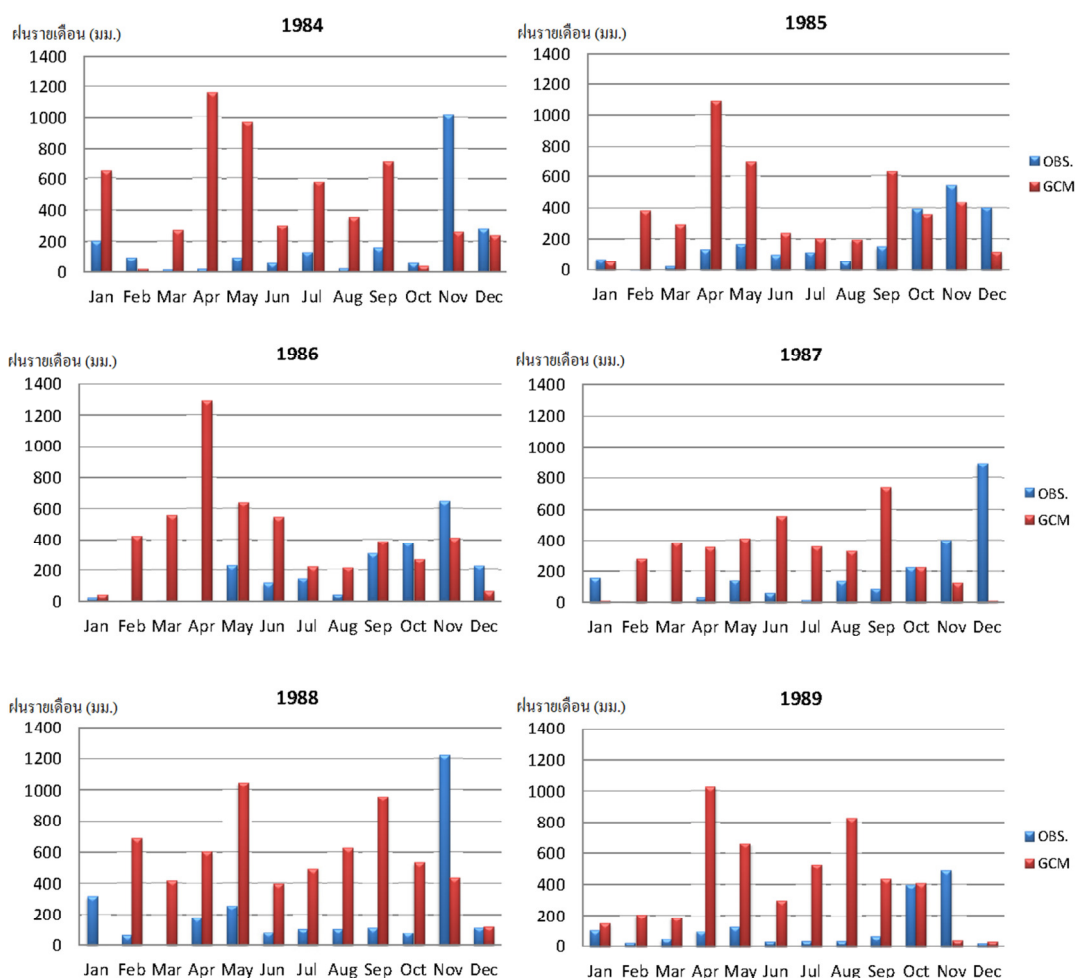
ฝนรายเดือนเฉลี่ย 29 ปี (มม.)



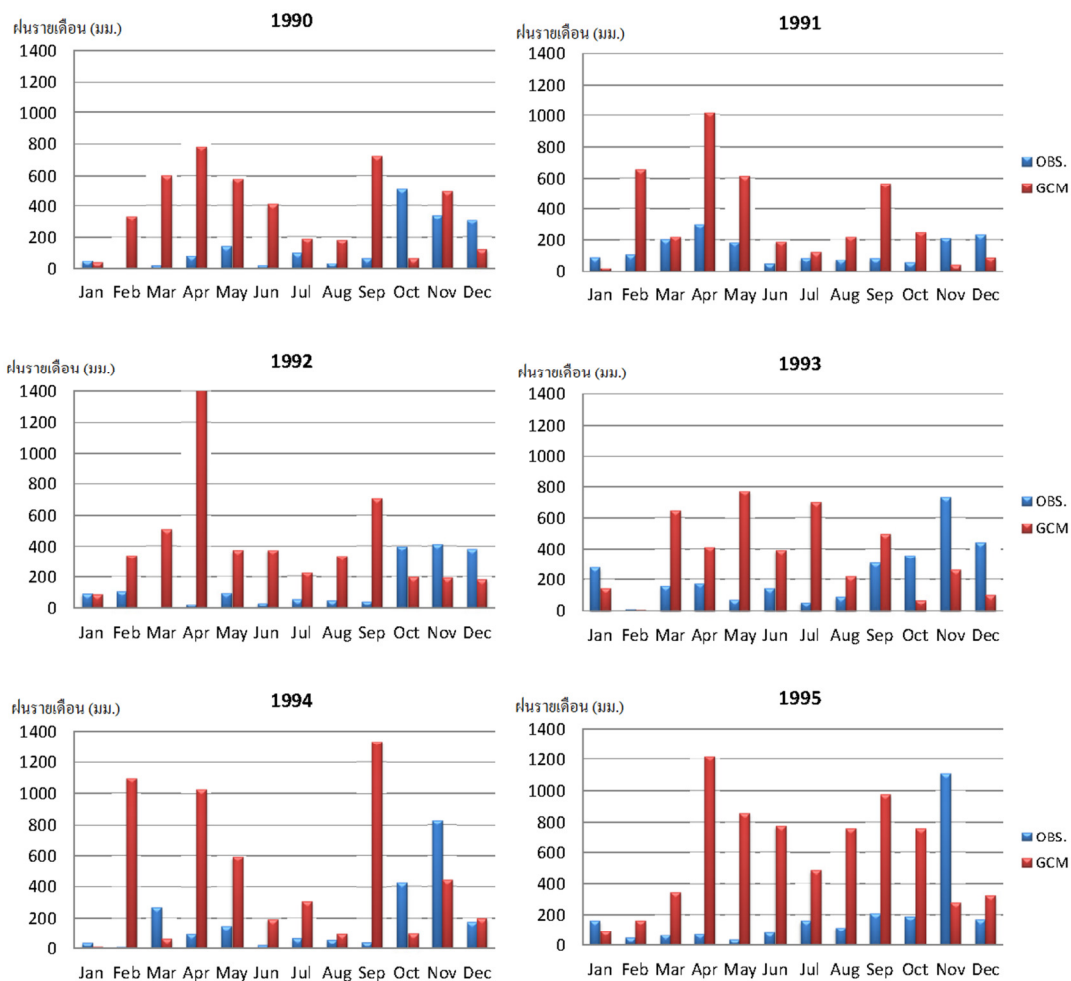
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือนเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ. นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012 GCM : ฝนรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดฝน

ผู้วิจัยได้พยายามที่จะให้เห็นภาพการเปรียบเทียบระหว่างฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012 ในลักษณะทางกายภาพมากขึ้น จึงได้นำเสนอในรูปแบบกราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบในแต่ละปี ดังแสดงในรูปที่ 4.5 4.6 4.7 4.8 และ 4.9 โดยจะขอยกตัวอย่างของปี 1988 ซึ่งเป็นปีที่มีการบันทึกว่ามีเหตุการณ์ดินถล่มใน จังหวัดนครศรีธรรมราช จากกราฟปี 1988 ในรูปที่ 4.5 ปรากฏว่าฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริง (กราฟแท่งสีน้ำเงิน) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนตุลาคม มีค่าต่ำกว่า 200 มิลลิเมตร มาตลอด

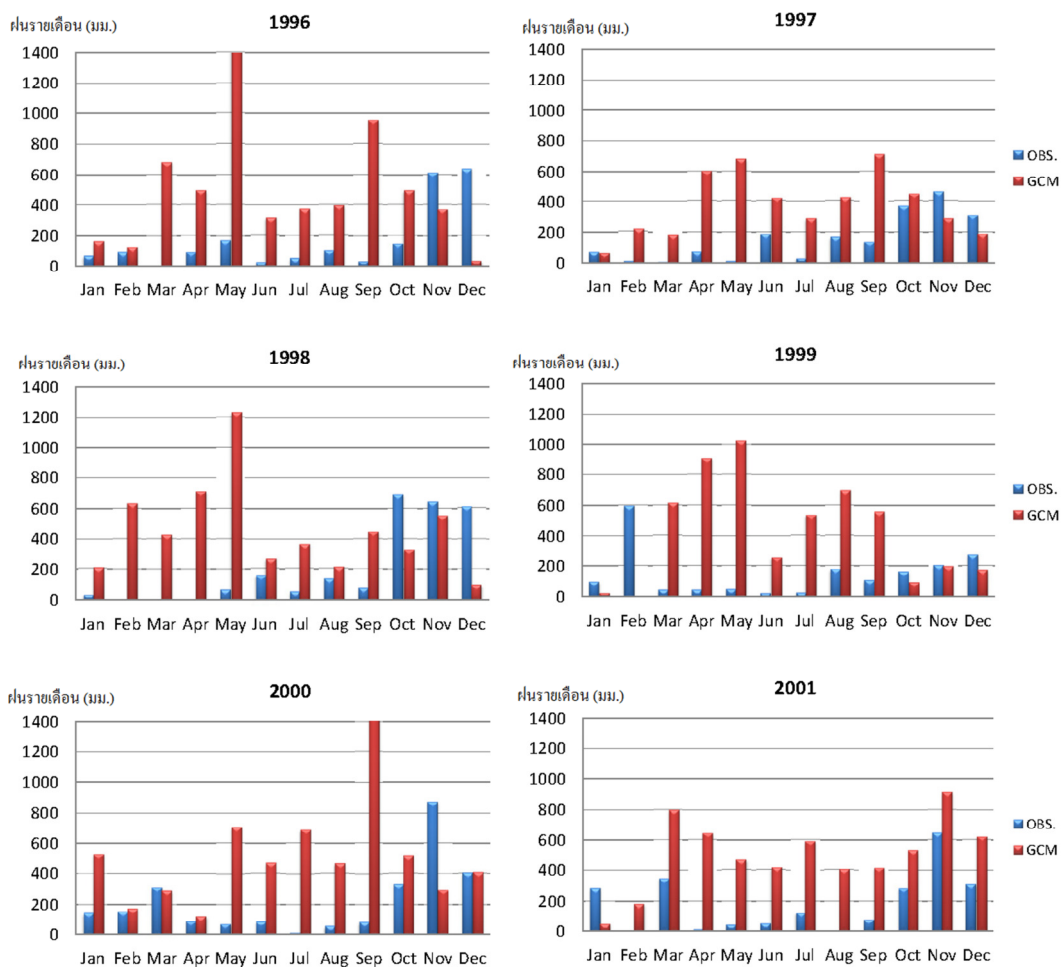
แต่ในเดือนพฤศจิกายน เพียงเดือนเดียว ปริมาณฝนรายเดือนสูงขึ้นถึง 1200 มิลลิเมตร และเกิดเหตุการณ์ดินถล่มทันที ในขณะที่ฝนรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (กราฟแท่งสีแดง) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนตุลาคม มีปริมาณสูงมาตลอด แต่ปรากฏว่าเมื่อเข้าสู่เดือนพฤศจิกายน กลับลดต่ำลง



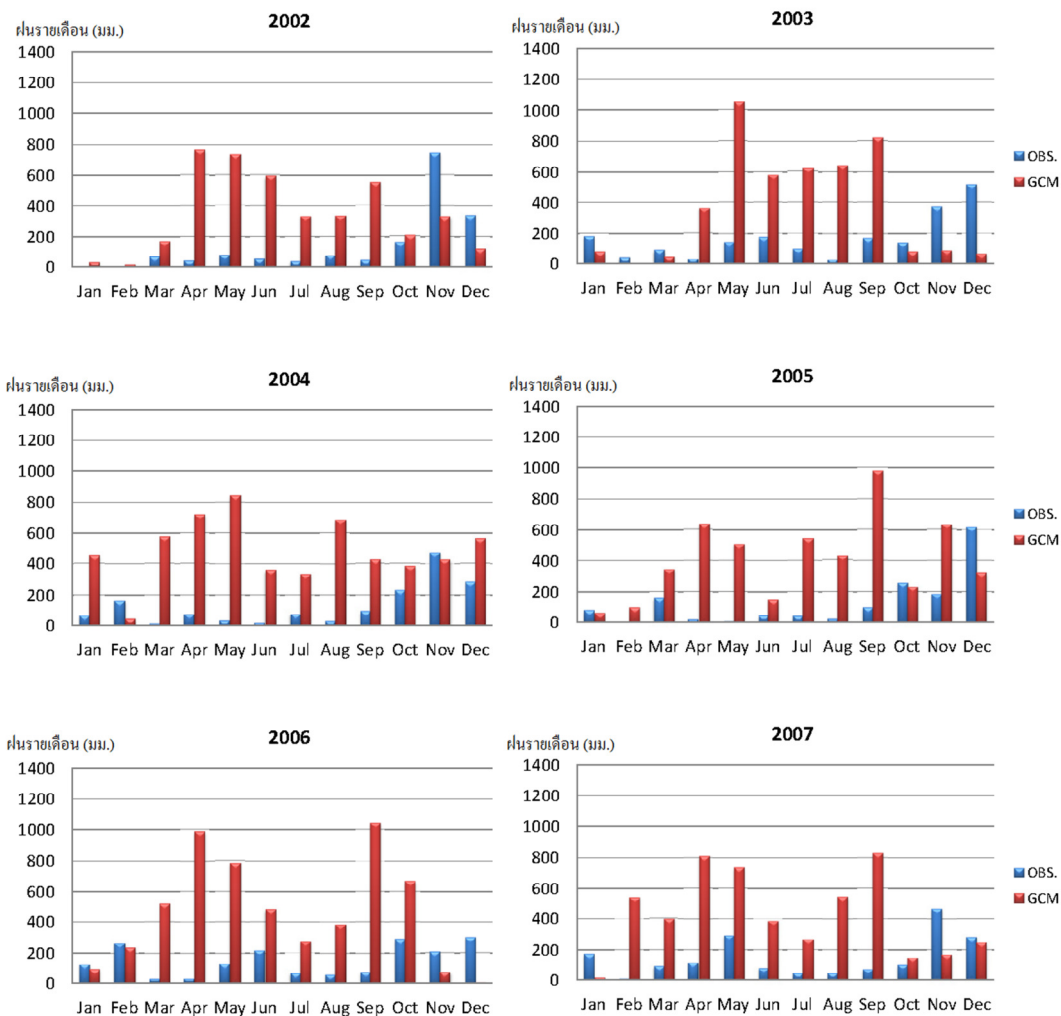
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 ถึงปี 1989 GCM : ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน



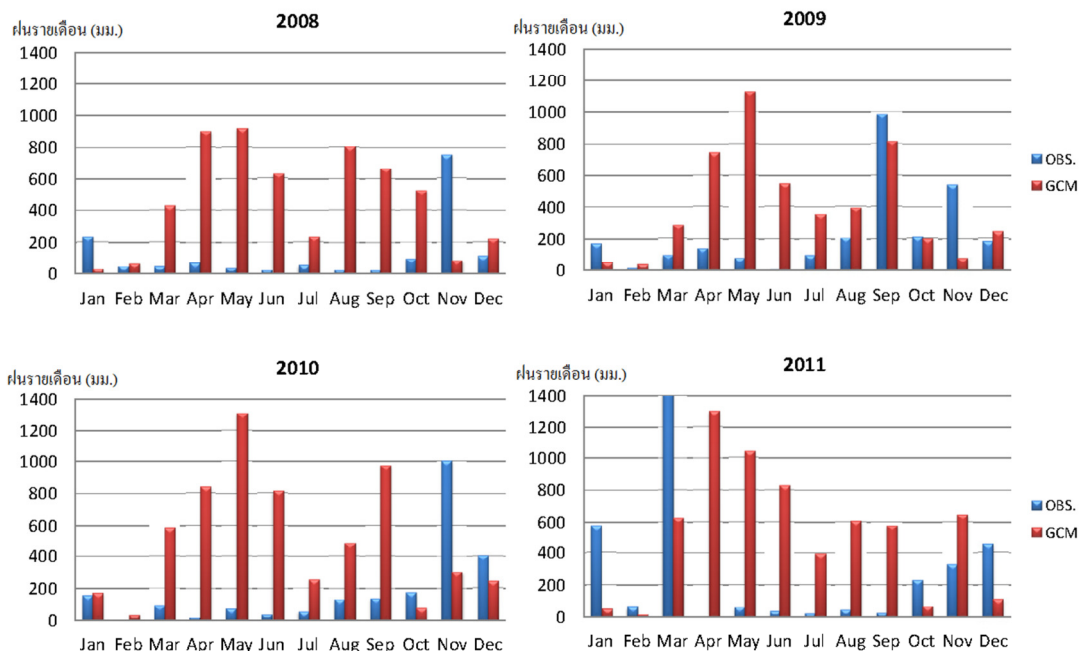
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1990 ถึงปี 1995 GCM : ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1996 ถึงปี 2001 GCM : ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน



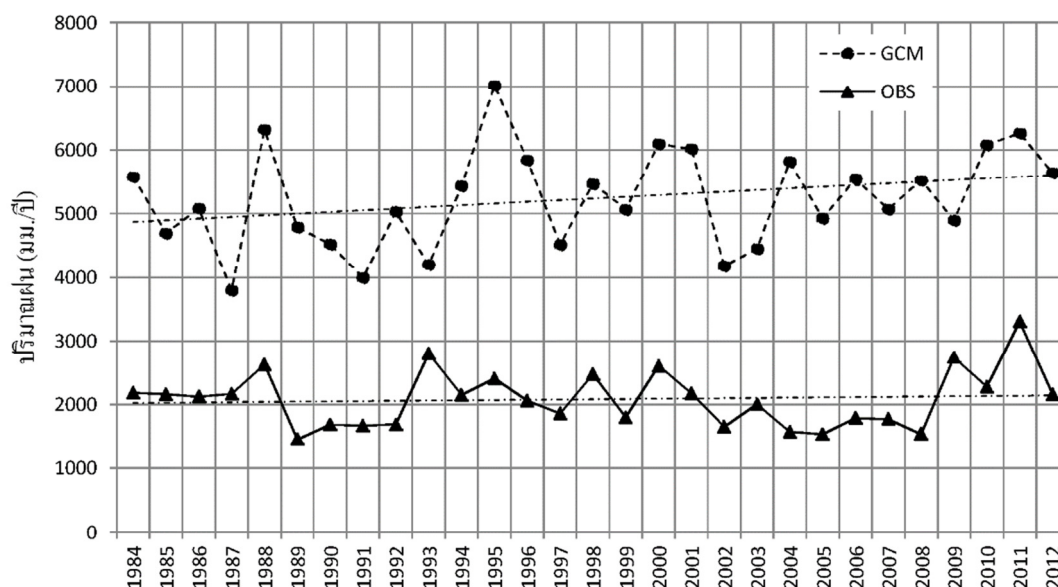
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 2002 ถึงปี 2007 GCM : ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบฝนรายเดือน ที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช กับฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 2008 ถึงปี 2011 GCM : ฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายเดือนที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน

ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ภาย ภาพแนวโน้มของฝนว่า ฝนจะตกในฤดูร้อนมากกว่าในฤดูฝน ซึ่งแตกต่างจากการตรวจวัดจริงจาก สถานีตรวจวัดน้ำฝน ที่แสดงว่าฝนในภาคใต้ยังคงตกตามฤดูกาล เมื่อผู้วิจัยนำฝนรายปีที่ตรวจวัด จริงจากสถานีตรวจวัดฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช มาทำการเปรียบเทียบกับฝนราย ปีที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012 โดย นำเสนอในรูปกราฟเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ปรากฏว่า ปริมาณฝนรายปีที่ได้จากแบบจำลอง สภาพภูมิอากาศ มีปริมาณมากกว่าฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน 2 เท่าโดยประมาณ นี่จึงแสดงให้เห็นประจักษ์ว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ จำเป็นต้องนำมาทำการ ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน (Bias correction) อีกครั้งให้สอดคล้องกับข้อมูลฝนที่ได้จากการ

ตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดฝน ซึ่งได้อธิบายวิธีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.2.6



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน อ.ท่าศาลา

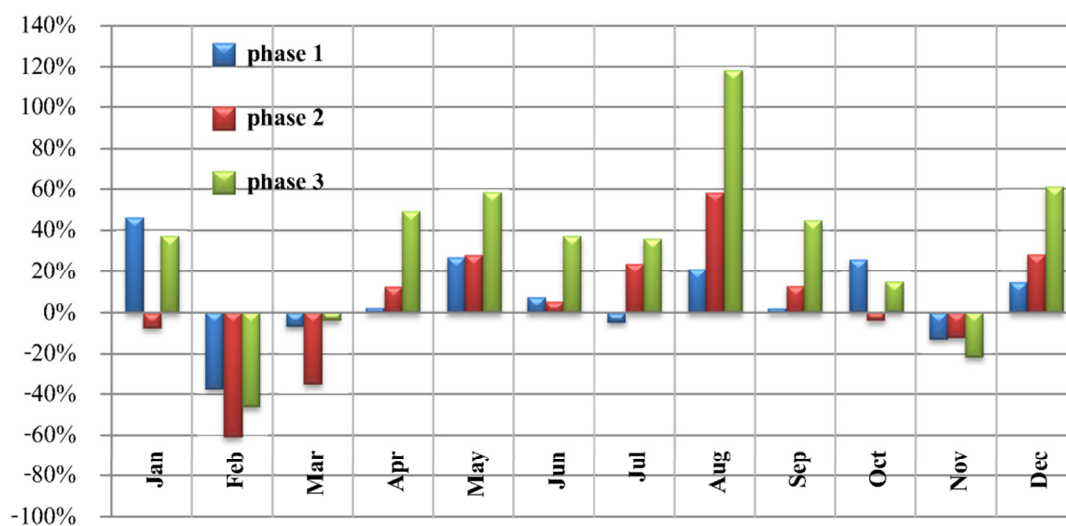
จ.นครศรีธรรมราช กับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ในช่วงปี 1984 - 2012 GCM : ฝนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ , OBS : ฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน

4.1.4 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ

การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการทางสถิติในการปรับแก้ (Statistical Bias Correction) คือ ใช้วิธีเดลต้า แฟกเตอร์ (Delta Factor) ที่เสนอโดย Fowler et al. (2007) และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) ตามคำแนะนำของ Prudhomme et al. (2002) ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำเพียง 4 แบบ คือ แบบ

สัดส่วน (Proportion) แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day)

ค่าเดลต้า แฟกเตอร์ ที่ได้จากการหาร้อยละของผลต่างของฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศช่วงอนาคต ลบด้วยฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศช่วงอดีต หรือปีฐาน (เป็นปีที่มีข้อมูลการตรวจวัดฝนจริงจากสถานีตรวจวัดฝน) ค่าเดลต้า แฟกเตอร์ แต่ละช่วงเวลา มีจำนวน 12 ค่าตามจำนวนเดือน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งมีได้ทั้งค่าที่เป็นบวกและค่าที่เป็นลบ โดยค่าที่เป็นบวกหมายถึงว่า ฝนในอนาคตมีปริมาณมากกว่าฝนในอดีต (ช่วงปีฐาน) ในทางกลับกัน ค่าที่เป็นลบ หมายถึง ฝนในอนาคตมีปริมาณน้อยกว่าฝนในอดีต (ช่วงปีฐาน) ดังที่นำเสนอด้วยกราฟแท่งในรูปที่ 4.11 และการที่เดลต้า แฟกเตอร์มีทั้งค่าที่เป็นบวก และค่าที่เป็นลบ ทำให้ผลลัพธ์ของการปรับแก้ผลลัพธ์จากแบบจำลองมีทั้งปริมาณฝนในอนาคตที่เพิ่มขึ้น และลดลง รูปที่ 4.11 แสดงค่าเดลต้าแฟกเตอร์ที่เป็นค่าลบ ซึ่งมีอยู่ในเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม และ พฤศจิกายนของทุกปี จึงทำให้ปริมาณฝนที่ปรับแก้แล้วในเดือนดังกล่าวมีปริมาณฝนลดลงจากอดีต ในทำนองเดียวกันสำหรับเดือนอื่นๆ เดลต้า แฟกเตอร์ที่เป็นค่าบวก จะทำให้ปริมาณฝนที่ปรับแก้แล้วมีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 กราฟแสดง Delta Factor

ตารางที่ 4.5 ค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
PRECIS/ECHAM4 Scenario A2

เดือน	ค่าเดลต้า แฟกเตอร์ของช่วงเวลาต่างๆ เทียบกับปีฐาน (1984-2012)		
	อนาคตอันใกล้ (2013-2041)	อนาคตช่วงกลาง (2042-2070)	อนาคตอันไกล (2071-2090)
มกราคม	46.0%	-7.4%	37.0%
กุมภาพันธ์	-37.4%	-61.0%	-46.2%
มีนาคม	-6.7%	-35.2%	-3.9%
เมษายน	2.4%	12.6%	49.3%
พฤษภาคม	27.2%	28.2%	58.5%
มิถุนายน	7.6%	5.4%	37.5%
กรกฎาคม	-4.6%	23.7%	35.8%
สิงหาคม	21.2%	58.4%	118.4%
กันยายน	2.2%	12.9%	44.9%
ตุลาคม	25.8%	-3.9%	14.8%
พฤศจิกายน	-12.8%	-12.2%	-21.7%
ธันวาคม	14.8%	28.7%	61.1%

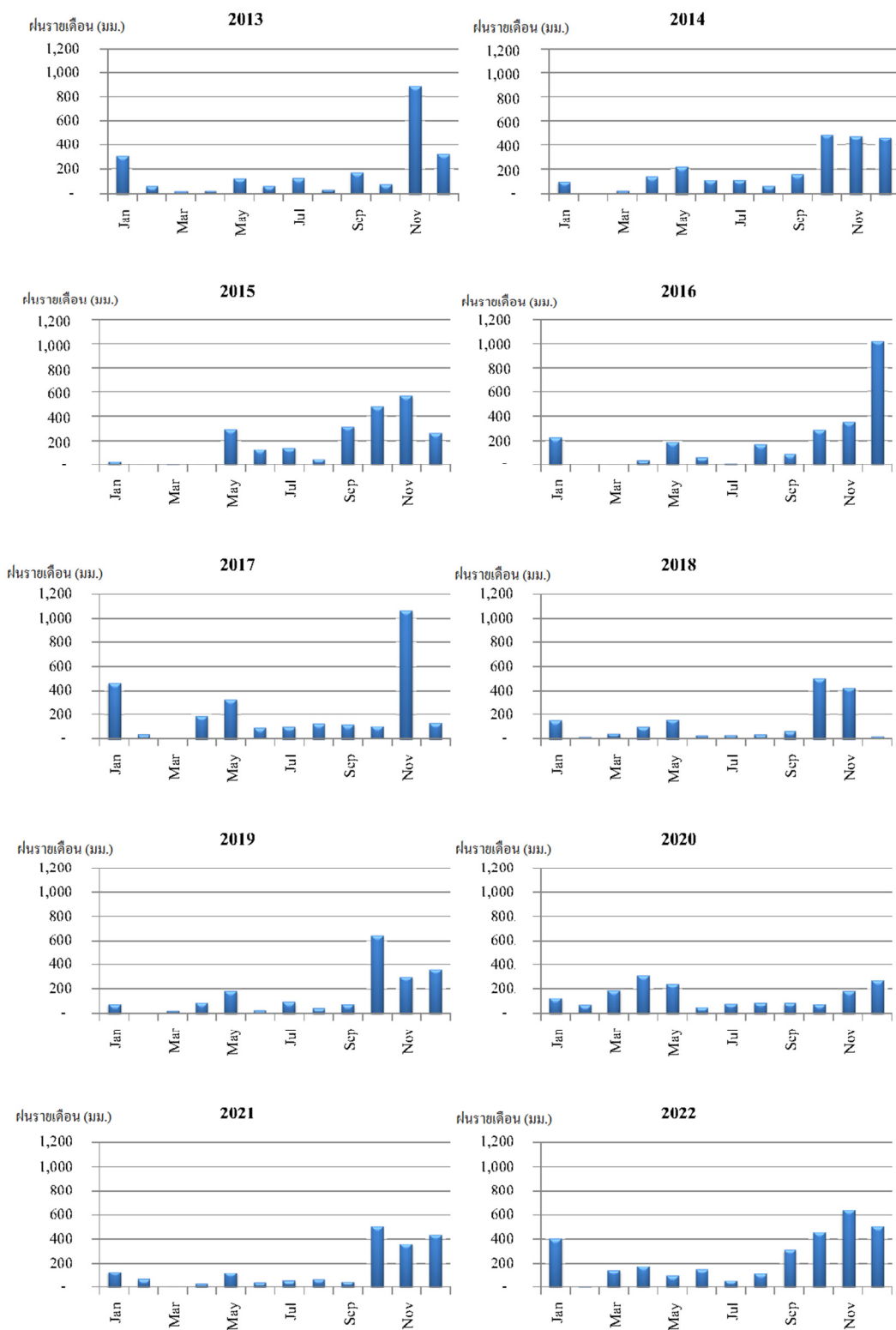
เมื่อได้เคลต้า แฟกเตอร์มาแล้ว (ขั้นตอนการหาค่าเดลต้า แฟกเตอร์ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.) ขั้นตอนถัดไปเป็นการคำนวณหาปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) โดยการนำเคลต้า แฟกเตอร์ไปคูณในชุดข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตหรือปีฐาน ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ปริมาณฝนส่วนต่าง และขั้นตอนต่อไปคือการกระจายปริมาณฝนส่วนต่างไปยังฝนรายวันที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช วิธีการคำนวณหาปริมาณฝนส่วนต่าง และการกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง ถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.2.6.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ ผู้วิจัยนำเสนอในรูปแบบของกราฟแท่งดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.19 เพื่อจะได้เห็นภาพรวมของลักษณะทางกายภาพฝนในอนาคตแต่ละเดือน และกราฟเส้นดังรูปที่ 4.21 เพื่อให้เห็นภาพรวมการเปลี่ยนแปลงรายปี ดังนี้

- 1.) ฝนเฉลี่ยรายปี ทั้ง 4 แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2263 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งมากกว่าฝนเฉลี่ยรายปีในอดีต ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2083 มิลลิเมตรต่อปี
- 2.) ผลจากการย่อส่วนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ทำให้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศสอดคล้องกับฝนที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากขึ้น โดยที่ฝนส่วนใหญ่ตกมากในฤดูฝน (เดือนตุลาคม – มกราคม) และฝนตกน้อยในฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์ – กันยายน) ตัวอย่างที่เห็นชัดเจนคือ ปี 2013-2016 2019 2021 2022 ในรูปที่ 4.12 ปี 2023-2027 2031 ในรูปที่ 4.13 ปี 2033 2034 2038 2039 ในรูปที่ 4.14 เป็นต้น และสามารถดูค่าเฉลี่ยฝนรายเดือนของฤดูแล้งและฤดูฝนได้จากตารางที่ 4.6 ปรากฏว่าฝนรายเดือนเฉลี่ยในฤดูแล้งจะมีค่าน้อยกว่าฝนรายเดือนเฉลี่ยในฤดูฝน
- 3.) ส่วนพายุฤดูร้อนยังไม่มีนัยสำคัญว่ามีแนวโน้มจะเกิดขึ้นมาก แต่ผลจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศฉายภาพออกมาว่าช่วงกลางศตวรรษมีเหตุการณ์พายุฤดูร้อน คือ รูปที่ 2.14 ในปี 2040 และรูปที่ 2.17 ในปี 2069

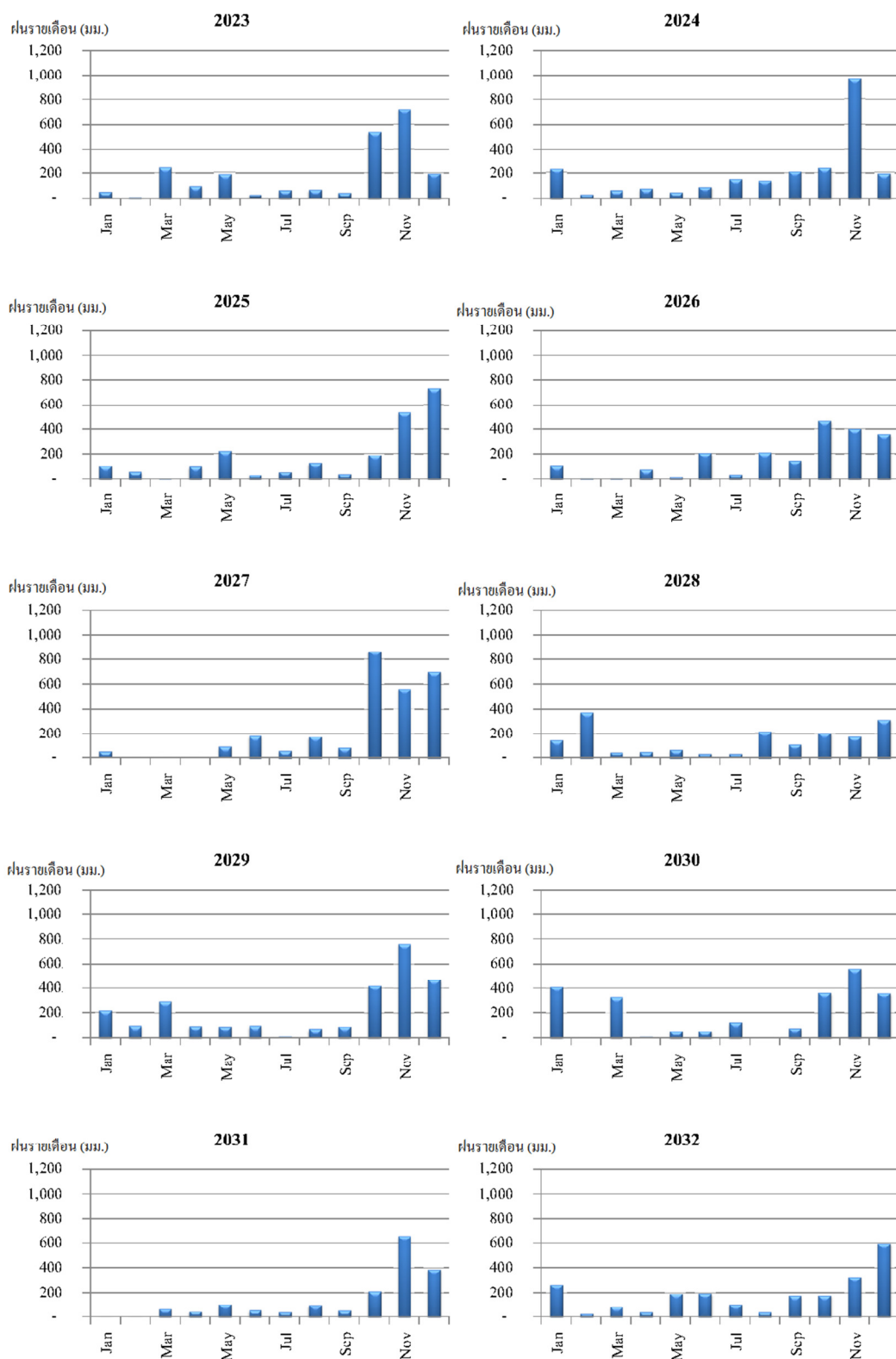
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือนในอนาคต ช่วงฤดูแล้ง และช่วงฤดูฝน

ช่วงเวลา	ค่าเฉลี่ยฝนรายเดือน (มม./เดือน)	
	ในฤดูแล้ง (ก.พ - ก.ย)	ในฤดูฝน (ต.ค - ม.ค)
อนาคตอันใกล้ (ปี 2013 - 2040)	94.44	365.93
อนาคตช่วงกลาง (ปี 2041 - 2070)	96.57	337.93
อนาคตอันไกล (ปี 2071 - 2090)	122.30	387.97

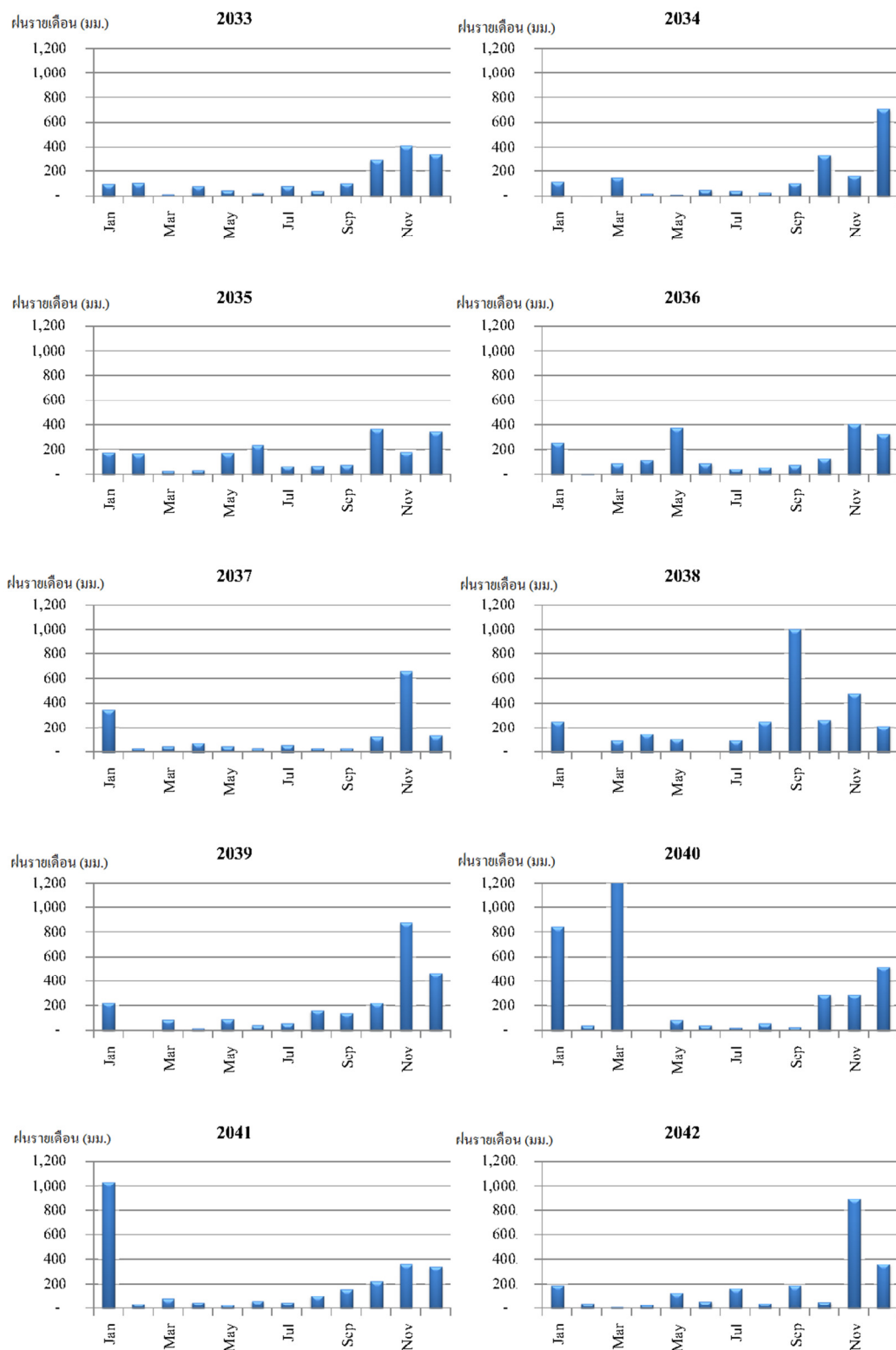
สำหรับผู้สนใจรายละเอียดของข้อมูลปริมาณฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ ผู้วิจัยได้แสดงไว้ในตารางของภาคผนวก ก. ง. จ. และ ฉ. และข้อมูลฝนรายวันผู้วิจัยได้บรรจุลงในแผ่นบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ (CD) ที่แนบมาด้วย



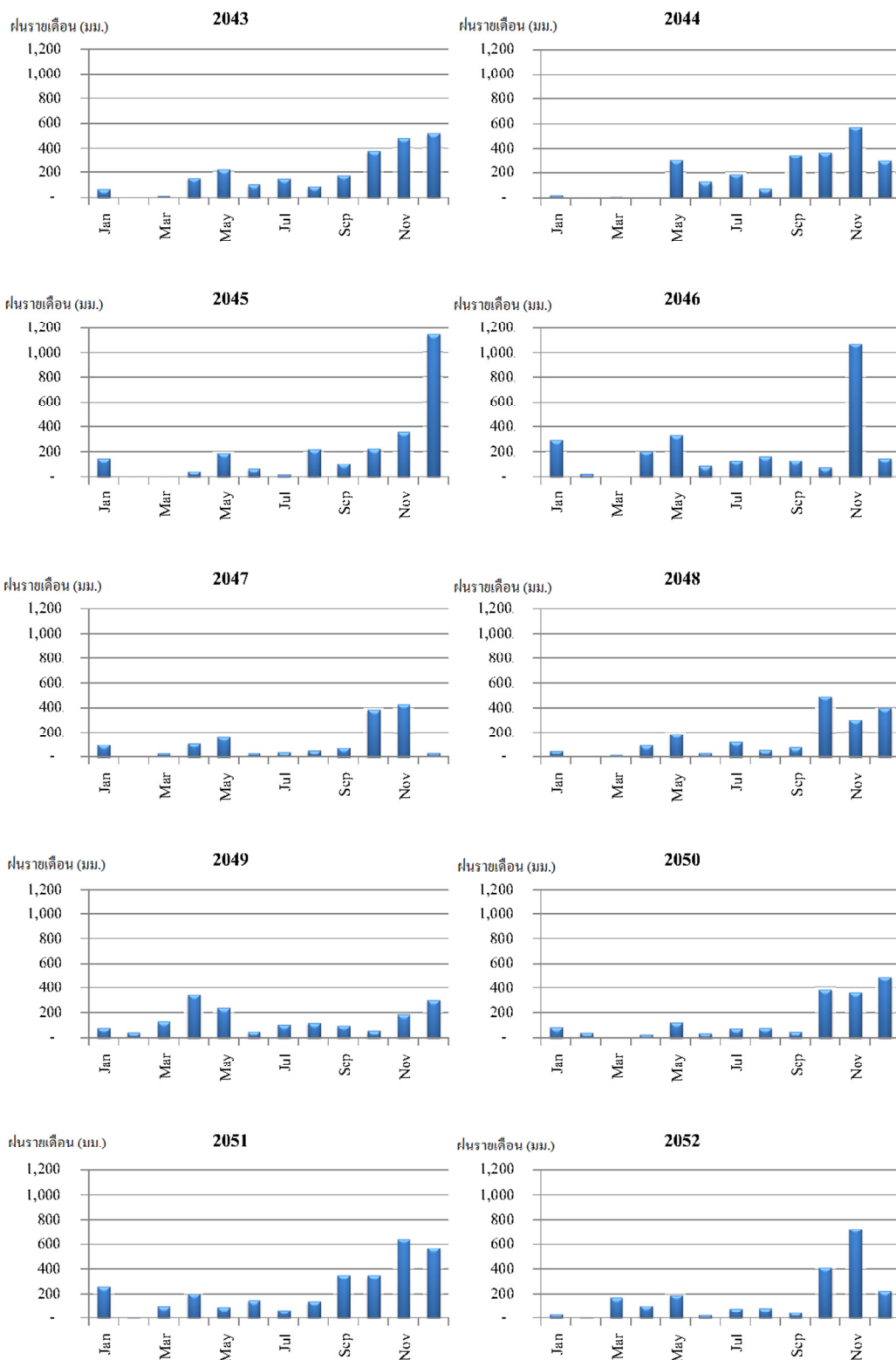
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลดำแฟกเตอร์ ปี 2013 ถึง 2022



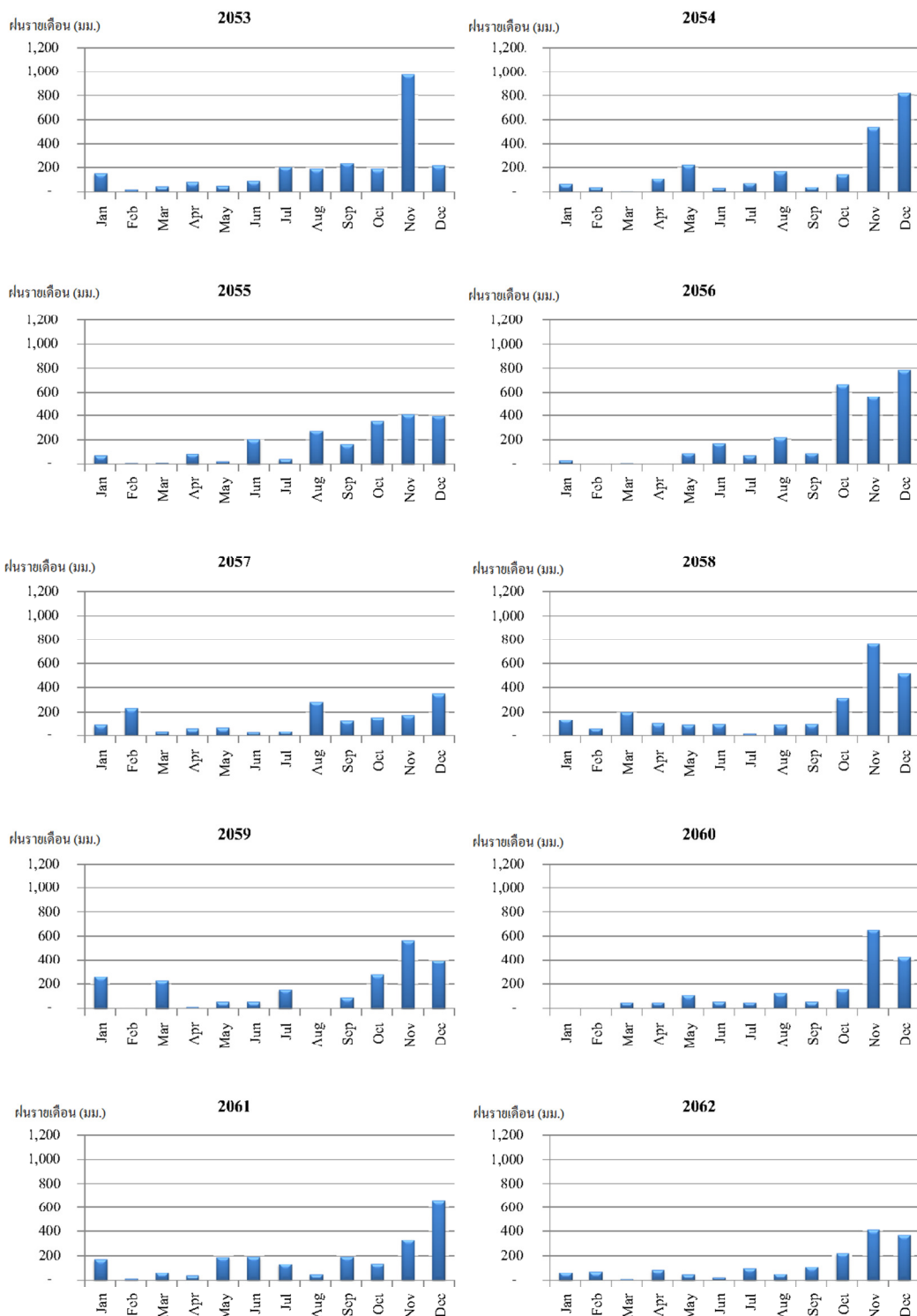
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้าแฟกเตอร์ ปี 2023 ถึง 2032



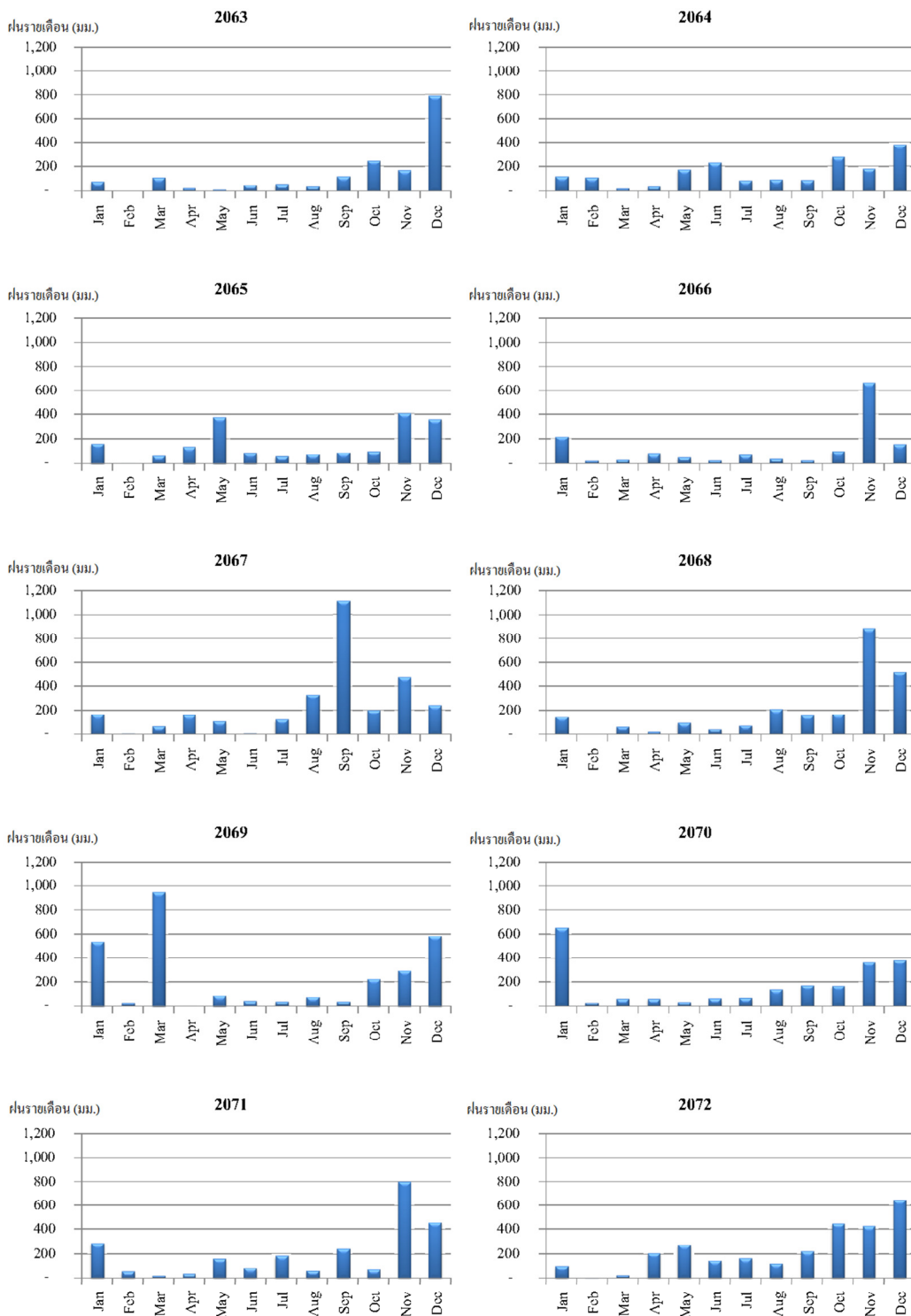
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้าแฟกเตอร์ ปี 2033 ถึง 2042



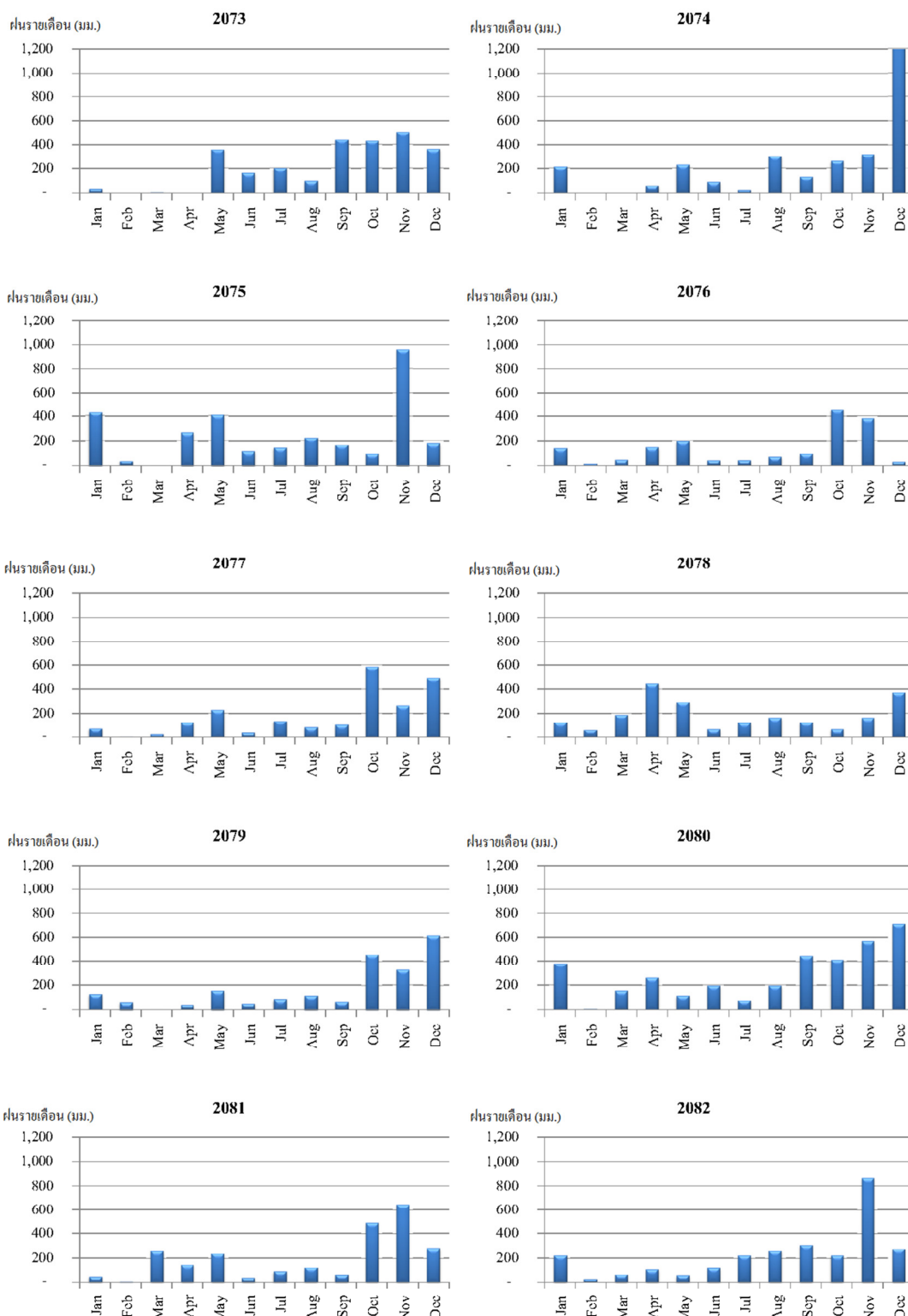
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้าแฟกเตอร์ ปี 2043 ถึง 2052



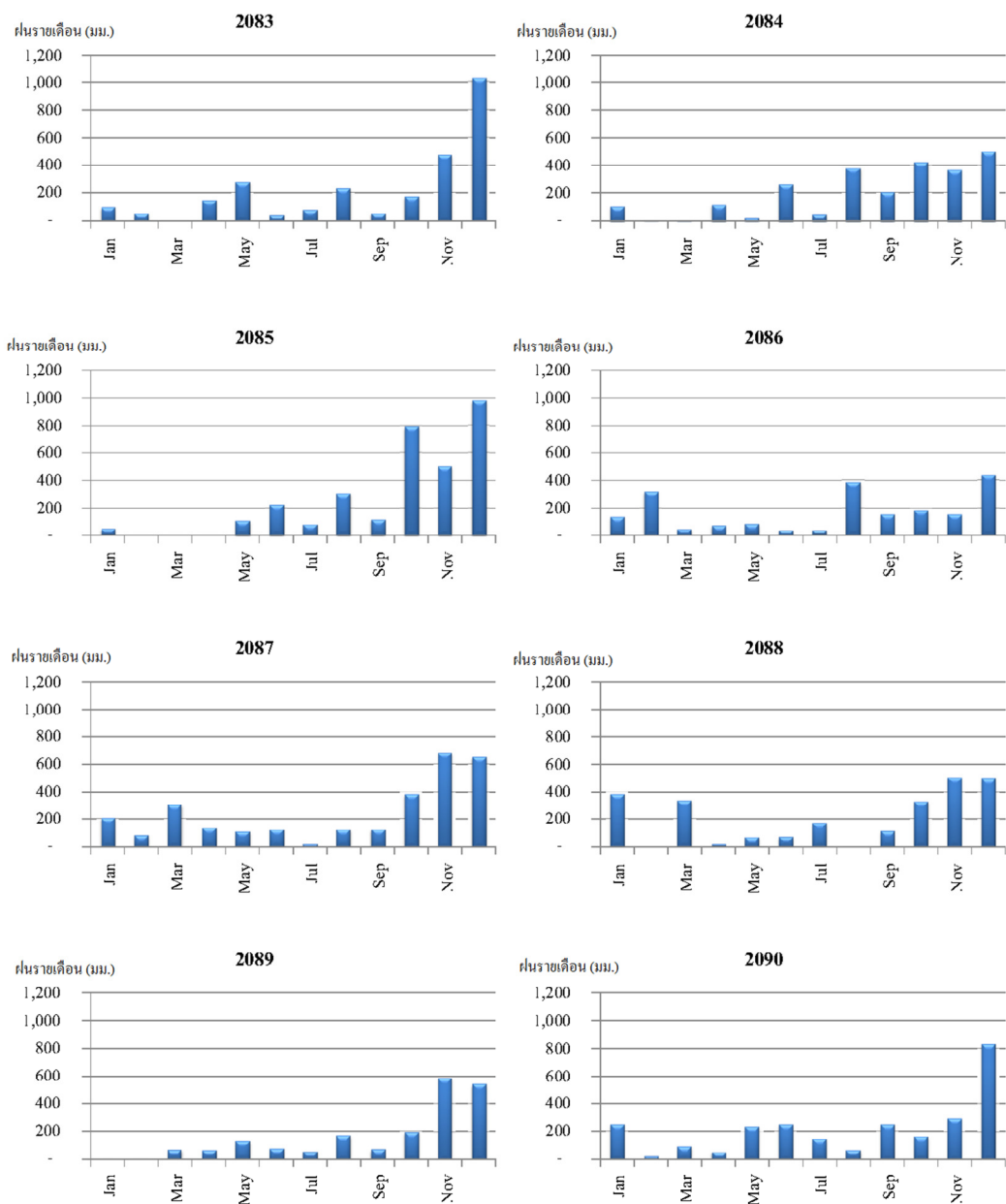
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้าแฟกเตอร์ ปี 2053 ถึง 2062



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลดำแฟกเตอร์ ปี 2063 ถึง 2072



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้าแฟกเตอร์ ปี 2073 ถึง 2082

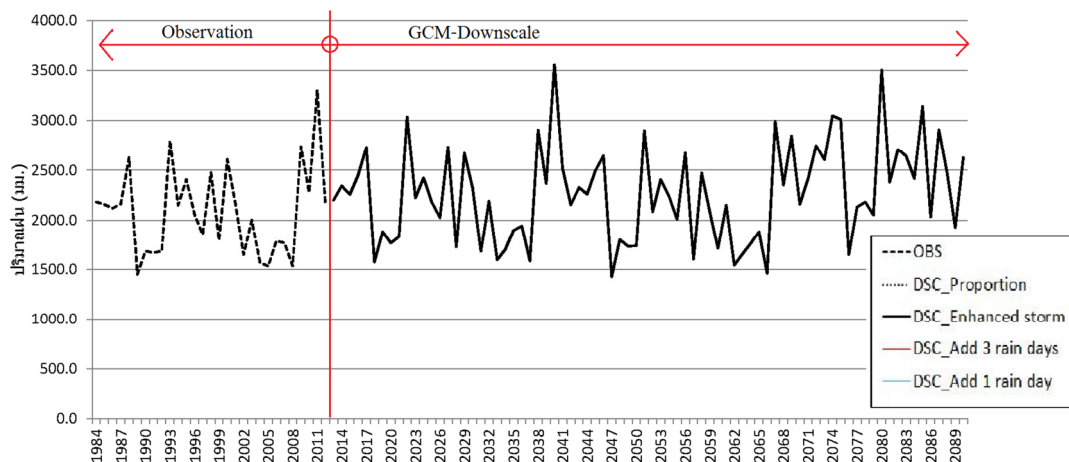


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงฝนรายเดือน ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ ปี 2083 ถึง 2090

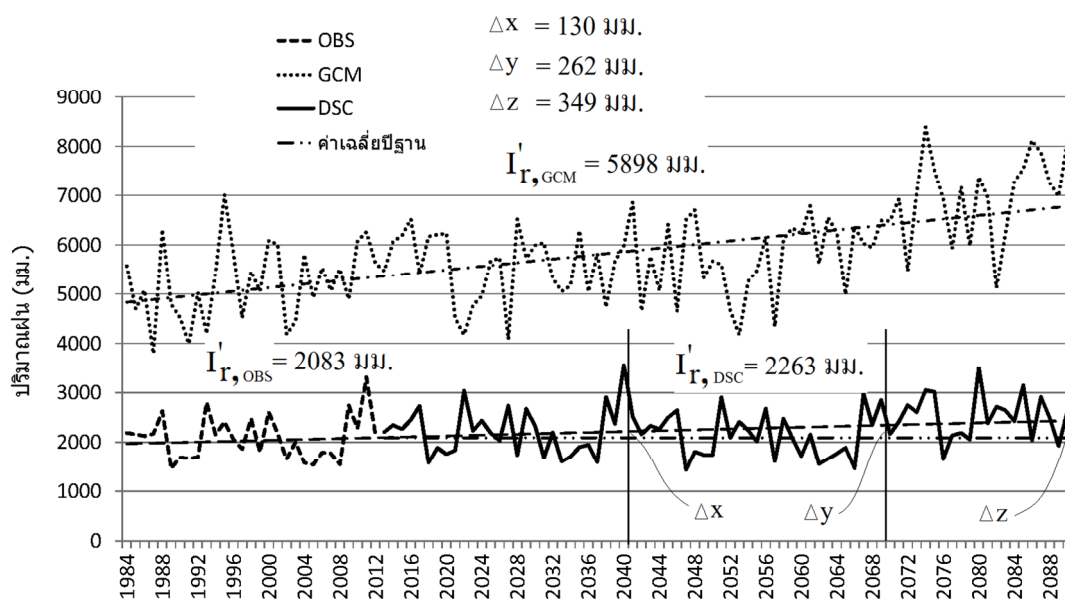
อีกประเด็นหนึ่งที่ผู้วิจัยต้องการที่จะนำเสนอ ภายหลังจากที่ได้ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของฝนที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกด้วยวิธีการต่างๆ ทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2.6 แล้ว คือ ผู้วิจัยพบว่าผลจากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แพกเตอร์ โดยการกระจายปริมาณฝนส่วนต่างด้วยวิธีทั้ง 4 วิธี เฉพาะฝนรายวันเท่านั้นที่ให้ผลลัพธ์แตกต่างกัน แต่ฝนรายเดือนและฝนรายปีจะให้ผลลัพธ์เท่ากันเสมอ ผู้วิจัยจึงยกตัวอย่างประกอบจากบางส่วนของงานวิจัย เพื่ออธิบายประเด็นนี้ คูตารางที่ 4.7 จะพบว่าฝนรายวัน 15 วันสุดท้ายของเดือนธันวาคม 2016 ที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศซึ่งทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แพกเตอร์ โดยการกระจายปริมาณฝนส่วนต่างด้วยวิธีทั้ง 4 วิธี มีค่าแตกต่างกัน แต่ฝนสะสมทั้งเดือนของเดือนธันวาคม 2016 และฝนสะสมทั้งปีของปี 2016 มีค่าเท่ากันทั้ง 4 วิธี คือ 1020.20 มิลลิเมตร และ 2450.23 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะทั้ง 4 วิธีจะใช้เซลล์ต่ำแพกเตอร์ (คูตารางที่ 4.5) และปริมาณฝนส่วนต่างค่าเดียวกัน นำมาแบ่งกระจายไปในแต่ละเดือนแบบรายวัน เช่น ฝนในเดือนธันวาคม 2016 (1020.20 มิลลิเมตร) เท่ากับ ฝนในอดีตที่ได้มาจากการตรวจวัดจริงในเดือนธันวาคม 1987 (888.60 มิลลิเมตร) บวกกับปริมาณฝนส่วนต่าง (131.63 มิลลิเมตร) โดยที่ปริมาณฝนส่วนต่าง จำนวน 131.63 มิลลิเมตร จะถูกกระจายด้วยวิธีต่างๆ เข้าไปในเดือนธันวาคม 1987 ในทำนองเดียวกันกับฝนรายปี สามารถอธิบายได้แบบเดียวกันกับฝนรายเดือน ดังนั้นเมื่อนำกราฟฝนรายปีที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเซลล์ต่ำ แพกเตอร์ โดยการกระจายปริมาณฝนส่วนต่างด้วยวิธีทั้ง 4 วิธี คือ แบบสัดส่วน แบบการเพิ่มโอกาสเกิดพายุ การเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน ก็จะได้เป็นกราฟ 4 เส้นที่สามารถซ้อนทับกันได้สนิทเสมือนหนึ่งเป็นกราฟเส้นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบฝนรายวัน ฝนรายเดือน และฝนรายปี ที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเคลต้า แฟกเตอร์ โดยการกระจายปริมาณฝนส่วนต่างด้วยวิธีทั้ง 4 วิธี

ฝนรายวันเดือนธันวาคม 2016 / วันที่	การกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง ด้วยวิธีต่างๆ			
	แบบสัดส่วน	แบบการเพิ่ม โอกาสเกิด พายุ	การเพิ่ม วันที่ฝนตก เดือนละ 1 วัน	การเพิ่ม วันที่ฝนตก เดือนละ 3 วัน
...
16	29.28	25.50	25.50	25.50
17	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	131.63	43.88
21	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	43.88
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	6.09	5.30	5.30	5.30
27	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	43.88
ฝนสะสมทั้งเดือนธันวาคม 2016	1020.20	1020.20	1020.20	1020.20
ฝนสะสมตลอดปี 2016	2450.23	2450.23	2450.23	2450.23



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ได้จากการทำการปรับแก้ความคลื่อนด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์ วิธีต่างๆในช่วงปี 1984 - 2090 OBS : ฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน, DSC : ฝนรายปีจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบต่างๆ



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบฝนรายปีที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศกับฝนรายปีที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว ในช่วงปี 1984 - 2090 OBS : ฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงที่สถานีวัดน้ำฝน, GCM : ฝนรายปีจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ, I_r' : ฝนรายปีเฉลี่ย

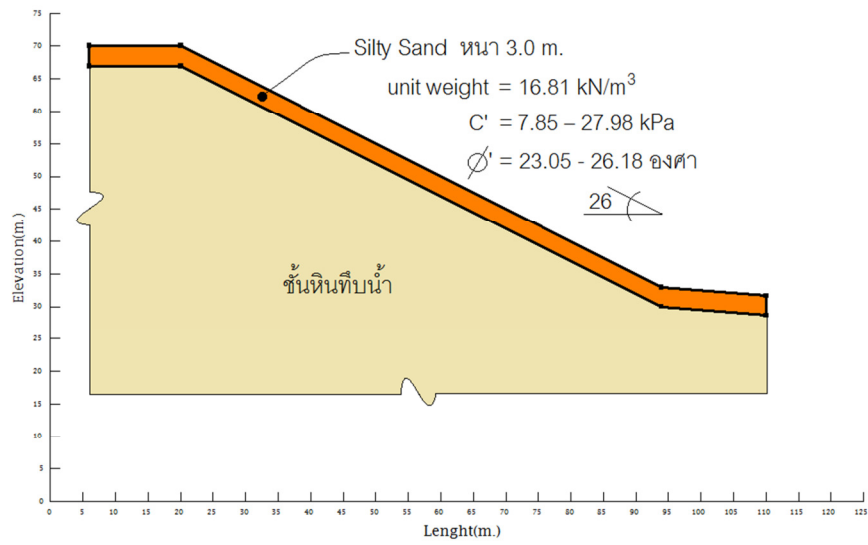
สำหรับกราฟในรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบฝนรายปีที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (GCM) กับ ฝนรายปีที่ได้จากการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์ ในช่วงปี 2013 - 2090 พบว่าผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ยังไม่ได้ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ปริมาณฝนมีค่าสูงกว่าผลลัพธ์ที่ได้การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้วประมาณ 2 เท่า และสามารถนำกราฟของผลลัพธ์ที่ได้ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว มาต่อกับกราฟของฝนรายปีที่ตรวจวัดจริงที่สถานีตรวจวัดน้ำฝนได้อย่างต่อเนื่องกัน เมื่อพิจารณาในประเด็นปริมาณน้ำฝนในอนาคต จากกราฟรูปที่ 4.21 ปรากฏว่าปริมาณฝนในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนี้คือ ฝนเฉลี่ยรายปีที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้วมีค่า 2263 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าฝนเฉลี่ยรายปีที่ได้จากการตรวจวัดจริง (ปีฐาน) คือ 2083 มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาเป็นช่วงเวลาๆละ 29 ปี ตามปีฐาน โดยคิดจากร้อยละของความแตกต่างระหว่างเส้นแนวโน้มของฝนรายปีจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว กับเส้นแนวโน้มของฝนรายปีเฉลี่ยของปีฐาน ปรากฏว่า ในปี 2040 ฝนเฉลี่ยรายปีจะเพิ่มขึ้นกว่าปีฐาน 6.3% (คำนวณจาก $(130/2083) \times 100\%$) ในปี 2070 ฝนเฉลี่ยรายปีจะเพิ่มขึ้นกว่าปีฐาน 12.6% และในปี 2090 ฝนเฉลี่ยรายปีจะเพิ่มขึ้นกว่าปีฐาน 16.8% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เกียมใจและคณะ (2553) ที่บอกว่าผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก MMR5 RCM ในภาคใต้มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง และงานวิจัยของ ศุภกรและคณะ(2552) ผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 ปริมาณฝนรายปีเพิ่มสูงขึ้นโดยเห็นได้ชัดตั้งแต่ช่วงกลางศตวรรษเป็นต้นไป

4.2 ผลการศึกษาแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน

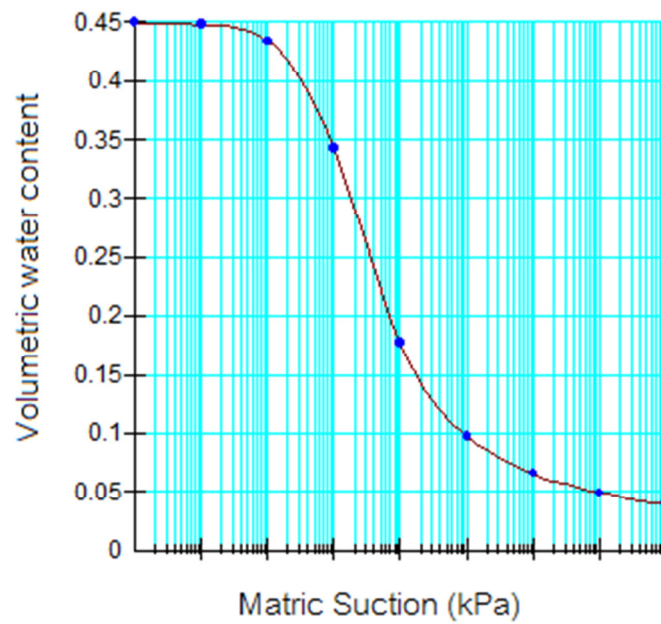
ในส่วนนี้ผู้วิจัยแบ่งผลการศึกษาออกเป็นการศึกษาข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช รวมถึงข้อมูลกายภาพ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองดังกล่าว และการคำนวณด้วยสมการลาดอนันต์ (Infinite Slope Stability Equation) ผลการคำนวณด้วยสมการดังกล่าว

4.2.1 ผลการศึกษาข้อมูลพื้นที่และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินของพื้นที่ศึกษา

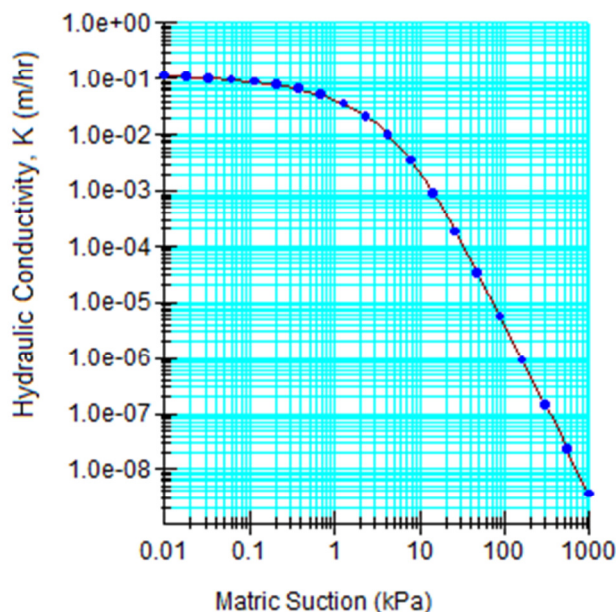
ผลการศึกษาข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล ทั้งจากภาพถ่ายและข้อมูลจากเอกสารของกรมทรัพยากรธรณี (2558) พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของ ตำบลเทพราช มีการเปลี่ยนแปลงสภาพป่าธรรมชาติมาเป็นสวนยางพารา สวนปาล์ม น้ำมัน และสวนผลไม้ พื้นที่ป่าธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติเขาหลวงซึ่งอยู่ทางทิศตะวันออกของ ตำบลเทพราช ในส่วนของข้อมูลทางด้านวิศวกรรมของดิน ได้จากงานวิจัยของรัชพลและคณะ (2557) ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ปรากฏว่าลาดภูเขาที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม (ตำบลเทพราช) มีความลาดชัน(β) เท่ากับ 26 องศา ชั้นดินเป็นดินประเภททรายปนตะกอนทราย (Silty Sand, SM) หนาเฉลี่ย 3 เมตร วางตัวบนชั้นหินที่บดน้ำ พารามิเตอร์ทางด้านวิศวกรรมต่างๆของดิน ในช่วงที่ดินมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 70-95% มีหน่วยแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') อยู่ในช่วง 7.85 – 27.98 kPa และค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') อยู่ในช่วง 23.05-26.18 องศา หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) เท่ากับ 16.81 kN/m³ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินอิ่มตัว เท่ากับ 11.13 ซม./ชม. (รายละเอียดปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.1) เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาทำเป็นแบบจำลองจะได้ดังรูปที่ 4.22 นอกจากนี้ Chollada (2016) ได้นำข้อมูลของรัชพลและคณะ(2557) ไปคำนวณหากราฟเส้นอัตรลักษณ์ของดิน (Soil-water characteristic curve ,SWCC) และฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (Permeability function) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 แบบจำลองลาดดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน



รูปที่ 4.23 กราฟเส้นอัตรลักษณ์ของดิน SM (Soil-water characteristic curve ,SWCC)



รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำในมวลดิน SM (Permeability function)

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพลาดดิน ช่วงที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม

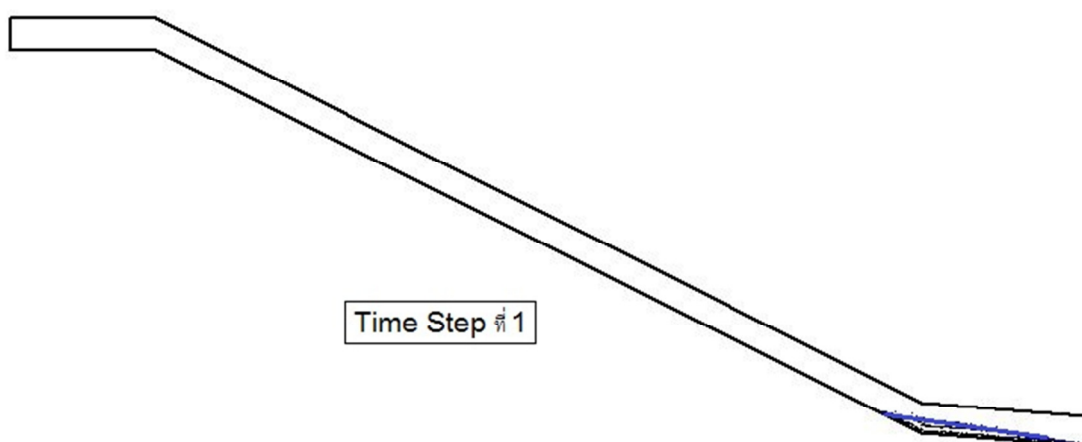
ผลการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นผลการคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมมาเป็นตัวแทนของลาดดินภูเขาของ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช และเพื่อหาเงื่อนไขต่างๆที่ทำให้เกิดดินถล่มได้ ส่วนที่ 2 เป็นผลการคำนวณโดยใช้สมการเสถียรภาพของลาดดินแบบอนันต์ (Infinite Slope Stability Equation) เพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากส่วนที่ 1 รายละเอียดในการดำเนินการเป็นดังนี้

4.2.2.1 ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W

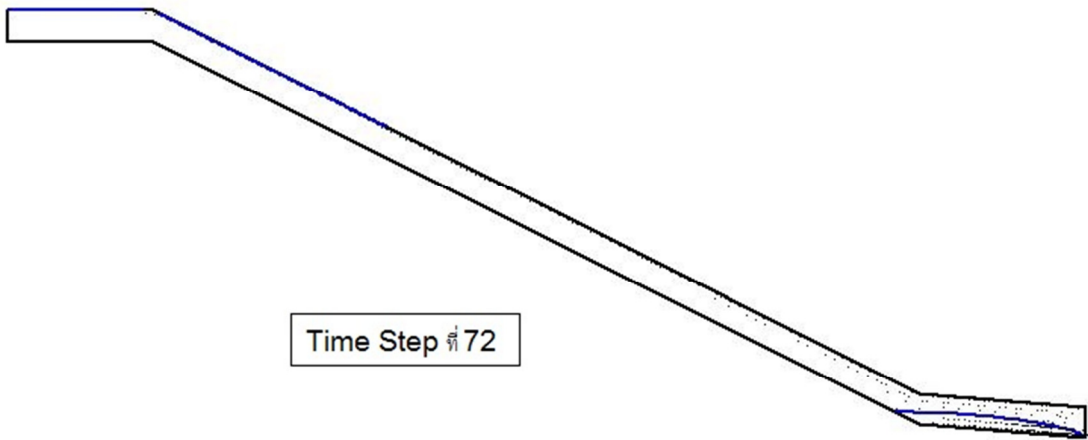
การไหลซึมของน้ำในมวลดินช่วงที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้ข้อมูลฝนตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อบต.ฉลอง อยู่ที่

ตำบลคลอง อำเภอลือชัย จังหวัดนครศรีธรรมราช ดังที่แสดงแล้วในตารางที่ 4.2 และกราฟรูปที่ 4.2 จากนั้นได้ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและปริมาณฝนที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดินถล่มช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011 โดยใช้โปรแกรม Seep/W และ Slope/W ปรากฏว่าหน่วยแรงเชื่อมแน่นประสิทธิผล (c') 8.0 kPa และค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') 24 องศา คือค่าที่เหมาะสม และทำให้ดินถล่มที่ชั่วโมง (Time Step) ที่ 117 หลังจากฝนเริ่มตก (ปริมาณฝนสะสมที่ 117 เท่ากับ 682 มิลลิเมตร) ตรงกับเวลาที่เกิดลาดดินถล่มจริงช่วงปลายของวันที่ 26 มีนาคม 2011 และสอดคล้องกับงานวิจัยของรัชพลและคณะ(2557) ที่ระบุว่าเวลาที่เกิดดินถล่ม คือช่วงบ่ายของวันที่ 26 มีนาคม 2011

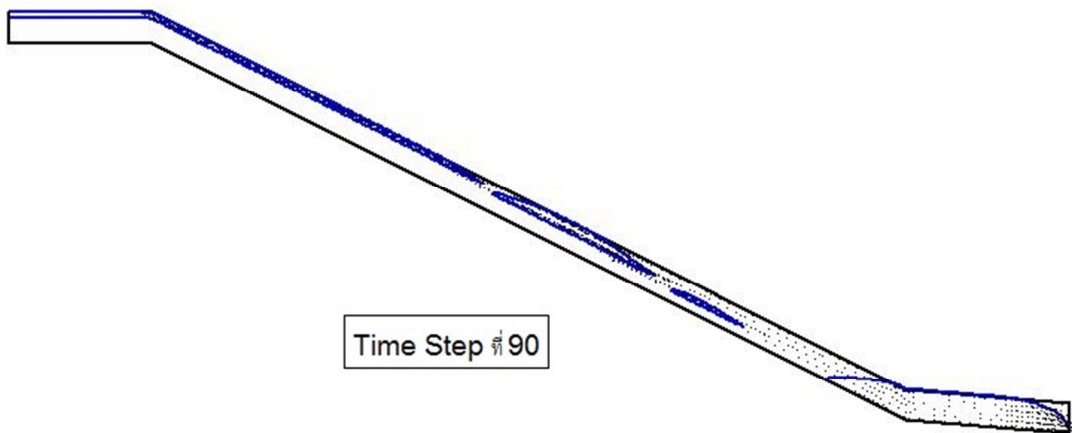
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SEEP/W ทำให้ได้ระดับน้ำใต้ดินของลาดดินที่ชั่วโมงต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกมานำเสนอเพียง 5 เวลา คือ ที่เวลาเริ่มต้น Time Step ที่ 1 คือเวลาที่ฝนเริ่มตก ระดับน้ำใต้ดินที่แสดงในรูปที่ 4.25 เป็นระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติช่วงฤดูร้อนที่ได้มาจากการคำนวณแบบ Steady State ย้อนหลัง 29 ปี (1984-2011) โดยใช้ข้อมูลฝนจากการตรวจวัดจริงในอดีตจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช Time Step ที่ 72 คือระยะเวลาที่ฝนตกมาแล้ว 72 ชั่วโมง (3 วัน) นับจากเวลาเริ่มต้นที่ฝนตก (รูปที่ 4.26) Time Step ที่ 90 Time Step ที่ 105 และ Time Step ที่ 117 คือระยะเวลาที่ฝนตกมาแล้ว 90 ชั่วโมง 105 ชั่วโมงและ 117 ชั่วโมง นับจากเวลาเริ่มต้นที่ฝนตกตามลำดับ (รูปที่ 4.27 4.28 และ 4.29)



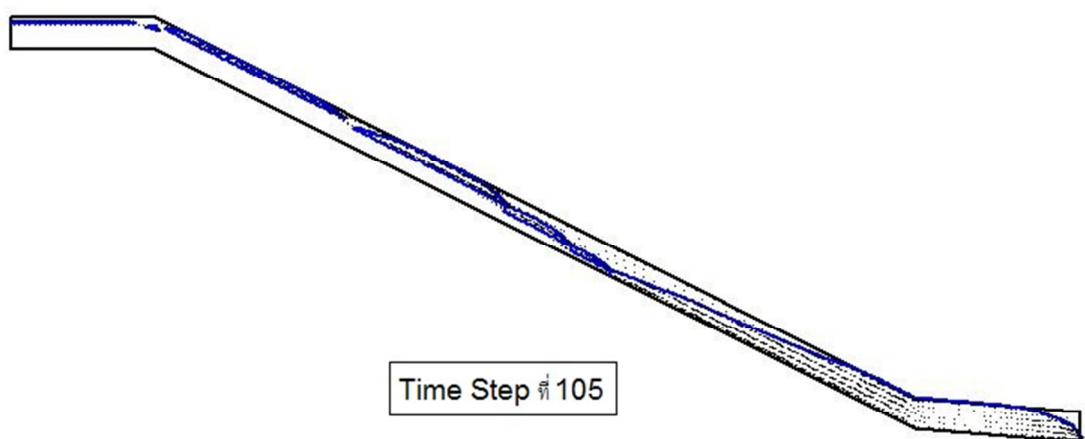
รูปที่ 4.25 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 1



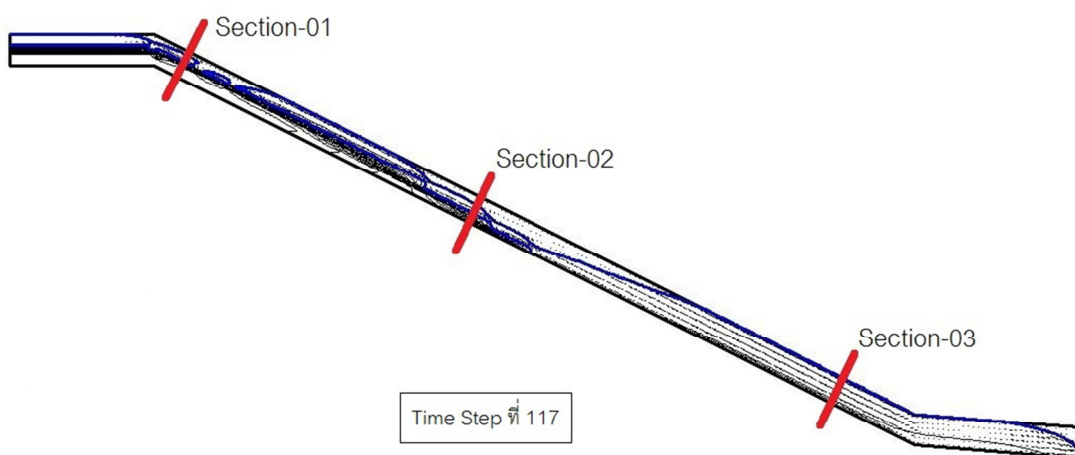
รูปที่ 4.26 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 72



รูปที่ 4.27 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 90



รูปที่ 4.28 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 105

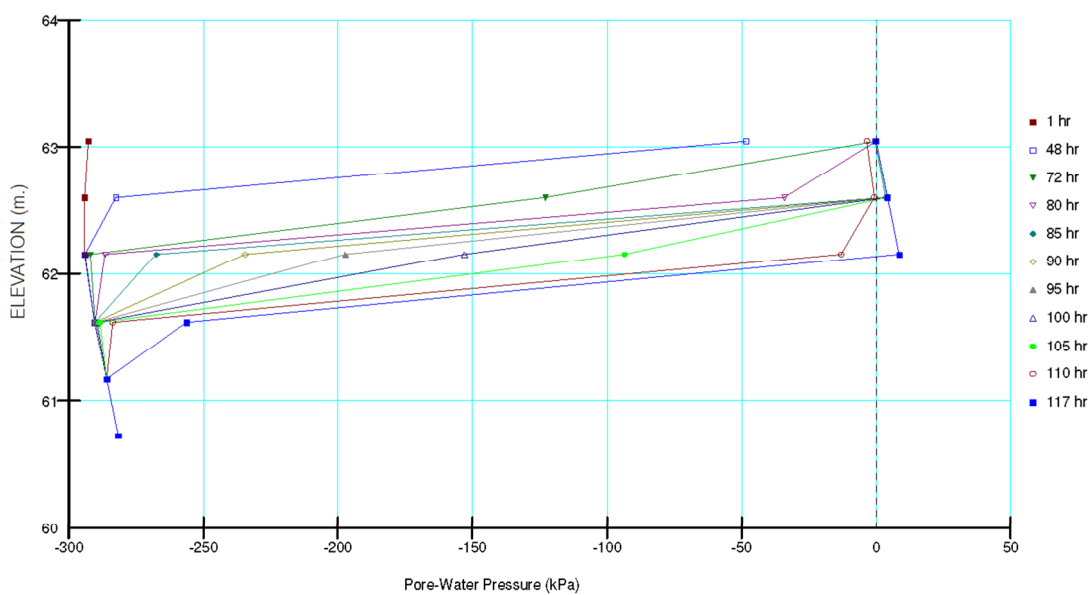


รูปที่ 4.29 ระดับน้ำใต้ดินในลาดดิน Time Step ที่ 117

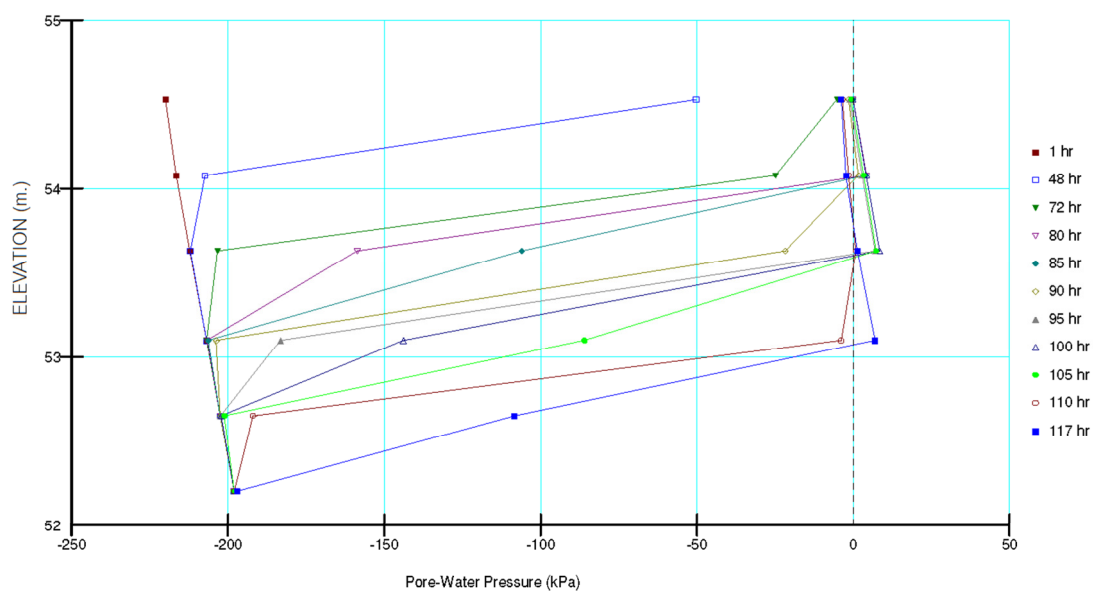
ระดับน้ำใต้ดินของลาดดินที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม SEEP/W แสดงให้เห็นว่าในแต่ละชั่วโมงหลังจากที่ฝนเริ่มตก ระดับน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนแปลงไป คือ ในช่วงเริ่มต้นระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ที่ดินของลาดดิน (รูปที่ 4.25) เป็นระดับน้ำใต้ดินธรรมชาติก่อนฝนตก เมื่อฝนตกต่อเนื่องไปอีก 3 วันระดับน้ำใต้ดินที่ดินของลาดดินเพิ่มขึ้นไม่มาก (รูปที่ 4.26) เพราะฝนใน 2 วันแรกตก

น้อยมากเพียง 15 มิลลิเมตรต่อวัน (รูปที่ 4.2 ประกอบ) แต่ก็พบว่าเริ่มมีน้ำสะสมบริเวณผิวดินตรงยอดของลาดดิน เมื่อเช้าช่วงวันที่ 4 (Time Step ที่ 90) ที่ฝนตกต่อเนื่อง (วันที่ 4 ฝนตก 342 มิลลิเมตรต่อวัน รูปที่ 4.2 ประกอบ) ปรากฏว่าระดับน้ำใต้ดินบริเวณตีนของลาดดินเพิ่มขึ้นมามาก และระดับน้ำเริ่มสะสมบริเวณตีนลาดดิน (รูปที่ 4.27) ในขณะที่บริเวณกลางๆของลาดดินและยอดของลาดดินมีน้ำสะสมภายในชั้นดินแล้ว แต่น้ำยังคงสะสมอยู่ใกล้ๆผิวดิน ยังไหลลงมาไม่ถึงชั้นหินที่บ้น้ำ เมื่อฝนตกต่อเนื่องเข้าสู่วันที่ 5 (Time Step ที่ 105) พบว่าภายในชั้นดินของลาดดิน มีน้ำใต้ดินสะสมอย่างต่อเนื่องและไหลลงมาพร้อมกับระดับน้ำใต้ดินบริเวณตีนลาดดินแล้ว (รูปที่ 4.28) หลังจากนั้นอีกเพียง 12 ชั่วโมง (Time Step ที่ 117) ที่ฝนยังคงตกต่อเนื่อง ทำให้บริเวณตีนของลาดดินมีน้ำสะสมตลอดความหนาของชั้นดิน (ดินอึดตัวด้วยน้ำทั้งหน้าตัด) และเกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่ Time Step นี้

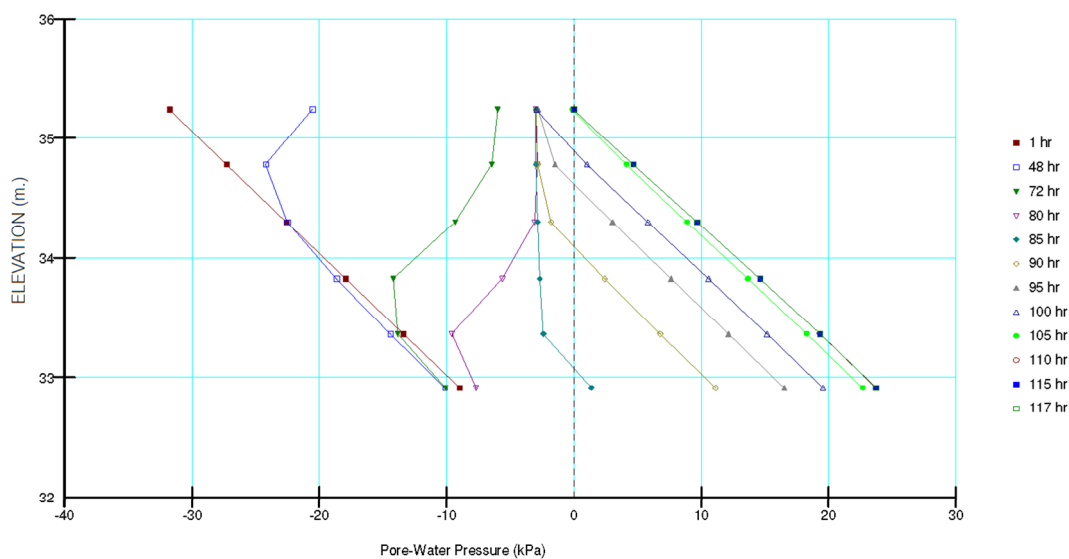
น้ำใต้ดินของลาดดินในรูปที่ 4.29 เป็นระดับน้ำในขณะที่เกิดดินถล่ม จะเห็นว่าน้ำฝนจากผิวดินไหลลงไปชั้นดิน ขณะเดียวกันน้ำใต้ดินที่สะสมอยู่บนชั้นหินที่บ้น้ำสูงชันจนมาบรรจบกับน้ำฝนที่ไหลลงมาทำให้บริเวณตีนของลาดดินมีการอึดตัวด้วยน้ำตลอดหน้าตัด(section) 03 ในขณะที่บริเวณตรงกลางของลาดดิน น้ำใต้ดินยังเอ่อล้นมาไม่ถึง น้ำส่วนใหญ่ที่หน้าตัด(section) 02 จึงเป็นน้ำฝนที่ไหลลงมาวมกันที่กลางๆความหนาของชั้นดิน และบริเวณยอดของลาดดินน้ำฝนสะสมอยู่ใกล้ๆผิวดินดั่งหน้าตัด (section) 01



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-01 ที่ Time Step ต่างๆ



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-02 ที่ Time Step ต่างๆ



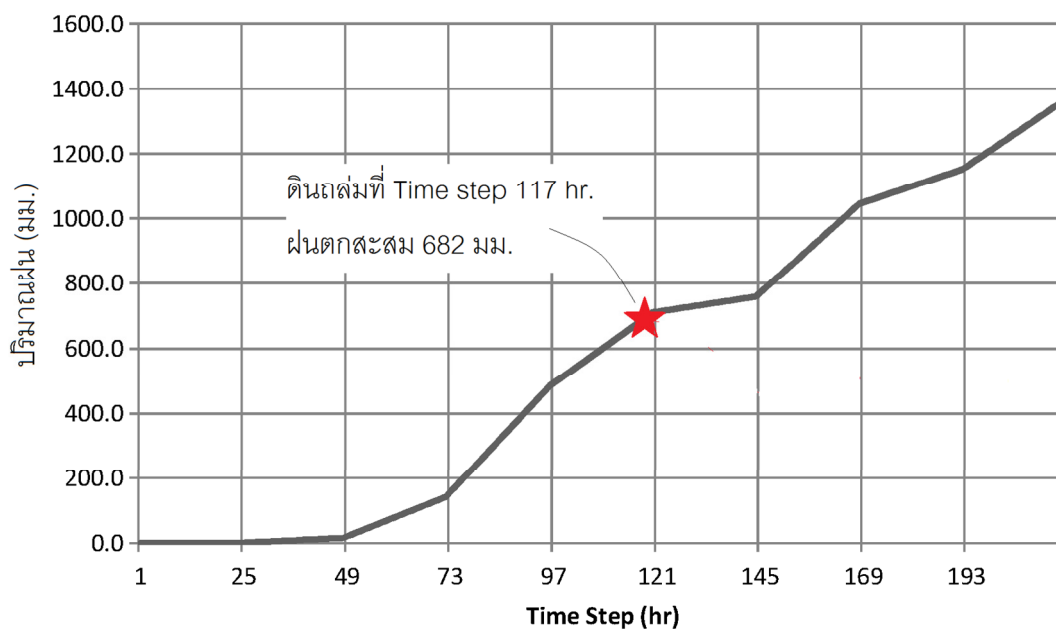
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงแรงดันน้ำ Pore water Pressure ของ Section-03 ที่ Time Step ต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 แรงดันน้ำ (Pore water Pressure) ของ Section-01 ที่ time step แรกจะมีค่าติดลบ (มีแรงดูด) มาก ตลอดทั้งหน้าตัดเนื่องจากดินยังแห้ง แต่เมื่อฝนเริ่มตกผิวดินมีค่าแรงดันน้ำค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อธิบายได้ว่าผิวดินเริ่มเปียกและอิมตัวด้วยน้ำ ในขณะที่ภายในชั้นดินล่างๆลงไปความเปียกยังคงลงไปไม่ถึง ทำให้ค่าแรงดันน้ำยังคงติดลบ แต่เมื่อถึง time step ที่ 117 ค่าแรงดันน้ำมีค่าเป็นบวก อธิบายได้ว่าน้ำฝนไหลลงไปสะสมภายในชั้นดินทำให้เกิดแรงดันน้ำอยู่ในชั้นดิน สำหรับรูปที่ 4.31 ก็อธิบายได้ทำนองเดียวกับรูปที่ 4.30 กล่าวคือการอิมตัวด้วยน้ำของลาดดินจะเริ่มจากผิวดินก่อนแล้วค่อยๆอิมตัวลงมาที่ชั้นดินด้านล่าง แต่รูปที่ 4.32 ปรากฏว่าค่าแรงดันน้ำของ Section-03 ที่ time Step แรกจะมีค่าติดลบมากที่ผิวดิน(แต่ก็ยังน้อยกว่า Section-01 และ 02) และบริเวณใกล้ชั้นหินที่น้ำติดลบไม่มาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะบริเวณใกล้ชั้นหินที่น้ำมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ (อธิบายได้ว่าชั้นดินยังอยู่ใกล้ผิวน้ำใต้ดินมากเท่าไร ความชื้นก็มีมากขึ้นไปด้วย ความชื้นมากขึ้น ทำให้แรงดันน้ำติดลบน้อยลง คือเกิดแรงดูดน้อยลง) แต่เมื่อฝนเริ่มตก ผิวดินมีค่าแรงดันน้ำค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อธิบายได้ว่าผิวดินเริ่มเปียกและอิมตัวด้วยน้ำ ในขณะที่ภายในชั้นดินล่างๆลงไปความเปียกยังคงลงไปไม่ถึง ค่าแรงดันน้ำก็ยังคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง แต่

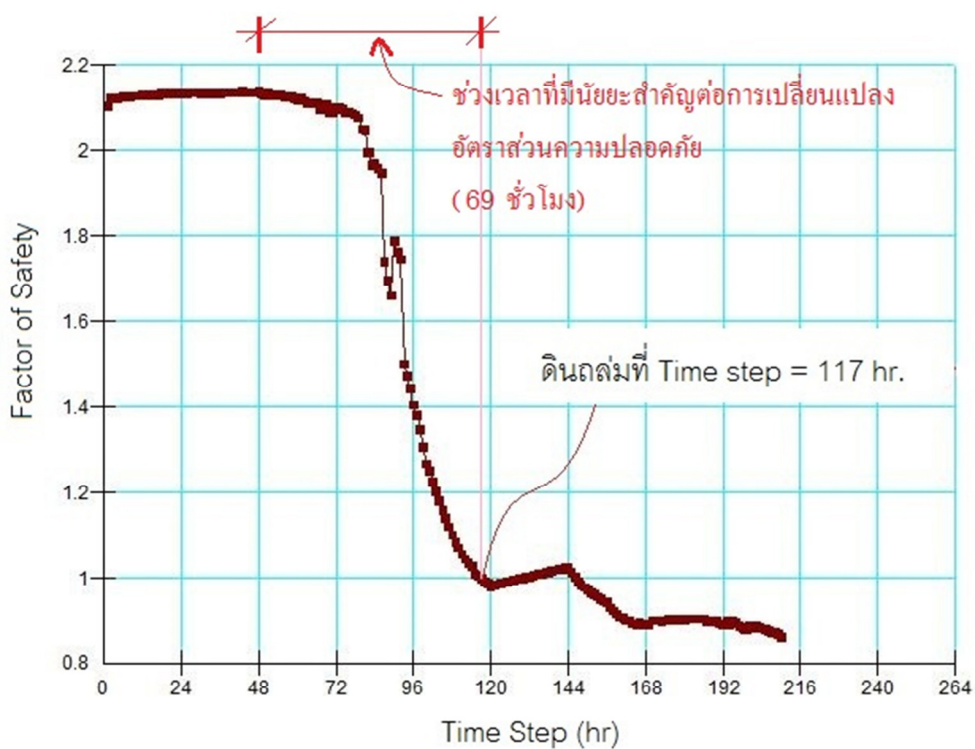
เมื่อเวลาผ่านไปนานกว่านั้นค่าแรงดันน้ำมีค่าเป็นบวกมากขึ้นเพราะน้ำฝนไหลลงไปบรรจบกับระดับน้ำใต้ดินที่ท่วมขึ้นมา ทำให้ดินที่ section-03 จมอยู่ใต้น้ำดังรูปที่ 4.29

ภายหลังจากการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินแล้ว ก็เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยใช้วิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit Equilibrium) วิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified ซึ่งใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินจากโปรแกรม SEEP/W มาคำนวณเสถียรภาพลาดดินต่อโดยใช้โปรแกรม SLOPE/W ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าดินถล่มที่ time step ที่ 117 (ประมาณ 5 วันหลังจากที่ฝนเริ่มตก) โดยมีปริมาณฝนสะสม 682 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และเมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ฝนตกในรูปที่ 4.34 พบว่ากราฟของอัตราส่วนความปลอดภัยเริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากชั่วโมงที่ 48 ผ่านไปแล้ว และหลังจากนั้นอีก 69 ชั่วโมงก็เกิดเหตุการณ์ดินถล่ม (ชั่วโมงที่ 117) อธิบายได้ว่าระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่องและปริมาณฝนช่วงที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพลาดดินที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช คือ ระยะเวลาฝนตกต่อเนื่อง 69 ชั่วโมง (ประมาณ 3 วัน) ปริมาณน้ำฝนสะสม 665 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณได้จาก $682 - 16 - 1 = 665$ มิลลิเมตร (ดูปริมาณฝนรายวันจากรูปที่ 4.2 ประกอบ)

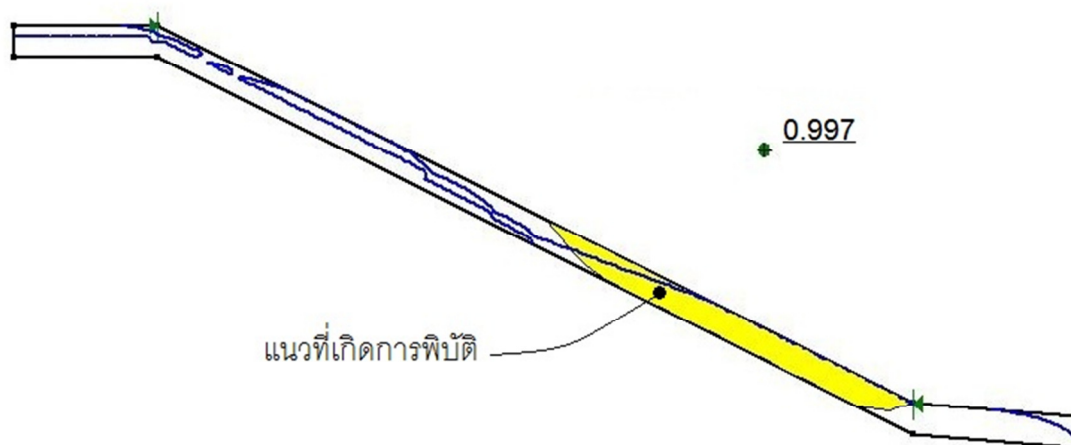
จากเงื่อนไขข้างต้นที่กล่าวมานี้ ได้จากการพิจารณาความชื้นเริ่มต้น (Initial water content) ที่ได้จากการคำนวณจากปริมาณฝนเฉลี่ยในช่วงฤดูร้อนย้อนหลังกลับไป 29 ปี (ค.ศ 1984-2011) ด้วยโปรแกรม SEEP/W โดยพิจารณาในสภาวะการไหลคงที่ (Steady State) หากในสภาพความเป็นจริงในธรรมชาติ ชั้นดินก่อนที่จะมีฝนตก มีความชื้นเริ่มต้นมากกว่านี้จะทำให้ปริมาณฝนตกสะสมที่ทำให้ดินถล่มมีค่าน้อยกว่า 665 มิลลิเมตรได้ ดังนั้นเพื่อให้เงื่อนไขต่างๆครอบคลุมกว่านี้ อาจจะต้องการศึกษาเพิ่ม



รูปที่ 4.33 กราฟการเพิ่มขึ้นของน้ำฝนของสถานี ออบต่าบลตลอด ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม 2011 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2011 ที่ Time step ต่างๆจนถึงจุดที่ดินถล่ม



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ฝนตก (Time Step)

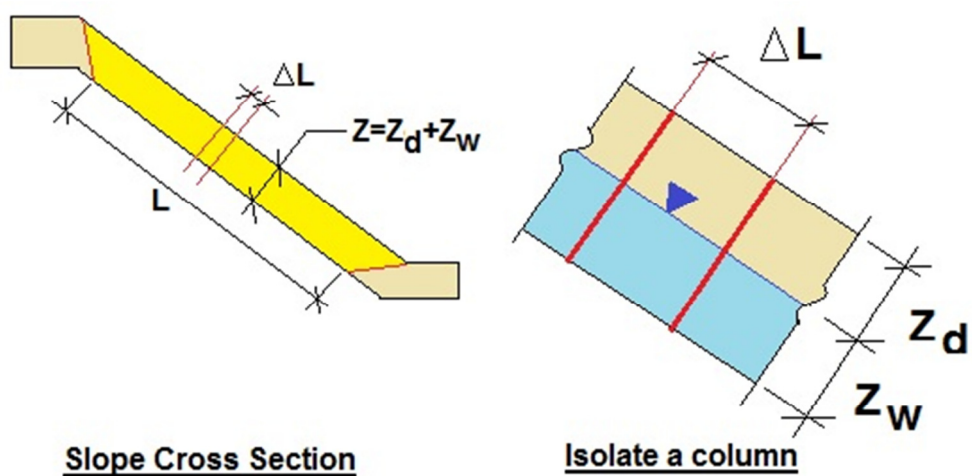


รูปที่ 4.35 แสดงรูปแนวพิบัติกับระดับน้ำในมวลดินช่วงที่เกิดดินถล่ม

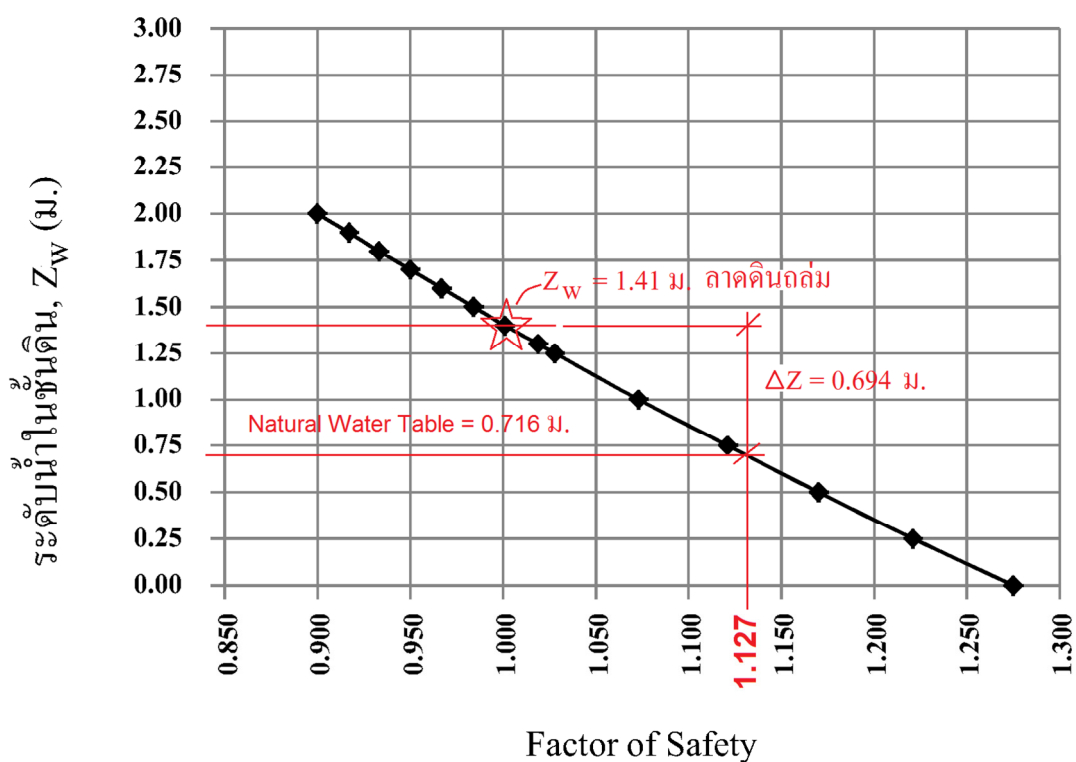
ลักษณะการพิบัติของลาดดินที่ time step ที่ 117 จะเกิดที่บริเวณตีนของลาดดินก่อน เนื่องจากดินบริเวณดังกล่าวมีการอิ่มตัวด้วยน้ำเกือบจะตลอดหน้าตัด ดังรูปที่ 4.35 พื้นที่สีเหลืองคือแนวที่เกิดการพิบัติ และเส้นสีฟ้าคือระดับน้ำใต้ดินในเวลาที่ลาดดินถล่ม ณ เวลาที่ลาดดินถล่มปรากฏว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้ เท่ากับ 0.997

4.2.2.2 ผลการคำนวณโดยใช้สมการลาดอนันต์ (Infinite Slope Stability Equation)

เนื่องจากสภาพของลาดภูเขาที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ชั้นดินมีลักษณะไม่หนาเมื่อเทียบกับความยาว จึงสามารถพิจารณาให้เป็นการพิบัติแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope Failure) ได้ ดังนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินบริเวณนี้ด้วยวิธีการพิบัติแบบลาดอนันต์ โดยใช้สมการที่ 2.33 ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5.2 ซึ่งไม่ได้คิดผลของดินในสถานะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) เพื่อเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W โดยใช้วิธีจำกัดสมดุลของแรง (Limit Equilibrium) วิเคราะห์ด้วยวิธี Bishop's Simplified มีการกำหนด parameter ต่างๆ ให้เหมือนกัน แล้วทำการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในชั้นดิน (Z_w) ดังรูปที่ 4.36 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความปลอดภัย ปรากฏว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัย จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระดับน้ำในชั้นดินเพิ่มสูงขึ้น ดังกราฟในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.36 แสดงการวิเคราะห์การพังทลายแบบลาดอนันต์ (Infinite slope Analysis)



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในชั้นดิน (Z_w) และอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินของ ต.เทพราช อ.สีชล จ.นครศรีธรรมราช

จากกราฟในรูปที่ 4.37 พบว่าลาดดินถล่ม (ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 0.999) เมื่อระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นมาถึงระดับ 1.41 เมตรจากระดับชั้นหินที่บ้น้ำ และคำนวณระดับน้ำใต้ดินธรรมชาติ โดยใช้สมการที่ 2.38 ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5.2 ได้เท่ากับ 0.714 เมตรจากระดับชั้นหินที่บ้น้ำ ดังนั้นปริมาณฝนสะสมที่ทำให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มจากระดับน้ำใต้ดินธรรมชาติ จนเกิดลาดดินถล่ม เท่ากับ 694 มิลลิเมตร ($1419 - 714 = 694$ มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยวิธี Bishop's Simplified พบว่ามีความใกล้เคียงกันในเรื่องปริมาณฝนตกสะสม แต่ระดับน้ำใต้ดิน ตอนที่เกิดลาดดินถล่มแตกต่างกันประมาณ 2 เท่า กล่าวคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Bishop's Simplified ระดับน้ำในชั้นดินสูงถึงระดับผิวดิน (ดินมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเกือบทั้งหน้าตัดดิน) และปริมาณฝนตกสะสม 665 มิลลิเมตร ถึงจะเริ่มเกิดลาดดินถล่ม แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีการพิบัติแบบลาดอนันต์ กลับมีระดับน้ำใต้ดิน ณ เวลาที่เกิดดินถล่ม อยู่ที่ระดับ 1.41 เมตรจากระดับชั้นหินที่บ้น้ำ ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยสมการวิธีการพิบัติแบบลาดอนันต์ ไม่ได้มีการพิจารณาผลของแรงดันน้ำในมวลดิน โดยเฉพาะค่าแรงดันน้ำที่เป็นค่าลบ (ซึ่งเป็นแรงดูด) และผลของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W มีการพิจารณาผลของแรงดันน้ำในมวลดินและผลของดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) ซึ่งมีผลทำให้ลาดดินมีแรงต้านทาน (Resisting force) มากขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์จากแบบจำลองต่างๆ

ส่วนนี้เป็นการนำผลจากแบบจำลองทั้งสาม คือแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน และแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน มาวิเคราะห์เพื่อประเมินปริมาณฝนและโอกาสการเกิดเหตุการณ์ดินถล่มในอนาคตอันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) พร้อมทั้งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้โอกาสการเกิดดินถล่มเปลี่ยนแปลงไป

4.3.1 ผลการประเมินปริมาณฝนในอนาคตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

เมื่อพิจารณาในประเด็นรูปแบบของฝนในอนาคตเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากกราฟแท่งรูปที่ 4.12 ถึง 4.19 ปรากฏว่าฝนในอนาคตยังคงตกมากในเดือนตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม ซึ่งเป็นฤดูฝนของภาคใต้ ในขณะที่ฝนพายุฤดูร้อนมีบ้างในบางปี แต่รูปแบบยังไม่แน่นอน จึงสรุปในภาพรวมของฝนในเชิงกายภาพได้ว่าแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว ให้ผลลัพธ์ในอนาคตดังนี้ คือ ปริมาณฝนที่ อำเภอท่าศาลา จ. นครศรีธรรมราช มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นของศตวรรษที่ 21 แต่มีแนวโน้มลดลงช่วงกลางศตวรรษที่ 21 และกลับมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วงปลายของศตวรรษที่ 21 ดังตารางที่ 4.8 ได้แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยของฝนรายปีในแต่ละทศวรรษ โดยที่ทศวรรษที่ 2 และ 3 ฝนรายปีมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่ทศวรรษที่ 4 ถึง 7 ปรากฏว่าฝนรายปีมีค่าเฉลี่ยลดลง และเมื่อเข้าสู่ทศวรรษที่ 8 และ 9 ฝนรายปีมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แต่เมื่อพิจารณาภาพรวมทั้งศตวรรษ จากกราฟแสดงแนวโน้มในรูปที่ 4.21 ปรากฏว่าในอนาคตปริมาณฝนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และรูปแบบของฝนยังไม่มีนัยสำคัญใดบ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงจากอดีต กล่าวคือ ฝนยังคงตกมากในฤดูฝนช่วงเดือนตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยฝนรายปีในแต่ละทศวรรษในอนาคต

ทศวรรษ	ฝนรายปีเฉลี่ย
ทศวรรษที่ 2 (2011-2020)	2263.97
ทศวรรษที่ 3 (2021-2030)	2319.15
ทศวรรษที่ 4 (2031-2040)	2144.03
ทศวรรษที่ 5 (2041-2050)	2111.12
ทศวรรษที่ 6 (2051-2060)	2195.85
ทศวรรษที่ 7 (2061-2070)	2080.37
ทศวรรษที่ 8 (2071-2080)	2534.36
ทศวรรษที่ 9 (2081-2090)	2526.28

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลฝนในอดีตกรณีที่เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) โดยใช้เกณฑ์ของปริมาณฝนตกต่อเนื่อง แล้วทำให้ปริมาณน้ำฝนสะสมเกินกว่า 600 มิลลิเมตร ขึ้นไปเป็นเงื่อนไขของเหตุการณ์ฝนตกหนัก (สาเหตุที่เลือกปริมาณน้ำฝนสะสมเกินกว่า 600 มิลลิเมตร ขึ้นไปเป็นเงื่อนไขของเหตุการณ์ฝนตกหนัก เนื่องจากได้ทำการคำนวณย้อนกลับ เหตุการณ์ลาดดินถล่มที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.2) ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณฝนและระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่องของเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 ของแต่ละปี กล่าวคือ เมื่อทำการนำฝนรายวันทั้งปีมาพิจารณา จะพบว่าเหตุการณ์ที่ฝนตกต่อเนื่องหลาย ๆ วันอยู่หลายครั้ง ผู้วิจัยพิจารณาเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่มีปริมาณฝนมากที่สุด เหตุการณ์ที่มีปริมาณฝนรองลงมา และเหตุการณ์ที่มีปริมาณฝนน้อยลงกว่านั้นอีกระดับหนึ่งเพื่อมาเป็นเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 ของแต่ละปีตามลำดับ ดังตารางที่ 4.9 ปรากฏว่าในช่วงปี 1984 ถึงปี 2012 มีเหตุการณ์ที่ฝนตกปริมาณมากกว่า 600 มิลลิเมตร จำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง คือเมื่อปี 1984, 1988, 1995, 1996, 1998, 2009, 2010 และ 2011 ในบันทึกประวัติการเกิดเหตุการณ์ดินถล่มพบว่า 2 ปี คือ ปี 1988 เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่บ้านกะทูน อำเภอพิปูน กับ บ้านคีรีวง อำเภอลานสกา จ.นครศรีธรรมราช ในเดือนพฤศจิกายน และปี 2011 เกิดเหตุการณ์ดินถล่มที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช ในเดือนมีนาคม สำหรับปีอื่นๆ ไม่พบประวัติการเกิดดินถล่ม อาจเป็นไปได้ว่ามีเหตุการณ์ดินถล่มแต่ไม่รุนแรงและสร้างความเสียหายกับหมู่บ้านมากเท่ากับปี 1988 และ ปี 2011 จึงไม่มีการบันทึกเอาไว้ กับอีกข้อสันนิฐานหนึ่งคือ จากสังเกตพบว่าในปี 1988 และ 2011 ฝนตกต่อเนื่องเพียง 3 วัน สามารถทำให้ปริมาณน้ำฝนสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ในขณะที่ปีอื่นๆ ต้องใช้เวลาถึง 5 วันกว่าที่จะทำให้ปริมาณน้ำฝนสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณารูปแบบที่ 4.38 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลจากตารางที่ 4.9 มาสร้างกราฟแท่ง เพื่อให้เห็นภาพปีที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มได้ชัดเจนขึ้น รวมถึงต้องการแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 ของแต่ละปี ผู้วิจัยได้สร้างกราฟแท่งของเหตุการณ์ทั้งสาม โดยให้เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 (สีเขียว) อยู่ข้างหน้าสุด ในส่วนเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 (สีน้ำเงิน) อยู่ถัดเข้าไป และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด (สีแดง) อยู่หลังสุดพบว่าเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด

เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 และมากที่สุดอันดับ 3 ของแต่ละปี มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 526 279 และ 194 มิลลิเมตร ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าปีใดที่เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักแล้ว จะไม่เกิดซ้ำเป็นครั้งที่ 2 ในปีนั้น ในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์เหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอดีต ผู้วิจัยได้นำฝนในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆมารวบรวมเพื่อหาเหตุการณ์ที่ปริมาณฝนตกต่อเนื่องแล้วทำให้ปริมาณฝนสะสมเกินกว่า 600 มิลลิเมตรขึ้นไปเป็นเงื่อนไขหนึ่งของเหตุการณ์ฝนตกหนัก (อีกเงื่อนไข คือ ฝนตกต่อเนื่องกันภายใน 3 วัน แล้วได้ปริมาณฝนสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไป ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป) โดยผู้วิจัยได้รวบรวมเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 และมากที่สุดอันดับ 3 ของแต่ละปี แล้วนำเสนอด้วยกราฟดังรูปที่ 4.39 4.40 และ 4.41 (ข้อมูลที่เป็นตัวเลขถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข.) จากกราฟในรูปที่ 4.39 เป็นการรวบรวมเหตุการณ์ของฝนในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ค่าแฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบสัดส่วน ในช่วงปี 2013 ถึงปี 2090 โดยให้เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 (สีเขียว) อยู่ข้างหน้าสุด ในส่วนเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 (สีน้ำเงิน) อยู่ถัดเข้าไป และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด (สีแดง) อยู่หลังสุด พบว่ามีเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ทั้งสิ้น 22 ครั้ง โดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10

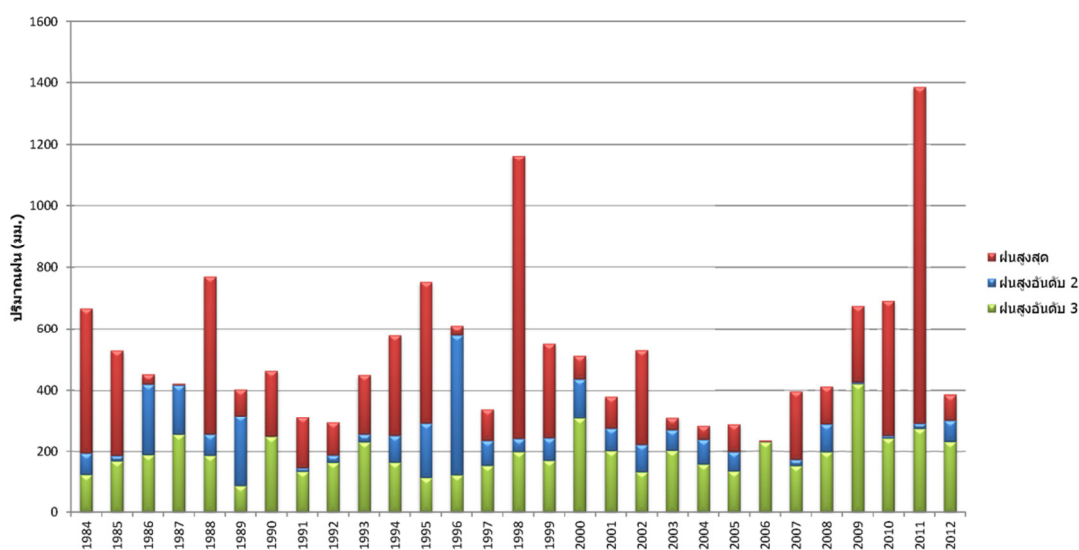
ในรูปที่ 4.40 เป็นการรวบรวมเหตุการณ์ของฝนในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ค่าแฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ ในช่วงปี 2013 ถึงปี 2090 โดยให้เหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 3 (สีเขียว) อยู่ข้างหน้าสุด ในส่วนเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุดอันดับ 2 (สีน้ำเงิน) อยู่ถัดเข้าไป และเหตุการณ์ที่ฝนตกมากที่สุด (สีแดง) อยู่หลังสุด พบว่ามีเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ทั้งสิ้น 18 ครั้ง โดยใช้ระยะเวลาแตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอดีต ที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
1984	5	666	9	195	5	125
1985	14	530	5	187	9	169
1986	6	453	7	421	15	189
1987	4	423	7	418	9	256
1988	5	769	6	256	8	187
1989	9	404	10	317	2	89
1990	10	464	6	249	11	248
1991	4	312	2	147	6	135
1992	4	295	4	188	3	164
1993	6	451	6	256	3	231
1994	8	579	4	252	6	165
1995	9	752	11	292	3	115
1996	10	611	10	579	5	124
1997	9	340	4	236	4	154
1998	19	1163	4	242	4	199
1999	4	552	10	244	5	171
2000	9	513	7	438	5	310
2001	12	381	9	276	8	203
2002	10	531	4	223	7	134
2003	4	310	4	271	2	203
2004	10	284	4	239	5	159
2005	10	287	6	199	6	136
2006	7	235	11	230	7	229
2007	5	396	6	174	6	154

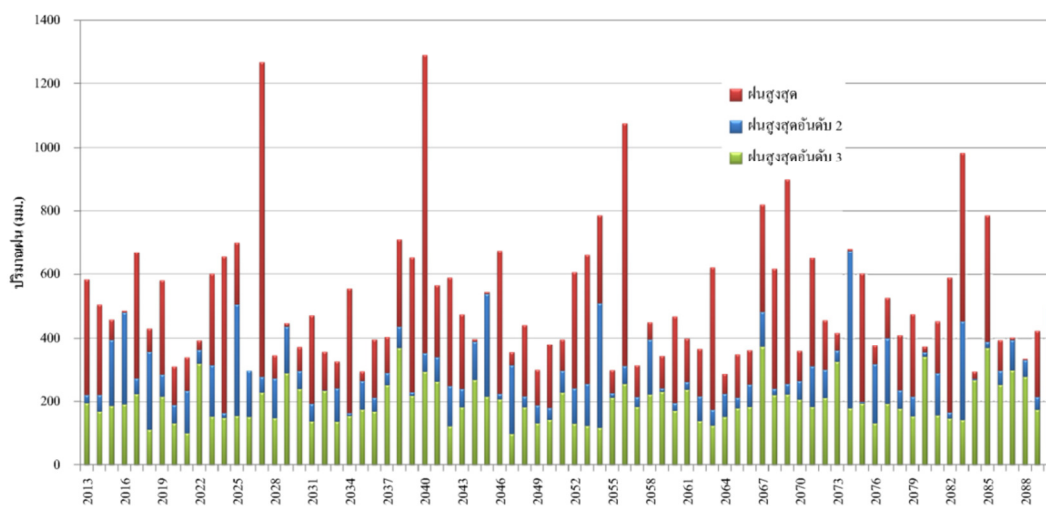
ตารางที่ 4.9(ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain)ในอดีต ที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2008	9	412	4	289	9	199
2009	12	674	8	427	8	422
2010	11	691	12	252	6	243
2011	11	1385	10	292	9	275
2012	3	387	9	301	4	232
ค่าเฉลี่ย		526		279		194



รูปที่ 4.38 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain)ในอดีต (ปี 1984 – 2012)

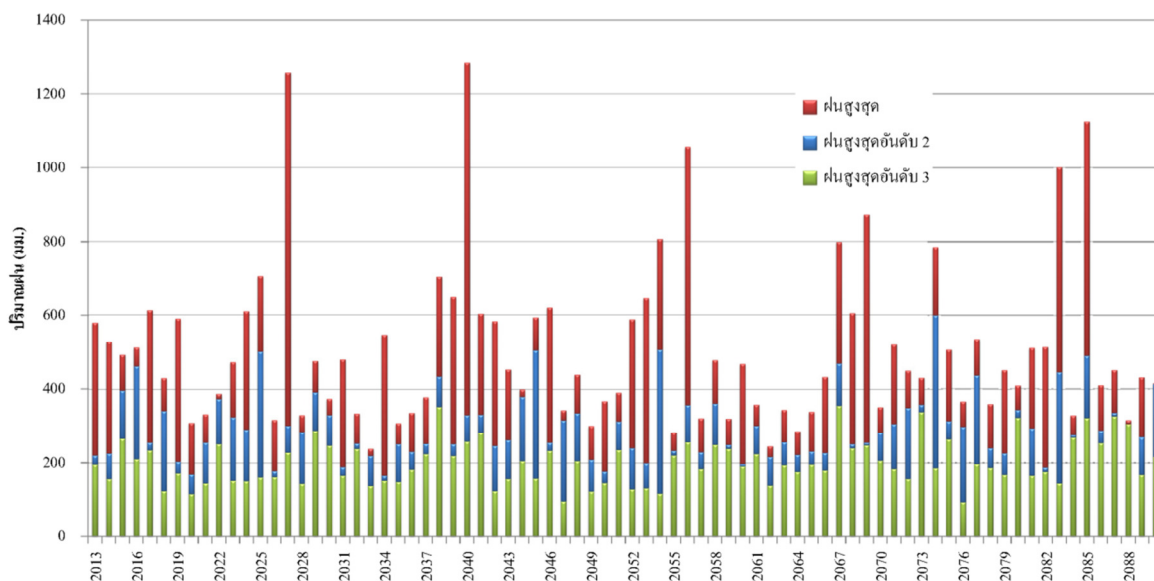
ที่ได้จากการตรวจวัดจริง ที่สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช



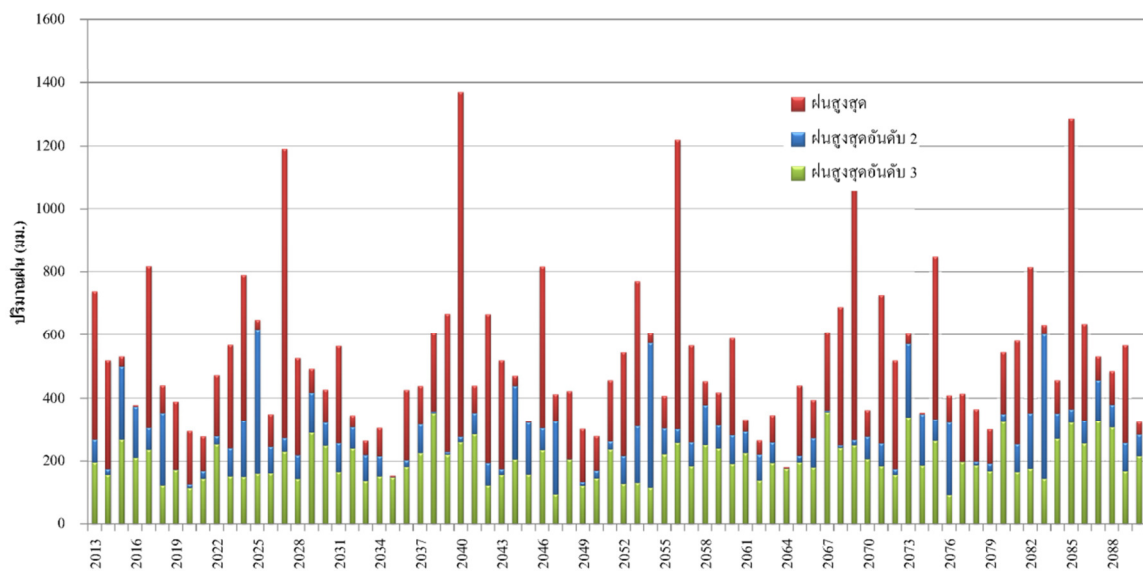
รูปที่ 4.39 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเดลต้าแพกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ตารางที่ 4.10 เหตุการณ์ในอนาคตที่ฝนตกติดต่อกันแล้วมีปริมาณฝนสะสมมากกว่า 600 มม. จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ต่ำ-แฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ปี	ฝนสูงสุด	
	ระยะเวลาที่ฝนตกติดต่อกัน	ปริมาณฝน
	(วัน)	(มิลลิเมตร)
2017	5	670
2023	17	601
2024	9	655
2025	10	701
2027	22	1270
2038	15	711
2039	12	652
2040	11	1293
2046	5	675
2052	17	606
2053	9	660
2054	10	786
2056	22	1076
2063	17	621
2067	17	820
2068	11	617
2069	11	898
2071	13	651
2074	4	681
2075	5	602
2083	10	984
2085	14	786



รูปที่ 4.40 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ต่ำแฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ



รูปที่ 4.41 กราฟเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ต่ำแฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน

ตารางที่ 4.11 เหตุการณ์ในอนาคตที่ฝนตกติดต่อกันแล้วมีปริมาณฝนสะสมมากกว่า 600 มม. จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ต่ำ-แฟกเตอร์และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ

ปี	ฝนสูงสุด	
	ระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่อง	ปริมาณฝน
	(วัน)	(มิลลิเมตร)
2017	5	613
2024	9	610
2025	10	705
2027	22	1258
2038	15	703
2039	11	649
2040	11	1287
2041	3	603
2046	5	620
2053	11	646
2054	12	807
2056	22	1058
2067	15	799
2068	11	605
2069	11	873
2074	4	785
2083	10	1001
2085	22	1126

ในขณะที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยพบว่าเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน กับแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน ได้ผลลัพธ์เท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะผู้วิจัยเลือกเพิ่มวันที่ฝนตก (ปริมาณฝนส่วนต่าง) เข้าไปในช่วงที่ไม่มีฝนของแต่ละเดือน จึงไม่ส่งผลใดๆต่อความต่อเนื่องในช่วงที่มีเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) เช่น เหตุการณ์ฝนตกหนักในอดีตเกิดขึ้นช่วงวันที่ 1 – 5 ของเดือน แต่ปริมาณฝนส่วนต่าง ถูกนำไปเพิ่มในวันที่ 15 20 และ 25 จึงไม่มีผลกับเหตุการณ์ฝนตกหนัก เป็นต้น เมื่อพิจารณากราฟเหตุการณ์ฝนตกหนักในรูปที่ 4.41 ปรากฏว่ามีเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ทั้งสิ้น 21 ครั้ง โดยใช้ระยะเวลาแตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

กราฟแท่งแสดงเหตุการณ์ฝนตกหนัก หรือพายุฝนในแต่ละปี จากรูปที่ 4.39 4.40 และ 4.41 แสดงให้ประจักษ์ว่าพายุฝนลูกใหญ่ในอนาคตจะมีแนวโน้มเกิดขึ้นปีละ 1 ครั้งหรือ 1 ลูกพายุ โดยที่ปีใดที่เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักแล้ว ก็จะไม่เกิดขึ้นอีก เช่น ปี 2027 2040 2056 2069 2083 2085 ในรูปที่ 4.40 เป็นต้น

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ฝนตกหนักในอดีตที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนอำเภอท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เทียบกับปริมาณฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตยังคงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงจากในอดีต กล่าวคือ ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักเฉลี่ยอยู่ที่ 3.5 – 3.7 ปีต่อครั้ง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 ยกเว้นฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ซึ่งมีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักเฉลี่ย เท่ากับ 4.3 ปีต่อครั้ง (รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 4.13) เหตุการณ์นี้อธิบายได้ว่า เพราะ เดลต้า แฟกเตอร์ (Delta factor) ที่นำไปเพิ่ม โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) มีทั้งค่าที่เป็นบวกและค่าที่เป็นลบ ดังนั้นเมื่อเมื่อนำค่าที่เป็นลบเพิ่มเข้าไป ก็จะทำให้ผลรวมของเหตุการณ์ฝนตกหนักมีปริมาณน้ำฝนลดลง (น้อยกว่า 600 มิลลิเมตร) ตัวอย่างเช่น ฝนในอนาคตของปี 2042 เกิดจากการนำปริมาณฝนส่วนต่าง (Delta) ไปบวกกับฝนในอดีตคือฝนของปี 1984 และเหตุการณ์ฝนตกหนักในอดีตเกิดขึ้นในเดือนพฤศจิกายน 1984 แต่ Delta factor ของเดือนพฤศจิกายนปี 2042 มีค่าเท่ากับ -12.2% (ดูตารางที่ 4.5 ประกอบ) เมื่อนำไปรวมกับฝนใน

ตารางที่ 4.12 เหตุการณ์ในอนาคตที่ฝนตกติดต่อกันแล้วมีปริมาณฝนสะสมมากกว่า 600 มม.

จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีเซลล์ค่าแฟกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน

ปี	ฝนสูงสุด	
	ระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่อง	ปริมาณฝน
	(วัน)	(มิลลิเมตร)
2013	5	666
2017	5	769
2024	9	752
2025	10	611
2027	19	1163
2038	12	674
2039	11	691
2040	11	1385
2042	5	666
2046	5	769
2053	9	752
2054	10	611
2056	19	1163
2067	12	674
2068	11	691
2069	11	1385
2071	5	666
2075	5	769
2082	9	752
2083	10	611
2085	19	1163

เดือนพฤศจิกายน 1984 จึงทำให้เหตุการณ์ฝนตกหนักในอดีต ที่มีปริมาณฝนสะสม 666 มิลลิเมตร เหลือเพียง 583 มิลลิเมตร (ลดลงไปประมาณ 12%)

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) โดยพิจารณา แต่ปริมาณฝน (ไม่คำนวณถึงระยะเวลาที่ฝนตก)

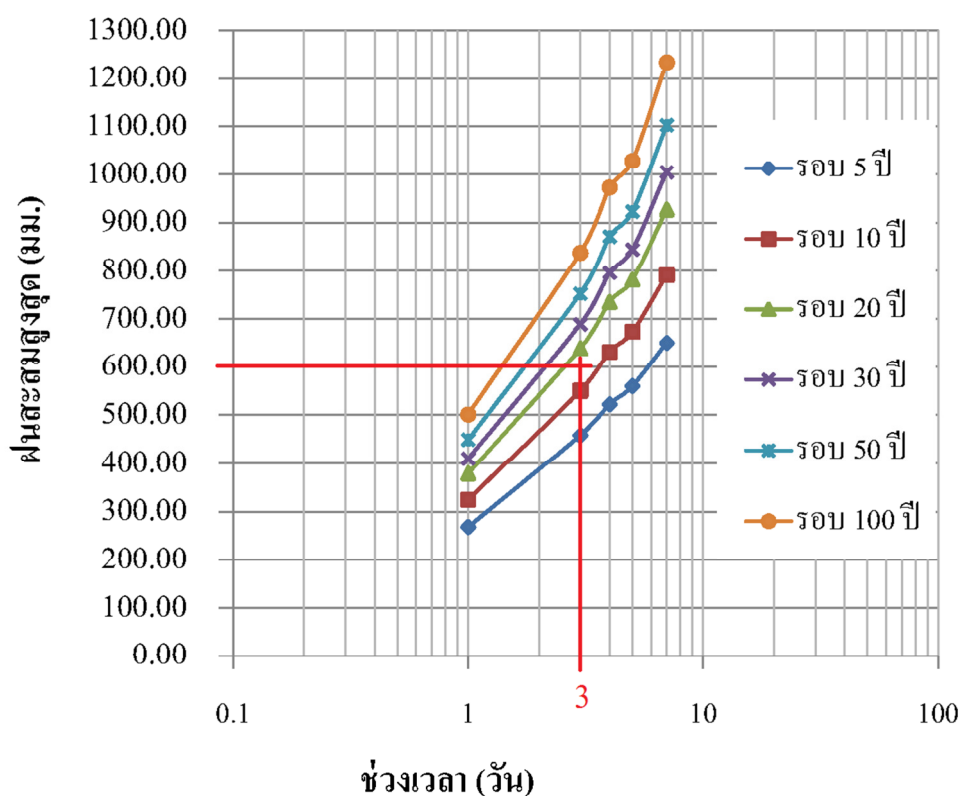
ข้อมูลจาก	เหตุการณ์ฝนตกหนัก พิจารณาเฉพาะที่ ปริมาณฝนตกสะสมมากกว่า 600 มม.	ความถี่ของการเกิด เหตุการณ์เฉลี่ย (ปี/ครั้ง) *
สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา ช่วงปี 1984-2012	8 ครั้ง ใน 29 ปี	3.63
แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบสัดส่วน	22 ครั้ง ใน 78 ปี	3.55
แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ	18 ครั้ง ใน 78 ปี	4.33
แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน	21 ครั้ง ใน 78 ปี	3.71
แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน	21 ครั้ง ใน 78 ปี	3.71

หมายเหตุ * คำนวณจากจำนวนปีหารด้วยจำนวนครั้ง เช่น $78/21 = 3.71$

ในประเด็นเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่พิจารณาแต่เงื่อนไขปริมาณฝนเพียง เงื่อนไขเดียว ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ปรากฏว่าไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงหรือนัยสำคัญใด บ่งบอกว่าในอนาคต จะมีความถี่มากขึ้น แต่งานวิจัยอื่นๆ เช่น แสงจันทร์และคณะ(2552) ได้

พิจารณาค่านี้ไว้ด้วยเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของฝน ปรากฏว่าในอนาคตพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราช มีระดับความรุนแรงของฝนมากขึ้นและปริมาณฝนมากกว่าปกติ

เมื่อพิจารณารอบปีการเกิดซ้ำ (Return period) ของเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ในอดีตจากการตรวจวัดจริงของสถานีตรวจวัดน้ำฝน อำเภอท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ของ Gumbel ในการคำนวณหาฝนสะสมสูงสุดในแต่ละรอบปีการเกิดซ้ำก็จะได้กราฟดังรูปที่ 4.42 และตรวจนับเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ โดยกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณาดังนี้ คือ ฝนตกต่อเนื่องในเวลา 3 และ 4 วันแล้วได้ปริมาณฝนสะสม 600 มิลลิเมตรขึ้นไป แล้วคำนวณหารอบปีการเกิดซ้ำโดยเฉลี่ย ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฝนสะสมสูงสุดจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก จำนวนวันที่ฝนตกและรอบปีการเกิดซ้ำ ที่วิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธีของ Gumbel โดยใช้ข้อมูลฝนจากการตรวจวัดจริงของ สถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช

ตารางที่ 4.14 เหตุการณ์ฝนตกหนัก ในช่วงระยะเวลาตกต่อเนื่อง 3 และ 4 วัน แล้วทำให้ได้
ฝนตกสะสมเกิน 600 มิลลิเมตรขึ้นไปจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก
ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการปรับแก้ ความคลาดเคลื่อน	แบบสัดส่วน		แบบเพิ่มโอกาสพายุ		แบบเพิ่มวันที่ฝนตก เดือนละ 1 และ 3 วัน	
	ฝนตกต่อเนื่อง 3 วัน	4 วัน	3 วัน	4 วัน	3 วัน	4 วัน
ปีที่เกิดเหตุการณ์	2040, 2074	2017, 2040, 2046, 2074	2040, 2041, 2074	2040, 2041, 2074	2013, 2017, 2040, 2042, 2046, 2069, 2071, 2075	2013, 2017, 2040, 2042, 2046, 2069, 2071, 2075
จำนวนเหตุการณ์ (ครั้ง)	2	4	3	3	8	8
รอบปีการเกิดซ้ำ โดยเฉลี่ย (ปี)	34	25	33	33	6	6

เมื่อนำรอบปีการเกิดซ้ำที่คำนวณมาจากฝนในอดีต (รูปที่ 4.42) เทียบกับข้อมูลฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ (ตารางที่ 4.14) ปรากฏว่า เหตุการณ์ฝนตกหนักภายใต้เงื่อนไขฝนตกต่อเนื่องในเวลา 3 วันแล้วได้ปริมาณฝนสะสม 600 มิลลิเมตรขึ้นไปจะเกิดขึ้นในรอบปีการเกิดซ้ำที่ 15 ปีโดยประมาณ ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.42 แต่จากตารางที่ 4.14 ปรากฏว่า ฝนตกต่อเนื่องในเวลา 3 วันแล้วได้ปริมาณฝนสะสม 600 มิลลิเมตรขึ้นไป จะเกิดขึ้นในทุก 30 ปี คือปี 2040 (หรือ 2041) และ 2074 โดยจะเกิดขึ้นกับการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบสัดส่วนและแบบเพิ่มโอกาสพายุ ส่วนการปรับแก้ความ

คลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน ปรากฏรอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ยทุกๆ 6 ปี จึงสรุปผลการเปรียบเทียบด้วยการพิจารณารอบปีการเกิดซ้ำได้ ดังนี้

1. รอบปีการเกิดซ้ำของเหตุการณ์ฝนตกหนัก ที่ได้จากการนับเหตุการณ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบสัดส่วนและแบบเพิ่มโอกาสพายุ จะมีความถี่การเกิดซ้ำยาวนานขึ้นกว่าการคำนวณจากข้อมูลฝนตรวจวัดจริงในอดีตประมาณ 2 เท่า คือ 30 ปี และ 15 ปี ตามลำดับ

2. รอบปีการเกิดซ้ำของเหตุการณ์ฝนตกหนัก ที่ได้จากการนับเหตุการณ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน จะมีความถี่การเกิดซ้ำสั้นลงกว่าการคำนวณจากข้อมูลฝนตรวจวัดจริงในอดีตประมาณ 2.5 เท่า คือ 6 ปี และ 15 ปี ตามลำดับ

3. การนับเหตุการณ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลก มีค่าไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับแบบจำลองสภาพภูมิอากาศและวิธีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน

ในทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณารอบปีการเกิดซ้ำ โดยพิจารณาแต่เฉพาะปริมาณฝนสูงสุด โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง จะได้ค่าดังตารางที่ 4.15 จากตารางปรากฏว่าที่รอบปีการเกิดซ้ำเดียวกัน ปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบสัดส่วน (PP) และแบบเพิ่มโอกาสพายุ (ES) มีค่าน้อยกว่าปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนตรวจวัดจริงในอดีต (OBS) และที่รอบปีการเกิดซ้ำเดียวกัน ปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบสัดส่วน (PP) ให้ค่าปริมาณฝนสูงสุดน้อยกว่าแบบเพิ่มโอกาสพายุ (ES) ในขณะที่ปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (ADD1) และแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (ADD3) มีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนตรวจวัดจริงในอดีต (OBS) ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ให้ได้ว่า $OBS = ADD1 = ADD3 > ES > PP$

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสมสูงสุด (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง) และรอบปีการเกิดซ้ำ เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เปรียบเทียบกับการคำนวณจากข้อมูลฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ด้วยวิธีการต่างๆ

รอบปีการเกิดซ้ำที่	ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในแต่ละรอบปีการเกิดซ้ำ จากข้อมูลต่างๆ				
	OBS.	PP	ES	ADD1	ADD3
5	744.10	680.20	693.08	744.10	744.10
10	913.93	811.18	840.57	913.93	913.93
20	1076.83	936.82	982.04	1076.83	1076.83
30	1170.54	1009.09	1063.42	1170.54	1170.54
50	1287.69	1099.44	1165.15	1287.69	1287.69
100	1445.70	1221.31	1302.37	1445.70	1445.70

หมายเหตุ : OBS	คือ การตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
PP	คือ ฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้แบบสัดส่วน
ES	คือ ฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้แบบเพิ่มโอกาสพายุ
ADD1	คือ ฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้แบบเพิ่มวันฝนตกเดือนละ 1 วัน
ADD3	คือ ฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้แบบเพิ่มวันฝนตกเดือนละ 3 วัน

สาเหตุที่ในรอบปีเดียวกันมีปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วันและแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (มีค่าเท่ากับและมีค่าเท่ากับปริมาณฝนสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลฝนตรวจวัดจริงในอดีต (OBS = ADD1 = ADD3) ผู้วิจัยได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้วว่าที่เป็นเช่นนี้เพราะผู้วิจัยเลือกเพิ่มวันที่ฝนตก (ปริมาณฝนส่วนต่าง) เข้าไปในช่วงที่ไม่มีฝนของแต่ละเดือน จึงไม่ส่งผลใดๆต่อความต่อเนื่องในช่วงที่มีเหตุการณ์ฝนตกหนัก ดังนั้นปริมาณฝนสูงสุดของเหตุการณ์ฝนตกหนักที่ได้จึงเป็นค่าเดียวกับค่าฝนสูงสุดในอดีต

ประเด็นถัดมาที่จะกล่าวถึงคือสาเหตุที่ทำให้ในรอบปีการเกิดซ้ำเดียวกันมีค่าฝนสูงสุดของ $OBS > ES > PP$ เพราะปริมาณฝนสูงสุดในเหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศทั้ง ES และ PP มีค่าน้อยกว่าปริมาณฝนสูงสุดในเหตุการณ์ฝนตกหนักที่ได้จากการตรวจวัดจริง (OBS) เช่น ปี 1988 ปริมาณฝนสูงสุดในเหตุการณ์ฝนตกหนักที่ได้จากการตรวจวัดจริง เท่ากับ 769 มิลลิเมตร และในปี 2017 (ใช้ข้อมูลฝนปี 1988 มาทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน) ให้ปริมาณฝนสูงสุดทั้งแบบ ES และ PP เท่ากับ 613 และ 670 มิลลิเมตรตามลำดับรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ข.

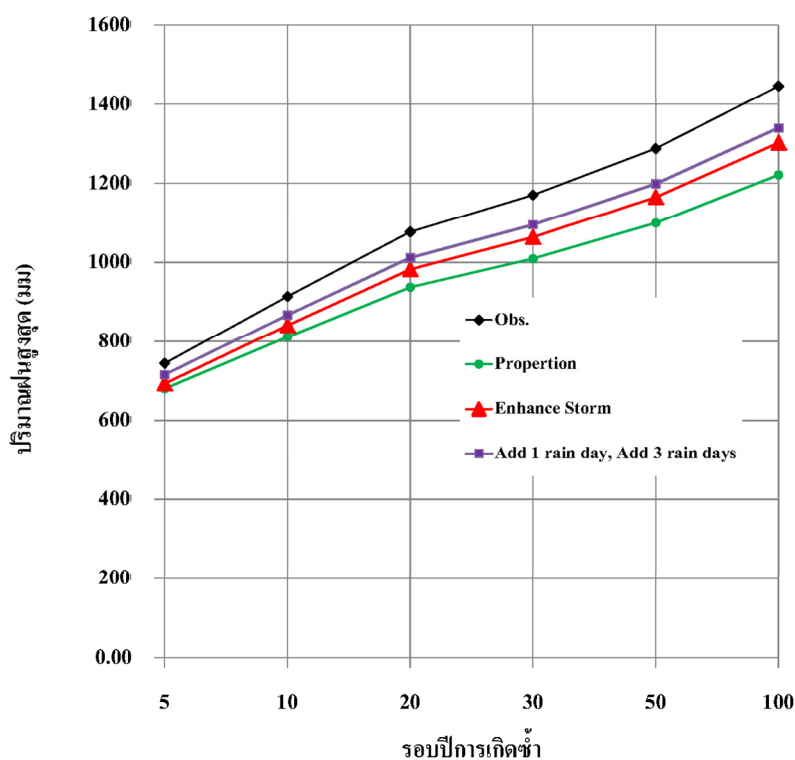
ส่วนประเด็นที่คิดว่าสาเหตุที่ทำให้ในรอบปีการเกิดซ้ำเดียวกันมีค่าฝนสูงสุดของ $OBS > ES > PP$ เพราะข้อมูลฝนจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน อำเภอท่าเสา จ. นครศรีธรรมราช มีเพียง 29 ปี ในขณะที่ข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ทั้งแบบ ES และ PP มีข้อมูลมากกว่า คือ 78 ปี และจะทำให้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณและวิเคราะห์โดยแบ่งการคำนวณเป็น 3 ช่วงเวลาๆละ 29 ปี และได้ผลดังตารางที่ 4.16 ปรากฏว่าที่รอบปีเกิดซ้ำเดียวกันของอนาคตอันใกล้ (ph1) ค่าปริมาณฝนสูงสุดของแต่ละวิธีเป็นดังนี้ $OBS = ADD1\&3(ph1) > PP(ph1) > ES(ph1)$ สำหรับอนาคตช่วงกลาง (ph2) ค่าปริมาณฝนสูงสุดของแต่ละวิธีเป็นดังนี้ $ADD1\&3(ph2) > PP(ph2) > ES(ph2)$ แต่สำหรับอนาคตอันไกล (ph3) ปรากฏว่า $ADD1\&3(ph3) > ES(ph3) > PP(ph3)$ เมื่อพิจารณาค่าปริมาณฝนสูงสุดของแต่ละวิธีเปรียบเทียบกันทั้ง 3 ช่วงเวลา ปรากฏว่า ที่รอบปีการเกิดซ้ำเดียวกัน ปรากฏว่า $PP(ph1) > PP(ph2) > PP(ph3)$ แต่ $ES(ph1) > PP(ph3) > ES(ph2)$ และ $ADD1\&3(ph1) = ADD1\&3(ph2) = ADD1\&3(ph3)$

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสมสูงสุด (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง) และรอบปีการเกิดซ้ำ เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เปรียบเทียบกับการคำนวณจากข้อมูลฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ด้วยวิธีการต่างๆ โดยแบ่งพิจารณาเป็นช่วงเวลา

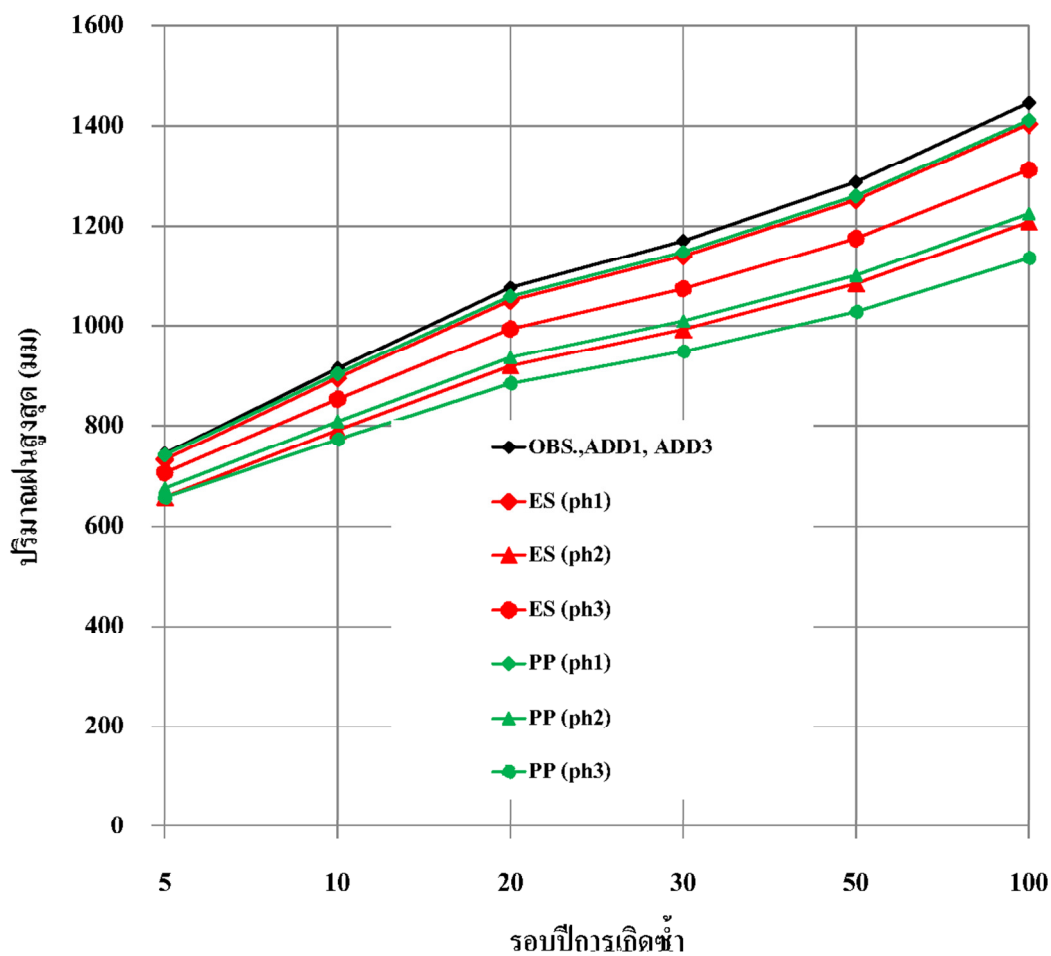
รอบปีการเกิดซ้ำ (ปี)	OBS. (1984-2012)	อนาคตอันใกล้ (2013-2041)		
		PP	ES	ADD1&ADD3
5	744.1	741.5	732.4	744.1
10	913.9	903.5	894.8	913.9
20	1076.8	1058.9	1050.6	1076.8
30	1170.5	1148.3	1140.2	1170.5
50	1287.7	1260.0	1252.3	1287.7
100	1445.7	1410.7	1403.4	1445.7
		อนาคตช่วงกลาง (2042-2070)		
		PP	ES	ADD1&ADD3
5	-	675.4	657.7	744.1
10	-	808.4	791.1	913.9
20	-	936.0	919.0	1076.8
30	-	1009.4	992.6	1170.5
50	-	1101.1	1084.5	1287.7
100	-	1224.9	1208.6	1445.7
		อนาคตอันไกล (2071-2090)		
		PP	ES	ADD1&ADD3
5	-	656.8	706.2	744.1
10	-	772.8	852.8	913.9
20	-	884.0	993.5	1076.8
30	-	948.0	1074.4	1170.5
50	-	1028.0	1175.5	1287.7
100	-	1135.9	1311.9	1445.7

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาข้างต้น จึงสรุปว่าไม่มีนัยสำคัญใดบ่งชี้ว่าจำนวนปีของข้อมูล มีผลต่อการคำนวณหารอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) และกรณีนี้จำนวนปีของข้อมูลมีผลน้อยกว่าปริมาณน้ำฝนในเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain)

ข้อมูลจากตารางที่ 4.15 และ 4.16 ถูกนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสูงสุด (เหตุการณ์ฝนตกหนัก) และรอบปีการเกิดซ้ำ (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง) เพื่อให้เห็นแนวโน้มและการเปรียบเทียบชัดเจนขึ้น ดังรูปที่ 4.43 และ 4.44



รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสูงสุด(เหตุการณ์ฝนตกหนัก)และรอบปีการเกิดซ้ำ (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกสะสม) เมื่อคำนวณจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เทียบกับขนาดที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ (OBS. คือ การวัดจริงจากสถานีวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช)



รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสูงสุดและรอบปีการเกิดน้ำ (โดยไม่คำนึงถึงจำนวนวันที่ฝนตกสะสม) เมื่อคำนวณจากการข้อมูลฝนที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช เทียบกับอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ โดยแบ่งพิจารณาเป็นช่วงเวลา

4.3.2 ผลการประเมินเหตุการณ์ดินถล่มเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพ ภูมิอากาศ

ในการประเมินเหตุการณ์ดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสามารถพิจารณาได้หลากหลายแนวทาง สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้ 2 แนวทาง คือ แนวทางแรกโดยการพิจารณาเงื่อนไขต่างๆจากเหตุการณ์ดินถล่มในอดีต (เหตุการณ์ลาดดินถล่ม ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเกิดขึ้นช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011) ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนสะสมที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม และระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่องจนเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม แล้วนำทั้งสองเงื่อนไขไปตรวจสอบกับฝนในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศเพื่อดูว่ามีเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นกี่ครั้ง แนวทางที่สอง โดยการนำน้ำฝนรายวันจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตไปเป็นข้อมูลนำเข้า (Input) ให้กับแบบจำลองลาดดิน และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย แล้วนับจำนวนเหตุการณ์ที่ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่า 1.0

4.3.2.1 แนวทางการกำหนดเงื่อนไขจากเหตุการณ์ลาดดินถล่มในอดีตไปตรวจสอบกับฝน ในอนาคตที่ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ

ผลการพิจารณาเงื่อนไขจากเหตุการณ์ลาดดินถล่มที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช เกิดขึ้นช่วงปลายเดือนมีนาคม 2011 โดยการคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis) ดังที่อภิปรายรายละเอียดไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.1 จึงสรุปว่าเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มที่บริเวณ เทือกเขาหลวง จ.นครศรีธรรมราช ที่ดินมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแบบเดียวกับลาดดินของ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จ.นครศรีธรรมราช คือ ฝนตกต่อเนื่องติดต่อกัน 3 ถึง 4 วัน และปริมาณน้ำฝนสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยถือว่าเงื่อนไขนี้เป็นเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) และทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม

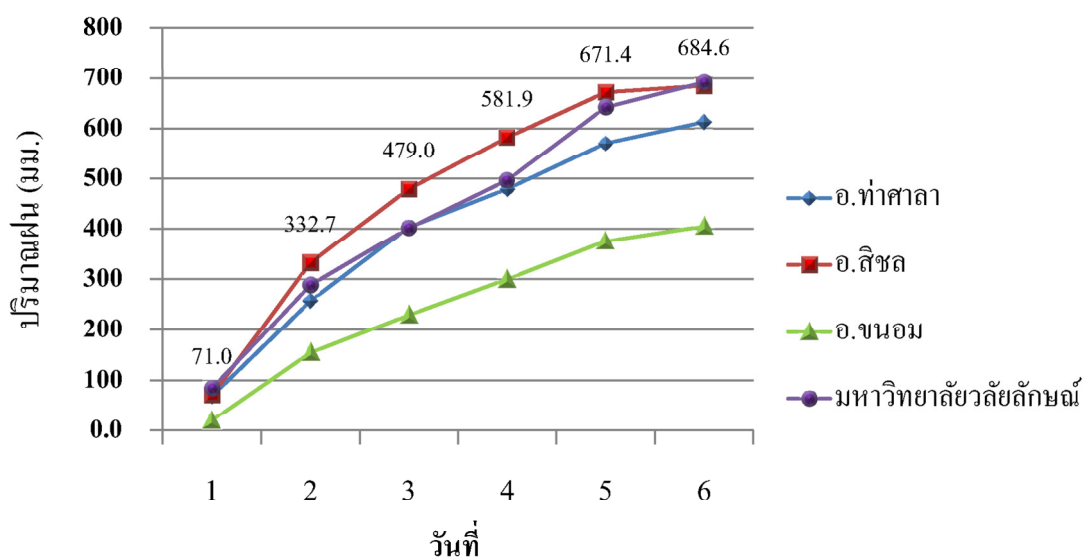
ผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการต่างๆ มาวิเคราะห์หาเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) และสรุปมาเป็นตารางดังที่แสดงในตารางที่ 4.14 และจากตารางดังกล่าวพบว่า

- 1.) แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบสัดส่วน (PP) ให้เหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคต 2-4 ครั้ง และให้รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย 30 ปี
- 2.) แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (ES) ให้เหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคต 3 ครั้ง และให้รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย 30 ปี
- 3.) แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (ADD1) ให้เหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคต 8 ครั้ง และให้รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย 6 ปี
- 4.) แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (ADD3) ให้เหตุการณ์ฝนตกหนักในอนาคต 8 ครั้ง และให้รอบปีการเกิดซ้ำเฉลี่ย 6 ปี
- 5.) ปี 2040 เป็นปีเดียวที่พบเหตุการณ์ฝนตกหนักในแบบจำลองสภาพภูมิอากาศทั้ง 4 แบบ

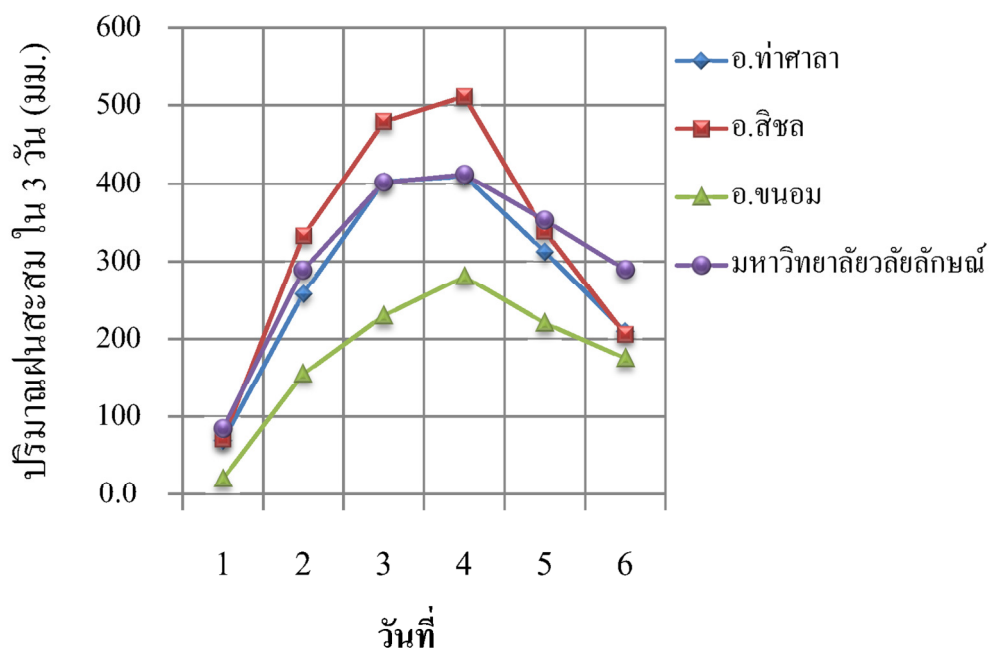
เพื่อเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของเงื่อนไขการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม ผู้วิจัยได้ตรวจสอบกับเหตุการณ์ฝนตกในจ.นครศรีธรรมราช ช่วงเดือนธันวาคม 2016 ถึงวันที่ 10 มกราคม 2017 โดยในระหว่างวันที่ 1 ถึง 6 ธันวาคม 2016 เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักและต่อเนื่องในภาคใต้ ผู้วิจัยได้ข้อมูลการตรวจวัดน้ำฝนของสถานีวัดน้ำฝน อำเภอสิชล อำเภอท่าศาลา อำเภอนอม และม.วลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา และได้ นำข้อมูลฝนมาวิเคราะห์หาฝนตกสะสมในช่วง 6 วัน ดังกราฟรูปที่ 4.45 พบว่ามีฝนตกสะสมเกิน 600 มิลลิเมตร แต่ไม่มีเหตุการณ์ดินถล่มเกิดขึ้นที่ ตำบลเทพราช และลาดดินของเขาลวง จ.นครศรีธรรมราช และจากกราฟรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 3-4 วันที่ฝนตกติดต่อกัน มีปริมาณฝนมากที่สุดเพียง 581 มิลลิเมตร และอีกครั้งคือช่วงระหว่างวันที่ 1 ถึง 10 มกราคม 2017 เกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักและต่อเนื่องในภาคใต้ ผู้วิจัยได้ข้อมูลการตรวจวัดน้ำฝนของสถานีวัดน้ำฝน อำเภอสิชล อำเภอท่าศาลา อำเภอนอม และม.วลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช จากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา และได้ นำข้อมูลฝนมาวิเคราะห์หาฝนตกสะสมในช่วง 10 วัน ดังกราฟรูปที่ 4.47 พบว่ามีฝนตกสะสมเกิน 600 มิลลิเมตร แต่ไม่มีเหตุการณ์ดินถล่ม

เกิดขึ้นที่ ตำบลเทพราช และลาดคินของเขาลวง จ.นครศรีธรรมราชเช่นกัน โดยที่กราฟรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 3-4 วันที่ฝนตกสะสมติดต่อกัน มีปริมาณฝนมากที่สุดเพียง 579 มิลลิเมตร

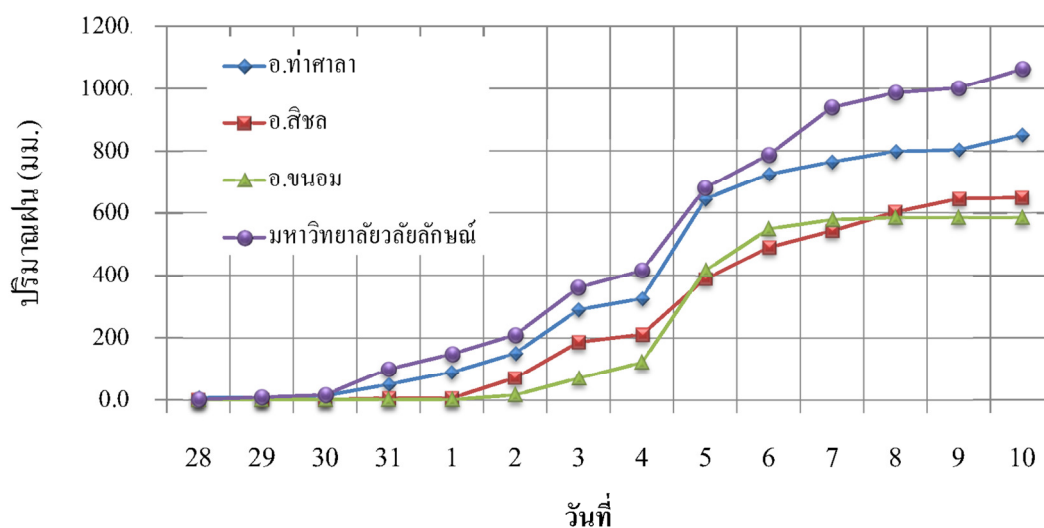
เหตุการณ์ทั้งสองครั้งอธิบายได้ว่าสาเหตุที่ไม่เกิดเหตุการณ์ลาดคินถล่มเพราะมีอีกเงื่อนไขหนึ่งของเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ยังไม่เกิดขึ้น นั่นคือช่วงเวลา 3-4 วัน โดยเงื่อนไขของเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ผู้วิจัยกำหนด จะต้องเกิดเหตุการณ์ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 3-4 วัน ถึงจะเกิดเหตุการณ์ดินถล่ม ดังนั้นจากเหตุการณ์ทั้งสองนี้จึงเป็นการพิสูจน์ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้ระดับหนึ่ง



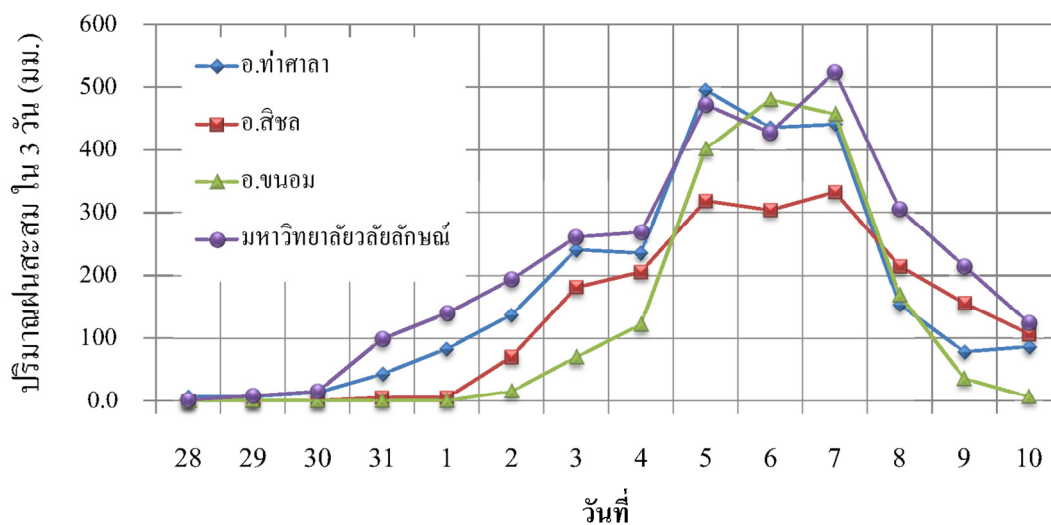
รูปที่ 4.45 ปริมาณฝนตกสะสมของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 1 – 6 ธันวาคม 2016



รูปที่ 4.46 ปริมาณฝนตกสะสม 3 วัน ของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 1 – 6 ธันวาคม 2016



รูปที่ 4.47 ปริมาณฝนตกสะสมของ 4 สถานีวัดน้ำฝน ช่วงวันที่ 28 ธันวาคม 2559 ถึง วันที่ 10 มกราคม 2017



รูปที่ 4.48 ปริมาณฝนตกสะสม 3 วัน ของ 3 สถานีวัดน้ำฝนช่วงวันที่ 28 ธันวาคม 2559 ถึง 10 มกราคม 2017

4.3.2.2 แนวทางการนำฝนรายชั่วโมงจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตไปเป็นข้อมูลนำเข้าให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

แนวทางนี้จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรและความสามารถของคอมพิวเตอร์มาก เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีมหาศาลทำให้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ไม่สามารถทำให้สำเร็จได้ กล่าวคือผู้วิจัยได้นำข้อมูลฝนรายชั่วโมงเป็นข้อมูลนำเข้า (Input) ให้กับโปรแกรม SEEP/W ทำการคำนวณพบว่าเมื่อโปรแกรมคำนวณไปได้ถึงประมาณชั่วโมงที่ 1000 โปรแกรม SEEP/W จะหยุดทำงานกับอีกกรณีหนึ่งถ้าผู้วิจัยกำหนดให้โปรแกรมคำนวณด้วยความละเอียดสูง พบว่าต้องใช้เวลาในการคำนวณหลายชั่วโมง และหลายครั้งพบว่าโปรแกรมหยุดทำงานไปเอง จากปัญหาที่อธิบายมานี้จึงทำให้ผู้วิจัยหาวิธีการแก้ปัญหา (เพื่อจะแสดงให้เห็นว่าถ้ามีความพร้อมในทุกด้าน สามารถใช้แนวทางนี้ในการประเมินได้) โดยการสรรหาตัวแทนของข้อมูลน้ำฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตไปใช้ โดยผู้วิจัยใช้หลักในการเลือกข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ดังนี้

- 1.) เลือกมาจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่มีความรุนแรงสูงสุด
- 2.) ต้องเป็นช่วงที่เกิดมักจะมีมรสุมเป็นประจำ เช่น ฤดูฝน
- 3.) ต้องเป็นเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 3-4 วัน

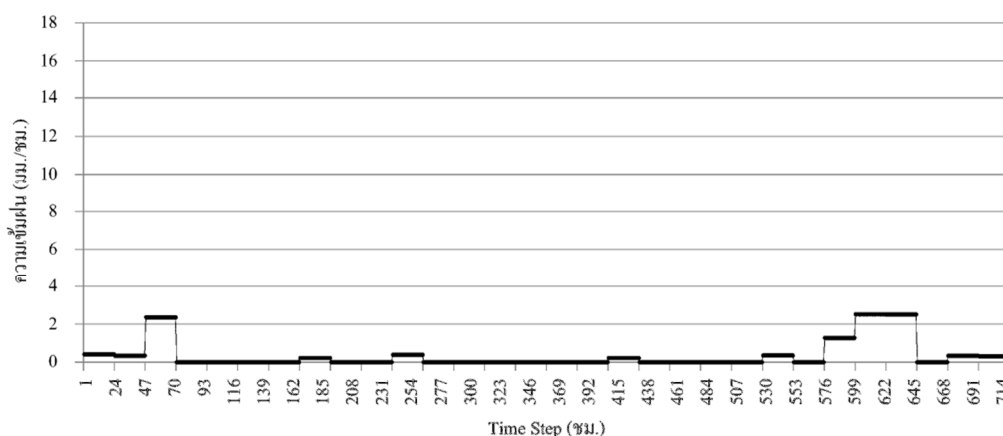
จากหลักทั้งสามข้อข้างต้น ผู้วิจัยได้พิจารณาแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้ว 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm, ES) และแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน แบบสัดส่วน (Proportion, PP) ส่วนสาเหตุที่ไม่เลือกแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน (ADD1 และ ADD3) เพราะปริมาณฝนสูงสุดของเหตุการณ์ฝนตกหนักที่ได้จากแบบจำลองแบบ ADD1 และ ADD3 เป็นค่าเดียวกับค่าฝนสูงสุดในอดีตตั้งที่อธิบายไปแล้วข้างต้น

ผลจากการพิจารณาแบบจำลองสภาพภูมิอากาศพบว่าแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (ES) ให้ค่าปริมาณฝนสูงกว่าแบบสัดส่วน (PP) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ประเด็นต่อมาที่พิจารณาคือ จะเลือกปีใดจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ มาเป็นตัวแทนในการคำนวณ ดังนั้นผู้วิจัยกลับมาพิจารณาเหตุการณ์ที่ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 3-4 วัน จากตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.14 พบว่ามี 3 ปีที่ให้ค่าปริมาณน้ำฝนสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 3-4 วัน คือ ปี 2040 2041 และ 2074 โดยให้ปริมาณฝนสูงสุด 1287 603 และ 785 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้เลือกปี 2074 เป็นตัวแทนของฝนในอนาคต เพราะเป็นปีที่มีเหตุการณ์ฝนตกสะสมมากกว่า 600 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 3-4 วัน อยู่ในช่วงที่มีมรสุมในเขตพื้นที่ศึกษา คือ ช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม ส่วนปี 2040 และ 2041 เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดในฤดูแล้ง ซึ่งโอกาสเกิดขึ้นได้ไม่มาก

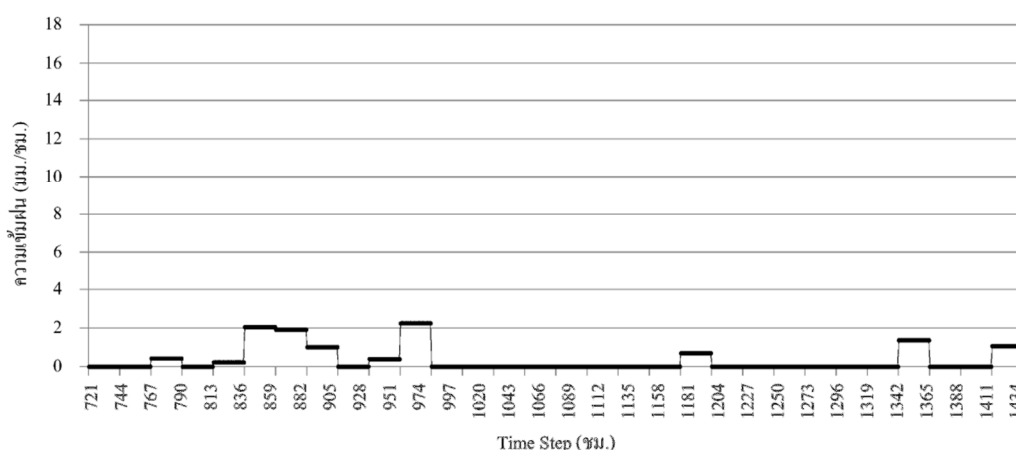
ขั้นตอนถัดมาคือการนำฝนช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม ปี 2074 ไปเป็นข้อมูลนำเข้า (Input) โดยทำการจำลองตามขั้นตอนเดิมในหัวข้อ 4.2.2 และแยกการวิเคราะห์เป็นรายเดือน เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ได้อธิบายแล้ว สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนคือ นำฝนรายวันจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศของเดือนตุลาคม-ธันวาคม ปี 2074 มาทำให้เป็นฝนรายชั่วโมงโดยการหารด้วย 24 ก็จะได้รับความเข้มฝนรายชั่วโมงของแต่ละเดือน จากนั้นนำความ

เข้มนรายช่วโมงนี้ไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับทำการวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในมวลดินและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W ต่อไป

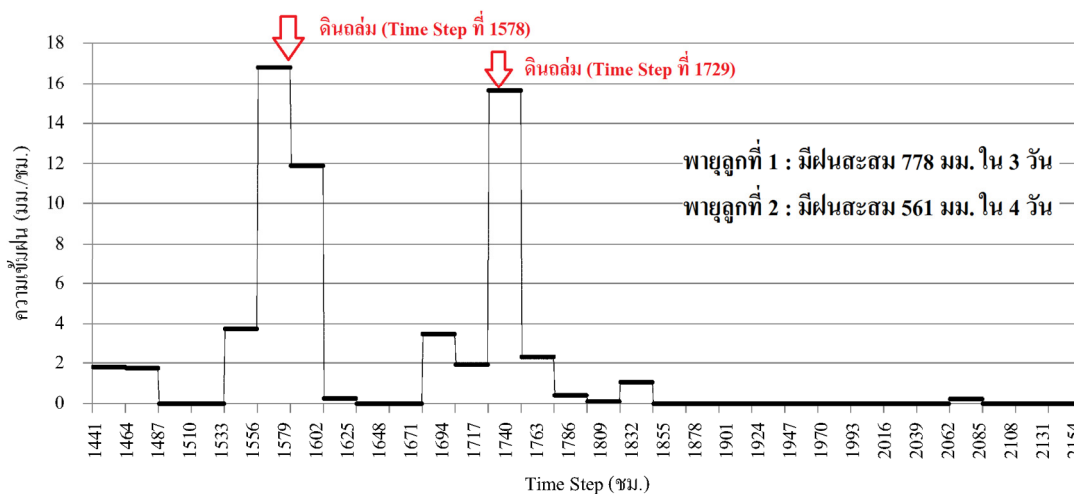
ผู้วิจัยได้นำความเข้มนรายช่วโมง (หน่วย : มิลลิเมตรต่อช่วโมง) มาเขียนกราฟ เพื่อให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฝนในเดือนทั้งสาม (ตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม) ของปี 2074 และใส่ Time Step ที่เกิดเหตุการณ์ดินถล่มลงไปในกราฟด้วย ดังรูปที่ 4.51 และจากกราฟดังกล่าว พบว่า ในเดือนธันวาคม 2074 มีพายุฝน 2 ลูก โดยลูกแรกเข้าในช่วงวันที่ 5, 6 และ 7 ของเดือน ลูกที่สองเข้าช่วงวันที่ 11, 12, 13 และ 14 ของเดือน



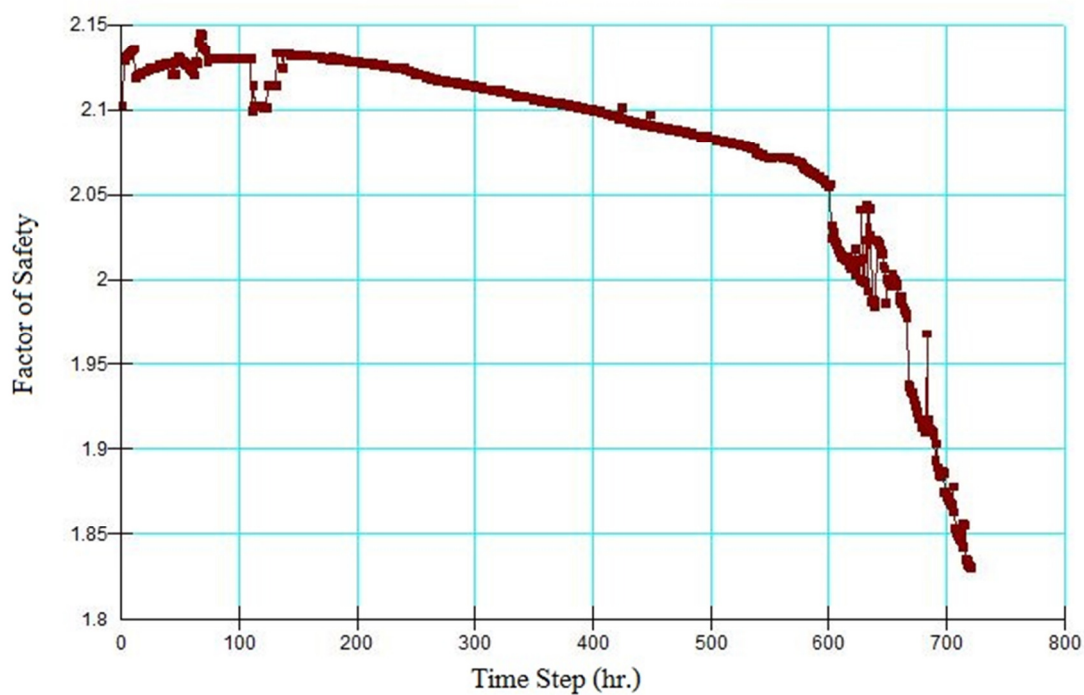
รูปที่ 4.49 ความเข้มนของเดือนตุลาคม 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES



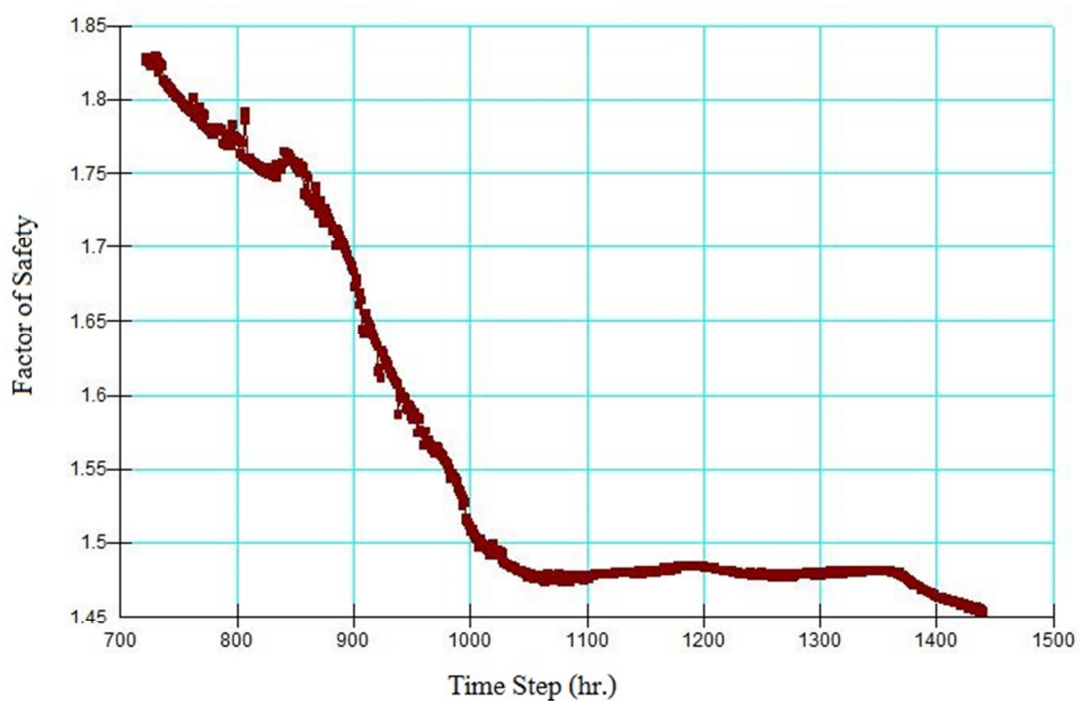
รูปที่ 4.50 ความเข้มนของเดือนพฤศจิกายน 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES



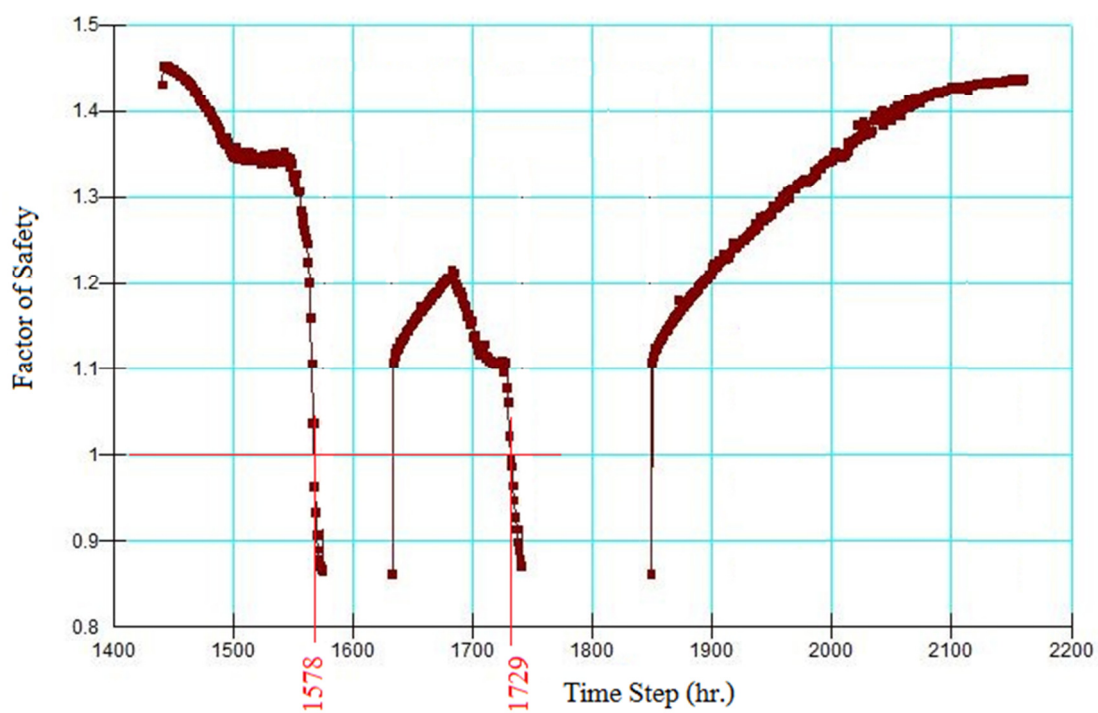
รูปที่ 4.51 ความเข้มฝนของเดือนธันวาคม 2074 ได้จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศแบบ ES



รูปที่ 4.52 ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนตุลาคม 2074



รูปที่ 4.53 ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนพฤศจิกายน 2074



รูปที่ 4.54 ค่าความปลอดภัยในแต่ละชั่วโมงของเดือนธันวาคม 2074

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน ทำให้ได้ผลลัพธ์มาเป็นค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ในแต่ละชั่วโมง (Time Step) โดยแสดงมาในรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.52 4.53 และ 4.54 เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.49 ถึง 4.54 จะพบว่า ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) แปรผกผันไปกับปริมาณฝนที่ตก กล่าวคือถ้าฝนตกมาก ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยก็จะลดลงและเมื่อฝนหยุดตก กราฟของอัตราส่วนความปลอดภัยก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.51 จะพบว่าฝนเริ่มตกหนัก ตั้งแต่ Time step ที่ 1533 เป็นต้นไป และเมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟในรูปที่ 4.54 พบว่ากราฟของอัตราส่วนความปลอดภัยก็เริ่มลดต่ำลงตั้งแต่ Time step ที่ 1533 ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่กราฟอัตราส่วนความปลอดภัยจะตกลงมาเรื่อยๆ ถึงค่า 1.0 (ดินถล่ม) ที่ Time Step ที่ 1578 ซึ่งใช้เวลาตั้งแต่ฝนเริ่มตกจนถึงเหตุการณ์ลาดดินถล่มทั้งสิ้น 45 ชั่วโมง (1 วันกับ 21 ชั่วโมง) ปริมาณฝนสะสม 443.5 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่า 600 มิลลิเมตร ที่เป็นเช่นนี้อธิบายว่า ก่อนหน้า Time Step ที่ 1533 ได้มีฝนตกมาแล้ว 3 วันและฝนหยุด 2 วัน จึงทำให้ความชื้นธรรมชาติของลาดดินเพิ่มขึ้น และเมื่อสังเกตอัตราส่วนความปลอดภัยก่อนที่ฝนจะตกหนัก อยู่ที่ 1.45 โดยประมาณ ดังนั้นเมื่อฝนตกเพิ่มอีกเพียง 443.5 มิลลิเมตร ก็ทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.51 ตั้งแต่ Time Step ที่ 1585 เป็นต้นไป พบว่ากราฟอัตราส่วนความปลอดภัยได้ขาดหายไป ที่เป็นเช่นนี้อธิบายว่าในขั้นตอนการวิเคราะห์และคำนวณแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินอันเนื่องจากฝนตก ด้วยโปรแกรม SEEP/W ปรากฏว่าช่วง Time Step ที่ 1556 เป็นต้นไปมีฝนตกหนักมาก คือ 16.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (403.5 มิลลิเมตรต่อวัน) ทำให้แบบจำลองลาดดินไม่สามารถระบายน้ำออกได้ทัน จนเกิดการอึดตัวด้วยน้ำทั้งแบบจำลอง ทำให้โปรแกรม SEEP/W ไม่สามารถคำนวณหาสมดุลของน้ำ (Water Balance) ในแบบจำลองลาดดินได้ เพราะโปรแกรม SEEP/W จะไม่คำนวณน้ำที่ท่วมแบบจำลองลาดดิน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ โปรแกรม SLOPE/W ไม่สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยที่ถูกต้องได้ ผู้วิจัยจึงได้ข้ามช่วงเวลาดังกล่าวไป แล้วเริ่มกลับมาวิเคราะห์และคำนวณอีกครั้งหลังจากที่โปรแกรม SEEP/W สามารถคำนวณหาสมดุลของน้ำ (Water Balance) ในแบบจำลองลาดดินได้แล้ว สำหรับช่วง Time Step ที่ 1738 ถึง 1855 ก็เช่นเดียวกัน

ปรากฏการณ์ที่อัตราส่วนความปลอดภัยเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝนที่ตกสามารถอธิบายความมีเสถียรภาพของลาดดินกับปริมาณฝนที่ตกได้ว่า ฝนที่ตกลงมาเมื่อไหลซึมไปในชั้นดิน จะทำให้ภายในชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำและความชื้น ซึ่งความชื้นนี้มีผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน กล่าวคือ ดินยังมีความชื้นสูง (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำสูง) กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินก็ลดต่ำลง

จากแนวทางนี้ทำให้เราสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพลาดดินรายชั่วโมงในอนาคตได้ เช่นเดียวกัน และถ้ามีความพร้อมทุกๆด้าน ก็สามารถทำแบบนี้กับข้อมูลฝนทั้งปี หลายๆปีในอนาคต ซึ่งจะยังสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพลาดดิน และแนวโน้มการเกิดดินถล่มในอนาคตว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นกี่ครั้ง ในห้วงเวลาใดๆในอนาคต

สรุปผลการประเมินเหตุการณ์ดินถล่มเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

1.) เงื่อนไขเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ทำให้เกิดลาดดินถล่ม ที่ได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) คือ ฝนตกต่อเนื่องติดต่อกัน 3 ถึง 4 วัน และปริมาณน้ำฝนสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไป สามารถนำไปตรวจสอบเหตุการณ์ดินถล่มจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตได้ในระดับหนึ่ง (เช่น ใช้ได้กับกรณีเหตุการณ์จริงที่ฝนตกช่วงปลายเดือนธันวาคม 2016 และต้นมกราคม 2017) แต่อาจจะยังไม่ละเอียดและครอบคลุมเพียงพอในการนำไปตรวจสอบให้ถูกต้องอย่างสมบูรณ์

2.) ปัจจัยหลักที่จะทำให้เกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม คือ ความสามารถในการระบายน้ำของลาดดินและปริมาณน้ำที่สะสมในลาดดิน กล่าวคือ ถ้าฝนที่ตกทำให้ลาดดินมีการสะสมของน้ำถึงระดับหนึ่ง กำลังต้านทานของดินก็ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพ ส่วนระยะเวลานั้นเป็นเพียงปัจจัยเสริมเท่านั้น แต่การใช้ระดับน้ำหรือความชื้นในมวลดินมากำหนดเป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบหาเหตุการณ์ดินถล่มจากผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต เป็นเรื่องที่ซับซ้อนยุ่งยากและยังไม่เหมาะสมจะนำไปใช้งาน

3.) ปี 2074 เป็นปีที่ฝนตกและอยู่ในเงื่อนไขเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ทำให้เกิดลาดดินถล่ม ดังตารางที่ 4.14 และเมื่อนำฝนช่วงเดือนตุลาคม ถึง ธันวาคมของปี 2074 มาคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยแบบจำลองลาดดิน ปรากฏว่า มีเหตุการณ์ดินถล่มเกิดขึ้นถึง

2 ครั้งในเดือนธันวาคม เพราะมีพายุฝน 2 ลูก พายุฝนลูกที่ 1 ทำให้ฝนตกหนักเป็นเวลา 3 วันและเกิดฝนสะสม 778 มิลลิเมตร พายุฝนลูกที่ 2 ทำให้ฝนตกหนักเป็นเวลา 4 วันและเกิดฝนสะสม 561 มิลลิเมตร

4.) ในงานวิจัยนี้อยู่บนสมมติ ที่ว่าแบบจำลองลาดดินจะยังคงเหมือนเดิม แม้ว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัย จะน้อยกว่า 1.0 (ดินถล่ม)ไปแล้ว และเมื่อฝนหยุดตกค่าอัตราส่วนความปลอดภัยก็เพิ่มกลับขึ้นมามากกว่า 1.0 อีกครั้ง และวนรอบไปมาเช่นนี้เรื่อยๆตามปริมาณฝนที่ตกหรือปริมาณความชื้นในมวลดิน (ในความเป็นจริงตามธรรมชาติ หากลาดดินถล่มแล้ว ลักษณะของลาดดินและคุณสมบัติต่างๆทางวิศวกรรมก็จะเปลี่ยนแปลงไป)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาวิจัยแบบจำลองทั้งสาม คือ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ร่วมกับแบบจำลองลาดดินด้วยคอมพิวเตอร์ ทั้งโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W เพื่อหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มของเทือกเขาหลวง (ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ฝนรายปีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดฝน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ช่วงปีฐาน (1984-2012) มีค่า 2083 มิลลิเมตร
2. ฝนรายปีเฉลี่ยจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ตามรูปแบบของการพัฒนาในอนาคต (Scenario) แบบ A2 ที่ได้จาก START ช่วงปีฐาน (1984-2012) มีค่า 5233 มิลลิเมตร และมีฝนตกหนักในเดือนมีนาคม – พฤษภาคม ในขณะที่ฤดูฝนในพื้นที่อยู่ในเดือนตุลาคม – ธันวาคมของปี ทำให้ต้องมีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลฝนจากแบบจำลอง
3. ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนข้อมูลฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario แบบ A2 โดยใช้เซลล์ต้าแพกเตอร์ และการย่อส่วนทางสถิติ ทำให้ได้ปริมาณฝนคาดการณ์รายวันในอนาคต โดยในภาพรวมปรากฏว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้มีปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นจากอดีต(ปีฐาน) 6.3%, 12.6% และ 16.8% ในปี 2040, 2070 และ 2090 ตามลำดับ
4. ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) โดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W พบว่าลาดดินถล่มในวันที่ 26 มีนาคม 2011 ชั้นดินมีค่าแรงเฉือนแน่นประสิทธิภาพ 8 kPa และมุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ 24 องศา ดินถล่มเมื่อฝนตกต่อเนื่องกัน 3 วัน และปริมาณน้ำฝนสะสม 655 มิลลิเมตร

5. ผลการวิเคราะห์เหตุการณ์ลาดดินถล่มในวันที่ 26 มีนาคม 2011 โดยใช้สมการลาดอนันต์ พบว่าปริมาณน้ำฝนสะสมที่ทำให้ลาดดินถล่ม เท่ากับ 694 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W
6. ผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี สามารถสรุปในภาพรวมได้ว่า ลาดดินที่ตำบลเทพราช อำเภอสหัส จังหวัดนครศรีธรรมราช ถล่มเมื่อมีฝนตกต่อเนื่องกัน 3-4 วัน แล้วได้ปริมาณน้ำฝนสะสม มากกว่า 600 มิลลิเมตร ซึ่งในช่วงปีฐาน (1984-2012) รวม 29 ปี มีเหตุการณ์ลาดดินถล่ม 1 ครั้ง หรือกล่าวได้ว่ามีรอบปีการเกิดซ้ำ 29 ปี และจากการคำนวณรอบปีการเกิดซ้ำโดยใช้วิธีของ Gumbel ปรากฏว่าได้รอบปีการเกิดซ้ำเท่ากับ 15 ปี
7. เมื่อนำข้อมูลฝนจากแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมาช่วยส่วนทางสถิติให้ได้ปริมาณฝนรายวันในอนาคต โดยวิธีสัดส่วน วิธีเพิ่มโอกาสการเกิดพายุ และวิธีเพิ่มวันที่ฝนตก ปรากฏว่า รอบปีการเกิดซ้ำของเหตุการณ์ลาดดินถล่มเปลี่ยนแปลงเป็น 30, 30 และ 6 ปี ตามลำดับ จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นได้ว่า ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่คำนวณโดยวิธีสัดส่วน และวิธีเพิ่มโอกาสการเกิดพายุ ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม (รอบปีการเกิดซ้ำไม่แตกต่างจากเดิม) แต่ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่คำนวณโดยวิธีเพิ่มวันที่ฝนตก จะทำให้โอกาสการเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่มเพิ่มขึ้น (รอบปีการเกิดซ้ำลดลงจาก 29 ปี เป็น 6 ปี)
8. ผลจากการนำข้อมูลฝนรายวัน เดือนตุลาคม – ธันวาคมในปี 2074 จากแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยด้วยโปรแกรม SEEP/W และ SLOPE/W พบว่าเกิดเหตุการณ์ลาดดินถล่ม (อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 1.0) 2 ครั้งในเดือนธันวาคม เนื่องมาจากมีพายุฝน 2 ลูก พายุฝนลูกที่ 1 ทำให้ฝนตกหนักเป็นเวลา 3 วันและเกิดฝนสะสม 778 มิลลิเมตร พายุฝนลูกที่ 2 ทำให้ฝนตกหนักเป็นเวลา 4 วันและเกิดฝนสะสม 561 มิลลิเมตร จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของพายุฝน มีผลต่อเหตุการณ์ลาดดินถล่ม

5.2 การวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ใช้ผลจากภาพถ่าย (Projection) ของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 แบบ AR4 เพียงแบบจำลองเดียวจึงไม่สามารถที่จะบอกชี้ชัดได้ว่าสภาพฝนในอนาคตต้องเป็นแบบนี้ ดังนั้นผู้ศึกษาจำเป็นต้องใช้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศอื่นๆ หรือแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ แบบ AR5 ที่มีความทันสมัยกว่ามาวิเคราะห์เพิ่ม และใช้เทคนิคใหม่ๆ ในการย่อส่วนแบบจำลองลงบนพื้นที่ที่ศึกษาและในการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนต่อไป
2. งานวิจัยนี้ศึกษาวิจัยพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย (จังหวัดนครศรีธรรมราช) ซึ่งมีภูมิประเทศที่มีทะเลขนานสองข้าง และด้วยอิทธิพลสภาพภูมิอากาศของทะเลมีมาก ทำให้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 มีข้อจำกัดและให้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการนำผลลัพธ์ไปใช้งานต้องทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนกับข้อมูลการตรวจวัดจริงหลายๆสถานีตรวจวัดน้ำฝน
3. ความถูกต้องของการคาดการณ์ลาดดินถล่ม ขึ้นอยู่กับผลการคาดการณ์ฝนเป็นหลัก ดังนั้นจึงควรมีหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องประเมินผลการคาดการณ์นี้ เพื่อให้ให้นักวิจัยนำไปศึกษาต่อๆไป
4. การนำแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 2 กลุ่มที่ใช้ข้อมูลนำเข้า (input) และให้ผลลัพธ์ (Output) มีความละเอียดแตกต่างกันมาก มาวิเคราะห์และทำงานร่วมกัน ย่อมทำให้ผลลัพธ์สุดท้ายมีความละเอียดต่ำ และมีความคลาดเคลื่อนสูง กล่าวคือ แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ ให้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดต่ำ (ให้ผลลัพธ์ละเอียดที่สุดคือฝนรายวัน) แต่แบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดินใช้ข้อมูลนำเข้า (input) ที่มีความละเอียดสูง (ต้องการข้อมูลนำเข้า ละเอียดที่สุดคือฝนรายวินาที) พร้อมกับให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดสูง ดังนั้นผู้ที่วิจัยในลักษณะนี้จำเป็นต้องประเมินความต้องการของงานวิจัยว่าต้องการลักษณะและความละเอียดระดับใด
5. โปรแกรมแบบจำลองการไหลซึมของน้ำในมวลดิน (SEEP/W) ใช้หลักการ Finite Element ในการคำนวณและมีความละเอียดสูง ดังนั้นในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง

จำเป็นต้องใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูง จึงเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์งานที่มีข้อมูลจำนวนน้อย (ระยะสั้น) แต่เมื่อต้องนำมาใช้วิเคราะห์งานที่มีข้อมูลจำนวนมาก เช่น ฝนระยะเวลาเป็นร้อยปี ทำให้คอมพิวเตอร์และโปรแกรมมีปัญหาในการทำงาน ดังนั้นผู้ที่ทำการวิจัยในลักษณะนี้ ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ด้วย และถ้าจะใช้ Personal Computer (PC) จะต้องทำเป็นระบบ Personal Computer หลายระบบขนานกัน จากนั้นนำผลที่ได้มาสรุปรวมกันอีกครั้ง

6. เหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) ที่ฝนตกสะสมตั้งแต่ 600 มิลลิเมตรขึ้นไปใน 3 วัน ได้จากการคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis) ในพื้นที่วิกฤติ (Critical Area) เหตุการณ์เดียว ซึ่งยังมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) อื่นๆอีก เช่น การเปลี่ยนแปลงของ Initial water content มีผลต่อปริมาณฝนที่ตกแล้วทำให้เกิดดินถล่ม เป็นต้น ซึ่งผู้ที่ทำการวิจัยต่อไป สามารถนำประเด็นนี้ไปวิจัยเพิ่มได้อีก
7. งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลของ Land-use change เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพป่าธรรมชาติ เป็นสวนยางพารา ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดดินถล่ม
8. แบบจำลองลาดดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้จำลองให้ไม่ซับซ้อนเพื่อง่ายแก่การคำนวณ และตรวจสอบ เช่น กำหนดความหนาของชั้นดินให้มีความลึกเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด พิจารณาให้ชั้นหินผุไม่มีความสามารถในการซึมน้ำ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กัณฑ์ชัย บุญประกอบ (2548) อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, รายงานการประชุม ความหลากหลายทางชีวภาพด้านป่าไม้และสัตว์ป่า. วันที่ 21-24 สิงหาคม 2548 โรงแรมริเจนท์ ซะอำ จังหวัดเพชรบุรี
- กัณฑ์ชัย บุญประกอบ (2550) รายงานการวิเคราะห์ครั้งที่ 4 ของ IPCC (IPCC Fourth Assessment Report หรือ AR4) ที่เมืองวาเลนเซีย ประเทศสเปน 12-17 พฤศจิกายน 2550 ที่ถอดความเป็นภาษาไทย สืบค้นเมื่อ 19 กันยายน 2556. สืบค้นจาก <http://www.ru.ac.th/climate-change/>
- กัณฑ์ชัย บุญประกอบ และคณะ (2553) การสร้างภาพจำลองของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในประเทศไทยโดยการย่อส่วน แบบจำลองภูมิอากาศโลก. รายงานฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- กัณฑ์ชัย บุญประกอบ และคณะ (2554) รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ
- จิรสรณ์ สันติสิริสมบูรณ์ และคณะ (2553) ภาพฉายอนาคตการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของประเทศไทยจากผลของแบบจำลองภูมิอากาศภูมิภาค - MM5, การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย, แบบจำลองสภาพภูมิอากาศ และสภาพภูมิอากาศในอนาคต, สำนักงานสนับสนุนการวิจัย [อำนาจ ชิดไธ (บรรณาธิการ)]
- จิรสรณ์ สันติสิริสมบูรณ์ และเจียมใจ เครือสุวรรณ (2554) ภาพจำลองภูมิอากาศโลกและภูมิอากาศอนาคต ในรายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย คณะทำงานกลุ่มที่ 1 สำนักงานสนับสนุนการวิจัย [อัสมน ลีมสกุล, อำนาจ ชิดไธสง และกัณฑ์ชัย บุญประกอบ (บรรณาธิการ)].
- ชลดา กาญจนกุล (2559) การประเมินความไว้วางใจของการวิเคราะห์ลาดดินพิบัติธรรมชาติสำหรับระบบการเตือนภัย วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่

- ชนพจน์ จิระนนาวงศ์ (2560) การศึกษาปริมาณน้ำฝนวิกฤตเพื่อการเตือนภัยลาดดินพิบัติ
กรณีศึกษา ต.คลองทราย อ.นาทวี จ.สงขลา วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2550). การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี
จังหวัดนครศรีธรรมราช กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2550) แผนที่จัดตั้งธรณีวิทยา จังหวัดนครศรีธรรมราช กรมทรัพยากรธรณี.
 กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2553) รายงานสรุปเหตุการณ์ธรณีพิบัติภัย ปีงบประมาณ 2553
สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดกระบี่ ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดชุมพร,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดตรัง ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดพัทลุง ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดนครศรีธรรมราช ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดสุราษฎร์ธานี ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2554) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน จังหวัดระนอง ,
 มิถุนายน 2554 กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ
- ทรัพย์ากรchner, กรม (2558) แผนที่เสี่ยงภัยดินถล่มระดับชุมชน ตำบลเทพราช อำเภอสิชล
จังหวัดนครศรีธรรมราช กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ

มณเฑียร กังสคติเทียม (2541) กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม

สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานฯ , กรุงเทพฯ พิมพ์ครั้งที่ 8

รัชพล คชอนันต์, ธนันท์ ชูอุปการ และธนิต เฉลิมยานนท์ (2556) อิทธิพลของระดับความอิ่มตัว
ด้วยน้ำที่มีผลต่อกำลังเฉือนในดินที่หุสลายอยู่กับที่ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติครั้งที่ 18

รัชพล คชอนันต์ (2558) ศึกษาเสถียรภาพของลาดดินโดยคุณสมบัติทางวิศวกรรม กรณีศึกษา
เทพราช อำเภอสีชล วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขต
หาดใหญ่

วรวุฒิ ต้นติวณิช (2535) ธรณีวิทยาภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินถล่มที่บ้านกระทุงเหนือ จังหวัด
นครศรีธรรมราช. ฝ่ายธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กองธรณีวิทยา, กรุงเทพฯ.

ศุภกร ชินวรรณ และคณะ (2552) การจำลองสภาพภูมิอากาศอนาคตสำหรับประเทศไทยและ
พื้นที่ข้างเคียง. รายงานฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สันติ ไทยยืนวงษ์ (2553) การวิเคราะห์โอกาสเกิดดินถล่มโดยวิธีทางธรณีวิศวกรรมโดยพิจารณา
จากปัจจัยที่ไม่คงที่ในภาคใต้ของประเทศไทยพื้นที่ฝั่งทะเลอันดามัน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำนักงานจังหวัดนครศรีธรรมราช. (2560) ลักษณะทางกายภาพจังหวัดนครศรีธรรมราช สืบค้นเมื่อ
วันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560 สืบค้นจาก

<http://www.nakhonsithammarat.go.th/geography.php>

หนังสือพิมพ์คมชัดลึก (27 มีนาคม 2554) ข่าวทั่วไป สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560 . สืบค้น
จาก <http://www.komchadluek.net/news/regional/92870>

อุตุนิยมวิทยา, กรม (2551) วารสารอุตุนิยมวิทยา ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม
พ.ศ 2551

อุตุนิยมวิทยา, กรม (2556) ลมมรสุมที่มีอิทธิพลต่อภาคใต้ของไทย สืบค้นเมื่อ 19 กันยายน 2556.
สืบค้นจาก <http://www.tmd.go.th>

- องค์การบริหารส่วนตำบลเทพราช (2560) สภาพและข้อมูลพื้นฐานตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช สืบค้นเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2560. สืบค้นจาก www.theppharat.go.th/general1.php
- อำนาจ ชิดไธสง (2553) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของไทย เล่มที่ 1 สภาพภูมิอากาศในอดีต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ
- อัศมน ลิ่มสกุลและแสงจันทร์ ลิ่มจิรกาล (2554) ข้อมูลการตรวจวัดที่ผิวพื้นและในบรรยากาศ. ในรายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1 คณะทำงานกลุ่มที่ 1 สำนักงานสนับสนุนการวิจัย [อัศมน ลิ่มสกุล, อำนาจ ชิดไธสง และกัณฑ์รัชย์ บุญประกอบ (บรรณาธิการ)].
- Bishop, A. W. (1955). The use of slope circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique. 5, 7-17
- British Geological Survey (2017) Type of landslide movement สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560 สืบค้นจาก http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html
- Chistel Prudhomme, Nick Reynard and Sue Crooks. (2002) Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where we are now? , HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process. **16**, 1137–1150 (2002) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1054
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. 7, pp. 343–387.
- Collison, A., Wade, S., Griffiths, J., Dehn, M. (2000) Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. Eng. Geol. 5, 205–218. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00121-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00121-0).
- Crozier, M. J. (2010) Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. Geomorphology 124, 260–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>.

- D. R. Easterling et. al. (2000) Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0417:OVATIE>](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>)
2.3.CO;2 Published Online: 1 March 2000
- Darcy, H., (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
- Dehn, M., Bürger, G., Buma, J., Gasparetto, P. (2000) Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. Eng. Geol. 55 (3), 193–204. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952\(99\)00123-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952(99)00123-4).
- Dikau, R., Schrott, L., (1999) The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. Geomorphology 30, 1–12. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x\(99\)00040-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x(99)00040-9).
- Eastern Illinois University (2017) Type of landslide movement สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560
สืบค้นจาก <http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1300/complex.html>
- Fredlund, D. G. and A. Xing. (1994). Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31: 521-532.
- Fredlund, D. G. and A. Xing. (1994). Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31: 521-532.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Son. New York 515 p.
- Geo-Slope International Ltd. (2008). Stability Modeling with SEEP/W 2007 version
An Engineering Methodology, 3rd Edition, March 2008
- Geo-Slope International Ltd. (2008). Stability Modeling with SLOPE/W 2007 version
An Engineering Methodology, 3rd Edition, March 2008
- Green, W.H., and Ampt. G.A. (1911). Studies on soil physics. I. The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci. 4: 1-24
- Gumbel, E.J. (1941) The return period of flood flows. The Annals of Mathematical Statistics, 12, 163-190.

Highland, L.M. and Bobrowsky, Peter. (2008). The landslide handbook-A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [R.T. Watson and Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 184 pp.

Malet, J.-P. et al. (2007) Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley. In: McInnes, R., Jakeways, J., Fairbank, H., E., M. (Eds.), Landslides and Climate Change: Challenges and Solutions, Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change. Taylor & Francis, Ventnor, Isle of Wight, UK, pp. 195–205 21–24 May 2007.

Manton, M.J. et al. (2001) Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998 International Journal of Climatology, vol. 21, Issue 3, pp.269-284

Nobuhiko Endo, Jun Matsumoto and Tun Lwin (2009) Trends in Precipitation Extremes over Southeast Asia. SOLA, 2009, Vol. 5, 168–171, doi:10.2151/sola.2009–043

- Punrattanasin (2002) Collapse and Erosion of Khon Kaen Loess with Treatment Option. ICSF-1 Conference Proceedings. pp. 1081-1090
- Qian Zhai and Harianto Rahardjo (2012) Determination of soil–water characteristic curve variables journal homepage: www.elsevier.com/locate/compageo Computers and Geotechnics 42 (2012) 37–43
- Ravindra V. Kale and Bhabagrahi Sahoo (2011) Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit Water Resources Management Article First Online: 12 July 2011 DOI: 10.1007/s11269-011-9868-0
- Robert L. Wilby and Hayley J. Fowler (2010) Regional climate downscaling, Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources Published Online: 1 Dec 2010 DOI: 10.1002/9781444324921.ch3 Copyright © 2011 Blackwell Publishing Ltd
- Sidle, R.C., Ochiai, H. (2006) Landslides: processes, prediction, and land use. Water Resour. Monogr. Ser. 18. AGU, Washington DC. <http://dx.doi.org/10.1029/WM018> 312 pp.
- Shakir Ali, N.C. Ghosh and Ranvir Singh (2010) Rainfall–runoff simulation using a normalized antecedent precipitation index Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, **55**(2) 2010
- Van Genuchten, M. Th., (1980). A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
- Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- Vanapalli, S.K., Fredlund D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, AW. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 33: 379-392.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2

พิกัด 8.60/99.80 (Lat/Lon)

ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ ก.1 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2536 (1993)

เดือน	ปี									
	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Jan	651.1	51.2	41.1	12.0	3.7	147.0	40.2	19.7	84.1	141.5
Feb	21.3	378.6	420.8	279.6	686.4	203.9	334.6	654.6	340.1	3.6
Mar	274.9	290.1	559.2	384.4	415.9	186.7	597.2	217.2	509.4	644.0
Apr	1159.3	1090.0	1294.8	356.5	604.2	1026.3	781.7	1016.1	1505.5	411.3
May	971.9	701.1	641.3	414.2	1043.3	661.7	577.4	611.8	373.3	769.9
Jun	303.8	237.1	546.3	554.8	398.9	299.2	410.9	190.2	377.1	388.8
Jul	580.8	204.3	223.1	359.9	489.7	522.9	191.3	122.0	225.8	697.7
Aug	352.6	195.5	217.0	328.2	625.3	829.8	183.6	220.1	338.1	219.7
Sep	715.2	630.6	389.0	738.9	959.6	435.1	722.8	561.3	704.0	496.0
Oct	40.9	359.1	269.2	227.2	531.7	408.8	68.6	250.9	195.3	65.8
Nov	264.2	437.2	409.4	127.0	438.9	36.2	490.7	42.2	191.8	262.1
Dec	237.9	119.2	63.5	11.8	117.7	29.9	125.4	90.3	181.4	100.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.2 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2537 (1994) ถึงปี 2546 (2003)

เดือน	ปี									
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Jan	8.5	89.3	159.0	64.0	207.5	25.5	526.0	45.2	31.9	82.4
Feb	1094.9	159.3	120.3	217.1	631.1	7.5	170.3	177.6	13.3	2.1
Mar	60.0	340.9	680.2	181.9	425.4	611.3	289.9	799.3	169.0	43.2
Apr	1023.4	1216.3	491.3	601.6	709.3	903.8	120.4	641.1	766.3	363.1
May	589.2	854.8	1455.5	679.7	1228.3	1024.0	703.8	466.5	735.1	1049.4
Jun	189.9	772.2	313.1	421.3	264.4	254.8	467.4	413.1	593.6	576.9
Jul	303.4	484.6	373.5	291.8	365.7	532.8	686.1	585.6	330.4	624.0
Aug	87.0	760.0	393.0	421.9	210.2	691.9	464.8	403.6	331.7	642.2
Sep	1334.3	973.3	953.5	714.5	447.2	553.6	1442.2	415.1	552.0	822.6
Oct	96.2	757.3	490.0	447.3	325.8	93.1	515.1	528.4	208.0	81.4
Nov	443.8	276.0	370.8	289.4	550.4	193.8	296.6	913.6	330.8	92.1
Dec	196.3	324.5	37.3	189.0	98.2	170.9	407.1	620.7	119.5	68.7

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.3 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2547 (2004) ถึงปี 2555 (2012)

เดือน	ปี								
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Jan	454.4	58.6	90.9	17.1	32.5	51.6	166.4	50.4	121.4
Feb	44.2	100.0	233.3	535.8	64.7	35.8	28.6	15.9	169.0
Mar	572.9	342.1	518.8	398.3	429.9	287.0	582.4	626.9	13.9
Apr	718.2	637.5	989.9	809.3	899.3	745.4	840.4	1301.2	984.7
May	843.5	504.8	784.1	733.7	918.4	1128.5	1307.5	1042.2	722.1
Jun	356.7	150.7	479.5	382.9	629.9	549.0	811.4	826.8	285.5
Jul	332.1	542.0	275.7	262.1	234.7	353.0	254.4	392.0	204.9
Aug	687.1	427.9	382.4	541.6	804.7	395.7	483.1	603.3	308.6
Sep	424.1	977.3	1042.3	827.6	666.9	818.3	975.4	577.6	809.5
Oct	386.5	231.2	667.8	144.8	524.0	200.9	78.5	67.3	174.2
Nov	428.5	632.8	71.7	166.3	87.2	81.5	301.9	644.3	349.9
Dec	560.2	321.1	1.0	244.5	225.3	247.4	246.6	111.2	1492.8

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.4 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2565 (2022)

เดือน	ปี									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	17.8	57.5	203.9	7.3	204.3	315.4	86.1	312.3	618.0	194.7
Feb	28.2	252.7	515.9	126.7	17.4	20.9	267.2	151.0	168.8	17.4
Mar	187.8	921.0	131.4	971.1	753.2	239.2	1066.8	264.3	174.5	141.5
Apr	878.2	1140.0	786.1	624.9	643.1	1290.2	1057.5	1069.6	853.7	479.1
May	1036.2	1404.8	564.1	1185.2	905.5	1297.0	842.8	982.6	758.7	827.1
Jun	716.2	192.3	212.4	188.5	189.7	575.7	560.6	443.7	453.9	127.5
Jul	322.0	419.8	67.8	750.0	333.1	468.1	470.6	727.6	157.1	366.9
Aug	1151.4	121.8	349.5	423.3	557.9	265.5	398.6	819.2	371.0	499.5
Sep	648.9	601.0	542.7	870.5	861.2	773.2	855.1	780.4	521.3	666.5
Oct	357.5	695.3	240.5	1029.9	272.1	713.3	391.9	434.6	311.8	366.3
Nov	84.7	174.2	185.0	113.0	246.2	93.6	197.6	241.6	52.2	465.8
Dec	35.6	93.3	2388.2	230.5	437.5	117.8	13.2	8.8	66.3	27.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.5 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2566 (2023) ถึงปี 2575 (2032)

เดือน	ปี									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jan	192.3	86.0	238.8	83.6	51.2	7.6	55.9	24.9	512.0	259.9
Feb	81.6	58.1	672.6	8.1	286.9	450.6	31.4	92.3	173.5	183.5
Mar	155.2	135.9	182.3	222.1	226.1	1270.6	54.8	525.6	161.7	375.5
Apr	432.0	688.7	648.2	1110.9	408.0	922.8	1442.0	915.9	1253.2	413.2
May	1252.3	1245.0	1150.6	1152.9	844.7	728.6	972.8	543.3	816.4	1326.5
Jun	499.5	504.1	519.3	284.7	186.2	483.8	812.9	505.0	315.6	323.9
Jul	261.2	297.7	308.7	648.6	214.3	133.7	321.7	493.0	321.9	222.3
Aug	673.7	485.7	764.1	338.5	371.3	675.4	527.3	667.1	477.2	375.2
Sep	590.7	843.1	784.7	694.0	1025.6	505.0	659.4	899.1	1138.1	524.3
Oct	290.1	485.6	227.2	314.0	258.4	282.8	102.9	268.4	184.2	533.1
Nov	281.0	64.7	99.9	490.4	134.3	547.9	53.0	746.8	399.8	741.8
Dec	69.2	61.0	75.6	392.0	80.8	510.7	696.7	314.1	291.5	35.5

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.6 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2576 (2033) ถึงปี 2585 (2042)

เดือน	ปี									
	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Jan	105.0	175.7	339.3	89.1	296.5	158.6	244.9	129.9	3.3	117.8
Feb	1.8	7.2	107.0	2.5	314.8	279.2	22.6	29.3	102.1	53.9
Mar	114.1	369.9	55.0	325.9	710.5	21.4	207.4	154.7	566.3	60.7
Apr	1017.9	634.3	464.3	894.3	828.8	782.7	766.1	1113.4	1014.8	588.5
May	1141.3	1078.6	968.7	740.0	809.9	1142.2	1476.6	820.2	1931.4	1140.8
Jun	564.4	1029.2	668.1	554.3	245.9	391.2	247.0	1023.4	573.1	545.5
Jul	103.1	319.9	514.6	275.9	672.2	286.7	359.4	217.8	480.8	270.8
Aug	565.4	429.4	645.0	433.8	421.1	590.3	653.2	901.1	261.4	451.9
Sep	789.7	699.8	1039.9	1107.4	729.6	352.4	877.4	844.4	922.9	655.0
Oct	297.8	304.8	819.4	200.8	284.6	83.7	338.0	230.4	288.1	159.0
Nov	257.4	90.5	346.3	247.9	507.5	378.1	274.2	225.8	295.5	314.1
Dec	95.6	29.1	320.2	173.4	9.5	265.2	211.9	286.5	424.2	296.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.7 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2586 (2043) ถึงปี 2595 (2052)

เดือน	ปี									
	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
Jan	13.6	1.4	13.6	197.8	242.4	29.0	637.2	24.4	61.6	9.0
Feb	3.3	47.9	128.3	278.4	7.6	254.7	63.9	6.2	179.5	10.6
Mar	93.3	42.2	1077.5	345.7	110.0	606.5	218.2	12.0	178.5	86.4
Apr	1189.2	1308.2	624.1	636.3	1361.7	900.0	634.3	634.3	1328.2	1352.8
May	947.8	594.6	912.9	1152.5	1361.7	1088.8	555.8	555.8	763.0	186.8
Jun	981.2	384.3	419.6	275.6	754.1	195.1	257.4	257.4	416.0	290.6
Jul	271.1	405.6	300.2	267.3	369.9	415.5	936.6	936.6	536.6	537.9
Aug	765.8	835.4	707.1	437.1	565.9	1015.0	931.3	931.3	444.3	837.9
Sep	443.5	904.6	1126.8	479.9	620.2	1258.1	680.3	680.3	946.2	803.4
Oct	165.0	269.1	101.2	188.7	315.1	146.0	67.2	67.2	402.3	447.8
Nov	607.9	235.8	410.0	97.1	421.1	387.0	130.0	130.0	322.7	87.3
Dec	290.7	31.6	592.8	287.1	377.7	406.3	218.8	1436.9	27.3	12.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.8 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2596 (2053) ถึงปี 2605 (2062)

เดือน	ปี									
	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062
Jan	11.6	41.1	123.3	231.8	21.8	46.1	469.3	51.7	89.9	98.0
Feb	8.0	41.4	13.2	39.8	96.5	104.2	25.1	172.8	43.7	137.1
Mar	23.5	294.2	21.5	598.3	150.7	287.4	501.0	214.2	445.8	295.8
Apr	482.6	904.3	558.2	592.6	578.5	1096.1	840.3	1203.1	903.8	1544.6
May	764.9	982.3	1141.0	1478.0	738.2	1316.5	651.4	1357.6	1636.0	642.7
Jun	276.8	475.2	492.2	317.5	300.7	508.4	671.5	472.8	597.0	479.5
Jul	564.2	243.7	540.4	519.8	389.8	250.8	859.7	403.5	447.3	275.3
Aug	656.7	282.8	776.1	588.2	541.7	783.0	455.7	809.2	1163.7	925.3
Sep	785.4	1076.0	720.4	920.2	981.1	981.7	1035.8	866.3	759.9	681.4
Oct	58.0	127.5	44.2	139.3	169.5	274.7	262.2	468.6	193.9	255.1
Nov	463.8	458.1	571.5	168.3	38.8	409.3	485.4	30.7	37.6	179.1
Dec	79.0	330.2	476.7	581.8	337.9	62.7	81.2	173.0	469.1	111.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.9 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2606 (2063) ถึงปี 2615 (2072)

เดือน	ปี									
	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072
Jan	163.4	18.7	81.0	221.7	26.1	70.4	71.2	31.5	361.3	52.3
Feb	224.5	32.8	253.4	80.8	185.5	280.4	2.7	9.3	364.4	4.1
Mar	338.9	154.5	292.4	43.0	331.3	22.7	193.9	383.0	512.4	361.6
Apr	1542.1	680.0	963.0	957.9	834.7	831.7	875.3	1093.0	1057.7	1664.5
May	1255.7	1505.8	1482.2	864.7	1514.3	1077.2	1031.4	1480.2	1360.0	542.4
Jun	557.3	589.6	176.0	460.6	407.5	553.0	651.3	358.1	311.2	422.7
Jul	318.6	424.2	478.0	315.8	555.0	693.0	315.8	819.8	362.1	428.9
Aug	888.2	670.2	459.0	725.1	340.7	820.2	663.0	403.6	912.5	843.0
Sep	934.5	845.2	428.0	1240.8	653.3	784.0	1149.5	1026.3	1002.2	270.5
Oct	93.5	317.4	106.0	720.8	888.5	537.7	962.4	157.4	304.2	679.0
Nov	208.5	552.3	262.8	243.9	110.3	118.8	366.6	246.9	173.9	189.7
Dec	28.6	455.0	1.6	502.7	185.6	154.4	210.1	477.9	210.5	14.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.10 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2616 (2073) ถึงปี 2625 (2082)

เดือน	ปี									
	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082
Jan	34.3	97.6	9.4	73.8	88.5	510.9	23.3	120.5	393.4	22.5
Feb	310.1	262.4	101.6	50.1	75.6	55.6	104.5	173.9	74.5	194.0
Mar	261.6	660.7	328.6	474.1	33.8	265.6	337.3	697.2	255.2	95.1
Apr	587.9	1689.7	1261.4	1090.3	833.3	1599.9	1808.0	1451.1	869.0	975.4
May	1491.9	1293.6	1446.6	1391.6	1265.1	1214.4	1178.2	1044.6	952.5	709.3
Jun	656.3	454.2	549.8	446.6	858.7	251.9	296.6	238.6	966.3	337.4
Jul	157.3	734.6	790.6	650.1	676.1	189.0	278.7	490.9	566.6	213.7
Aug	851.9	1293.5	1291.1	989.0	871.5	670.3	569.1	611.7	1263.5	307.6
Sep	1357.0	1105.7	862.8	880.5	792.7	1219.6	476.6	1124.7	994.6	1457.5
Oct	148.7	266.0	161.9	703.2	75.9	238.8	231.0	413.1	422.3	515.2
Nov	661.8	423.1	384.6	68.7	137.7	329.9	569.9	258.9	160.6	227.6
Dec	531.7	107.5	338.9	102.4	222.8	630.6	109.2	760.8	39.6	63.9

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.11 ฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
ตั้งแต่ปี 2626 (2083) ถึงปี 2633 (2090)

เดือน	ปี							
	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Jan	8.0	115.4	46.0	326.5	404.5	131.3	396.1	115.5
Feb	489.2	197.3	60.2	126.1	68.8	222.4	29.0	221.9
Mar	88.5	1013.9	502.7	269.9	479.2	238.9	128.7	373.2
Apr	310.9	1275.4	1567.5	1643.4	1800.6	893.3	720.3	908.8
May	1198.9	1156.1	1453.4	1638.3	1215.5	1699.5	1169.3	1227.4
Jun	657.3	534.4	467.8	1026.1	603.2	724.4	895.5	267.8
Jul	428.3	485.1	698.4	560.1	598.7	998.5	867.4	952.4
Aug	1171.2	806.6	482.4	928.6	1085.5	287.1	787.1	1262.8
Sep	1463.5	880.9	1160.5	949.7	1117.3	1379.8	1187.2	1408.9
Oct	305.4	255.6	479.1	227.9	80.7	543.0	402.5	390.5
Nov	74.2	407.4	252.3	73.4	167.2	60.0	140.2	294.4
Dec	34.3	159.3	369.1	349.8	251.6	74.9	256.9	703.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข.

ฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช
ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2555 (2012)

ตารางที่ ข.1 ฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา
 จ.นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 2527 (1984) ถึงปี 2536 (1993)

เดือน	ปี									
	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Jan	205.8	68.9	20.7	154.4	315.4	101.6	49.8	86.1	88.4	276.0
Feb	97.7	1.0	0.0	0.0	63.5	21.8	5.3	106.2	106.8	6.0
Mar	19.7	22.6	4.3	0.0	0.0	46.0	22.2	198.8	0.0	155.3
Apr	23.3	136.5	0.0	37.7	178.4	97.1	82.2	302.0	24.5	173.2
May	98.2	170.1	229.4	144.7	257.3	125.0	143.4	185.8	95.1	71.6
Jun	57.9	100.9	117.7	63.1	82.6	29.3	24.2	47.9	32.7	141.4
Jul	132.7	118.3	148.6	15.6	103.3	30.8	98.4	85.3	57.7	54.2
Aug	26.3	53.6	43.0	138.3	102.7	31.4	36.3	73.8	50.3	88.8
Sep	163.7	152.3	307.2	91.1	112.8	64.0	69.0	86.2	42.4	307.1
Oct	59.5	390.0	379.7	228.1	80.5	399.0	507.8	57.7	397.6	359.0
Nov	1017.3	542.3	645.3	403.4	1218.9	487.5	339.3	209.4	411.6	729.4
Dec	280.5	401.8	225.2	888.6	112.1	19.3	307.9	231.4	381.2	439.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ข.2 ฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา
จ.นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 2537 (1994) ถึงปี 2546 (2003)

เดือน	ปี									
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Jan	31.2	161.4	70.0	72.3	33.4	96.5	146.8	280.0	0.0	181.3
Feb	12.3	44.5	92.0	12.0	0.0	593.8	151.2	0.0	0.0	37.9
Mar	263.5	63.0	3.9	8.2	3.0	44.9	309.7	348.0	68.5	91.7
Apr	93.1	69.3	96.5	75.9	0.0	46.9	87.8	12.3	42.3	33.2
May	149.3	33.7	172.7	13.2	67.7	50.5	68.0	40.4	80.0	148.1
Jun	22.7	83.3	27.9	190.4	161.1	25.5	87.3	50.0	51.9	180.4
Jul	63.3	161.2	55.7	32.1	56.7	27.6	13.4	125.0	37.0	105.0
Aug	53.5	117.5	105.2	171.7	137.8	176.8	54.8	0.0	77.3	29.2
Sep	38.6	208.9	35.1	140.8	79.0	107.2	83.3	75.5	46.9	170.3
Oct	423.6	191.2	148.8	370.4	689.2	160.6	331.0	285.7	165.4	139.3
Nov	827.0	1105.4	612.4	461.0	639.7	198.0	869.4	643.0	747.4	372.0
Dec	172.7	167.1	638.5	310.4	607.0	271.6	403.6	309.5	334.5	515.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ข.3 ฝนรายเดือนจากการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝน อ.ท่าศาลา
จ.นครศรีธรรมราช ตั้งแต่ปี 2547 (2004) ถึงปี 2555 (2012)

เดือน	ปี								
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Jan	65.4	77.8	122.0	170.6	235.0	172.1	150.8	574.4	703.5
Feb	164.6	0.0	265.0	10.5	46.7	13.2	0.0	64.2	63.3
Mar	15.7	159.7	29.5	94.9	48.0	100.2	94.7	1455.6	90.8
Apr	75.5	19.4	31.7	115.6	68.7	141.3	18.0	0.0	51.4
May	34.8	8.5	131.6	292.4	38.1	81.6	73.0	64.6	21.9
Jun	20.4	44.3	217.4	80.9	25.4	5.2	38.2	38.4	58.0
Jul	76.7	41.9	66.5	44.7	56.5	97.8	56.6	24.3	51.9
Aug	31.1	22.1	56.5	44.6	25.0	206.9	131.5	45.6	86.2
Sep	97.1	99.7	74.3	74.1	23.9	985.6	136.8	26.9	151.1
Oct	231.0	258.3	289.2	100.7	100.0	209.1	172.6	229.5	174.4
Nov	472.1	186.6	206.6	463.2	753.4	541.4	1004.1	327.8	413.4
Dec	286.9	614.6	297.8	278.7	116.1	184.6	401.8	452.9	293.7

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก ค.

ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2

พิกัด 8.60/99.80 (Lat/Lon) ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง

แบบสัดส่วน (Proportion)

ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ ค.1 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน (Proportion) ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2565 (2022)

เดือน	ปี									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	300.4	100.6	30.2	225.4	460.4	148.3	72.7	125.7	129.0	402.9
Feb	61.1	0.6	0.0	0.0	39.7	13.6	3.3	66.5	66.8	3.8
Mar	18.4	21.1	4.0	0.0	0.0	42.9	20.7	185.5	0.0	144.9
Apr	23.8	139.7	0.0	38.6	182.6	99.4	84.1	309.1	25.1	177.3
May	124.9	216.4	291.9	184.1	327.4	159.0	182.4	236.4	121.0	91.1
Jun	62.3	108.6	126.6	67.9	88.9	31.5	26.0	51.5	35.2	152.1
Jul	126.6	112.8	141.7	14.9	98.5	29.4	93.9	81.4	55.0	51.7
Aug	31.9	65.0	52.1	167.6	124.5	38.1	44.0	89.5	61.0	107.6
Sep	167.2	155.6	313.8	93.1	115.2	65.4	70.5	88.1	43.3	313.7
Oct	74.8	490.4	477.5	286.8	101.2	501.8	638.6	72.6	500.0	451.5
Nov	886.6	472.6	562.4	351.6	1062.3	424.9	295.7	182.5	358.7	635.7
Dec	322.1	461.3	258.6	1020.2	128.7	22.2	353.5	265.7	437.7	504.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.2 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน (Proportion) ตั้งแต่ปี 2566 (2023) ถึงปี 2575 (2032)

เดือน	ปี									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jan	45.5	235.6	102.2	105.5	48.8	140.9	214.3	408.7	0.0	264.7
Feb	7.7	27.8	57.6	7.5	0.0	371.6	94.6	0.0	0.0	23.7
Mar	245.9	58.8	3.6	7.7	2.8	41.9	289.0	324.7	63.9	85.6
Apr	95.3	70.9	98.8	77.7	0.0	48.0	89.9	12.6	43.3	34.0
May	190.0	42.9	219.7	16.8	86.1	64.3	86.5	51.4	101.8	188.4
Jun	24.4	89.6	30.0	204.9	173.3	27.4	93.9	53.8	55.8	194.1
Jul	60.4	153.8	53.1	30.6	54.1	26.3	12.8	119.2	35.3	100.2
Aug	64.9	142.4	127.5	208.1	167.0	214.3	66.4	0.0	93.7	35.4
Sep	39.4	213.4	35.9	143.8	80.7	109.5	85.1	77.1	47.9	174.0
Oct	532.7	240.4	187.1	465.8	866.7	202.0	416.2	359.3	208.0	175.2
Nov	720.8	963.4	533.7	401.8	557.5	172.6	757.7	560.4	651.4	324.2
Dec	198.3	191.9	733.1	356.4	696.9	311.8	463.4	355.3	384.1	591.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.3 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน (Proportion) ตั้งแต่ปี 2576 (2033) ถึงปี 2585 (2042)

เดือน	ปี									
	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Jan	95.5	113.6	178.1	249.0	343.0	251.2	220.1	838.5	1026.9	190.5
Feb	103.0	0.0	165.8	6.6	29.2	8.3	0.0	40.2	39.6	38.1
Mar	14.6	149.0	27.5	88.5	44.8	93.5	88.4	1358.1	84.7	12.8
Apr	77.3	19.9	32.4	118.3	70.3	144.6	18.4	0.0	52.6	26.2
May	44.3	10.8	167.4	372.0	48.5	103.8	92.9	82.2	27.9	125.9
Jun	22.0	47.7	233.9	87.1	27.3	5.6	41.1	41.3	62.4	61.0
Jul	73.2	40.0	63.4	42.6	53.9	93.3	54.0	23.2	49.5	164.1
Aug	37.7	26.8	68.5	54.1	30.3	250.8	159.4	55.3	104.5	41.6
Sep	99.2	101.9	75.9	75.7	24.4	1006.9	139.8	27.5	154.4	184.8
Oct	290.5	324.8	363.7	126.6	125.8	263.0	217.1	288.6	219.3	57.2
Nov	411.5	162.6	180.1	403.7	656.6	471.9	875.1	285.7	360.3	893.1
Dec	329.4	705.6	341.9	320.0	133.3	211.9	461.3	520.0	337.2	360.9

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.4 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน
(Proportion) ตั้งแต่ปี 2586 (2043) ถึงปี 2595 (2052)

เดือน	ปี									
	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
Jan	63.8	19.2	142.9	292.0	94.1	46.1	79.7	81.8	255.5	28.9
Feb	0.4	0.0	0.0	24.8	8.5	2.1	41.4	41.6	2.3	4.8
Mar	14.6	2.8	0.0	0.0	29.8	14.4	128.9	0.0	100.7	170.8
Apr	153.7	0.0	42.5	200.9	109.4	92.6	340.1	27.6	195.1	104.9
May	218.1	294.2	185.5	329.9	160.3	183.9	238.2	121.9	91.8	191.4
Jun	106.4	124.1	66.5	87.1	30.9	25.5	50.5	34.5	149.1	23.9
Jul	146.3	183.8	19.3	127.8	38.1	121.7	105.5	71.4	67.0	78.3
Aug	84.9	68.1	219.0	162.6	49.7	57.5	116.9	79.7	140.6	84.7
Sep	171.9	346.7	102.8	127.3	72.2	77.9	97.3	47.9	346.6	43.6
Oct	374.7	364.9	219.2	77.4	383.4	487.9	55.4	382.1	345.0	407.0
Nov	476.1	566.5	354.2	1070.1	428.0	297.9	183.8	361.4	640.4	726.1
Dec	516.9	289.7	1143.2	144.2	24.8	396.1	297.7	490.4	564.8	222.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.5 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน
(Proportion) ตั้งแต่ปี 2596 (2053) ถึงปี 2605 (2062)

เดือน	ปี									
	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062
Jan	149.4	64.8	66.9	30.9	89.3	135.9	259.2	0.0	167.8	60.5
Feb	17.3	35.9	4.7	0.0	231.5	58.9	0.0	0.0	14.8	64.2
Mar	40.8	2.5	5.3	1.9	29.1	200.7	225.6	44.4	59.4	10.2
Apr	78.0	108.7	85.5	0.0	52.8	98.9	13.9	47.6	37.4	85.0
May	43.2	221.4	16.9	86.8	64.8	87.2	51.8	102.6	189.9	44.6
Jun	87.8	29.4	200.7	169.8	26.9	92.0	52.7	54.7	190.2	21.5
Jul	199.4	68.9	39.7	70.1	34.1	16.6	154.6	45.8	129.9	94.9
Aug	186.1	166.6	271.9	218.2	280.0	86.8	0.0	122.4	46.2	49.3
Sep	235.8	39.6	158.9	89.2	121.0	94.0	85.2	52.9	192.2	109.6
Oct	183.7	143.0	355.9	662.2	154.3	318.1	274.5	158.9	133.9	222.0
Nov	970.5	537.7	404.7	561.6	173.8	763.3	564.5	656.2	326.6	414.5
Dec	215.0	821.5	399.3	780.9	349.4	519.2	398.2	430.3	663.0	369.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.6 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน
(Proportion) ตั้งแต่ปี 2606 (2063) ถึงปี 2615 (2072)

เดือน	ปี									
	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072
Jan	72.0	112.9	157.9	217.6	159.3	139.6	531.8	651.3	282.0	94.4
Feb	0.0	103.3	4.1	18.2	5.1	0.0	25.0	24.7	52.6	0.5
Mar	103.5	19.1	61.5	31.1	64.9	61.4	943.5	58.9	18.9	21.7
Apr	21.8	35.7	130.2	77.4	159.1	20.3	0.0	57.9	34.8	203.8
May	10.9	168.7	374.9	48.9	104.6	93.6	82.8	28.1	155.6	269.6
Jun	46.7	229.2	85.3	26.8	5.5	40.3	40.5	61.1	79.6	138.8
Jul	51.8	82.3	55.3	69.9	121.0	70.0	30.1	64.2	180.2	160.6
Aug	35.0	89.5	70.6	39.6	327.7	208.2	72.2	136.5	57.4	117.0
Sep	112.5	83.9	83.6	27.0	1112.4	154.4	30.4	170.5	237.1	220.6
Oct	248.2	277.9	96.8	96.1	200.9	165.9	220.5	167.6	68.3	447.8
Nov	163.8	181.4	406.7	661.4	475.3	881.5	287.8	362.9	796.5	424.6
Dec	790.7	383.1	358.6	149.4	237.5	516.9	582.7	377.9	451.9	647.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.7 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน (Proportion) ตั้งแต่ปี 2616 (2073) ถึงปี 2625 (2082)

เดือน	ปี									
	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082
Jan	28.4	211.6	432.2	139.2	68.2	118.0	121.1	378.2	42.8	221.2
Feb	0.0	0.0	34.2	11.7	2.9	57.2	57.5	3.2	6.6	24.0
Mar	4.1	0.0	0.0	44.2	21.3	191.0	0.0	149.2	253.2	60.5
Apr	0.0	56.3	266.3	145.0	122.7	450.8	36.6	258.6	139.0	103.5
May	363.6	229.3	407.8	198.1	227.3	294.5	150.7	113.5	236.6	53.4
Jun	161.9	86.8	113.6	40.3	33.3	65.9	45.0	194.5	31.2	114.6
Jul	201.8	21.2	140.3	41.8	133.6	115.8	78.3	73.6	86.0	218.9
Aug	93.9	302.0	224.3	68.6	79.3	161.1	109.8	193.9	116.8	256.6
Sep	445.0	132.0	163.4	92.7	100.0	124.9	61.4	444.9	55.9	302.6
Oct	436.0	261.9	92.4	458.2	583.1	66.3	456.6	412.2	486.4	219.6
Nov	505.2	315.8	954.3	381.7	265.7	163.9	322.3	571.1	647.5	865.5
Dec	362.8	1431.5	180.6	31.1	496.0	372.8	614.1	707.2	278.2	269.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ค.8 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน (Proportion) ตั้งแต่ปี 2626 (2083) ถึงปี 2633 (2090)

เดือน	ปี							
	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Jan	95.9	99.1	45.8	132.2	201.2	383.7	0.0	248.4
Feb	49.5	6.5	0.0	319.7	81.4	0.0	0.0	20.4
Mar	3.7	7.9	2.9	43.1	297.5	334.3	65.8	88.1
Apr	144.1	113.3	0.0	70.0	131.1	18.4	63.1	49.6
May	273.7	20.9	107.3	80.0	107.8	64.0	126.8	234.7
Jun	38.4	261.9	221.6	35.1	120.1	68.8	71.4	248.1
Jul	75.6	43.6	77.0	37.5	18.2	169.7	50.2	142.6
Aug	229.7	374.9	300.9	386.1	119.7	0.0	168.8	63.8
Sep	50.8	204.0	114.4	155.3	120.7	109.4	67.9	246.7
Oct	170.9	425.3	791.4	184.4	380.1	328.1	189.9	160.0
Nov	479.5	360.9	500.9	155.0	680.7	503.4	585.2	291.3
Dec	1028.6	500.0	977.9	437.5	650.2	498.6	538.9	830.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก ง.

ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
พิกัด 8.60/99.80 (Lat/Lon) ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm)
ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ ง.1 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2565 (2022)

เดือน	ปี									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	300.4	100.6	30.2	225.4	460.4	148.3	72.7	125.7	129.0	402.9
Feb	61.1	0.6	0.0	0.0	39.7	13.6	3.3	66.5	66.8	3.8
Mar	18.4	21.1	4.0	0.0	0.0	42.9	20.7	185.5	0.0	144.9
Apr	23.8	139.7	0.0	38.6	182.6	99.4	84.1	309.1	25.1	177.3
May	124.9	216.4	291.9	184.1	327.4	159.0	182.4	236.4	121.0	91.1
Jun	62.3	108.6	126.6	67.9	88.9	31.5	26.0	65.7	35.2	152.1
Jul	126.6	112.8	141.7	14.9	98.5	29.4	93.9	81.4	55.0	51.7
Aug	31.9	65.0	52.1	167.6	124.5	38.1	44.0	89.5	61.0	107.6
Sep	167.2	155.6	313.8	93.1	115.2	65.4	70.5	88.1	43.3	313.7
Oct	74.8	490.4	477.5	286.8	101.2	501.8	638.6	72.6	500.0	451.5
Nov	886.6	472.6	562.4	351.6	1062.3	424.9	295.7	182.5	358.7	635.7
Dec	322.1	461.3	258.6	1020.2	128.7	22.2	353.5	265.7	437.7	504.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ง.2 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2566 (2023) ถึงปี 2575 (2032)

เดือน	ปี									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jan	45.5	235.6	102.2	105.5	48.8	140.9	214.3	408.7	0.0	264.7
Feb	7.7	27.8	57.6	7.5	0.0	371.6	94.6	0.0	0.0	23.7
Mar	245.9	58.8	3.6	7.7	2.8	41.9	289.0	324.7	63.9	85.6
Apr	95.3	70.9	98.8	77.7	0.0	48.0	89.9	12.6	43.3	34.0
May	190.0	42.9	219.7	16.8	86.1	64.3	86.5	51.4	101.8	188.4
Jun	24.4	89.6	30.0	204.9	173.3	27.4	93.9	53.8	55.8	194.1
Jul	60.4	153.8	53.1	30.6	54.1	26.3	12.8	119.2	35.3	100.2
Aug	64.9	134.1	127.5	208.1	167.0	214.3	66.4	0.0	93.7	35.4
Sep	39.4	213.4	35.9	143.8	80.7	109.5	85.1	77.1	47.9	174.0
Oct	532.7	240.4	187.1	465.8	866.7	202.0	416.2	359.3	208.0	175.2
Nov	720.8	963.4	533.7	401.8	557.5	172.6	757.7	560.4	651.4	324.2
Dec	198.3	191.9	733.1	356.4	696.9	311.8	463.4	355.3	384.1	591.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.3 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2576 (2033) ถึงปี 2585 (2042)

เดือน	ปี									
	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Jan	95.5	113.6	178.1	249.0	343.0	251.2	220.1	838.5	1026.9	190.5
Feb	103.0	0.0	165.8	6.6	29.2	8.3	0.0	40.2	39.6	38.1
Mar	14.6	149.0	27.5	88.5	44.8	93.5	88.4	1358.1	84.7	12.8
Apr	77.3	19.9	32.4	118.3	70.3	144.6	18.4	0.0	52.6	26.2
May	44.3	10.8	167.4	372.0	48.5	103.8	92.9	82.2	27.9	125.9
Jun	22.0	47.7	233.9	87.1	27.3	5.6	41.1	41.3	62.4	61.0
Jul	73.2	40.0	63.4	42.6	53.9	93.3	54.0	23.2	49.5	164.1
Aug	37.7	26.8	68.5	54.1	30.3	250.8	159.4	55.3	104.5	41.6
Sep	99.2	101.9	75.9	75.7	24.4	1006.9	139.8	27.5	154.4	184.8
Oct	290.5	324.8	363.7	126.6	125.8	263.0	217.1	288.6	219.3	57.2
Nov	411.5	162.6	180.1	403.7	656.6	471.9	875.1	285.7	360.3	893.1
Dec	329.4	705.6	341.9	320.0	133.3	211.9	461.3	520.0	337.2	360.9

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.4 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2586 (2043) ถึงปี 2595 (2052)

เดือน	ปี									
	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
Jan	63.8	19.2	142.9	292.0	94.1	46.1	79.7	81.8	255.5	28.9
Feb	0.4	0.0	0.0	24.8	8.5	2.1	41.4	41.6	2.3	4.8
Mar	14.6	2.8	0.0	0.0	29.8	14.4	128.9	0.0	100.7	170.8
Apr	153.7	0.0	42.5	200.9	109.4	92.6	340.1	27.6	195.1	104.9
May	218.1	294.2	185.5	329.9	160.3	183.9	238.2	121.9	91.8	191.4
Jun	106.4	124.1	66.5	87.1	30.9	25.5	50.5	34.5	149.1	23.9
Jul	146.3	183.8	19.3	127.8	38.1	121.7	105.5	71.4	67.0	78.3
Aug	84.9	68.1	219.0	162.6	49.7	57.5	116.9	79.7	140.6	84.7
Sep	171.9	346.7	102.8	127.3	72.2	77.9	97.3	47.9	346.6	43.6
Oct	374.7	364.9	219.2	77.4	383.4	487.9	55.4	382.1	345.0	407.0
Nov	476.1	566.5	354.2	1070.1	428.0	297.9	183.8	361.4	640.4	726.1
Dec	516.9	289.7	1143.2	144.2	24.8	396.1	297.7	490.4	564.8	222.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.5 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2596 (2053) ถึงปี 2605 (2062)

เดือน	ปี									
	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062
Jan	149.4	64.8	66.9	30.9	89.3	135.9	259.2	0.0	167.8	60.5
Feb	17.3	35.9	4.7	0.0	231.5	58.9	0.0	0.0	14.8	64.2
Mar	40.8	2.5	5.3	1.9	29.1	200.7	225.6	44.4	59.4	10.2
Apr	78.0	108.7	85.5	0.0	52.8	98.9	13.9	47.6	37.4	85.0
May	43.2	221.4	16.9	86.8	64.8	87.2	51.8	102.6	189.9	44.6
Jun	87.8	29.4	200.7	169.8	26.9	92.0	52.7	54.7	190.2	21.5
Jul	199.4	68.9	39.7	70.1	34.1	16.6	154.6	45.8	129.9	94.9
Aug	186.1	166.6	271.9	218.2	280.0	86.8	0.0	122.4	46.2	49.3
Sep	235.8	39.6	158.9	89.2	121.0	94.0	85.2	52.9	192.2	109.6
Oct	183.7	143.0	355.9	662.2	154.3	318.1	274.5	158.9	133.9	222.0
Nov	970.5	537.7	404.7	561.6	173.8	763.3	564.5	656.2	326.6	414.5
Dec	215.0	821.5	399.3	780.9	349.4	519.2	398.2	430.3	663.0	369.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๖.6 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2606 (2063) ถึงปี 2615 (2072)

เดือน	ปี									
	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072
Jan	72.0	112.9	157.9	217.6	159.3	139.6	531.8	651.3	282.0	94.4
Feb	0.0	103.3	4.1	18.2	5.1	0.0	25.0	24.7	52.6	0.5
Mar	103.5	19.1	61.5	31.1	64.9	61.4	943.5	58.9	18.9	21.7
Apr	21.8	35.7	130.2	77.4	159.1	20.3	0.0	57.9	34.8	203.8
May	10.9	168.7	374.9	48.9	104.6	93.6	82.8	28.1	155.6	269.6
Jun	46.7	229.2	85.3	26.8	5.5	40.3	40.5	61.1	79.6	138.8
Jul	51.8	82.3	55.3	69.9	121.0	70.0	30.1	64.2	180.2	160.6
Aug	35.0	89.5	70.6	39.6	327.7	208.2	72.2	136.5	57.4	117.0
Sep	112.5	83.9	83.6	27.0	1112.4	154.4	30.4	170.5	237.1	220.6
Oct	248.2	277.9	96.8	96.1	200.9	165.9	220.5	167.6	68.3	447.8
Nov	163.8	181.4	406.7	661.4	475.3	881.5	287.8	362.9	796.5	424.6
Dec	790.7	383.1	358.6	149.4	255.1	516.9	582.7	377.9	451.9	647.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ง.7 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4
Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่ม
โอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2616 (2073) ถึงปี 2625 (2082)

เดือน	ปี									
	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082
Jan	28.4	211.6	432.2	139.2	68.2	118.0	121.1	378.2	42.8	221.2
Feb	0.0	0.0	34.2	11.7	2.9	57.2	57.5	3.2	6.6	24.0
Mar	4.1	0.0	0.0	44.2	21.3	191.0	0.0	149.2	253.2	60.5
Apr	0.0	56.3	266.3	145.0	122.7	450.8	36.6	258.6	139.0	103.5
May	363.6	229.3	407.8	198.1	227.3	294.5	150.7	113.5	236.6	53.4
Jun	161.9	86.8	113.6	40.3	33.3	65.9	45.0	194.5	31.2	114.6
Jul	201.8	21.2	140.3	41.8	133.6	115.8	78.3	73.6	86.0	218.9
Aug	93.9	302.0	224.3	68.6	79.3	161.1	109.8	193.9	116.8	256.6
Sep	445.0	132.0	163.4	92.7	100.0	124.9	61.4	444.9	55.9	302.6
Oct	436.0	261.9	92.4	458.2	583.1	66.3	456.6	412.2	486.4	219.6
Nov	505.2	315.8	954.3	381.7	265.7	163.9	322.3	571.1	647.5	865.5
Dec	362.8	1431.5	180.6	31.1	496.0	372.8	614.1	707.2	278.2	269.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.8 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ (Enhanced Storm) ตั้งแต่ปี 2626 (2083) ถึงปี 2633 (2090)

เดือน	ปี							
	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Jan	95.9	99.1	45.8	132.2	201.2	383.7	0.0	248.4
Feb	49.5	6.5	0.0	319.7	81.4	0.0	0.0	20.4
Mar	3.7	7.9	2.9	43.1	297.5	334.3	65.8	88.1
Apr	144.1	113.3	0.0	70.0	131.1	18.4	63.1	49.6
May	273.7	20.9	107.3	80.0	107.8	64.0	126.8	234.7
Jun	38.4	261.9	221.6	35.1	120.1	68.8	71.4	248.1
Jul	75.6	43.6	77.0	37.5	18.2	169.7	50.2	142.6
Aug	229.7	374.9	300.9	386.1	119.7	0.0	168.8	63.8
Sep	50.8	204.0	114.4	155.3	120.7	109.4	67.9	246.7
Oct	170.9	425.3	791.4	184.4	380.1	328.1	189.9	160.0
Nov	479.5	360.9	500.9	155.0	680.7	503.4	585.2	291.3
Dec	1028.6	500.0	977.9	437.5	650.2	498.6	538.9	830.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก จ.

ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
พิกัด 8.60/99.80 (Lat/Lon) ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน(Add 3 rain days)
ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ จ.1 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2565 (2022)

เดือน	ปี									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	300.4	100.6	30.2	225.4	460.4	148.3	72.7	125.7	129.0	402.9
Feb	61.1	0.6	0.0	0.0	39.7	13.6	3.3	66.5	66.8	3.8
Mar	18.4	21.1	4.0	0.0	0.0	42.9	20.7	185.5	0.0	144.9
Apr	23.8	139.7	0.0	38.6	182.6	99.4	84.1	309.1	25.1	177.3
May	124.9	216.4	291.9	184.1	327.4	159.0	182.4	236.4	121.0	91.1
Jun	62.3	108.6	126.6	67.9	88.9	31.5	26.0	51.5	35.2	152.1
Jul	126.6	112.8	141.7	14.9	98.5	29.4	93.9	81.4	55.0	51.7
Aug	31.9	65.0	52.1	167.6	124.5	38.1	44.0	89.5	61.0	107.6
Sep	167.2	155.6	313.8	93.1	115.2	65.4	70.5	86.2	43.3	313.7
Oct	74.8	490.4	477.5	286.8	101.2	501.8	638.6	57.7	500.0	451.5
Nov	886.6	472.6	562.4	351.6	1062.3	424.9	295.7	209.4	358.7	635.7
Dec	322.1	461.3	258.6	1020.2	128.7	22.2	353.5	231.4	437.7	504.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.2 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2566 (2023) ถึงปี 2575 (2032)

เดือน	ปี									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jan	45.5	235.6	102.2	105.5	48.8	140.9	214.3	408.7	0.0	264.7
Feb	7.7	27.8	57.6	7.5	0.0	371.6	94.6	0.0	0.0	23.7
Mar	245.9	58.8	3.6	7.7	2.8	41.9	289.0	324.7	63.9	85.6
Apr	95.3	70.9	98.8	77.7	0.0	48.0	89.9	12.6	43.3	34.0
May	190.0	42.9	219.7	16.8	86.1	64.3	86.5	51.4	101.8	188.4
Jun	24.4	89.6	30.0	204.9	173.3	27.4	93.9	53.8	55.8	194.1
Jul	60.4	153.8	53.1	30.6	54.1	26.3	12.8	119.2	35.3	100.2
Aug	64.9	142.4	127.5	208.1	167.0	214.3	66.4	0.0	93.7	35.4
Sep	39.4	213.4	35.9	143.8	80.7	109.5	85.1	77.1	47.9	174.0
Oct	532.7	240.4	187.1	465.8	866.7	202.0	416.2	359.3	208.0	175.2
Nov	720.8	963.4	533.7	401.8	557.5	172.6	757.7	560.4	651.4	324.2
Dec	198.3	191.9	733.1	356.4	696.9	311.8	463.4	355.3	384.1	591.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.3 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2576 (2033) ถึงปี 2585 (2042)

เดือน	ปี									
	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Jan	95.5	113.6	178.1	249.0	343.0	251.2	220.1	838.5	1026.9	190.5
Feb	103.0	0.0	165.8	6.6	29.2	8.3	0.0	40.2	39.6	38.1
Mar	14.6	149.0	27.5	88.5	44.8	93.5	88.4	1358.1	84.7	12.8
Apr	77.3	19.9	32.4	118.3	70.3	144.6	18.4	0.0	52.6	26.2
May	44.3	10.8	167.4	372.0	48.5	103.8	92.9	82.2	27.9	125.9
Jun	22.0	47.7	233.9	87.1	27.3	5.6	41.1	41.3	62.4	61.0
Jul	73.2	40.0	63.4	42.6	53.9	93.3	54.0	23.2	49.5	164.1
Aug	37.7	26.8	68.5	54.1	30.3	250.8	159.4	55.3	104.5	41.6
Sep	99.2	101.9	75.9	75.7	24.4	1006.9	139.8	27.5	154.4	184.8
Oct	290.5	324.8	363.7	126.6	125.8	263.0	217.1	288.6	219.3	57.2
Nov	411.5	162.6	180.1	403.7	656.6	471.9	875.1	285.7	360.3	893.1
Dec	329.4	705.6	341.9	320.0	133.3	211.9	461.3	520.0	337.2	360.9

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.4 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2586 (2043) ถึงปี 2595 (2052)

เดือน	ปี									
	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
Jan	63.8	19.2	142.9	292.0	94.1	46.1	79.7	81.8	255.5	28.9
Feb	0.4	0.0	0.0	24.8	8.5	2.1	41.4	41.6	2.3	4.8
Mar	14.6	2.8	0.0	0.0	29.8	14.4	128.9	0.0	100.7	170.8
Apr	153.7	0.0	42.5	200.9	109.4	92.6	340.1	27.6	195.1	104.9
May	218.1	294.2	185.5	329.9	160.3	183.9	238.2	121.9	91.8	191.4
Jun	106.4	124.1	66.5	87.1	30.9	25.5	50.5	34.5	149.1	23.9
Jul	146.3	183.8	19.3	127.8	38.1	121.7	105.5	71.4	67.0	78.3
Aug	84.9	68.1	219.0	162.6	49.7	57.5	116.9	79.7	140.6	84.7
Sep	171.9	346.7	102.8	127.3	72.2	77.9	97.3	47.9	346.6	43.6
Oct	374.7	364.9	219.2	77.4	383.4	487.9	55.4	382.1	345.0	407.0
Nov	476.1	566.5	354.2	1070.1	428.0	297.9	183.8	361.4	640.4	726.1
Dec	516.9	289.7	1143.2	144.2	24.8	396.1	297.7	490.4	564.8	222.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.5 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2596 (2053) ถึงปี 2605 (2062)

เดือน	ปี									
	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062
Jan	149.4	64.8	66.9	30.9	89.3	135.9	259.2	0.0	167.8	60.5
Feb	17.3	35.9	4.7	0.0	231.5	58.9	0.0	0.0	14.8	64.2
Mar	40.8	2.5	5.3	1.9	29.1	200.7	225.6	44.4	59.4	10.2
Apr	78.0	108.7	85.5	0.0	52.8	98.9	13.9	47.6	37.4	85.0
May	43.2	221.4	16.9	86.8	64.8	87.2	51.8	102.6	189.9	44.6
Jun	87.8	29.4	200.7	169.8	26.9	92.0	52.7	54.7	190.2	21.5
Jul	199.4	68.9	39.7	70.1	34.1	16.6	154.6	45.8	129.9	94.9
Aug	186.1	166.6	271.9	218.2	280.0	86.8	0.0	122.4	46.2	49.3
Sep	235.8	39.6	158.9	89.2	121.0	94.0	85.2	52.9	192.2	109.6
Oct	183.7	143.0	355.9	662.2	154.3	318.1	274.5	158.9	133.9	222.0
Nov	970.5	537.7	404.7	561.6	173.8	763.3	564.5	656.2	326.6	414.5
Dec	215.0	821.5	399.3	780.9	349.4	288.0	398.2	430.3	663.0	369.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.6 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2606 (2063) ถึงปี 2615 (2072)

เดือน	ปี									
	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072
Jan	72.0	112.9	157.9	217.6	159.3	139.6	531.8	651.3	282.0	94.4
Feb	0.0	103.3	4.1	18.2	5.1	0.0	25.0	24.7	52.6	0.5
Mar	103.5	19.1	61.5	31.1	64.9	61.4	943.5	58.9	18.9	21.7
Apr	21.8	35.7	130.2	77.4	159.1	20.3	0.0	57.9	34.8	203.8
May	10.9	168.7	374.9	48.9	104.6	93.6	82.8	28.1	155.6	269.6
Jun	46.7	229.2	85.3	26.8	5.5	40.3	40.5	61.1	79.6	138.8
Jul	51.8	82.3	55.3	69.9	121.0	70.0	30.1	64.2	180.2	160.6
Aug	35.0	89.5	70.6	39.6	327.7	208.2	72.2	136.5	57.4	117.0
Sep	112.5	83.9	83.6	27.0	1112.4	154.4	30.4	170.5	237.1	220.6
Oct	248.2	277.9	96.8	96.1	200.9	165.9	220.5	167.6	68.3	447.8
Nov	163.8	181.4	406.7	661.4	475.3	881.5	287.8	362.9	796.5	424.6
Dec	790.7	383.1	358.6	149.4	237.5	516.9	582.7	377.9	451.9	647.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.7 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2616 (2073) ถึงปี 2625 (2082)

เดือน	ปี									
	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082
Jan	28.4	211.6	432.2	139.2	68.2	118.0	121.1	378.2	42.8	221.2
Feb	0.0	0.0	34.2	11.7	2.9	57.2	57.5	3.2	6.6	24.0
Mar	4.1	0.0	0.0	44.2	21.3	191.0	0.0	149.2	253.2	60.5
Apr	0.0	56.3	266.3	145.0	122.7	450.8	36.6	258.6	139.0	103.5
May	363.6	229.3	407.8	198.1	227.3	294.5	150.7	113.5	236.6	53.4
Jun	161.9	86.8	113.6	40.3	33.3	65.9	45.0	194.5	31.2	114.6
Jul	201.8	21.2	140.3	41.8	133.6	115.8	78.3	73.6	86.0	218.9
Aug	93.9	302.0	224.3	68.6	79.3	161.1	109.8	193.9	116.8	256.6
Sep	445.0	132.0	163.4	92.7	100.0	124.9	61.4	444.9	55.9	302.6
Oct	436.0	261.9	92.4	458.2	583.1	66.3	456.6	412.2	486.4	219.6
Nov	505.2	315.8	954.3	381.7	265.7	163.9	322.3	571.1	647.5	865.5
Dec	362.8	1431.5	180.6	31.1	496.0	372.8	614.1	707.2	278.2	269.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.8 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 3 วัน (Add 3 rain days) ตั้งแต่ปี 2626 (2083) ถึงปี 2633 (2090)

เดือน	ปี							
	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Jan	95.9	99.1	45.8	132.2	201.2	383.7	0.0	248.4
Feb	49.5	6.5	0.0	319.7	81.4	0.0	0.0	20.4
Mar	3.7	7.9	2.9	43.1	297.5	334.3	65.8	88.1
Apr	144.1	113.3	0.0	70.0	131.1	18.4	63.1	49.6
May	273.7	20.9	107.3	80.0	107.8	64.0	126.8	234.7
Jun	38.4	261.9	221.6	35.1	120.1	68.8	71.4	248.1
Jul	75.6	43.6	77.0	37.5	18.2	169.7	50.2	142.6
Aug	229.7	374.9	300.9	386.1	119.7	0.0	168.8	63.8
Sep	50.8	204.0	114.4	155.3	120.7	109.4	67.9	246.7
Oct	170.9	425.3	791.4	184.4	380.1	328.1	189.9	160.0
Nov	479.5	360.9	500.9	155.0	680.7	503.4	585.2	291.3
Dec	1028.6	500.0	977.9	437.5	650.2	498.6	538.9	830.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก ฉ.

ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2
พิกัด 8.60/99.80 (Lat/Lon) ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day)
ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ ๑.1 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2565 (2022)

เดือน	ปี									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	300.4	100.6	30.2	225.4	460.4	148.3	72.7	125.7	129.0	402.9
Feb	61.1	0.6	0.0	0.0	39.7	13.6	3.3	66.5	66.8	3.8
Mar	18.4	21.1	4.0	0.0	0.0	42.9	20.7	185.5	0.0	144.9
Apr	23.8	139.7	0.0	38.6	182.6	99.4	84.1	309.1	25.1	177.3
May	124.9	216.4	291.9	184.1	327.4	159.0	182.4	236.4	121.0	91.1
Jun	62.3	108.6	126.6	67.9	88.9	31.5	26.0	51.5	35.2	152.1
Jul	126.6	112.8	141.7	14.9	98.5	29.4	93.9	81.4	55.0	51.7
Aug	31.9	65.0	52.1	167.6	124.5	38.1	44.0	89.5	61.0	107.6
Sep	167.2	155.6	313.8	93.1	115.2	65.4	70.5	86.2	43.3	313.7
Oct	74.8	490.4	477.5	286.8	101.2	501.8	638.6	57.7	500.0	451.5
Nov	886.6	472.6	562.4	351.6	1062.3	424.9	295.7	209.4	358.7	635.7
Dec	322.1	461.3	258.6	1020.2	128.7	22.2	353.5	231.4	437.7	504.0

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ จ.2 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2566 (2023) ถึงปี 2575 (2032)

เดือน	ปี									
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jan	45.5	235.6	102.2	105.5	48.8	140.9	214.3	408.7	0.0	264.7
Feb	7.7	27.8	57.6	7.5	0.0	371.6	94.6	0.0	0.0	23.7
Mar	245.9	58.8	3.6	7.7	2.8	41.9	289.0	324.7	63.9	85.6
Apr	95.3	70.9	98.8	77.7	0.0	48.0	89.9	12.6	43.3	34.0
May	190.0	42.9	219.7	16.8	86.1	64.3	86.5	51.4	101.8	188.4
Jun	24.4	89.6	30.0	204.9	173.3	27.4	93.9	53.8	55.8	194.1
Jul	60.4	153.8	53.1	30.6	54.1	26.3	12.8	119.2	35.3	100.2
Aug	64.9	142.4	127.5	208.1	167.0	214.3	66.4	0.0	93.7	35.4
Sep	39.4	213.4	35.9	143.8	80.7	109.5	85.1	77.1	47.9	174.0
Oct	532.7	240.4	187.1	465.8	866.7	202.0	416.2	359.3	208.0	175.2
Nov	720.8	963.4	533.7	401.8	557.5	172.6	757.7	560.4	651.4	324.2
Dec	198.3	191.9	733.1	356.4	696.9	311.8	463.4	355.3	384.1	591.6

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.3 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2576 (2033) ถึงปี 2585 (2042)

เดือน	ปี									
	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Jan	95.5	113.6	178.1	249.0	343.0	251.2	220.1	838.5	1026.9	190.5
Feb	103.0	0.0	165.8	6.6	29.2	8.3	0.0	40.2	39.6	38.1
Mar	14.6	149.0	27.5	88.5	44.8	93.5	88.4	1358.1	84.7	12.8
Apr	77.3	19.9	32.4	118.3	70.3	144.6	18.4	0.0	52.6	26.2
May	44.3	10.8	167.4	372.0	48.5	103.8	92.9	82.2	27.9	125.9
Jun	22.0	47.7	233.9	87.1	27.3	5.6	41.1	41.3	62.4	61.0
Jul	73.2	40.0	63.4	42.6	53.9	93.3	54.0	23.2	49.5	164.1
Aug	37.7	26.8	68.5	54.1	30.3	250.8	159.4	55.3	104.5	41.6
Sep	99.2	101.9	75.9	75.7	24.4	1006.9	139.8	27.5	154.4	184.8
Oct	290.5	324.8	363.7	126.6	125.8	263.0	217.1	288.6	219.3	57.2
Nov	411.5	162.6	180.1	403.7	656.6	471.9	875.1	285.7	360.3	893.1
Dec	329.4	705.6	341.9	320.0	133.3	211.9	461.3	520.0	337.2	360.9

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.4 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2586 (2043) ถึงปี 2595 (2052)

เดือน	ปี									
	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052
Jan	63.8	19.2	142.9	292.0	94.1	46.1	79.7	81.8	255.5	28.9
Feb	0.4	0.0	0.0	24.8	8.5	2.1	41.4	41.6	2.3	4.8
Mar	14.6	2.8	0.0	0.0	29.8	14.4	128.9	0.0	100.7	170.8
Apr	153.7	0.0	42.5	200.9	109.4	92.6	340.1	27.6	195.1	104.9
May	218.1	294.2	185.5	329.9	160.3	183.9	238.2	121.9	91.8	191.4
Jun	106.4	124.1	66.5	87.1	30.9	25.5	50.5	34.5	149.1	23.9
Jul	146.3	183.8	19.3	127.8	38.1	121.7	105.5	71.4	67.0	78.3
Aug	84.9	68.1	219.0	162.6	49.7	57.5	116.9	79.7	140.6	84.7
Sep	171.9	346.7	102.8	127.3	72.2	77.9	97.3	47.9	346.6	43.6
Oct	374.7	364.9	219.2	77.4	383.4	487.9	55.4	382.1	345.0	407.0
Nov	476.1	566.5	354.2	1070.1	428.0	297.9	183.8	361.4	640.4	726.1
Dec	516.9	289.7	1143.2	144.2	24.8	396.1	297.7	490.4	564.8	222.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๓.5 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2596 (2053) ถึงปี 2605 (2062)

เดือน	ปี									
	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062
Jan	149.4	64.8	66.9	30.9	89.3	135.9	259.2	0.0	167.8	60.5
Feb	17.3	35.9	4.7	0.0	231.5	58.9	0.0	0.0	14.8	64.2
Mar	35.8	2.5	5.3	1.9	29.1	200.7	225.6	44.4	59.4	10.2
Apr	78.0	108.7	85.5	0.0	52.8	98.9	13.9	47.6	37.4	85.0
May	43.2	221.4	16.9	86.8	64.8	87.2	51.8	102.6	189.9	44.6
Jun	87.8	29.4	200.7	169.8	26.9	92.0	52.7	54.7	190.2	21.5
Jul	199.4	68.9	39.7	70.1	34.1	16.6	154.6	45.8	129.9	94.9
Aug	186.1	166.6	271.9	218.2	280.0	86.8	0.0	122.4	46.2	49.3
Sep	235.8	39.6	158.9	89.2	121.0	94.0	85.2	52.9	192.2	109.6
Oct	183.7	143.0	355.9	662.2	154.3	318.1	274.5	158.9	133.9	222.0
Nov	970.5	537.7	404.7	561.6	173.8	763.3	564.5	656.2	326.6	414.5
Dec	215.0	821.5	399.3	780.9	349.4	519.2	398.2	430.3	663.0	369.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๖.6 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2606 (2063) ถึงปี 2615 (2072)

เดือน	ปี									
	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072
Jan	72.0	112.9	157.9	217.6	159.3	139.6	531.8	651.3	282.0	94.4
Feb	0.0	103.3	4.1	18.2	5.1	0.0	25.0	24.7	52.6	0.5
Mar	103.5	19.1	61.5	31.1	64.9	61.4	943.5	58.9	18.9	21.7
Apr	21.8	35.7	130.2	77.4	159.1	20.3	0.0	57.9	34.8	203.8
May	10.9	168.7	374.9	48.9	104.6	93.6	82.8	28.1	155.6	269.6
Jun	46.7	229.2	85.3	26.8	5.5	40.3	40.5	61.1	79.6	138.8
Jul	51.8	82.3	55.3	69.9	121.0	70.0	30.1	64.2	180.2	160.6
Aug	35.0	89.5	70.6	39.6	327.7	208.2	72.2	136.5	57.4	117.0
Sep	112.5	83.9	83.6	27.0	1112.4	154.4	30.4	170.5	237.1	220.6
Oct	248.2	277.9	96.8	96.1	200.9	165.9	220.5	167.6	68.3	447.8
Nov	163.8	181.4	406.7	661.4	475.3	881.5	287.8	362.9	796.5	424.6
Dec	790.7	383.1	358.6	149.4	237.5	516.9	582.7	377.9	451.9	647.3

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๗.7 ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2616 (2073) ถึงปี 2625 (2082)

เดือน	ปี									
	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082
Jan	28.4	211.6	432.2	139.2	68.2	118.0	121.1	378.2	42.8	221.2
Feb	0.0	0.0	34.2	11.7	2.9	57.2	57.5	3.2	6.6	24.0
Mar	4.1	0.0	0.0	44.2	21.3	191.0	0.0	149.2	253.2	60.5
Apr	0.0	56.3	266.3	145.0	122.7	450.8	36.6	258.6	139.0	103.5
May	363.6	229.3	407.8	198.1	227.3	294.5	150.7	113.5	236.6	53.4
Jun	161.9	86.8	113.6	40.3	33.3	65.9	45.0	194.5	31.2	114.6
Jul	201.8	21.2	140.3	41.8	133.6	115.8	78.3	73.6	86.0	218.9
Aug	93.9	302.0	224.3	68.6	79.3	161.1	109.8	193.9	116.8	256.6
Sep	445.0	132.0	163.4	92.7	100.0	124.9	61.4	444.9	55.9	302.6
Oct	436.0	261.9	92.4	458.2	583.1	66.3	456.6	412.2	486.4	219.6
Nov	505.2	315.8	954.3	381.7	265.7	163.9	322.3	571.1	647.5	865.5
Dec	362.8	1431.5	180.6	31.1	496.0	372.8	614.1	707.2	278.2	269.2

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ ๘.๘ ผลการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 ด้วยวิธี Delta Factor และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 วัน (Add 1 rain day) ตั้งแต่ปี 2626 (2083) ถึงปี 2633 (2090)

เดือน	ปี							
	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090
Jan	95.9	99.1	45.8	132.2	201.2	383.7	0.0	248.4
Feb	49.5	6.5	0.0	319.7	81.4	0.0	0.0	20.4
Mar	3.7	7.9	2.9	43.1	297.5	334.3	65.8	88.1
Apr	144.1	113.3	0.0	70.0	131.1	18.4	63.1	49.6
May	273.7	20.9	107.3	80.0	107.8	64.0	126.8	234.7
Jun	38.4	261.9	221.6	35.1	120.1	68.8	71.4	248.1
Jul	75.6	43.6	77.0	37.5	18.2	169.7	50.2	142.6
Aug	229.7	374.9	300.9	386.1	119.7	0.0	168.8	63.8
Sep	50.8	204.0	114.4	155.3	120.7	109.4	67.9	246.7
Oct	170.9	425.3	791.4	184.4	380.1	328.1	189.9	160.0
Nov	479.5	360.9	500.9	155.0	680.7	503.4	585.2	291.3
Dec	1028.6	500.0	977.9	437.5	650.2	498.6	538.9	830.1

หมายเหตุ : หน่วยของปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการย่อส่วน
ด้วยวิธีเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor) และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง แบบต่างๆ
ตั้งแต่ปี 2556 (2013) ถึงปี 2633 (2090)

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำ การย่อส่วนด้วยวิธีเซลล์ แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2013	5	583	7	221	2	196
2014	14	505	7	221	7	170
2015	7	458	6	395	8	187
2016	4	486	7	480	4	192
2017	5	670	7	273	6	224
2018	17	430	13	356	4	113
2019	10	581	10	285	4	216
2020	4	310	7	190	6	133
2021	4	339	4	234	6	102
2022	6	393	4	362	18	319
2023	17	601	4	314	6	154
2024	9	655	4	165	5	150
2025	10	701	10	505	5	156
2026	5	297	10	297	5	153
2027	22	1270	4	278	4	229
2028	4	345	10	273	6	149
2029	9	447	7	436	5	289
2030	12	370	8	296	9	240
2031	10	471	4	194	6	139
2032	4	356	4	236	2	234
2033	11	326	4	242	5	138
2034	17	555	8	165	6	156
2035	7	295	13	265	17	176

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำ
การย่อส่วนด้วยวิธีเซลล์ แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2036	12	396	6	213	7	170
2037	12	404	9	290	4	252
2038	15	711	8	436	8	368
2039	12	652	6	230	12	219
2040	11	1293	9	352	7	294
2041	3	565	5	339	9	263
2042	5	589	7	249	2	124
2043	14	474	5	240	7	183
2044	6	397	7	389	13	268
2045	4	544	7	538	7	216
2046	5	675	6	225	5	208
2047	9	355	11	314	3	100
2048	9	441	4	217	6	183
2049	4	300	2	189	6	133
2050	4	380	4	181	3	144
2051	6	396	3	297	4	229
2052	17	606	4	242	7	132
2053	9	660	11	256	2	125
2054	10	786	10	509	5	119
2055	10	299	5	227	7	213
2056	22	1076	4	312	4	256
2057	11	314	4	215	6	184
2058	9	450	7	396	3	223

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำ
การย่อยส่วนด้วยวิธีเดลต้า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2059	12	343	9	242	6	231
2060	11	468	4	196	8	172
2061	4	399	2	262	4	238
2062	10	365	4	217	5	140
2063	17	621	6	175	7	126
2064	11	287	7	225	10	153
2065	5	348	6	213	7	180
2066	9	361	4	254	9	184
2067	17	820	8	482	8	371
2068	11	617	6	241	12	221
2069	11	898	10	256	9	223
2070	3	359	9	265	3	207
2071	13	651	7	311	2	184
2072	14	456	5	300	7	212
2073	7	416	8	360	9	325
2074	4	681	7	674	4	180
2075	5	602	6	200	3	195
2076	11	375	9	316	3	133
2077	9	526	10	400	4	194
2078	4	409	2	236	8	179
2079	4	475	4	216	10	155
2080	3	371	6	353	4	339
2081	8	453	4	289	6	158

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำ
การย่อส่วนด้วยวิธีเดลต้า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบสัดส่วน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2082	9	589	3	167	4	148
2083	10	984	10	454	5	143
2084	7	293	5	270	10	266
2085	14	786	4	390	7	368
2086	11	394	4	297	6	253
2087	9	402	7	394	5	298
2088	12	334	10	330	8	278
2089	11	423	8	215	4	175
2090	4	499	2	328	4	212

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการย่อส่วนด้วยวิธีเซลล์ แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2013	5	579	7	221	2	197
2014	14	527	5	226	7	158
2015	7	491	6	397	9	267
2016	4	511	7	462	7	211
2017	5	613	6	256	8	235
2018	11	430	9	342	5	125
2019	8	590	4	204	6	173
2020	4	310	2	170	6	117
2021	4	333	4	256	3	146
2022	6	388	4	374	3	252
2023	8	473	4	325	6	153
2024	9	610	11	292	5	152
2025	10	705	10	500	5	162
2026	3	318	5	179	5	163
2027	22	1258	4	302	4	229
2028	4	331	11	285	6	145
2029	9	476	7	392	5	289
2030	12	375	8	331	9	248
2031	11	480	4	190	8	167
2032	4	335	2	254	4	239
2033	4	239	5	220	5	139
2034	17	546	6	167	7	153
2035	7	309	11	252	8	150

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Event) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการข่อส่วนด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2036	5	337	6	231	7	183
2037	9	379	6	253	4	225
2038	15	703	8	434	8	353
2039	11	649	12	252	6	220
2040	11	1287	2	331	9	259
2041	3	603	3	332	9	284
2042	5	583	7	247	5	125
2043	14	453	5	263	7	158
2044	6	400	7	380	8	206
2045	4	593	7	503	2	159
2046	5	620	6	256	4	234
2047	9	344	11	317	3	97
2048	9	439	11	336	4	206
2049	4	302	7	209	6	124
2050	4	368	4	178	3	147
2051	6	391	3	314	6	236
2052	17	588	4	241	4	130
2053	11	646	6	200	3	133
2054	12	807	10	505	5	118
2055	10	284	7	234	5	221
2056	22	1058	4	358	4	257
2057	11	322	2	230	6	185
2058	9	478	7	362	3	250

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2059	12	321	9	250	6	239
2060	11	468	8	198	4	192
2061	4	359	2	302	4	225
2062	5	246	4	217	5	140
2063	10	345	6	257	6	195
2064	13	287	7	223	17	177
2065	5	340	6	232	7	197
2066	12	433	4	228	9	181
2067	15	799	8	469	8	356
2068	11	605	12	252	11	241
2069	11	873	4	256	9	249
2070	3	352	9	284	3	207
2071	5	519	7	307	2	185
2072	14	450	5	350	7	158
2073	7	431	6	359	9	339
2074	4	785	7	599	7	187
2075	5	505	5	313	8	265
2076	11	366	9	298	5	95
2077	9	534	11	436	4	198
2078	4	359	2	241	3	188
2079	4	450	4	227	10	169
2080	3	409	6	345	6	324
2081	17	510	4	294	4	167

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มโอกาสเกิดพายุ

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2082	9	512	4	189	3	177
2083	10	1001	10	446	5	146
2084	5	330	3	277	4	270
2085	22	1126	4	490	4	323
2086	11	410	2	288	6	255
2087	9	450	3	337	7	328
2088	12	316	6	306	8	306
2089	11	431	8	270	4	169
2090	4	415	2	413	4	217

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2013	5	666	9	195	5	125
2014	14	530	5	187	9	169
2015	6	453	7	421	15	189
2016	4	423	7	418	9	256
2017	5	769	6	256	8	187
2018	9	404	10	317	2	89
2019	10	464	6	249	11	248
2020	4	312	2	147	6	135
2021	4	295	4	188	3	164
2022	6	451	6	256	3	231
2023	8	579	4	252	6	165
2024	9	752	11	292	3	115
2025	10	611	10	579	5	124
2026	9	340	4	236	4	154
2027	19	1163	4	242	4	199
2028	4	552	10	244	5	171
2029	9	513	7	438	5	310
2030	12	381	9	276	8	203
2031	10	531	4	223	7	134
2032	4	310	4	271	2	203
2033	10	284	4	239	5	159
2034	10	287	6	199	6	136
2035	7	235	11	230	7	229

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อส่วนด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2036	5	396	6	174	6	154
2037	9	412	4	289	9	199
2038	12	674	8	427	8	422
2039	11	691	12	252	6	243
2040	11	1385	10	292	9	275
2041	3	387	9	301	4	232
2042	5	666	9	195	5	125
2043	14	530	5	187	9	169
2044	6	453	7	421	15	189
2045	4	423	7	418	9	256
2046	5	769	6	256	8	187
2047	9	404	10	317	2	89
2048	10	464	6	249	11	248
2049	4	312	2	147	6	135
2050	4	295	4	188	3	164
2051	6	451	6	256	3	231
2052	8	579	4	252	6	165
2053	9	752	11	292	3	115
2054	10	611	10	579	5	124
2055	9	340	4	236	4	154
2056	19	1163	4	242	4	199
2057	4	552	10	244	5	171
2058	9	513	7	438	5	310

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แพกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2059	12	381	9	276	8	203
2060	10	531	4	223	7	134
2061	4	310	4	271	2	203
2062	10	284	4	239	5	159
2063	10	287	6	199	6	136
2064	7	235	11	230	7	229
2065	5	396	6	174	6	154
2066	9	412	4	289	9	199
2067	12	674	8	427	8	422
2068	11	691	12	252	6	243
2069	11	1385	10	292	9	275
2070	3	387	9	301	4	232
2071	5	666	9	195	5	125
2072	14	530	5	187	9	169
2073	6	453	7	421	15	189
2074	4	423	7	418	9	256
2075	5	769	6	256	8	187
2076	9	404	10	317	2	89
2077	10	464	6	249	11	248
2078	4	312	2	147	6	135
2079	4	295	4	188	3	164
2080	6	451	6	256	3	231
2081	8	579	4	252	6	165

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ
 ที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แฟกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่าง
 แบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน

ปี	ฝนสูงสุด		ฝนสูงสุดอันดับ 2		ฝนสูงสุดอันดับ 3	
	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ	ระยะเวลา	ปริมาณ
	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)	(วัน)	(มม.)
2082	9	752	11	292	3	115
2083	10	611	10	579	5	124
2084	9	340	4	236	4	154
2085	19	1163	4	242	4	199
2086	4	552	10	244	5	171
2087	9	513	7	438	5	310
2088	12	381	9	276	8	203
2089	10	531	4	223	7	134
2090	4	310	4	271	2	203

หมายเหตุ : ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Extreme Rain) จากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ทำการย่อยด้วยวิธีเซลล์ค่า แฟกเตอร์ และกระจายปริมาณฝนส่วนต่างแบบเพิ่มวันที่ฝนตกเดือนละ 1 และ 3 วัน มีค่าเท่ากัน จึงใช้ตารางที่ ข.3 ร่วมกัน

ภาคผนวก ข.

การหาค่าเดลต้าแฟกเตอร์ (Delta Factor)

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือนของจากแบบจำลองสภาพ
ภูมิอากาศ ช่วงปีในอนาคต เฟส 1 (29ปีแรก)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	...	Oct	Nov	Dec
2013	17.85	28.18	187.76	878.15		357.54	84.65	35.62
2014	57.47	252.67	921.02	1140.00		695.32	174.15	93.26
2015	203.90	515.89	131.41	786.12		240.51	184.97	2388.21
2016	7.29	126.75	971.14	624.94		1029.93	113.04	230.50
2017	204.31	17.38	753.20	643.07		272.11	246.22	437.48
2018	315.41	20.91	239.21	1290.24		713.34	93.63	117.80
2019	86.14	267.19	1066.75	1057.51		391.87	197.61	13.19
...								
2035	339.25	107.02	55.00	464.31		819.37	346.28	320.20
2036	89.06	2.45	325.87	894.35		200.77	247.92	173.38
2037	296.55	314.80	710.48	828.75		284.64	507.52	9.51
2038	158.60	279.17	21.36	782.68		83.74	378.12	265.21
2039	244.86	22.58	207.43	766.12		338.01	274.21	211.94
2040	129.94	29.29	154.73	1113.41		230.37	225.81	286.50
2041	3.29	102.07	566.28	1014.75		288.08	295.45	424.18
ค่าเฉลี่ย	174.88	154.18	368.47	847.38	...	365.78	277.13	267.62

ตารางที่ ๗.2 ตารางแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยของฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพ
ภูมิอากาศโลก ช่วงปีฐาน

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	...	Oct	Nov	Dec
1984	651.12	21.26	274.86	1159.34		40.85	264.25	237.94
1985	51.20	378.58	290.08	1090.01		359.07	437.24	119.21
1986	41.12	420.75	559.23	1294.75		269.22	409.38	63.53
1987	12.03	279.59	384.36	356.52		227.19	127.01	11.81
1988	3.71	686.36	415.94	604.16		531.66	438.95	117.73
1989	147.03	203.87	186.75	1026.29		408.85	36.21	29.85
1990	40.22	334.57	597.21	781.74		68.56	490.71	125.42
...								
2006	90.86	233.30	518.79	989.94		667.78	71.69	0.99
2007	17.09	535.82	398.29	809.31		144.84	166.32	244.51
2008	32.47	64.66	429.85	899.34		524.02	87.25	225.33
2009	51.59	35.77	286.97	745.38		200.86	81.47	247.42
2010	166.42	28.63	582.42	840.41		78.45	301.94	246.59
2011	50.40	15.91	626.88	1301.19		67.26	644.26	111.19
2012	121.44	169.05	13.87	984.71		174.16	349.92	1492.78
ค่าเฉลี่ย	119.80	246.35	394.91	827.87		290.87	317.97	233.09

จากสมการที่ 2.1 จะได้ว่า Delta factor ของเดือนมกราคม เท่ากับ 46% โดยคิดจาก

$$\frac{174.88-119.80}{119.80} \times 100\% = 46\% \text{ และสำหรับ Delta factor ของเดือนอื่นๆก็คิดแบบเดียวกัน}$$

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20
วันที่ 8-10 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะชาयน์ จ.ชลบุรี



ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่มในภาคใต้
(กรณีศึกษาที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช)
Effects of Climate Change on Landslide in Southern Thailand
(A Case study of Tepparat Area, Nakorn Sri Thammarat Province)

ไชยคุณ ไทยเจริญ¹ ธนิศ เฉลิมยานนท์² และ ธนันท์ ขูปอุบล^{1,2}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

² ศูนย์วิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติภาคใต้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ไม่
บรรยากาศส่งผลกระทบโดยตรงทำให้สภาพภูมิอากาศโลกเปลี่ยนแปลงไป
และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้
ให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติเพิ่มขึ้นรวมถึงการเกิดดินถล่มในหลายพื้นที่ทั่วโลก
การศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง
ภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่มในตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัด
นครศรีธรรมราช โดยพื้นที่นี้เคยเกิดดินถล่มมาแล้วในปี พ.ศ. 2554 การ
ดำเนินการวิจัยประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ ส่วนแรกคือการนำผล
แบบจำลองภูมิอากาศโลกโดยใช้แบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 ซึ่งสามารถ
อธิบายการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตในรูปแบบรายวันแล้วทำการ
Downscale โดยวิธีทางสถิติ ผลที่ได้ถูกนำมาประเมินช่วงเวลาและรูปแบบ
ของฝนที่มีความเสี่ยงทำให้เกิดดินถล่ม ส่วนที่สองประกอบด้วย การนำ
คุณสมบัติทางวิศวกรรมจากผลการทดสอบในสนามและห้องทดลองมา
วิเคราะห์ปริมาณฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มโดยใช้แบบจำลองการไหลซึมของน้ำ
ใต้ดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดิน ผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนถูก
นำมาประเมินการเกิดดินถล่มในพื้นที่ศึกษาผลการศึกษาพบว่าในอนาคต
ปริมาณฝนในพื้นที่ศึกษาจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ปริมาณความชื้น
ของฝนและระยะเวลาที่ฝนตก มีผลต่อปริมาณการสะสมของน้ำในชั้นดินจน
อาจทำให้เกิดดินถล่มได้หลายครั้งในอนาคต จะมีมากกว่าในอดีตเนื่องจาก
ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก, PRECIS/ECHAM4, ดิน
ถล่ม, ตำบลเทพราช, แบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดิน, แบบจำลอง
เสถียรภาพลาดดิน

Abstract

Increase in atmospheric greenhouse gases due to human
activities has directly caused the global climate change.
Apparently, climate change effects have increased natural

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: zainoon081@yahoo.com

disasters including the landslides in southern Thailand.

This study aims to evaluate the effects of global climate
change on landslides in Theppharat Area, Nakorn Sri
Thammarat Province which experienced landslides in 2011.
This study consists of two main parts: the first part is the
evaluation of periods and patterns of predicted rains that may
cause landslides using statistically downscaled rain data
generated from PRECIS/ECHAM4 model results. The second
part consists of analysis of the rain that may cause the
landslides in the area using groundwater seepage and slope
stability models. Engineering properties of natural slopes used
in these modeling were obtained from a series of field and
laboratory tests. Analytical results from these two main parts
were used to evaluate the possible occurrence of landslides in
the study area. The results show that future rainfall in the
study area will significantly increase due to climate change.
The rainfall intensity and duration will affect the accumulation
of groundwater and may cause landslides for many cases. Thus,
due to climate change, the number of landslide events in the
future may be greater than those in the past.

Keywords: Global Climate Change, PRECIS/ECHAM4, Landslide,
Tepparat, Groundwater seepage models, Slope stability models

คำนำ

ในฤดูร้อนปี 2554 มีเหตุการณ์ดินถล่มในภาคใต้ของประเทศไทย
เกิดขึ้นหลายพื้นที่ และที่ได้รับความสนใจมากที่สุดคือ ดินถล่มที่บริเวณลาดดิน
บนภูเขาตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช เพราะสร้างความ
เดือดร้อนให้กับประชาชนหลายหมู่บ้าน เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดจาก
ฝนตกหนักในฤดูร้อนช่วงระหว่างวันที่ 22 ถึง 31 มีนาคม 2554 ซึ่งเป็น
เหตุการณ์ที่ไม่ปกติตามธรรมชาติทั่วไปของพื้นที่บริเวณนี้จะมีฝนตกหนัก
นอกฤดูฝน(พฤศจิกายน – มกราคม)

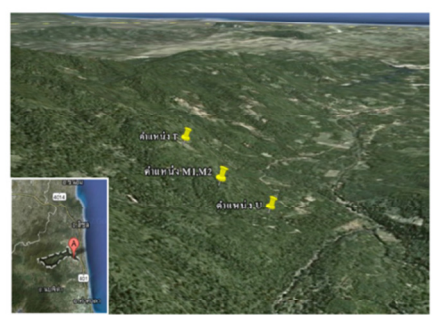
ในทศวรรษที่ผ่านมา รายงานที่สำคัญหลายฉบับ [1] แสดงให้เห็นว่า ภูมิอากาศโลกกำลังเปลี่ยนแปลง ก่อเกิดฝนและความแห้งแล้งที่ผิดปกติ ความผิดปกติของฝนในแต่ละพื้นที่ พายุที่มีความรุนแรงและถี่ขึ้น ส่งผลกระทบอย่างมากต่อทุกพื้นที่ ทุกด้าน ทั้งทางเศรษฐกิจ ความเป็นอยู่ ชีวิต ทรัพย์สิน เป็นต้น ปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) ความแปรปรวน (Climate variability) และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของโลกและมีผลเชื่อมโยงกับส่วนอื่น ๆ ในระบบโลกจนแยกกันไม่ออก การเตรียมรับมือกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีความยาก และซับซ้อน ดังนั้นจึงมีหน่วยงานระดับโลกคือ คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ หรือ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากองค์การสหประชาชาติขึ้นมาดูแลในเรื่องนี้ ตามรายงานของ IPCC (2007) [1] พบว่าบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2504 ปริมาณน้ำฝนรวมมีแนวโน้มลดลง และมีโอกาสที่จะเกิดสภาวะความรุนแรงของสภาพอากาศเพิ่มขึ้น คือ มีฝนตกหนัก อากาศร้อนขึ้น เป็นต้น บทความนี้เสนอผลการศึกษาที่เป็นการศึกษาการดำเนินงานในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน และเสถียรภาพของลาดดินในอนาคตจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศ โดยเน้นที่การศึกษาเสถียรภาพของลาดดินที่ ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช



รูปที่ 2 ดินถล่มในเดือนมีนาคม 2554 เนื่องจากฝนตกหนักในฤดูร้อนบริเวณพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช [2]

1. พื้นที่ศึกษา

รัชพลและคณะ[2] ลาดดินในพื้นที่ศึกษาเป็นลาดดินบนภูเขาซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขาหลวงบริเวณตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช (รูปที่ 1) โดยลาดดินที่ศึกษามีความลาดเอียงประมาณ 25 องศา มีความหนาของชั้นดิน 3 เมตร ดินเป็นดินประเภททรายปนตะกอนทราย (Silty sand) ที่เกิดจากการยุบตัวของหินแกรนิต ยุคจูแรสสิก-ครีเทเชียส (Jurassic-Cretaceous) ได้ชั้นดินเป็นหินแกรนิต



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษบริเวณตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช[2]

สภาพการใช้ที่ดินในปัจจุบันของลาดดินพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพป่าเป็นสวนยางพาราในลักษณะพืชเชิงเดี่ยว ในฤดูร้อนปี 2554 ช่วงปลายเดือนมีนาคม เกิดฝนตกหนักในพื้นที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช จนทำให้เกิดดินถล่มในช่วงวันที่ 25-26 มีนาคม 2554 ดังรูปที่ 2

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate change) เกิดจากก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ก๊าซเรือนกระจกเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ มีเทน เป็นต้น มีคุณสมบัติในการดูดกลืนความร้อน ทำให้ความร้อนไม่สามารถระบายออกไปนอกบรรยากาศของโลกได้ จนทำให้โลกร้อนขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

2.2 แบบจำลองภูมิอากาศโลก

แบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models หรือ Global Climate Models, GCM) [3] เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติของระบบภูมิอากาศโลก ที่ใช้ข้อมูลเชิงปริมาณในการลอกเลียน (simulate) ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานในบรรยากาศ มหาสมุทร พื้นดิน และน้ำแข็ง แบบจำลองภูมิอากาศทุกชนิดใช้หลักการของสมดุลของพลังงานโลก กล่าวคือ พลังงานที่โลกได้รับเท่ากับพลังงานที่โลกส่งออกไปนอกบรรยากาศโลกและพลังงานที่เหลืออยู่ในชั้นบรรยากาศโลก พลังงานส่วนที่เหลือนี้จะเป็นตัวขับเคลื่อนการไหลเวียนของอากาศในชั้นบรรยากาศและทำให้เกิดลักษณะภูมิอากาศต่างๆ ในเวลาใดๆ แบบจำลองภูมิอากาศโลกสามารถสร้างเหตุการณ์จำลองของภูมิอากาศในอนาคตตามช่วงเวลาใดๆ ได้ โดยใช้ข้อมูลนำเข้าส่วนหนึ่งเป็นการประเมินการปล่อยปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอนาคต โดย IPCC ได้ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตตามรูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม การเติบโตของประชากร และเทคโนโลยี (เช่น Scenario A2 หรือ B1 เป็นต้น) ผลแบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยทั่วไปจะแสดงผลในช่วงเวลาทุกๆ 30 ปีข้างหน้า แบบจำลองภูมิอากาศโลกจะแสดงผลพื้นฐานรูปของอุณหภูมิ หรือปริมาณน้ำฝนของพื้นที่ต่างๆของโลก โดยทั่วไปจะแสดงเป็นตาราง (Grid) ขนาด 250x250 กม. ซึ่งมีความละเอียดต่ำ จำเป็นต้องทำการ Downscale เสียก่อนเพื่อให้สามารถใช้ข้อมูลสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษาได้

2.3 Downscaling

Downscaling คือ กระบวนการดำเนินการทำให้ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) มีความละเอียดในเชิงพื้นที่และเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งโดยทั่วไปใช้วิธีแบบ Dynamic downscaling ผลลัพธ์จากการ downscale จะทำให้ผลลัพธ์ของ GCM ที่มีขนาดความละเอียดพื้นที่ 250x250 กม. มีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 20x20กม. ซึ่งถูกเรียกว่าแบบจำลองภูมิอากาศระดับภูมิภาค (Regional Climate Model , RCM) และ ผล RCM ดังกล่าวสามารถนำไปเป็นงานศึกษาเชิงพื้นที่ได้ดีกว่า GCM

2.4 Delta Statistical Downscaling

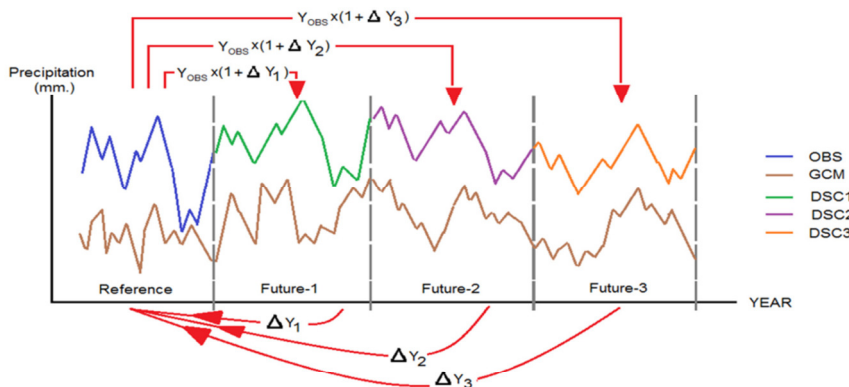
Statistical Downscaling ในที่นี้คือวิธีการปรับผลการจำลองปริมาณน้ำฝนจาก แบบจำลอง GCM หรือ RCM ให้สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดน้ำฝนย้อนหลังจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ที่ศึกษา โดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่าผลการคำนวณปริมาณน้ำฝนในอนาคตจาก GCM หรือ RCM จะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับข้อมูลน้ำฝนในอดีตแต่มีการเพิ่มผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศเข้าไป

Statistical Downscaling มีหลากหลายวิธี วิธี Delta เป็นการ Downscale ด้วยวิธีทางสถิติโดยการหาร้อยละของผลต่างระหว่างชุดข้อมูล

$$q = ki \tag{2}$$

ต้องการมีการพัฒนาสมการที่สามารถใช้ได้กับการไหลของน้ำผ่านชั้นดินที่อิ่มตัวและดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated and unsaturated soil) ดังสมการที่ 3 [5-6]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \frac{\partial u}{\partial t} \tag{3}$$



รูปที่ 3 ภาพอธิบายการ Downscale ด้วยวิธี Delta

ฝนจาก GCM ช่วงเวลาในอดีตซึ่งเป็นฐาน (Baseline) กับชุดข้อมูลฝนในอนาคตจาก GCM โดยจำนวนปีของชุดข้อมูลฝนในอนาคตจะต้องเท่ากับจำนวนปีของชุดข้อมูลฝนปีฐาน จากนั้นจึงนำผลต่างดังกล่าวไปคูณกับข้อมูลฝนที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาในช่วงเวลาปีฐาน ก็จะได้ชุดข้อมูลฝนในอนาคตที่สัมพันธ์กับชุดข้อมูลฝนจากสถานีวัดน้ำฝน ดังสมการที่ 1 [4] และอธิบายด้วยรูปที่ 3 เส้นสีน้ำเงิน OBS คือชุดข้อมูลฝนจากสถานีวัดน้ำฝนในอดีต เส้นสีน้ำตาล GCM คือชุดข้อมูลฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก เส้นสีเขียว ม่วงและส้ม DSC1,2,3 คือผลลัพธ์จากการ Downscale ชุดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\Delta Y = \frac{\bar{Y}_{GCM,Future} - \bar{Y}_{GCM,Baseline}}{\bar{Y}_{GCM,Baseline}} \tag{1}$$

ΔY คืออัตราส่วนผลต่างระหว่างปริมาณฝนจาก GCM ในอนาคตกับปีฐานเทียบกับปีฐานซึ่งเป็นปีที่ตรงกับปีที่มีข้อมูลฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ย้อนหลัง $\bar{Y}_{GCM,Future}$ คือค่าเฉลี่ยปริมาณฝนจาก GCM ในอนาคต อาจจะ เป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนหรือรายปีขึ้นอยู่กับการศึกษา $\bar{Y}_{GCM,Baseline}$ คือค่าเฉลี่ยฝนจาก GCM ในปีฐาน

2.5 การไหลของน้ำผ่านชั้นดิน

Darcy ได้เสนอสมการพื้นฐานการไหลของน้ำผ่านชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำดังสมการที่ 2 ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่ากฎของดาร์ซี (Darcy 's Law) โดย q คือ อัตราการไหล k คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินและ i คือ ความลาดชันทางศาสตร

โดยที่ H คือ พลังงานศักย์น้ำรวม (total head) , k_x คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง x , k_y คือสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินในทิศทาง y , Q คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้า-ออกในระบบที่พิจารณา, m_w คือ ความชื้นของกราฟเส้นอรรถลักษณะของดิน (soil-water characteristic curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงดูดของน้ำในช่องว่างของดิน, u_w คือแรงดันน้ำในช่องว่างของดิน (pore water pressure) และ t คือเวลา สมการนี้เป็นกรณีการวิเคราะห์การไหลเข้า-ออกของน้ำในระบบที่พิจารณาตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง เรียกการวิเคราะห์แบบนี้ว่า Transient state Analysis ในกรณีที่การไหลเข้า-ออกนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเรียกว่า Steady state Analysis ดังสมการที่ 4

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \tag{4}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3 จะพบว่าค่าแรงดันน้ำในดินจะแปรตามปริมาณน้ำฝนคือค่า Q, ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในชั้นดินและลักษณะอรรถลักษณะของชั้นดิน (soil-water characteristic curve)ในรูปของ m_w ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการทั้งสองคือค่าแรงดันน้ำสำหรับการคำนวณกำลังเฉือนของดิน เพื่อไปคำนวณเสถียรภาพลาดดินต่อไป

2.6 กำลังต้านแรงเฉือนของดิน

เนื่องจากสภาพลาดดินในธรรมชาติ ก่อนเกิดผ่นตกเป็นดินที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Soil) สมการกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของสองพจน์คือ $\sigma - u_a$ (ความเค้นยึดเหนี่ยวของดิน, net normal stress) และ $u_a - u_w$ (แรงดูด ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน, Matric Suction) ดังสมการที่ 5 [7]

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (5)$$

τ คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน c' คือหน่วยแรงเฉือนแน่นประสิทธิผลของดิน u_a คือความดันของอากาศระหว่างเม็ดดิน ϕ' คือมุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน ϕ^b คือมุมเสียดทานของดินที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งค่าไม่คงที่ขึ้นกับแรงดันน้ำและระดับความชื้นด้วย

2.7 เสถียรภาพของลาดดิน

เสถียรภาพของลาดดินสามารถคำนวณได้จากวิธีของ Bishop's simplified [8] ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่ศตวรรษที่ 1950 การคำนวณไม่ซับซ้อนและในกรณีที่ Failure plane ของลาดดินมีลักษณะการโค้งเป็นแบบ Arc of Circle (เหมือนกรณีที่ตำบลเทพราช) จะใช้ค่า FS ที่น่าเชื่อถือ โดยจะให้ค่าแตกต่างจากการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าเพียง 5% [9-10] โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัย(FS.) สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 6

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u_a \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + \frac{(\sin \alpha \tan \phi')}{FS}} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (6)$$

Δl คือความกว้างของชิ้นดิน(slice) α คือมุมที่ฐานของชิ้นดินเทียบกับแนวราบ W คือน้ำหนักของชิ้นดิน

3. วิธีการศึกษา

วิธีการประเมินผลกระทบของภาวะเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเกิดดินถล่มในพื้นที่ตำบลเทพราช จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้โดยการศึกษาทางวิศวกรรมเพื่อประเมินปริมาณน้ำฝนและเวลาที่ฝนตกที่ทำให้เกิดดินถล่ม แล้วประเมินปริมาณน้ำฝนในอนาคตของพื้นที่โดยใช้ผลจากแบบจำลอง RCM แล้วนำมาประเมินความเป็นไปได้ที่จะมีการเกิดดินถล่มในอนาคต รายละเอียดการศึกษาครั้งนี้ดังต่อไปนี้

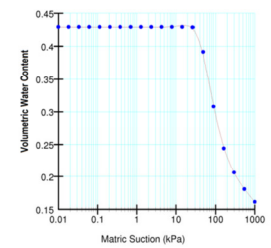
3.1 การประเมินปริมาณน้ำฝนในอนาคตเนื่องจาก Climate Change การศึกษานี้ใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAME4 Scenario A2 ของThe Southeast Asia START Regional Center ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 20x20 กม. มาทำการ Downscale ด้วยวิธีทางสถิติกับข้อมูลน้ำฝนย้อนหลังของพื้นที่ ในการเลือกสถานีวัดน้ำฝนจะเลือกพิจารณาสถานีที่อยู่ใกล้พื้นที่ที่ศึกษาซึ่งจะมีประมาณ 3-4 สถานีและเลือกใช้สถานีวัดน้ำฝนที่มีข้อมูลฝนรายวันที่สมบูรณ์ที่สุดที่สำคัญคือต้องมีข้อมูลย้อนหลังมากกว่า 20 ปี โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลฝนรายวันย้อนหลัง 29 ปี (พ.ศ. 2527 ถึง 2555) ของสถานีอุตุนิยมวิทยาอำเภอท่าเสา จังหวัดนครราชสีมา จากกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAME4 Scenario A2 ซึ่งดาวน์โหลด Text file จากเว็บไซต์ [http://gis.gms-](http://gis.gms-eoc.org/)

[eoc.org/](http://gis.gms-eoc.org/) และได้ทำการแปลงไฟล์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบ excel format เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้คำนวณ

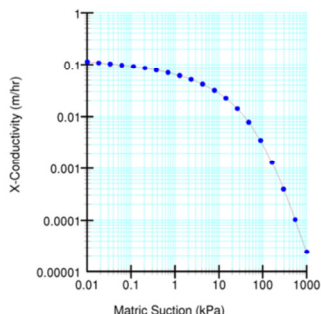
การทำ Downscale เริ่มจากการเลือกผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศให้ตรงกับพื้นที่ของสถานีอุตุนิยมวิทยาอำเภอท่าเสา พิกัดละติจูดที่ 8.60 ลองจิจูดที่ 99.80 จากนั้นทำการหาอัตราส่วนของแต่ละค่า (Delta) ของค่าเฉลี่ยปริมาณฝนรายเดือนจาก PRECIS/ECHAME4 ในอนาคต (2556-2584) กับปีฐาน (2527-2555) เทียบกับปีฐาน(2527-2555) (สมการที่ 1) จากนั้นนำค่าอัตราส่วนผลต่าง (Δy) ดังกล่าวไปคูณกับปริมาณฝนรายวันที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาอำเภอท่าเสาเมื่อปี พ.ศ. 2527 ถึง 2555 ก็จะได้อัตราส่วนของปริมาณฝนในอนาคต (2556-2584) ทำแบบเดิมอีกสองครั้งแล้วเปลี่ยนชุดข้อมูลจากปี พ.ศ. 2556-2584 เป็นปี พ.ศ. 2585-2613 และ ปี พ.ศ. 2614-2633 ตามลำดับ

3.2 การประเมินปริมาณฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มทางวิศวกรรม ในการวิเคราะห์การไหลซึมของฝนลงสู่ดินและการไหลซึมของน้ำผ่านดินซึ่งมีผลต่อกำลังเฉือนของดินของงานวิจัยนี้ เลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SeepAW มีขั้นตอนพอสังเขปดังนี้ เริ่มตั้งแต่การสร้างแบบจำลองลาดดินที่ตำบลเทพราชจากข้อมูลงานวิจัยของรัชชและคณะ [2] (รูปที่ 7) โดยลาดดินหนาประมาณ 3 เมตร ยาวประมาณ 80 เมตร วางอยู่บนชั้นหินแกรนิตที่ราบ จากนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ของแบบจำลองให้สอดคล้องกับพื้นที่จริง ดังนี้ ผิวดินคือด้านบนของแบบจำลองกำหนดให้มีอัตราการไหลซึมเข้าเท่ากับปริมาณน้ำฝนที่พิจารณา ด้านซ้ายและด้านล่างของแบบจำลองกำหนดให้เป็นขอบเขตที่ไม่มีน้ำไหลผ่าน (No flow boundaries) ในขณะที่ด้านขวามือได้กำหนด Boundary Condition ให้เป็น unit gradient คือปล่อยให้ไหลออกอย่างอิสระขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของดินในธรรมชาติ

a) การประมาณค่า SWCC และ K-function การกำหนดคุณสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการไหลซึม คือ ฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำผ่านดิน (Hydraulic Conductivity Function) โดยฟังก์ชันนี้ได้มาจากเส้นออสติกซ์ของดิน (Soil-water characteristic curve) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการประเมินเส้นออสติกซ์ของดินทางอ้อมตามวิธีของ Aubertin[11] โดยใช้คุณสมบัติของดิน ประกอบด้วย ขนาดของเม็ดดิน D_{10} และ D_{60} , Saturated volumetric water content Liquid limit และ Saturated hydraulic conductivity สำหรับพื้นที่ตำบลเทพราช ข้อมูลจากงานวิจัยของรัชชและคณะ [2] พบว่า D_{10} และ D_{60} เท่ากับ 0.30 mm. และ 2.50 mm. ตามลำดับ ค่า Saturated volumetric water content เท่ากับ $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ Liquid limit เท่ากับ 39% และ Saturated hydraulic conductivity เท่ากับ 0.113 m/hr . ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมและฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำผ่านดินได้แสดงไว้ในกราฟในรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 เส้นออสติกซ์ของดิน (SWCC) ที่ได้จากกราฟ Grain Size Distribution



รูปที่ 5 ฟังก์ชันการไหลซึมของน้ำผ่านดินที่ได้จากราว Grain Size Distribution

b) การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดิน (Seepage analysis) การวิเคราะห์การไหลซึมของน้ำในลาดดิน ได้แบ่งสภาวะการวิเคราะห์เป็น 2 สภาวะ คือสภาวะเริ่มต้น เป็นการวิเคราะห์ในสภาวะการไหลแบบคงที่ (Steady state) มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการประเมินระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติในสภาวะปกติ เพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นในการวิเคราะห์ (Initial condition) การวิเคราะห์นี้ทำโดยใช้ข้อมูลฝนย้อนหลัง 29 ปีของสถานีอำเภอท่าศาลา (เท่ากับ 0.241 มม./ชม.) เพื่อคำนวณหาระดับน้ำใต้ดินเฉลี่ย ผลการวิเคราะห์พบว่า ในสภาวะปกติก่อนฝนตกหนัก ดินในลาดดินเป็นดินที่ไม่อิ่มตัว ระดับน้ำใต้ดินอยู่เฉพาะที่ผิวของลาดดิน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ปริมาณน้ำฝนที่วัดได้จากอบต.ฉลอง อำเภอสิชลวันที่ 22-28 มีนาคม 2554

การวิเคราะห์ในสภาวะการไหลแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient state) ปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่สภาวะนี้ คือข้อมูลฝนที่ตรวจวัดได้ที่ อบต.ฉลอง อำเภอสิชล ซึ่งอยู่ห่างจากตำบลเทพราชประมาณ 10 กิโลเมตร เป็นข้อมูลฝนรายวันช่วงระหว่างวันที่ 22 ถึง 31 มีนาคม 2554 โดยการนำปริมาณฝนรายวันดังกล่าวหารด้วย 24 เพื่อจะได้ฝนรายชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 6

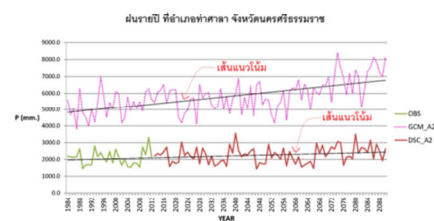
c) การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (Slope Stability analysis) การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (Slope Stability analysis) ได้ใช้ข้อมูลสมบัติของดินจากงานวิจัยของรัชพลและคณะ[2] โดยลาดดินเป็นดินประเภททรายปนตะกอนทราย (Silty Sand) มีหน่วยน้ำหนักดินอิ่มตัว (Saturated unit weight) เท่ากับ 16 kN/m³ ค่าความเชื่อมั่น

ประสิทธิผล (Effective cohesion) เท่ากับ 8 kPa มุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective internal friction angle) เท่ากับ 32° วิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน (Slope Stability analysis) โดยอาศัยแรงดันน้ำภายในลาดดินจากผลการวิเคราะห์การไหลซึมที่กล่าวไว้ตอนต้นโดยวิธี General Limit Equilibrium วิเคราะห์แบบ Effective stress Mohr Coulomb โดยใช้โปรแกรม Slope/W วิเคราะห์หา Factor of Safety (FS) โดยวิธี Bishop simplified แต่ละช่วงเวลา และให้โปรแกรมหา failure plane เอง

4. ผลการศึกษา

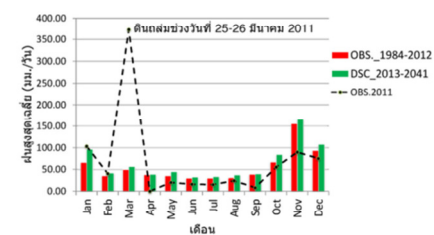
4.1 ผลการประเมินปริมาณฝนในอนาคตเนื่องจากผลของ Climate change

ผลลัพธ์จากการทำ Downscale แบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAME4 ในอีก 78 ปีข้างหน้าคือปี 2556 ถึง 2633 (2013 ถึง 2090) จากรูปที่ 8

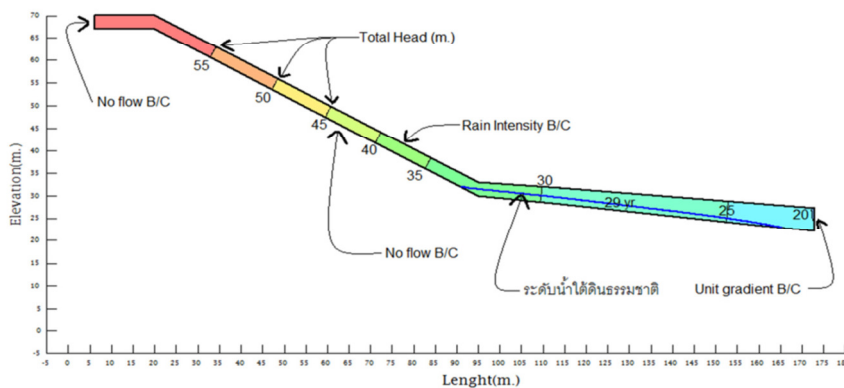


รูปที่ 8 ผลการประเมินฝนรายปีของพื้นที่ตำบลเทพราช จากการทำ Downscale แบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAME4 ตั้งแต่ปี 2013 ถึง 2090

เส้นสีเขียว OBS คือข้อมูลฝนจากสถานีวัดน้ำฝนในอดีต, เส้นประสีม่วง GCM_A2 คือผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 และเส้นสีแดงทับ DSC_A2 คือผลจากการทำ Downscale กับข้อมูลฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในอดีตแล้วเมื่อคำนวณเส้นแนวโน้มปรากฏว่าในอนาคตปริมาณฝนรายปีมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นโดยจะเพิ่มขึ้นจาก 2150 มม. ในปี 2556 เป็น 2450 มม.ในปี 2633 หรือเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 4.38 มม.ต่อปี



รูปที่ 9 ความเข้มฝนสูงสุดเฉลี่ยเปรียบแต่ละเดือนตั้งแต่ปี 2013 ถึง 2041

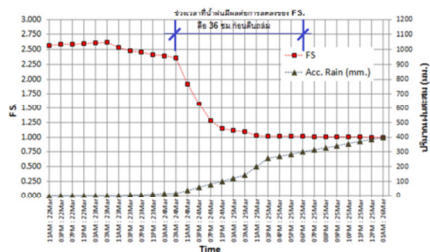


รูปที่ 7 แนบจำลองลาดดินและระดับน้ำใต้ดิน คำนวณในสภาวะ Steady State โดยใช้ฝนเฉลี่ย 29 ปี

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้น (มม./วัน) สูงสุดเฉลี่ย ในช่วง 29 ปีในอดีต (กราฟแท่งสีแดงในรูปที่ 9) และช่วง 29 ปีในอนาคต (กราฟแท่งสีเขียวในรูปที่ 9) โดยแยกพิจารณาแต่ละเดือนปรากฏว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกๆเดือนดังแสดงในรูปที่ 9 ถึงแม้จะไม่ชัดเจน แต่ก็มีนัยยะสำคัญ และเมื่อนำความเข้มข้นที่ตกจริงในปี พ.ศ. 2554 (2011) มาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยดังกล่าวปรากฏว่า ความเข้มข้นในเดือนมีนาคม 2554 ซึ่งเป็นเดือนที่เกิดดินถล่มที่ตำบลเทพราช พบว่ามีค่าเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 6 เท่า

4.2 ผลการวิเคราะห์การไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดิน

ผลการวิเคราะห์การไหลซึมของฝนในชั้นดินในสภาวะปกติ (Steady state) จากข้อมูลฝนในอดีต 29 ปี พบว่า ในสภาวะปกติก่อนฝนตก ดินในลาดดินเป็นดินที่ไม่อิ่มตัว ระดับน้ำใต้ดินอยู่เฉพาะที่ตีนของลาดดิน ดังรูปที่ 7 และผลการศึกษาการไหลซึมในช่วงวันที่ 22-28 มีนาคม 2554 ที่เกิดดินถล่มไม่พบที่พบระดับน้ำใต้ดินในลาดดินจะค่อนข้างสูงซึ่งพบปริมาณน้ำที่ซึมลงสู่พื้นที่ชั้นดินและหินซึ่งตัวลึกลงน้ำของลาดดินและระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวลาดดินเมื่อฝนตกต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 45 และจากชั่วโมงที่ 47 เป็นต้นไประดับน้ำใต้ดินก็ไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้ฝนจะยังคงต่อเนื่องไปอีก เพราะมวลดินไม่สามารถอุ้มน้ำได้อีกและมวลดินได้ถ่ายน้ำออกทางผิวดินในลักษณะของตาน้ำ ที่เรียกว่า Seepage face

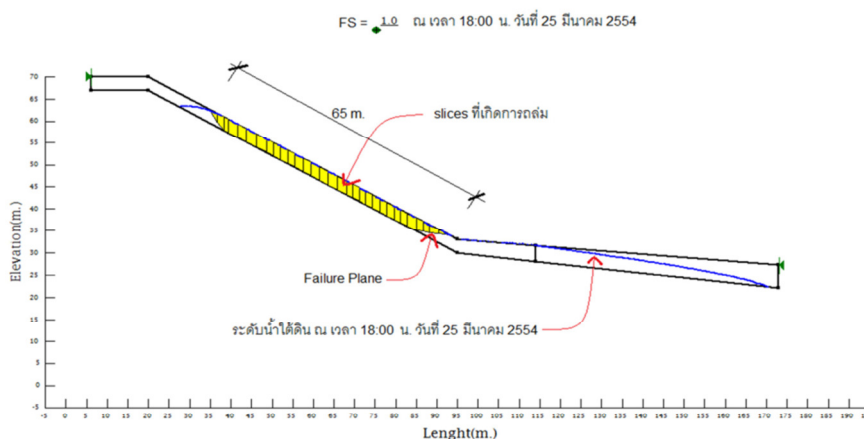


รูปที่ 10 กราฟปริมาณฝนสะสมและ FS ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเนื่องจากปริมาณฝนที่ตกช่วงระหว่างวันที่ 22-31 มีนาคม 2554 พบว่า ในช่วงเวลาปกติก่อนฝนตก ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของลาดดินเท่ากับ 2.36 เมื่อเกิดฝนตกในช่วงวันดังกล่าว ค่า FS ลดลงอย่างต่อเนื่อง (ปริมาณฝนสะสมเพิ่มมากขึ้นตามเวลา) ดังแสดงกราฟในรูปที่ 10 จากกราฟพบว่าดินถล่มที่ FS เท่ากับ 1.009) เมื่อปริมาณฝนสะสมเท่ากับ 299 มม. ช่วงเวลาสิบแปดนาฬิกาของวันที่ 25 มีนาคม 2554 ซึ่งสอดคล้องกับที่มีรายงานจากชาวบ้านในพื้นที่ว่า พบเห็นดินโคลนไหลลงมาช่วงวันดังกล่าว จึงมั่นใจได้ว่าแบบจำลองลาดดินและสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เหมาะสม และเมื่อพิจารณา failure plane (รูปที่ 11) พบว่าแนวการพังทลายยาว 65 ม. ลึกลงไปในชั้นดินจนถึงระดับ Bedrock ற்பิดเนื่องจากจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำตลอดลาดดิน ซึ่งสอดคล้องกับสภาพเหตุการณ์ดินถล่มที่ตำบลเทพราช

4.3 การประเมินการเกิดดินถล่มเนื่องจาก Climate Change

การประเมินการเกิดดินถล่มเนื่องจาก Climate Change ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการประเมินอย่างง่ายเนื่องจากผลจากแบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ซึ่งมีควมไม่แน่นอน (Uncertainty) สูง และไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต การประเมินทำได้นำผลการจำลองฝนรายวันที่กล่าวมาแล้วมาพิจารณาร่วมกับผลการประเมินปริมาณน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มจากแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดินของตำบลเทพราช อำเภออียล จังหวัดนครราชสีมา พบว่าจะเกิดดินถล่มเมื่อฝนตกเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 36 ชั่วโมงหรือหนึ่งวันครั้ง และมีปริมาณน้ำฝนสะสม 299 มม. (รูปที่ 10) ในขณะที่แบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 Scenario A2 แสดงผลว่าในช่วงระยะเวลา 30 ปีข้างหน้า จะมีฝนตกติดต่อกันในระยะเวลา 24-48 ชั่วโมงแล้วทำให้มีปริมาณน้ำฝนสะสม 300 มม. มีจำนวน 5 ครั้ง และเมื่อพิจารณาผลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาพบว่าในช่วงระยะเวลา 29 ปีในอดีตมีฝนตกติดต่อกันในระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง แล้วทำให้มีปริมาณน้ำฝนสะสม 300 มม. มีจำนวน 3 ครั้ง ดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นโอกาสที่จะเกิดดินถล่มในอนาคตเนื่องจาก Climate Change มีมากกว่าในอดีต



รูปที่ 11 Failure Plane ของแบบจำลองลาดดินและระดับน้ำใต้ดิน ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วย Slope/W

ตารางที่ 1 จำนวนครั้งที่ฝนตกมากกว่า 300 มม. ในรอบปีต่างๆ จากแบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 Scenario A2

ช่วงเวลา (ปี)	จำนวนครั้งที่ฝนตกใน			
	1 วัน		2 วัน	
	ข้อมูลไม่มีผลจากสภาพภูมิอากาศ (OBS)	ข้อมูลที่มีผลจากสภาพภูมิอากาศแบบจำลอง (GCM_A2)	ข้อมูลไม่มีผลจากสภาพภูมิอากาศ (OBS)	ข้อมูลที่มีผลจากสภาพภูมิอากาศแบบจำลอง (GCM_A2)
5	3	1	7	6
10	1	2	8	9
20	2	2	12	10
30	3	5	17	18

5. สรุปและวิจารณ์

ผลการประเมินปริมาณน้ำฝนที่ทำให้เกิดดินถล่มจากแบบจำลองการไหลซึมของน้ำใต้ดินและแบบจำลองเสถียรภาพลาดดินของตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าดินถล่มเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำฝนสะสม 299 มม. ในระยะเวลา 36 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการเกิดดินถล่มจริงในพื้นที่ในช่วงปลายเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 การเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศทำให้ปริมาณฝนมีการเปลี่ยนแปลงที่ตำบลเทพราช อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งจากแบบจำลองภูมิอากาศPRECIS/ECHAM4 โดยใช้ภาพจำลองปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอนาคต(Scenario) แบบ A2 พบว่าในอนาคต 30 ปี มีแนวโน้มที่จะปริมาณฝนรายปีมากขึ้นส่งผลให้มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ดินถล่ม มากกว่าในอดีต ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นการประเมินโอกาสการเกิดดินถล่มในอนาคตอย่างง่ายเพื่อให้พอให้เห็นแนวโน้มของสภาพรวมของเหตุการณ์ดินถล่มใน

อนาคต ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ยังมีความไม่แน่นอนสูงและยังไม่ละเอียดเพียงพอ โดยผลการประเมินการไหลซึมและเสถียรภาพของลาดดินมีความละเอียดสูงในขณะที่ผลการประเมินปริมาณน้ำฝนในอนาคตจากแบบจำลอง PRECIS/ECHAM4 มีความละเอียดต่ำกว่า ทั้งนี้ในเชิงพื้นที่และเวลา

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยปิโตรเลียมฯ ภาควิชาปิโตรเลียม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NadPec) สำหรับความอนุเคราะห์โปรแกรม Seep/W และ Slope/W กรมอุทกศาสตร์ กองทัพทหารบก และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลาที่อนุเคราะห์ข้อมูลฝนย้อนหลัง ศูนย์วิจัย The Southeast Asia START Regional Center (START) ที่อนุเคราะห์ให้ข้อมูลผลจากแบบจำลองภูมิอากาศ PRECIS/ECHAM4 ศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้านโลกร้อน สดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (T-GLOB) สำหรับหนังสือและงานวิจัยเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศ

เอกสารอ้างอิง

[1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007

[2] รัชพล คชานันต์, ธนินท์ ชูบุปผการ และธนิต เฉลิมยานนท์ "อิทธิพลของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีผลต่อกำลังเฉือนในดินที่ผลาญอยู่กับที่" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18, 2556

[3] กัณห์วี บุญประกอบ, จิรธรรม์ สันติศิริสมบูรณ์, จารุทัศน์ สันติศิริสมบูรณ์, วรวิญญู วงษ์เสรี, พรหม จิระประวัติ, พัทธณ แก้วแพร่, สิริรินทร์ เพชรรัตน์, ยอด สุขะมงคล, มนชัย ขอบธรรม, นิพัทธ์ สัมกลับ,

- ชวนรัตน์ อักษรสิงห์ชัย, ขวัญบุญชัย ศรีสงเคราะห์ และทรงศักดิ์ ชัยชนะ
 วิจารณ์. การสร้างภาพจำลองของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในประเทศไทย
 โดยโครงการย่อยส่วน แบบจำลองภูมิอากาศโลก. รายงานฉบับสมบูรณ์
 สนับสนุนสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 2553.
- [4] Robert L. Wilby, and Hayley J. Fowler "Regional climate
 downscaling" บทหนึ่งของหนังสือ Modeling the Impact of
 Climate Change on Water Resources . สำนักพิมพ์ Blackwell
 Publishing, 2010
- [5] Richard, I. A. "Capillary conduction of liquids through porous
 mediums." Physics.1, 318-333, 1931
- [6] Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. "Sci. Mechanics for
 Unsaturated Soils." NY, John Wiley and Sons., 1993
- [7] Fredlund, D. G. , Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. "The
 shear strength of unsaturated soil." Canadian Geotechnical
 Journal, 15,312-321, 1978
- [8] Bishop, A.W. "The Use of The Slip Circle in the Stability
 Analysis of Slope" Geotechnique, 5, pp.7-17, 1955
- [9] Lee W.A., Thomas S.J., Sunil S. and Glenn M.B., "Slope
 Stability and Stabilization methods", John Wiley and
 Sons, inc. 2nd Edition, pp.316-380, 2002
- [10] Fredlund, D.G. and Kraha, "Comparison of Slope Stability
 Methods of Analysis" Canadian Geotechnical Journal,
 Vol.14, pp.429-439, 1977
- [11] M. Aubertin, M. Mbonimpa, B. Bussiere and R.F. Chaois
 "Development of a model to predict the water retention
 curve using basic geotechnical properties." Canadian
 Geotechnical Journal, 40(6): 1104-1122 (2003)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายไชนูน ไทยเจริญ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5510120063

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2543

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ผู้จัดการโครงการ บริษัท แมเนจเม้นท์ 103 จำกัด 219/53-54 อาคารอโศกทาวเวอร์ส ชั้น 16
แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ไชนูน ไทยเจริญ, ธนิต เกลิมยานนท์ และ ธนันท์ ชูบุอุปการ (2558). ผลกระทบของกาเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อการเกิดดินถล่มในภาคใต้ของประเทศไทย (กรณีศึกษา : ต.เทพราช อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช) การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 8-10 สิงหาคม 2558 โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยาจังหวัดชลบุรี