ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ — **สาขา**

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ — **ภาควิชา**

เรื่อง การคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก

Prediction of Temperature and Rainfall Amount in Upper Ping River Basin under Global Climate Change Scenarios

นามผู้วิจัย นายเทวิน พริกมาก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์จิระวัฒน์ กณะสุต, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรชัย ลิปิวัฒนาการ, M.Asc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 17 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก

Prediction of Temperature and Rainfall Amount in Upper Ping River Basin under Global Climate Change Scenarios

โดย

นายเทวิน พริกมาก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)
พ.ศ. 2553

เทวิน พริกมาก 2553: การคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D. 202 หน้า

ในปัจจุบันเทคนิคการลดส่วนได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนทั้งในอดีต และการคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก โดยใช้ข้อมูลด้านออกของตัวแปรภูมิอากาศภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบ A2 และ B2 ที่ได้จากแบบจำลอง Hadley Centre Coupled Model, version 3 (HadCM3) และนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลอง Statistical Downscaling Model (SDSM) เพื่อการลดส่วนของตัวแปรด้านภูมิอากาศเพื่อให้สามารถนำมาใช้กับลุ่มน้ำปิงตอนบนได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาข้อมูลอุณหภูมิในอดีตที่ตรวจวัดได้ที่สถานีตรวจวัดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อใช้เป็นสถานีตัวแทนเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลุ่มน้ำปิงตอนบน ในส่วนของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนนั้นได้ใช้ข้อมูลฝนที่บันทึกไว้ที่สถานีวัดน้ำฝนจำนวน 20 สถานี ที่กระจายทั่วทั้งลุ่มน้ำปิงตอนบน ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดรายปี ในช่วงปี ค.ศ. 1961-2008 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0.01-0.03 °C ต่อปี โดยอุณหภูมิในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 มีการเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 0.04 °C ต่อปี ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1991-2008 ซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยประมาณ 0.004 °C ต่อปี สำหรับปริมาณฝนรายปีของข้อมูลในอดีตมีแนวโน้มลดลงในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 โดยเฉลี่ย 6.2 มม.ต่อปี ในขณะที่ปริมาณฝนในช่วงปี ค.ศ.1991-2007 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 15.1 มม.ต่อปี จากการศึกษาพบว่าตัวแปรภูมิอากาศที่มีความเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิคือ ความชื้นในชั้นบรรยากาศและอุณหภูมิใกล้พื้นผิวโลก ส่วนตัวแปรภูมิอากาศหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดและปริมาณฝนประกอบด้วย ความชื้นสัมพัทธ์ในชั้นบรรยากาศและทิศทางของกระแสลม สำหรับผลการคาดการณ์ในอนาคต (ค.ศ.2010-2099) ภายใต้สมมติฐาน A2 และ B2 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 0.01-0.02 °C ต่อปี โดยการเปลี่ยนแปลงแบบ A2 จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบ B2 เล็กน้อย สำหรับปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในอนาคตโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้นภายใต้สมมติฐานทั้งสองแบบ โดยปริมาณฝนที่เป็นผลจากสมมติฐาน A2 จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่เป็นผลจากสมมติฐาน B2 โดยเฉลี่ยประมาณ 4.1 มม.ต่อปี ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีตามพื้นที่ในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 และ B2 จะเพิ่มขึ้นมากถึง 60% เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในอดีตในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 โดยเดือนที่มีปริมาณฝนตกสูงสุดจะเกิดขึ้นในเดือนสิงหาคมแทนที่เดือนกันยายนที่เคยเกิดขึ้นในอดีต จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 และ B2 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับในอดีต ซึ่งจะทำให้กราฟน้ำท่าและกราฟน้ำท่วมในลุ่มน้ำเพิ่มมากขึ้นซึ่งย่อมส่งผลกระทบต่อการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำปิงตอนบน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการประยุกต์ผลการศึกษาเพื่อการบริหารจัดการน้ำจึงจำเป็นต้องทำการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศในรายละเอียดมากขึ้น โดยการพิจารณาตัวแปรทางสถิติอื่น ๆ เช่น ค่า Efficiency Index นอกเหนือจาก Root Mean Square Error และ Regression Coefficient ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

ลายมือชื่อนิสิต	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	11 / มิ.ย. / 53

Tawin Prikmak 2010: Prediction of Temperature and Rainfall Amount in Upper Ping River Basin under Global Climate Change Scenarios. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Nutchanart Sriwongsitanon, Ph.D. 202 pages.

Downscaling is currently accepted as an effective technique to be used for the study on global climate change. This research is therefore aims to investigate the variations of historical temperature and rainfall amount in the Upper Ping River Basin as well as their changes in the future under the global climate change scenarios. The outputs of climate variables under the greenhouse gas emission (GHG) scenarios A2 and B2 from Hadley Centre Coupled Model, version 3 (HadCM3) were applied together with the Statistical Downscaling Model (SDSM), which was used for downscaling the GCM output into a finer scale to be more useful for the Upper Ping River Basin.

In this study, the historical temperature data measured at Chiang Mai meteorological station have been used as a representative station for the study on temperature changes of the Upper Ping River Basin (UPRB). For the case of rainfall amount variations, the recorded rainfall data measured at 20 stations distributed in the UPRB have been used for an investigation. The results showed that the average, maximum and minimum temperature within the period 1961-2008 tended to increase between 0.01 and 0.03 degree Celsius per year. An average increment temperature between 1961 and 1990 was around 0.04 degree Celsius per year, which was more than an average increment of 0.004 degree Celsius per year recorded between 1991 and 2008. An annual rainfall amount for the period 1961-1990 tended to decrease around 6.2 mm per year, while that of for the period 1991-2007 tended to increase around 15.1 mm per year. The study showed that climate predictors relating to temperature are the atmospheric moisture and near earth surface temperature. While the main climate predictors relating to rainfall occurrence and rainfall amount are the atmospheric humidity and wind direction. The prediction results of temperature and rainfall amount in the future under A2 and B2 scenarios (period 2010 to 2099) showed that an average annual temperature will slightly increase between 0.01and 0.02 degrees Celsius. Temperature changes under the A2 scenario were slightly beyond changes under the B2 scenario. The average annual rainfall in the future tends to increase under these two scenarios. The rainfall amount predicted by the A2 scenario will be higher than that of predicted by the B2 scenario around 4.1 mm per year. An average areal rainfall predicted under the A2 and B2 scenarios will increase as much as 60 percents compared to an average rainfall recorded between 1961 and 1990. The maximum rainfall amount will occur in August instead of in September of the past record. The study results revealed that rainfall amount in the future under the A2 and B2 scenarios will greatly increase compared to recorded data. Flow and flood hydrographs in the river basin will significantly increase and will later affect water management in the UPRB. To ensure the study results for further application for water management, thorough investigation on predictor selection is therefore needed. More appropriate statistical parameters such as Efficiency Index should be used together with the Root Mean Square Error and Regression Coefficient which were applied in this study.

Tawin Prikmak   N. Sriwongsitanon   11 / Jun / 10

Student's signature   Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ช่วยแนะนำการกำหนดขอบเขตการวิจัย วางแผนการวิจัย ให้คำปรึกษาข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนดูแลให้คำแนะนำและผลักดันข้าพเจ้าให้สามารถศึกษาและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.จิระวัฒน์ กณะสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี ประธานการสอบ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่กรุณาให้คำแนะนำแก้ไขเพิ่มเติม เพื่อความถูกต้องและสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ดร.กฤษณัส สุรกิตย์และคุณวินัย เชาวน์วิวัฒน์ ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการศึกษาวิจัย ข้อเสนอแนะและชี้แนะแนวทางวิธีการที่ใช้ในการศึกษา ขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ขอบคุณหน่วยงานกรมชลประทานและกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องและเพื่อน ๆ ที่ให้ความรักความห่วงใย คอยให้กำลังใจ คอยช่วยเหลือผลักดันให้ข้าพเจ้าผ่านอุปสรรคต่าง ๆ ได้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เทวิน พริกมาก

มิถุนายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	51
อุปกรณ์	51
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	145
สรุป	145
ข้อเสนอแนะ	150
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	152
ภาคผนวก	155
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบน (สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดเชียงใหม่)	156
ภาคผนวก ข ข้อมูลปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	163
ภาคผนวก ค ผลการคาดการณ์ปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	169
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	202

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิงตอนบน	5
2	ข้อมูลภูมิอากาศในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2522-2551) ที่สถานีตรวจอากาศ อ.เมือง จ.เชียงใหม่	9
3	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยในแต่ละลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิงตอนบน	17
4	สภาพการใช้ที่ดินในปัจจุบันของลุ่มน้ำปิงตอนบน	18
5	แบบจำลองภูมิอากาศโลกและสมมติฐาน (scenarios) ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล เพื่อจำลองเหตุการณ์ภูมิอากาศในอนาคตจากสถาบันต่าง ๆ	22
6	ตัวอย่างขนาดความละเอียด (resolution) ของกริด และจำนวนชั้นข้อมูลในบรรยากาศที่นำมาใช้ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก	24
7	จุดเด่น (strengths) จุดด้อย (weakness) ของ statistical และ dynamical downscaling	29
8	รายชื่อสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ใช้ในการศึกษา	56
9	รายชื่อตัวแปรภูมิอากาศและการกำหนดชื่อไฟล์สำหรับแบบจำลอง SDSM	63
10	สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงเวลาต่าง ๆ ในอดีต	79
11	เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ.1961-2008 กับผลการคาดการณ์อุณหภูมิในอนาคตจากสมการเชิงเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง	80
12	ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่	81
13	รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	81
14	ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	82
15	รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิสูงสุดรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิสูงสุดรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	83
17	รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	83
18	ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิต่ำสุดรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่	83
19	สรุปผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางสถิติของอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบน	85
20	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน	95
21	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน	99
22	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่ำสุดรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน	104
23	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	119
24	ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	122
25	สรุปผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางสถิติปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน (19 สถานี)	125
26	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ใช้ในการศึกษาในอดีตและอนาคต	131
27	ค่าถ่วงน้ำหนักหรือ weighting factor ของสถานีวัดน้ำฝนที่มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคต	136
28	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน, จำนวนวันที่ฝนตก, ช่วงความยาวฝนตกและช่วงความยาวฝนแล้งเฉลี่ยรายเดือนในลุ่มน้ำปิงตอนบน เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990	137

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ก1	อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่	157
ก2	อุณหภูมิสูงสุดรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่	159
ก3	อุณหภูมิต่ำสุดรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่	161
ข1	รายชื่อสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	164
ข2	แผนภูมิแสดงช่วงปีสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	166

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
1	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนและการแบ่งลุ่มน้ำย่อย	6
2	ทิศทางของลมมรสุม พายุจร และตำแหน่งของร่องความกดอากาศที่พัดเข้าสู่ประเทศไทย	8
3	การผันแปรรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศที่อำเภอเมืองเชียงใหม่	12
4	การผันแปรของปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนในจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน	14
5	เส้นชั้นปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำปิง	15
6	แผนที่ป่าไม้และการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบน	19
7	ภาพจำลองการทำงานของ GCM	21
8	การพัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศในอดีตจนถึงปัจจุบันและในอนาคต	24
9	ภาพแสดงการจำลองภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยวิธี downscaling	25
10	หลักการและวิธีในการทำ downscaling	27
11	สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission scenarios) ของโลกในอนาคต	34
12	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ (scenarios)	35
13	ผลการจำลองอุณหภูมิในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศต่างๆ ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต	36
14	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในที่ต่างๆ ของโลกตามแบบจำลองภูมิอากาศโลก	37
15	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในที่ต่างๆ ของโลกตามแบบจำลองภูมิอากาศโลก	38
16	หน้าจอและเมนูหลักของแบบจำลอง SDSM เวอร์ชั่น 4.2.2	46
17	โครงสร้างกลไกการทำงานของแบบจำลอง SDSM	49
18	แผนผังขั้นตอนการศึกษา statistical downscaling ด้วยแบบจำลอง SDSM ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน	52
19	ตำแหน่งสถานีตรวจอากาศและสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน	54
20	ตำแหน่งสถานีตรวจอากาศและสถานีวัดน้ำฝนที่ได้รับคัดเลือกในลุ่มน้ำปิงตอนบน	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

21 การดาวน์โหลดข้อมูลภูมิอากาศของ NCEP และ HadCM3 59

22 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางกริดหรือ box mapping และ box เฉลี่ยซึ่งครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน 61

23 ตัวอย่างการคัดเลือก predictor ที่เหมาะสมของแบบจำลอง SDSM 66

24 การแสดงผลการสอบเทียบแบบจำลอง (calibration results) ของแบบจำลอง SDSM 68

25 การสร้างไฟล์พารามิเตอร์ของ transfer function ในขั้นตอนของการสอบเทียบแบบจำลอง (model calibration) 68

26 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงปี ค.ศ.1961-2008 72

27 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 73

28 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ในช่วงปี ค.ศ.1991-2008 74

29 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1961-2008 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง 75

30 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง 76

31 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1991-2008 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง 77

32 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1961-1975 86

33 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1976-1990 88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1961-1975	89
35	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือน ช่วงปี ค.ศ.1976-1990	91
36	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน ในแต่ละเดือน ช่วงปี ค.ศ.1961-1975	92
37	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน ในแต่ละเดือน ช่วงปี ค.ศ.1976-1990	93
38	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	96
39	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือน ในอนาคตภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	97
40	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099	97
41	การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2	98
42	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	100
43	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	101
44	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099	102
45	การเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2	102
46	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

ภาพที่		หน้า
47	การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	106
48	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099	105
49	การเปรียบเทียบอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2	107
50	ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-1990	110
51	ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1991-2007	113
52	ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-2007	116
53	การแสดงผลการสอบเทียบ (calibration) ของแบบจำลอง SDSM ของสถานีวัดน้ำฝนอำเภอแม่ริม (07062) ที่ไม่สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง predictors-predictand ได้	123
54	วิธีการสร้าง box plot เบื้องต้นและความหมายของเทอมต่าง ๆ	129
55	การแบ่งพื้นที่อิทธิพลของสถานีวัดน้ำฝนที่มีการคาดการณ์ปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนด้วยวิธีรูปเหลี่ยมธีเอสเสน (thiessen polygon)	135
56	ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนจากข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และปี ค.ศ. 1991-2007 เปรียบเทียบกับผลจากการคาดการณ์ปริมาณฝนภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2	143
57	การเปรียบเทียบปริมาณฝนเฉลี่รายเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ที่ทศวรรษต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในอดีต	144

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ค1 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07013 170

ค2 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07013 170

ค3 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07032 171

ค4 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07032 171

ค5 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07052 172

ค6 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07052 172

ค7 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07092 173

ค8 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07092 173

ค9 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07112 174

ค10 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07112 174

ค11 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07162 175

ค12 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07162 175

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ค13 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07182 176
ค14 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07182 176
ค15 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07192 177
ค16 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07192 177
ค17 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07242 178
ค18 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07242 178
ค19 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07252 179
ค20 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07252 179
ค21 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07282 180
ค22 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07282 180
ค23 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07292 181
ค24 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07292 181

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค25	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 07472	182
ค26	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 07472	182
ค27	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17012	183
ค28	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17012	183
ค29	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17022	184
ค30	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17022	184
ค31	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17032	185
ค32	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17032	185
ค33	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17042	186
ค34	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17042	186
ค35	ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17052	187
ค36	ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17052	187

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ | หน้า

ค37 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 ของสถานีวัด 17062 188

ค38 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 ของสถานีวัด 17062 188

ค39 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07013 แบบ A2 และ B2 189

ค40 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07032 แบบ A2 และ B2 189

ค41 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07052 แบบ A2 และ B2 190

ค42 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07092 แบบ A2 และ B2 190

ค43 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07112 แบบ A2 และ B2 191

ค44 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07162 แบบ A2 และ B2 191

ค45 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07182 แบบ A2 และ B2 192

ค46 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07192 แบบ A2 และ B2 192

ค47 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07242 แบบ A2 และ B2 193

ค48 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07252 แบบ A2 และ B2 193

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค49	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07282 แบบ A2 และ B2	194
ค50	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07292 แบบ A2 และ B2	194
ค51	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07472 แบบ A2 และ B2	195
ค52	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17012 แบบ A2 และ B2	195
ค53	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17022 แบบ A2 และ B2	196
ค54	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17032 แบบ A2 และ B2	196
ค55	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17042 แบบ A2 และ B2	197
ค56	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17052 แบบ A2 และ B2	197
ค57	การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17062 แบบ A2 และ B2	198
ค58	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีในอนาคต (ปี ค.ศ.2010-2099) ของสถานีต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน	199

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

GCMs	=	Global Climate Models or General Circulation Models
SDSM	=	Statistical Downscaling Model
HadCM3	=	Hadley Centre Coupled Ocean-Atmosphere Climate Model, version 3
IPCC	=	Intergovernmental Panel on Climate Change
NCEP	=	National Centers for Environmental Prediction
SRES	=	Special Report on Emission Scenarios
GHG	=	Greenhouse Gas
ECHAM4	=	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts–Deutsches Klimarechenzentrum: Hamburg
CCAM	=	Conformal Cubic Atmospheric Model
ppm	=	Part per million
SWAT	=	Soil and Water Assessment Tool
SEA START RC	=	South-East Asia Global Change System for Analysis Research and Training (START) Regional Center (ศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์ วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้)
hPa	=	Hecto Pascal
RMSE	=	Root Mean Square Error
r	=	Correlation Coefficient
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
STDEV	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส
รทก.	=	ระดับน้ำทะเลปานกลาง
ตร.กม.	=	ตารางกิโลเมตร
ม.	=	เมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
ลบ.ม.	=	ลูกบาศก์เมตร
ล./วิ./ตร.กม.	=	ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร

การคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก

Prediction of Temperature and Rainfall Amount in Upper Ping River Basin under Global Climate Change Scenarios

คำนำ

ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาภัยพิบัติทางธรรมชาติในด้านต่าง ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านภัยแล้ง อุทกภัย วาตภัย และคลื่นความร้อน เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวนับวันจะทวีความรุนแรงตลอดจนมีความถี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้นักวิจัยทั่วโลกพยายามหาเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจนได้พบว่าสาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ ภาวะโลกร้อน (Global Warming) และการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ (Climate Change)

สาเหตุหลักของปัญหาภาวะโลกร้อน คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศมากจนเกินไป ซึ่งมีผลทำให้โลกร้อนขึ้นและทำให้น้ำแข็งจากขั้วโลกละลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น การที่โลกร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยังก่อให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติขนาดใหญ่ร้ายแรง (extreme events) อีกด้วย

ปัจจุบันการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสามารถประเมินได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศ General Circulation Models (GCMs) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่ได้จากแบบจำลอง GCMs จะแสดงผลสำหรับพื้นที่ขนาดกว้างมาก ๆ (large scale) แต่สำหรับระดับสเกลที่เล็กลงเช่นในระดับลุ่มน้ำจะไม่สามารถแสดงผลที่เชื่อถือได้ ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาในด้านสเกลของแบบจำลองภูมิอากาศ จึงได้มีการนำเทคนิคการประเมินค่าตัวแปรภูมิอากาศสำหรับพื้นที่ระดับท้องถิ่น (regional) หรือระดับพื้นที่ลุ่มน้ำ (basin) จากค่าตัวแปรภูมิอากาศที่เป็นผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCMs ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่าวิธีการลดส่วนหรือเทคนิคการเพิ่มความละเอียด (Downscaling Technique)

หลักการของวิธี downscaling คือ การนำชุดตัวแปรด้านภูมิอากาศ (predictors) ที่ได้จากแบบจำลอง GCMs มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านอุทกวิทยา (predictands) ที่สถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน เพื่อให้ได้ฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่า (transfer function) จากนั้นสามารถนำฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่ามาประยุกต์ใช้กับผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภูมิอากาศตามสมมุติฐานต่าง ๆ (scenarios) ในอนาคต ก็จะได้ตัวแปรด้านอุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป

ในการทำ downscaling นั้น โดยทั่วไปมีวิธีการหลัก ๆ 2 วิธี คือ วิธีการทางพลศาสตร์ (Dynamical Downscaling) และวิธีการทางสถิติ (Statistical Downscaling) วิธี Statistical Downscaling มีข้อได้เปรียบกว่าวิธี Dynamical Downscaling คือ ใช้ต้นทุนต่ำ มีการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในพื้นที่จำกัดได้รวดเร็วกว่า ไม่ใช้เทคโนโลยีมากนัก Statistical Downscaling ในปัจจุบันจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจและนำมาประยุกต์ใช้ได้สะดวกมากกว่า

ดังนั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงตัวแปรด้านอุทกวิทยา (predictands) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนภายใต้สมมุติฐานต่าง ๆ (IPCC emission scenarios) ในอนาคต โดยได้เลือกพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ในการศึกษา เนื่องจากเป็นที่ตั้งของเขื่อนขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญในระดับชาติถึง 3 เขื่อน คือ เขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และเขื่อนแม่กวงอุดมธารา ซึ่งในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศย่อมมีผลต่อปริมาณฝนและอุณหภูมิในพื้นที่ลุ่มน้ำ ผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำของทั้ง 3 เขื่อน ไม่ว่าจะเป็นปริมาณน้ำในปริมาณที่มากหรือน้อยกว่าปกติก็ตาม ย่อมส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่และการประกอบอาชีพของประชาชนที่อาศัยในลุ่มน้ำนี้ ตลอดจนประชาชนที่นำน้ำจากเขื่อนทั้งสามไปใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านอุปโภคบริโภค เกษตรกรรม อุตสาหกรรม ผลิตกระแสไฟฟ้า รักษาสภาพสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นแหล่งท่องเที่ยว ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาผลกระทบ เพื่อเตรียมพร้อมรับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตและแนวทางการบริหารจัดการต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินอุณหภูมิและปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

2. เพื่อประเมินอุณหภูมิและปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ภายใต้สมมติฐานของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต

ขอบเขตการศึกษา

1. แบบจำลองภูมิอากาศที่ใช้ในการศึกษาคือ Statistical Downscaling Model (SDSM)

2. สถานีวัดอุณหภูมิและปริมาณฝนที่ใช้ในการศึกษาพิจารณาใช้ของกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมชลประทานเท่านั้น

3. การประเมินอุณหภูมิและปริมาณฝนจากแบบจำลอง SDSM จะแสดงที่สถานีตัวแทนที่ได้รับการคัดเลือก

4. ตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่เลือกใช้ในการประเมินอุณหภูมิและปริมาณฝนของสถานีตัวแทนต่างๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน เป็นผลจากขั้นตอนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง SDSM

5. ใช้ตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตจากผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (Global Climate Model, GCM) Hadley Centre Coupled Model, version 3 (HadCM3) ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emission scenarios) แบบ A2 และ B2 ในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคต

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษา

1.1 สภาพทั่วไปและลักษณะภูมิประเทศ

ลุ่มน้ำปิงเป็น 1 ใน 25 ลุ่มน้ำของประเทศไทย ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศมีพื้นที่รับน้ำฝนประมาณ 34,856 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 5 จังหวัดหลัก ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ตาก กำแพงเพชร และนครสวรรค์ มีลักษณะลุ่มน้ำเรียวยาววางตัวในแนวเหนือ-ใต้ อยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 15° 43′ ถึง 19° 48′ เหนือ และอยู่ระหว่างเส้นลองจิจูดที่ 98° 50′ ถึง 100° 08′ ตะวันออก มีลำน้ำหลักที่สำคัญนอกเหนือจากแม่น้ำปิงซึ่งเป็นลำน้ำสายหลักแล้วยังมีลำน้ำสายสำคัญในลุ่มน้ำ เช่น น้ำแม่แตง น้ำแม่งัด น้ำแม่กวง น้ำแม่ลี้ น้ำแม่แจ่ม เป็นต้น สำหรับลุ่มน้ำปิงเมื่อพิจารณาลักษณะพื้นที่ลุ่มน้ำสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ลุ่มน้ำปิงตอนบน และลุ่มน้ำปิงตอนล่าง โดยลุ่มน้ำปิงตอนบนครอบคลุมพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูนตั้งอยู่เหนืออ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล ส่วนลุ่มน้ำปิงตอนล่างครอบคลุมพื้นที่จังหวัดตาก กำแพงเพชร และนครสวรรค์ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ศึกษาต่อไป

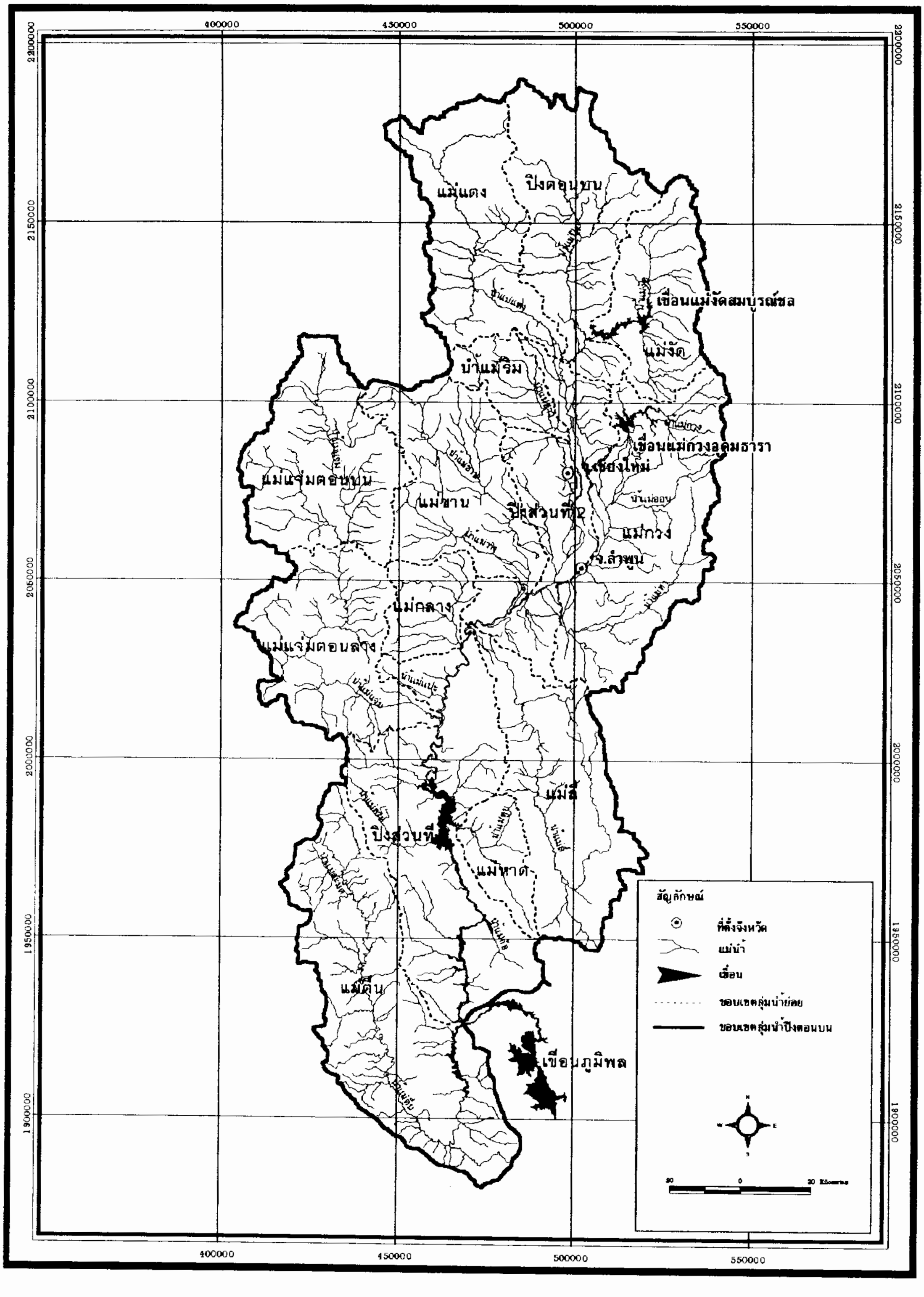
ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รับน้ำเหนือเขื่อนภูมิพลประมาณ 25,369 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน ตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูด 17° 14′ 30” ถึง 19° 47′ 52″ เหนือ และระหว่างเส้นลองจิจูด 98° 04′ 30″ ถึง 99° 22′ 30″ ตะวันออก มีลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนปกคลุมด้วยป่าไม้ ลำน้ำในช่วงที่ไหลผ่านอำเภอเชียงดาวอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 500 ถึง 1,300 เมตร (รทก.) ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:40 ลำน้ำช่วงที่ผ่านหุบเขาตอนบนในเขตอำเภอแม่แตงมีระดับความสูงประมาณ 300 ถึง 500 เมตร (รทก.) ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:50 ลำน้ำช่วงที่ผ่านที่ราบในหุบเขาในเขตอำเภอแม่แตง อำเภอแม่ริม อำเภอเมือง มีระดับความสูงประมาณ 260 ถึง 300 เมตร (รทก.) ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:1,800 ลำน้ำช่วงที่ผ่านที่ราบในหุบเขาก่อนไหลลงอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล มีระดับความสูงประมาณ 140 ถึง 260 เมตร (รทก.) ความลาดชันท้องน้ำประมาณ 1:1,590 โดยภาพรวมแล้วสภาพความลาดชันของท้องน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิประเทศ (กรมชลประทาน, 2553)

ลุ่มน้ำปิงตอนบนประกอบด้วย 14 ลุ่มน้ำย่อย คือ แม่น้ำปิงตอนบน น้ำแม่งัด น้ำแม่แตง แม่น้ำปิงส่วนที่ 2 น้ำแม่ริม น้ำแม่กวง น้ำแม่งาน น้ำแม่ลี้ น้ำแม่กลาง แม่น้ำปิงส่วนที่ 3 น้ำแม่แจ่มตอนบน น้ำแม่แจ่มตอนล่าง น้ำแม่หาด และน้ำแม่ตื่น โดยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและการแบ่งลุ่มน้ำแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 การแบ่งลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิงตอนบน

รหัสลุ่มน้ำย่อย	รายชื่อลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่รับน้ำ (ตารางกิโลเมตร)
1	แม่น้ำปิงตอนบน	1,972
2	น้ำแม่งัด	1,282
3	น้ำแม่แตง	1,956
4	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	1,723
5	น้ำแม่ริม	565
6	น้ำแม่กวง	2,680
7	น้ำแม่งาน	1,732
8	น้ำแม่ลี้	2,080
9	น้ำแม่กลาง	616
10	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	3,180
11	น้ำแม่แจ่มตอนบน	1,965
12	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	1,930
13	น้ำแม่หาด	521
14	น้ำแม่ตื่น	3,167
รวมลุ่มน้ำปิงตอนบน (14 ลุ่มน้ำย่อย)		25,369

ที่มา: กรมชลประทาน (2553)



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนและการแบ่งลุ่มน้ำย่อย

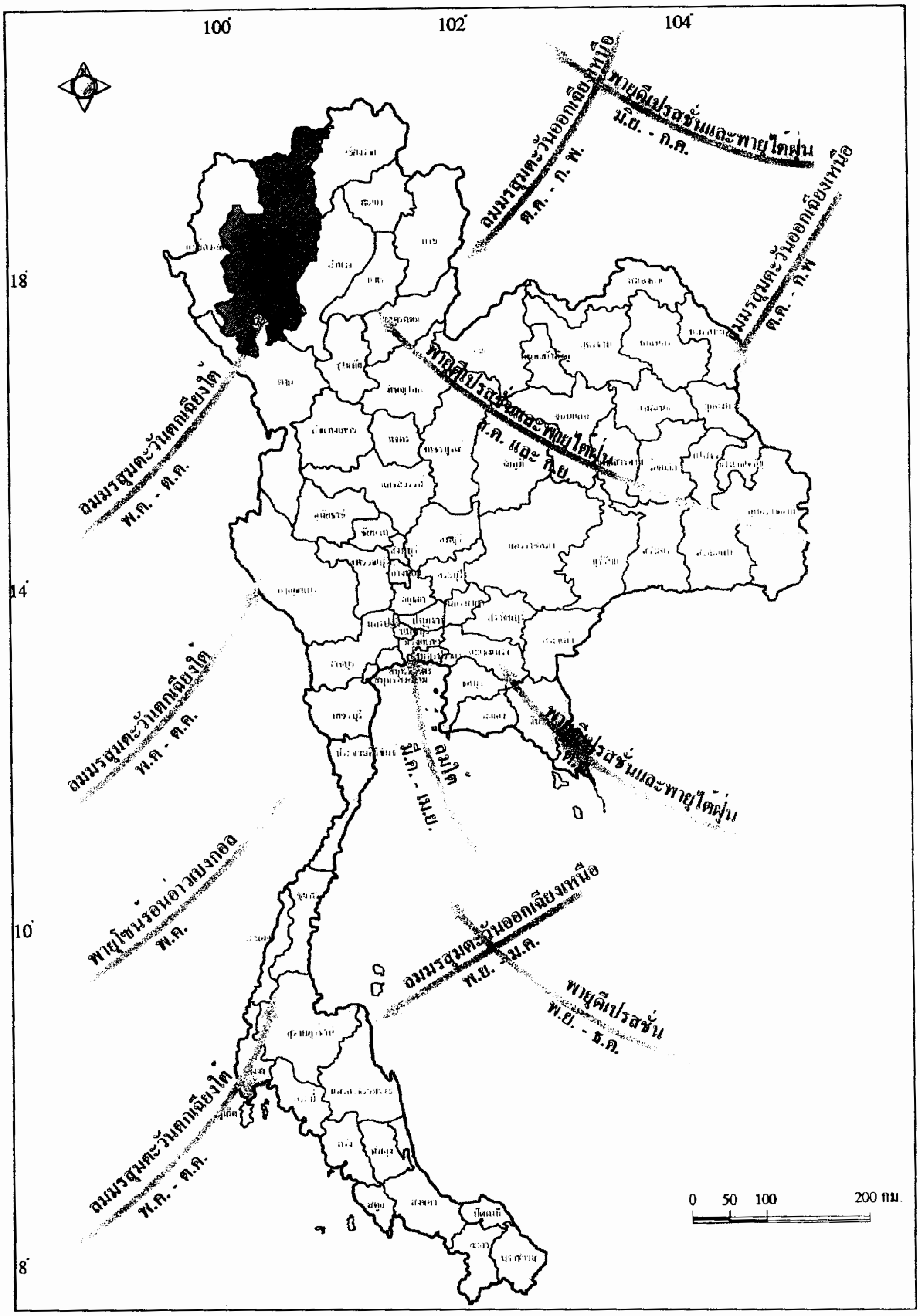
ที่มา: กรมชลประทาน (2553)

1.2 สภาพภูมิอากาศ

สภาพอากาศทั่วไปของลุ่มน้ำปิงตอนบน อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นยังได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชั่นจากทะเลจีนใต้ทำให้มีฝนตกชุกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม แสดงดังภาพที่ 2 และเนื่องจากลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่ครอบคลุม 2 จังหวัด คือ จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน แต่พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในจังหวัดเชียงใหม่ (ประมาณ 82% ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน) จึงขอใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาอำเภอเมืองจังหวัดเชียงใหม่ สถิติช่วงปี พ.ศ. 2522 ถึง ปี พ.ศ.2551เป็นตัวแทนในการศึกษาสภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำปิงตอนบน (ดังแสดงในตารางที่ 2) โดยการผันแปรรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศของสถานีดังกล่าวแสดงในภาพที่ 3 ส่วนค่าเฉลี่ยรายปีและรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

ตัวแปรภูมิอากาศ	ค่าเฉลี่ยรายปี	ช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ยสูงสุด	ค่าเฉลี่ยต่ำสุด
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.8	21.4 (ม.ค.) – 29.2 (เม.ย.)	36.5 (เม.ย.)	14.7 (ม.ค.)
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	71	52 (มี.ค.) - 81 (ส.ค.,ก.ย.)	94 (ก.ย.)	29 (มี.ค.)
ปริมาณการระเหยจากถาด (มิลลิเมตร)	1,610.8	96.6 (ธ.ค.) – 186.7 (เม.ย.)	-	-
ความครึ้มของเมฆ (0-10 อ๊อกต้า)	4.8	1.7 (ก.พ.) - 8.2 (ส.ค.)	-	-
ความเร็วลม (น๊อต)	2.6	1.5 (ม.ค.) - 3.6 (เม.ย.)	99 (ก.พ.,มี.ค.)	-
ปริมาณฝน (มิลลิเมตร)	1,132.2	3.7 (ม.ค.) – 210.9 (ก.ย.)	-	-

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2552)



ภาพที่ 2 ทิศทางของลมมรสุม พายุจร และตำแหน่งของร่องความกดอากาศที่พัดเข้าสู่ประเทศไทย

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2546)

<u>รายละเอียดสถานี</u>

ชื่อสถานี	เชียงใหม่	ระดับสถานีเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง	312	ม.
รหัสสถานี	48327	ความสูงของบาโรมิเตอร์เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง	314	ม.
ละติจูด	18°47' N	ความสูงของเทอร์โมมิเตอร์เหนือพื้นดิน	1.2	ม.
ลองติจูด	98°59' E	ความสูงของเครื่องมือวัดความเร็วลมเหนือพื้นดิน	8.9	ม.
		ความสูงของเครื่องมือวัดน้ำฝน	0.8	ม.

ตารางที่ 2 ข้อมูลภูมิอากาศในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2522-2551) ที่สถานีตรวจอากาศ อ.เมือง จ.เชียงใหม่

รายการ	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
ความกดอากาศ (+1000 หรือ 900 มิลิบาร์)													
เฉลี่ย	1007.27	1006.16	1004.99	1005.01	1005.31	1007.74	1010.84	1013.18	1014.97	1013.43	1011.36	1008.94	1009.10
สูงสุด	1010.71	1008.82	1007.04	1007.12	1007.47	1010.12	1013.42	1016.07	1018.11	1016.92	1015.07	1012.54	1011.95
ต่ำสุด	1003.52	1002.90	1002.11	1002.35	1002.37	1004.70	1007.46	1009.95	1011.64	1009.91	1007.59	1005.08	1005.80
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)													
เฉลี่ย	29.2	28.3	27.6	27.2	26.8	26.6	26.0	24.0	21.4	21.4	23.8	27.1	25.8
เฉลี่ยสูงสุด	36.5	34.1	32.6	31.8	31.5	31.6	31.4	30.1	28.5	29.8	32.6	35.2	32.1
เฉลี่ยต่ำสุด	22.9	23.8	24.0	23.9	23.7	23.2	22.1	19.2	15.7	14.7	16.2	19.5	20.7
สูงสุด	41.4	42.4	39.3	39.0	36.5	35.8	37.9	34.5	33.4	35.2	37.7	40.9	42.4
ต่ำสุด	16.3	18.3	21.2	20.5	21.2	19.5	14.0	9.3	3.8	8.6	9.4	13.0	3.8

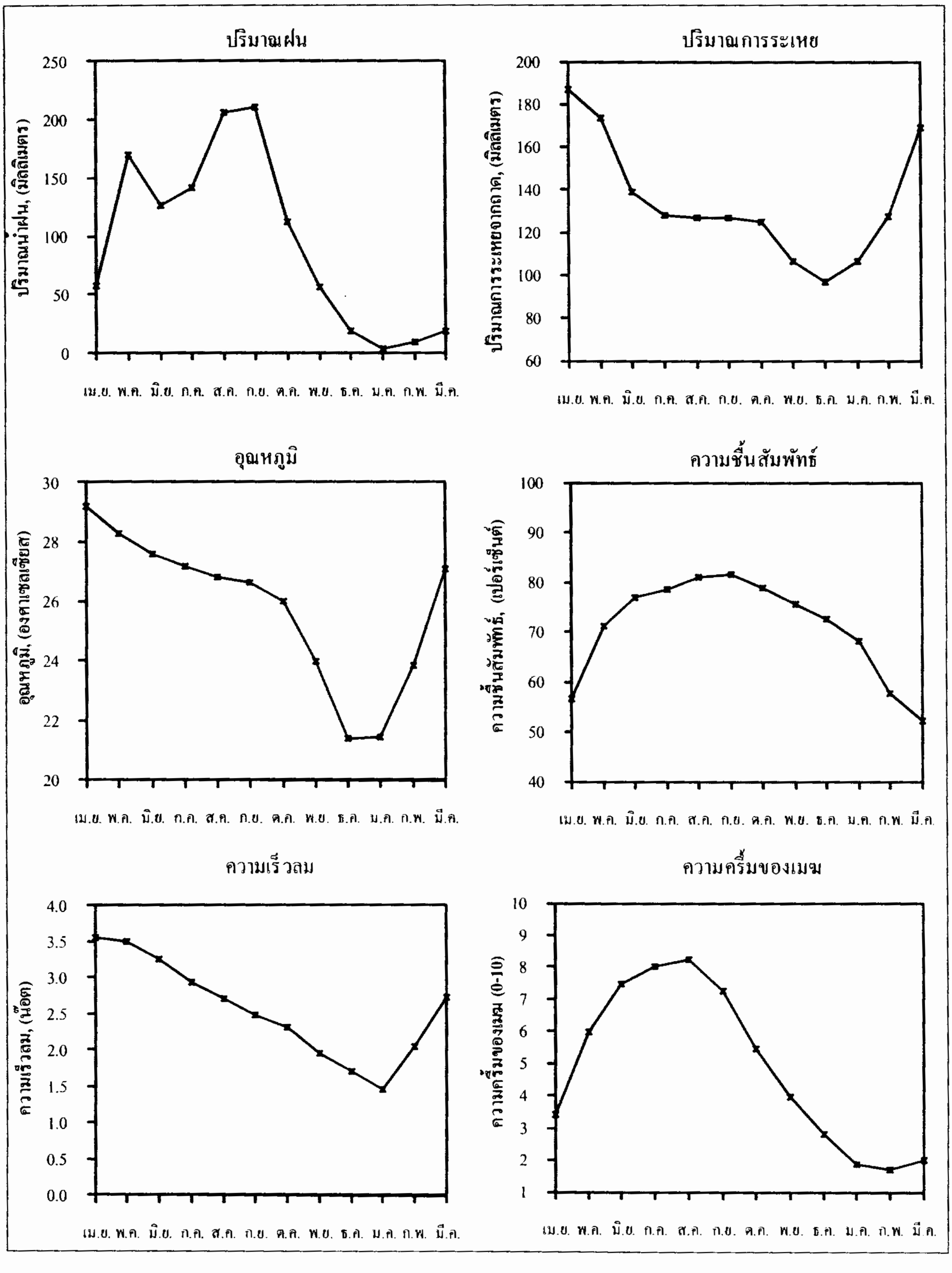
ตารางที่ 2 (ต่อ)

รายการ	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)													
เฉลี่ย	57	71	77	79	81	81	79	75	73	68	58	52	71
เฉลี่ยสูงสุด	78	87	91	92	93	94	93	93	92	91	83	76	88
เฉลี่ยต่ำสุด	35	51	59	61	63	62	58	51	45	38	31	29	49
ต่ำสุด	11	22	21	8	41	34	31	30	14	3	5	3	3
จุดน้ำค้าง (องศาเซลเซียส)													
เฉลี่ย	18.8	21.9	22.8	22.8	23.0	22.9	21.7	18.9	15.7	14.5	13.8	15.3	19.3
การระเหย (มิลลิเมตร)													
เฉลี่ยจากถาด	186.7	173.5	138.7	127.9	126.5	126.6	125.0	106.3	96.6	106.6	127.5	168.7	1610.8
ความครึ้มของเมฆ (0-10)													
เฉลี่ย	3.4	6.0	7.4	8.0	8.2	7.2	5.4	4.0	2.8	1.9	1.7	2.0	4.8
ชั่วโมงที่มีแสงแดด (ชั่วโมง)													
	252.0	213.4	142.9	118.8	118.7	153.0	200.5	220.5	232.8	262.7	253.2	266.8	2435.4
ทัศนวิสัย (กิโลเมตร)													
เฉลี่ย	9.0	11.6	12.2	12.0	11.8	11.2	10.1	9.6	8.8	8.0	7.9	7.4	10.0

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รายการ	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
ความเร็วลม (น๊อต)													
ความเร็วลมเฉลี่ย	3.6	3.5	3.3	2.9	2.7	2.5	2.3	2.0	1.7	1.5	2.1	2.7	2.6
ทิศทางลม	S	S,SW	S,SW	S,SW	S,SW	S,SW	N	N	N	S	S	S	-
ความเร็วลมสูงสุด	60	64	43	99	53	41	40	45	43	39	99	99	99
ฝน (มิลลิเมตร)													
เฉลี่ย	57.0	169.9	126.5	141.4	206.7	210.9	112.6	55.7	19.4	3.7	9.6	19.0	1132.2
จำนวนวันที่ฝนตก	6.4	14.9	16.8	18.1	20.2	17.6	11.3	5.1	1.3	0.5	1.0	2.3	115.6
ฝนสูงสุดใน 24 ชม.	119.1	113.8	72.0	105.8	123.0	144.4	79.3	114.6	92.9	27.9	65.2	99.0	144.4
จำนวนวันที่เกิด													
เมฆ	19.0	1.7	0.0	0.1	0.3	2.1	8.1	10.6	17.1	25.9	25.5	28.5	138.8
หมอก	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.8	2.5	1.5	0.2	0.0	6.8
ลูกเห็บ	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ฟ้าคะนอง	5.1	7.7	5.9	4.0	6.4	8.4	4.1	0.8	0.2	0.2	0.3	1.3	44.4
ลมพายุ	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2552)



ภาพที่ 3 การผันแปรรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศที่อำเภอเมืองเชียงใหม่

1.3 ปริมาณฝน

ได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนและบริเวณข้างเคียง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2495 จนถึงปี พ.ศ. 2549 จำนวนทั้งสิ้น 80 สถานี โดยสถานีเหล่านี้เป็นของกรมชลประทานจำนวน 21 สถานี กรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 52 สถานี และของหน่วยงานอื่นๆ จำนวน 7 สถานี โดยข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำฝนที่ตั้งอยู่ในจังหวัดเชียงใหม่ (53 สถานี) และจังหวัดลำพูน (ลำพูน 10 สถานี) สามารถสรุปได้ดังนี้

หน่วย : มิลลิเมตร

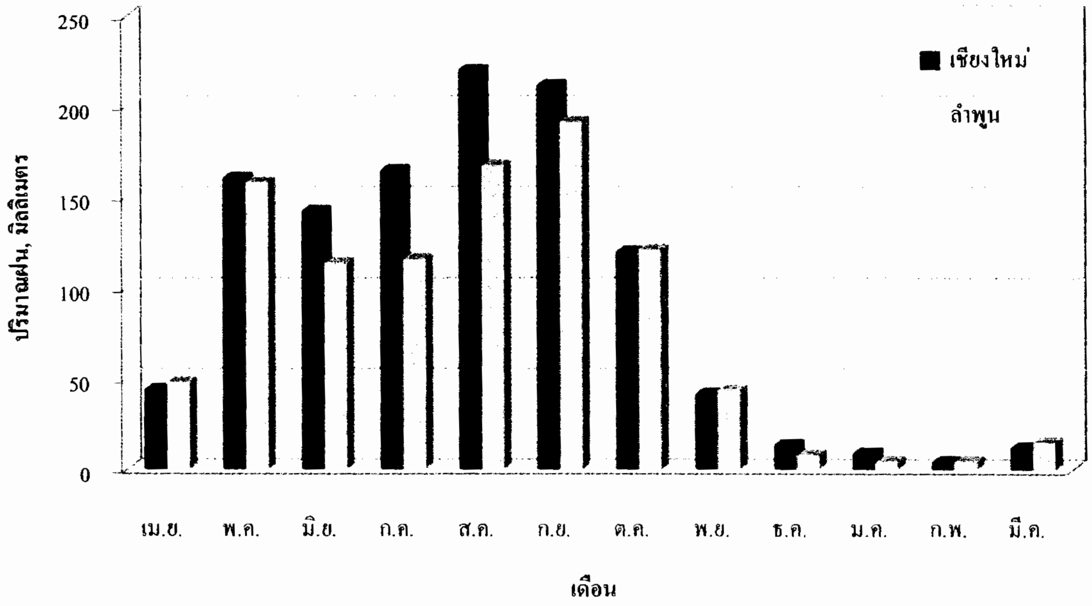
จังหวัด	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
เชียงใหม่	44.3	160.8	142.4	164.9	220.0	211.3	120.0	41.8	13.7	9.2	4.5	12.3	1,145.1
ลำพูน	48.6	158.4	114.1	116.4	167.6	191.7	121.5	44.2	8.1	4.7	4.9	15.4	995.6

ที่มา: กรมชลประทาน (2553)

จากข้อมูลปริมาณฝนข้างต้นจะเห็นว่าปริมาณฝนในจังหวัดเชียงใหม่มีค่ามากกว่าจังหวัดลำพูนเล็กน้อย โดยมีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,145 และ 996 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจากข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนข้างต้นสามารถนำมาแสดงการกระจายในแต่ละเดือนได้ดังภาพที่ 4 ซึ่งจากข้อมูลการกระจายในแต่ละเดือนของปริมาณฝนทั้งสองสถานีจะเห็นว่าฤดูฝนจะอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมและมีปริมาณฝนตกสูงสุดในช่วงเดือนสิงหาคมและกันยายน (ประมาณ 36-38% ของปริมาณฝนทั้งปี) นอกจากนี้ยังได้รวบรวมข้อมูลเส้นชั้นน้ำฝนครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปิงจากรายงานโครงการจัดทำแผนรวมฯ ลุ่มน้ำปิงของกรมทรัพยากรน้ำ (พ.ศ. 2546) แสดงดังภาพที่ 5

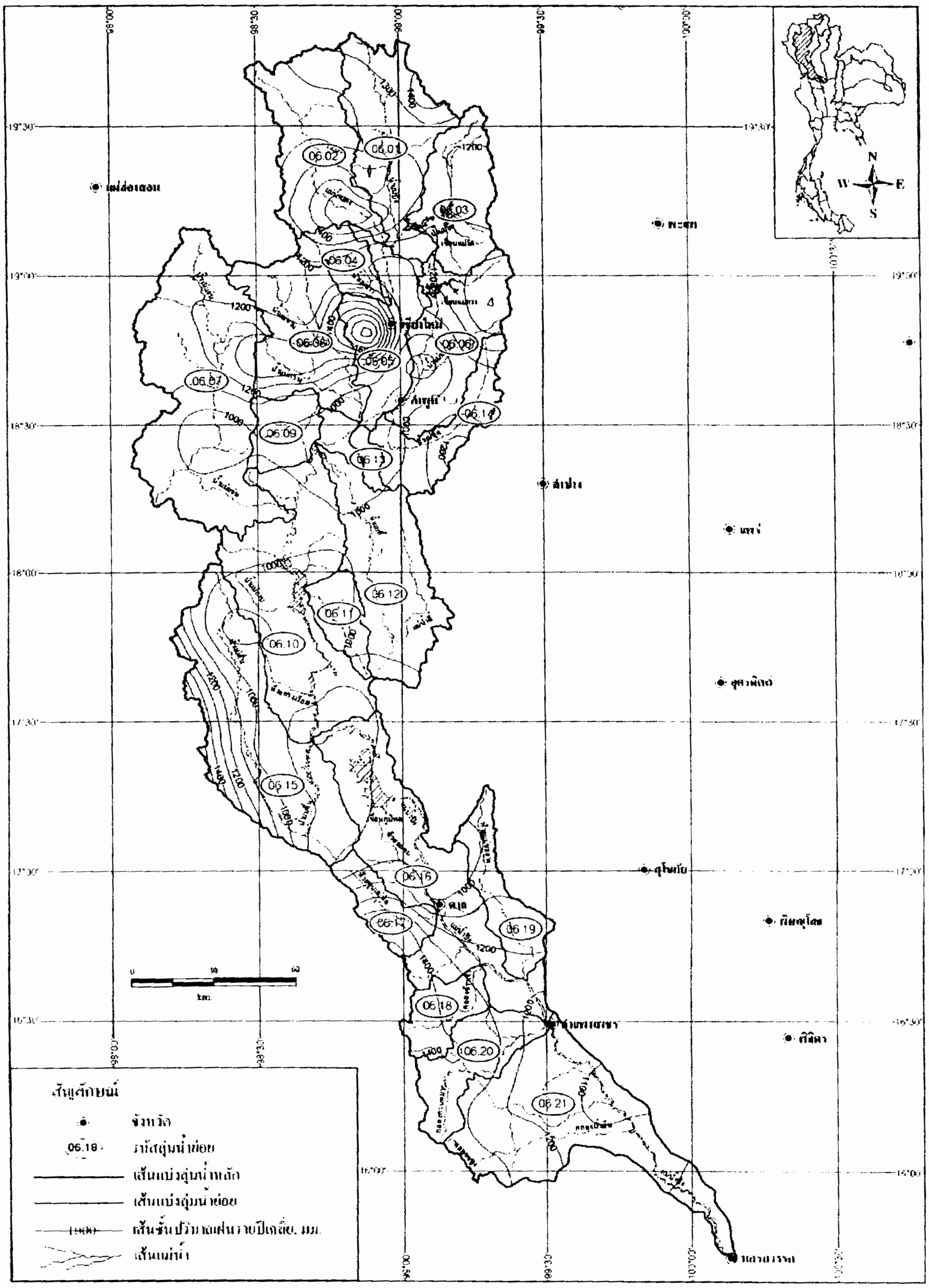
1.4 ปริมาณน้ำท่า

ได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมชลประทาน จำนวน 44 สถานี ที่มีช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มปี พ.ศ.2503 ถึงปี พ.ศ.2543 จากข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ได้รวบรวมจากสถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ นำมาวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือน รายปีและศักยภาพของปริมาณน้ำท่าในแต่ละลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำปิงตอนบนสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยปริมาณน้ำท่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (specific yield) ของลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำปิงตอนบนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.20 ถึง 11.95 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร



ภาพที่ 4 การผันแปรของปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนในจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 เส้นชั้นปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำปิง

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2546)

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยในแต่ละลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	ชื่อลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย, ล้าน ลบ.ม.												ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย , ล้าน ลบ.ม.			Annual Yield
		(ตร.กม.)	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ทั้งปี	ล./วิ./ตร.กม.
1	แม่ปิงส่วนที่ 1	1,979	10.0	16.1	31.3	41.5	93.3	133.2	84.3	50.0	31.7	22.0	15.3	10.8	399.8	139.8	539.6	8.7
2	แม่แตง	1,931	14.7	29.1	40.0	47.1	101.4	121.2	94.2	65.6	42.1	25.6	15.2	14.7	432.9	177.9	610.8	10.0
3	แม่งัด	1,287	3.8	12.2	17.9	27.3	78.2	75.5	47.4	29.3	15.5	11.6	5.3	4.6	258.5	70.1	328.6	8.1
4	แม่ริม	525	3.7	9.4	15.2	17.5	28.2	35.6	28.0	20.1	13.2	8.9	5.7	3.5	134.0	55.1	189.0	11.4
5	แม่ปิงส่วนที่ 2	1,480	6.7	18.2	27.0	33.4	76.6	98.1	66.6	43.3	28.4	13.6	6.8	5.3	319.8	104.0	423.8	9.1
6	แม่กวง	1,694	4.7	16.6	22.1	41.8	129.2	163.2	96.0	54.3	18.6	8.6	5.1	4.1	468.9	95.3	564.2	10.6
7	แม่แจ่ม	3,896	23.8	43.0	61.8	91.6	199.6	236.2	185.2	112.3	72.2	54.5	35.6	29.2	817.4	327.6	1145.0	9.3
8	แม่ขาน	1,804	7.1	17.6	25.2	26.8	55.3	85.3	79.0	48.4	30.3	18.5	11.3	6.9	289.2	122.4	411.5	7.2
9	แม่กลาง	629	4.0	12.6	13.7	13.1	28.3	52.3	50.9	29.8	16.4	8.9	3.8	3.3	170.8	66.3	237.1	12.0
10	แม่ปิงส่วนที่ 3	3,171	13.2	29.8	41.3	68.2	121.7	145.6	113.6	67.4	44.4	24.6	15.6	14.0	520.1	179.3	699.4	7.0
11	แม่หาด	533	3.0	5.5	5.9	8.7	14.9	19.2	12.8	11.9	8.0	4.5	3.2	3.1	67.0	33.8	100.8	6.0
12	แม่ลี้	2,080	2.9	10.0	13.4	7.9	14.5	62.9	60.6	27.2	6.8	2.2	0.7	0.8	169.3	40.7	209.9	3.2
13	แม่อาว	172	0.3	1.5	2.1	3.2	9.6	13.5	8.4	4.9	1.1	0.5	0.4	0.2	38.3	7.4	45.6	8.4

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย, ล้าน ลบ.ม.												ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย , ล้าน ลบ.ม.			Annual Yield
ที่		(ตร.กม.)	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ทั้งปี	ล./วิ./ตร.กม.
14	แม่ทา	996	1.6	8.5	11.8	18.9	57.4	81.1	50.6	29.2	6.8	3.1	2.2	1.2	228.3	44.1	272.4	8.7
15	แม่ตื่น	3,168	10.9	33.8	61.8	108.9	193.8	235.8	199.6	82.8	51.3	31.2	15.9	11.7	833.7	203.8	1037.5	10.4
รวมลุ่มน้ำปิงตอนบน		25,345	110.3	263.7	390.5	555.9	1,201.7	1,558.8	1,177.2	676.4	386.7	238.3	142.1	113.5	5,147.8	1,667.3	6,815.1	8.5

หมายเหตุ เฉลี่ยจากข้อมูลที่ศึกษาช่วงปี พศ.2503-2543

ฤดูฝน ช่วงเดือน พ.ค.-ต.ค. และฤดูแล้งช่วงเดือน พ.ย.-เม.ย.

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2546)

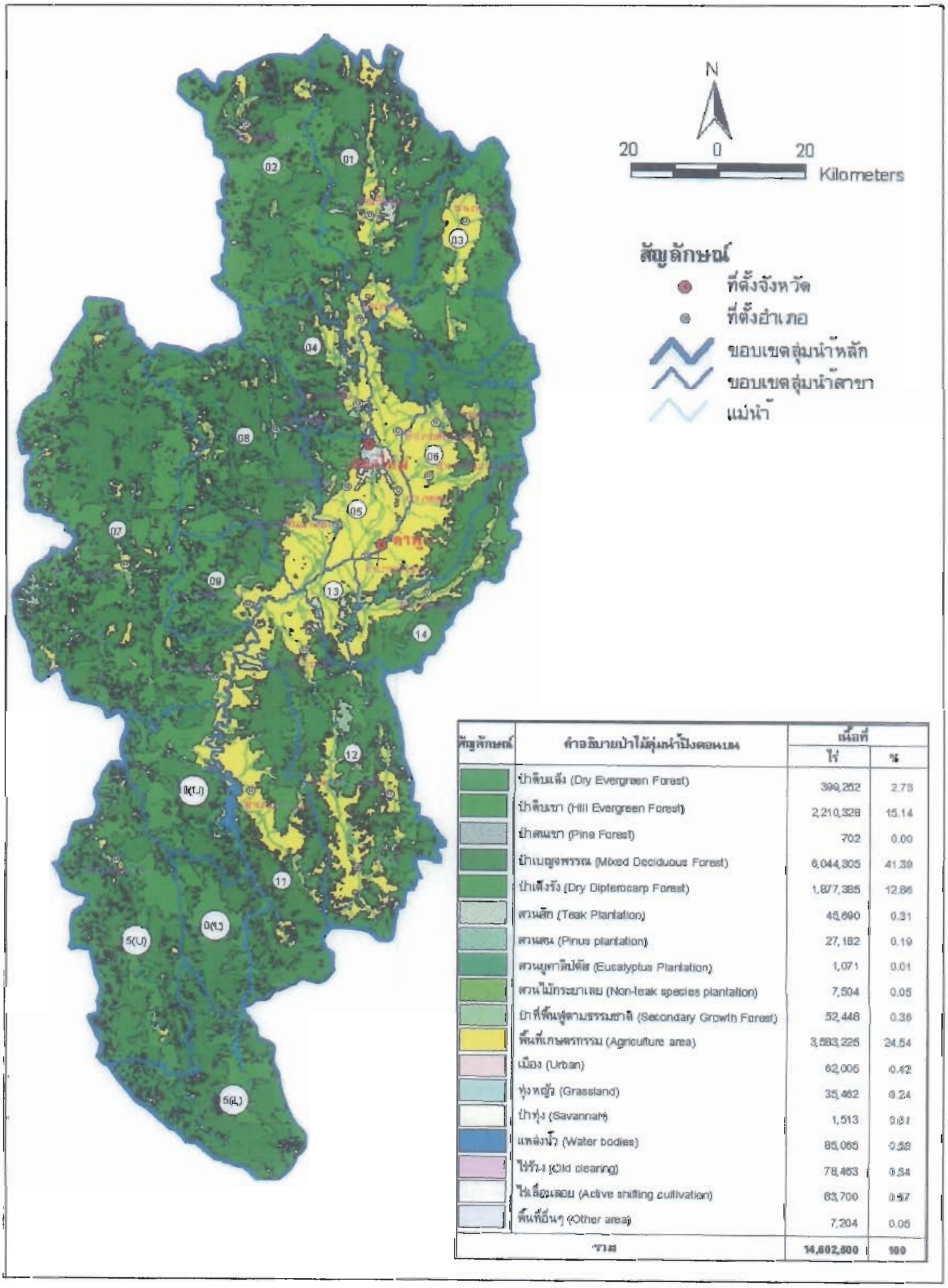
1.5 สภาพการใช้ที่ดิน

ได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยจำแนกตามประเภทการใช้ที่ดินได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้คือ มีพื้นที่รวม 14,606,250 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ป่าไม้ 11,418,900 ไร่ หรือร้อยละ 78.18 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่เกษตรกรรม (นาข้าว พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล พืชสวน ไร่หมุนเวียน ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ และสถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) 2,361,990 ไร่ หรือร้อยละ 16.17 พื้นที่อยู่อาศัย 484,744 ไร่ หรือร้อยละ 3.32 พื้นที่อื่นๆ (ทุ่งหญ้าธรรมชาติ พื้นที่ลุ่ม เหมืองแร่และบ่อขุด ที่ทิ้งขยะ และพื้นที่อื่นๆ) 235,498 ไร่ หรือร้อยละ 1.61 และพื้นที่แหล่งน้ำ (แหล่งน้ำธรรมชาติ และแหล่งน้ำที่สร้างขึ้น) 105,118 ไร่ หรือร้อยละ 0.72 โดยพื้นที่ป่าไม้ส่วนใหญ่อยู่บริเวณพื้นที่ต้นน้ำ ส่วนพื้นที่เกษตรกรรมอยู่บริเวณริมสองฝั่งแม่น้ำ สำหรับสภาพการใช้ที่ดินในปัจจุบันของลุ่มน้ำปิงตอนบนแสดงดังภาพที่ 6 และสรุปพื้นที่การใช้ที่ดินในแต่ละประเภทได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สภาพการใช้ที่ดินในปัจจุบันของลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	ประเภทการใช้ที่ดิน	พื้นที่	
		ไร่	ร้อยละของพื้นที่ทั้งหมด
1	พื้นที่อยู่อาศัย	484,744	3.32
2	พื้นที่เกษตรกรรม	2,361,990	16.17
3	พื้นที่ป่าไม้	11,418,900	78.18
4	พื้นที่แหล่งน้ำ	105,118	0.72
5	พื้นที่อื่นๆ	235,498	1.61
รวมพื้นที่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน		14,606,250	100.00

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2546)



สัญลักษณ์	คำอธิบายป่าไม้ลุ่มน้ำปิงตอนบน	เนื้อที่	
		ไร่	%
	ป่าดิบแล้ง (Dry Evergreen Forest)	399,252	2.73
	ป่าดิบเขา (Hill Evergreen Forest)	2,210,328	15.14
	ป่าสนเขา (Pine Forest)	702	0.00
	ป่าเบญจพรรณ (Mixed Deciduous Forest)	6,044,305	41.39
	ป่าเต็งรัง (Dry Dipterocarp Forest)	1,877,385	12.86
	สวนสัก (Teak Plantation)	45,690	0.31
	สวนสน (Pinus plantation)	27,182	0.19
	สวนยูคาลิปตัส (Eucalyptus Plantation)	1,071	0.01
	สวนไม้กระยาเลย (Non-teak species plantation)	7,504	0.05
	ป่าที่ฟื้นฟูตามธรรมชาติ (Secondary Growth Forest)	52,448	0.36
	พื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture area)	3,583,225	24.54
	เมือง (Urban)	62,005	0.42
	ทุ่งหญ้า (Grassland)	35,462	0.24
	ป่าทุ่ง (Savannah)	1,513	0.01
	แหล่งน้ำ (Water bodies)	85,065	0.58
	ไร่ร้าง (Old clearing)	78,463	0.54
	ไร่เลื่อนลอย (Active shifting cultivation)	83,700	0.57
	พื้นที่อื่นๆ (Other area)	7,204	0.05
รวม		14,602,500	100

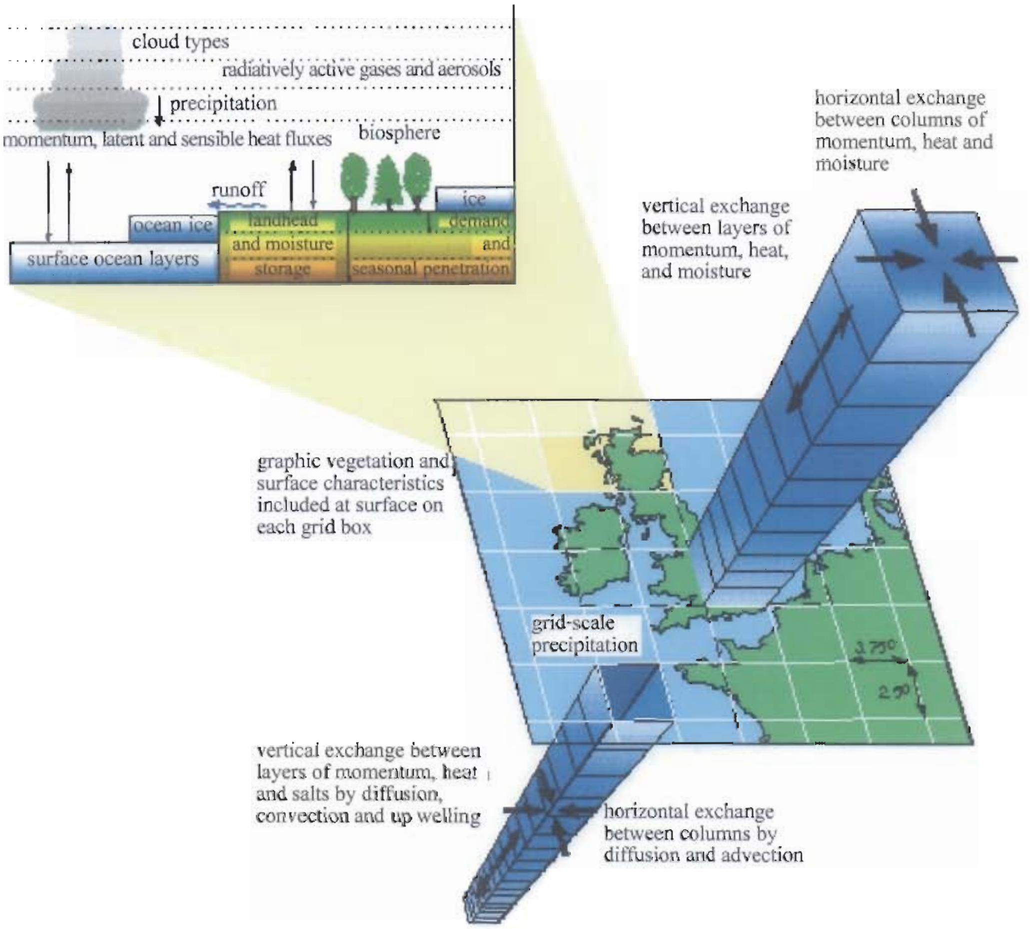
ภาพที่ 6 แผนที่ป่าไม้และการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2546)

2. แบบจำลองภูมิอากาศโลก (Global Climate Models)

ในปัจจุบันการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกสามารถวิเคราะห์ได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก Global Climate Models หรือ General Circulation Models (GCMs) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ใช้ในการจำลองสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันและอนาคตของโลกที่ได้รับผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจก (Green House Gases, GHGs) และการฟุ้งกระจายในชั้นบรรยากาศ (aerosols) โดย GCMs เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการจำลองสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันของโลกและยังใช้ในการคาดการณ์สภาพภูมิอากาศในอนาคตที่สถานการณ์ต่าง ๆ ได้อีกด้วย โดยใช้หลักการถ่ายทอดพลังงานของระบบซึ่งประกอบด้วย ชีวภพ (Biosphere) อุทกภาคหรือพื้นน้ำ (Hydrosphere) บรรยากาศ (Atmosphere) และพื้นธรณี (Geosphere) โดยพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายทอดระหว่างส่วนประกอบของโลกเหล่านี้ เพื่อให้เกิดสมดุลของพลังงานซึ่งมีผลต่อสภาพภูมิอากาศและฤดูกาลในที่ต่าง ๆ (กัณฑรีย์, 2548) แบบจำลอง GCMs เป็นการจำลองที่มีลักษณะเป็นกริด (cartesian point) ที่มีความละเอียดในแนวราบและแนวดิ่งแตกต่างกันในแต่ละส่วนของโลกและชนิดของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 7 (IPCC, 2007)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลอง GCM ขึ้นมามากมายโดยหน่วยงานแนวหน้าทั่วโลก ซึ่งอยู่ในประเทศที่พัฒนาแล้วทั้งสิ้น (แสดงในตารางที่ 5) อาทิเช่น แบบจำลอง ECHAM5-OM ของประเทศเยอรมัน แบบจำลอง HadCM3 ของประเทศอังกฤษ แบบจำลอง CGCM3 ของประเทศแคนาดา และแบบจำลอง CSIRO-Mk3 ของประเทศออสเตรเลีย เป็นต้น การสร้างและพัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศมีความซับซ้อนและใช้ข้อมูลจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยหน่วยงานเหล่านี้ได้มีการนำข้อมูลภูมิอากาศด้านต่าง ๆ ที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละภูมิภาคไปใช้ร่วมกับแบบจำลองด้านภูมิอากาศและประเมินเป็นข้อมูลภูมิอากาศด้านต่าง ๆ ภายใต้กริดขนาดใหญ่ (ประมาณ 100,000 ตารางกิโลเมตร ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 6) จากนั้นนำสมมุติฐานต่าง ๆ (scenarios) ของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่จัดทำขึ้นโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศหรือ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) โดยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การเพิ่มขึ้นของผลผลิตมวลรวมของประเทศ (GDP) และ การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น นำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองด้านภูมิอากาศเพื่อการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตที่ได้จากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงในอดีต



ภาพที่ 7 ภาพจำลองการทำงานของ GCM

ที่มา: IPCC (2007)

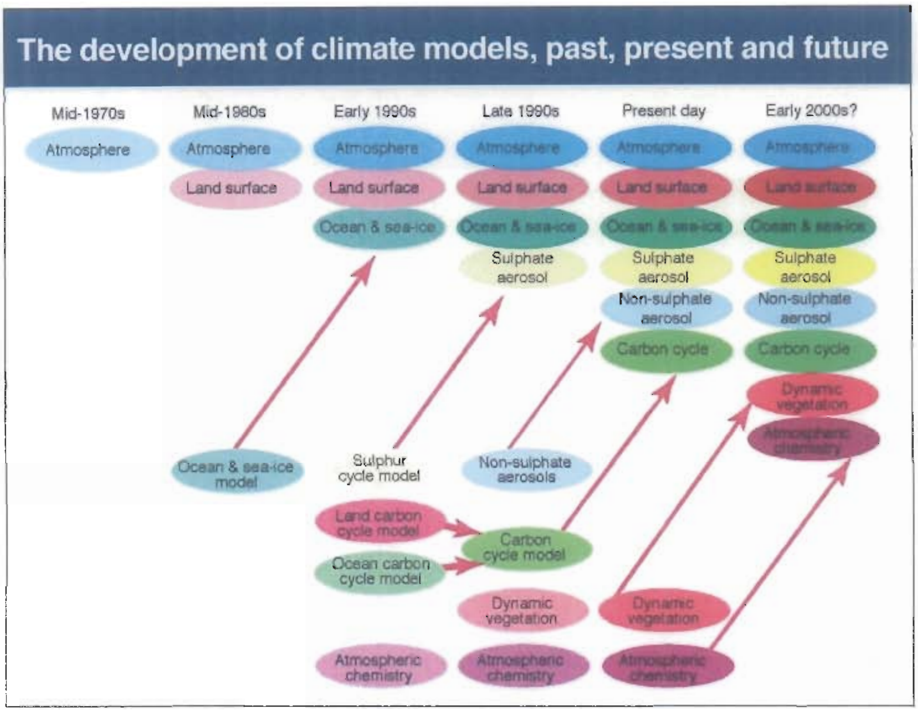
ตารางที่ 5 แบบจำลองภูมิอากาศโลกและสมมติฐาน (scenarios) ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล เพื่อจำลองเหตุการณ์ภูมิอากาศในอนาคตจากสถาบันต่าง ๆ

Center	Acronym	Model	SRES Scenario Runs							
			COM-MIT	PI-cntrl	20C3M	A2	A1B	B1	1%-2X	1%-4X
Beijing Climate Center (China)	BCC	CM1		●	●		●	●	●	
Bjerkenes Centre for Climate Research (Norway)	BCCR	BCM 2.0	●	●	●	●	●	●	●	
Canadian Center for Climate Modeling and Analysis (Canada)	CCCma	CGCM3 (T47 resolution)	●	●	●	●	●	●	●	●
		CGCM3 (T63 resolution)		●	●		●	●		
Centre National de Recherches Meteorologiques (France)	CNRM	CM3	●	●	●	●	●	●	●	●
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)	CSIRO	Mk3.0	●	●	●	●	●	●	●	
Max-Planck-Institute for Meteorology (Germany)	MPI-M	ECHAM5-OM	●	●	●	●	●	●	●	●
Meteorological Institute, University of Bonn (Germany), Meteorological Research Institute of KMA (Korea), Model and Data Groupe at MPI-M (Germany)	MIUB, METRI, M&D	ECHO-G	●	●	●	●	●	●	●	●
Institute of Atmospheric Physics (China)	LASG	FGOALS-g1.0	●	●	●		●	●	●	
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	GFDL	CM2.0	●	●	●	●	●	●	●	●
		CM2.1	●	●	●	●	●	●	●	●

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Center	Acronym	Model	SRES Scenario Runs							
			COM-MIT	PI-cntrl	20C3M	A2	A1B	B1	1%-2X	1%-4X
Goddard Institute for Space Studies (USA)	GISS	AOM		●	●		●	●		
		E-H		●	●		●		●	
		E-R	●	●	●	●	●	●	●	●
Institute for Numerical Mathematics (Russia)	INM	CM3.0	●	●	●	●	●	●	●	●
Institute Pierre Simon Laplace (France)	IPSL	CM4	●	●	●	●	●	●	●	●
National Institute for Environmental Studies (Japan)	NIES	MIROC3.2 hires		●	●		●	●	●	
		MIROC3.2 medres	●	●	●	●	●	●	●	●
Meteorological Research Institute (Japan)	MRI	CGCM2.3.2	●	●	●	●	●	●	●	●
National Centre for Atmospheric Research (USA)	NCAR	PCM	●	●	●	●	●	●	●	●
		CCSM3	●	●	●	●	●	●	●	●
UK Met. Office (UK)	UKMO	HadCM3	●	●	●	●	●	●	●	
		HadGEM1		●	●	●	●		●	
National Institute of Geophysics and Volcanology (Italy)	INGV	SXG 2005	●	●	●	●	●	●	●	●

ที่มา: IPCC (2007)



ภาพที่ 8 การพัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศในอดีตจนถึงปัจจุบันและในอนาคต

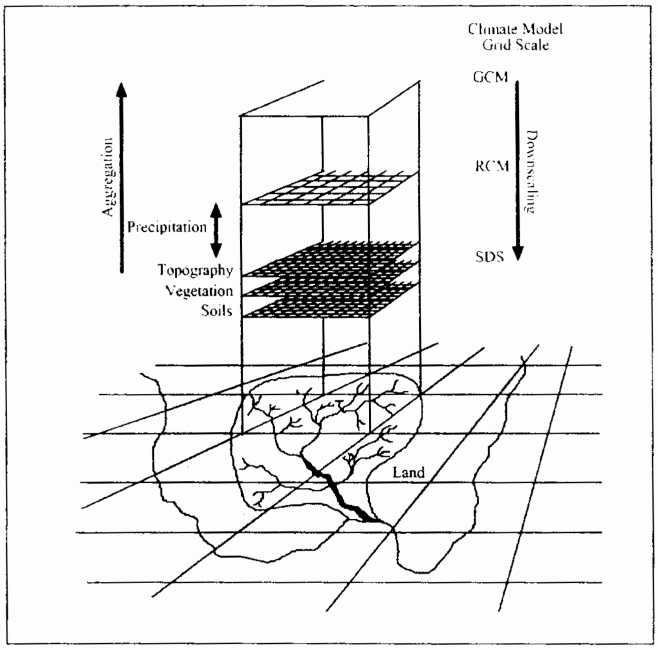
ที่มา: IPCC (2001)

ตารางที่ 6 ตัวอย่างขนาดความละเอียด (resolution) ของกริด และจำนวนชั้นข้อมูลในบรรยากาศที่นำมาใช้ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

GCM	Atmospheric resolution (lat ° x long °)	Number of atmospheric layers	Ocean resolution (lat ° x long °)	Number of ocean layers	Average global increase by 2050s (°C)
CGCM1	3.75 x 3.75	10	13 x 35	29	2.7
CGCM2	3.75 x 3.75	10	13 x 35	29	N/a
HadCM2 and 3	2.5 x 3.75	19	20 x 35	20	1.7
ECHAM4	2.8 x 2.8	19	18 x 47	11	1.3
CCSR-98	5.6 x 5.6	20	9 x 24	17	2.4
CSIRO-Mk2b	3.2 x 5.6	9	3.2 x 5.6	21	2.0
GFDL	4.5 x 7.5	9	4.5 x 3.7	12	2.2

ที่มา: IPCC (2007)

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่ได้จากแบบจำลอง GCMs จะแสดงผลในพื้นที่ที่มีขนาดกว้างมาก ๆ (large scale) ซึ่งขึ้นกับขนาดของกริดการแสดงผลลัพธ์ แต่สำหรับระดับสเกลที่เล็กลงเช่นในระดับภูมิภาค (regional scale) หรือระดับท้องถิ่น (local scale) จะไม่สามารถแสดงผลที่เชื่อถือได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการลดส่วน (downscaling) ขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์สภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นหรือระดับภูมิภาค จากตัวแปรด้านภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศจากสเกลที่มีขนาดใหญ่โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ (ดังแสดงในภาพที่ 9) คือ Statistical DownScaling (SDS) จะใช้วิธีเชิงตัวเลขทางสถิติมาช่วยในการทำนายสภาพอากาศ ส่วนวิธีที่สอง คือวิธี Regional Climate Models (RCMs) โดยจะจำลองลักษณะภูมิอากาศต่าง ๆ ในสเกลย่อลงไปในแบบจำลอง GCMs โดยใช้วิธีทางพลศาสตร์ (dynamic) ที่ตัวแปรและเงื่อนไขผันแปรไปตามเวลา และใช้พื้นที่และขอบเขตเงื่อนไขจากแบบจำลอง GCMs เป็นตัวควบคุม



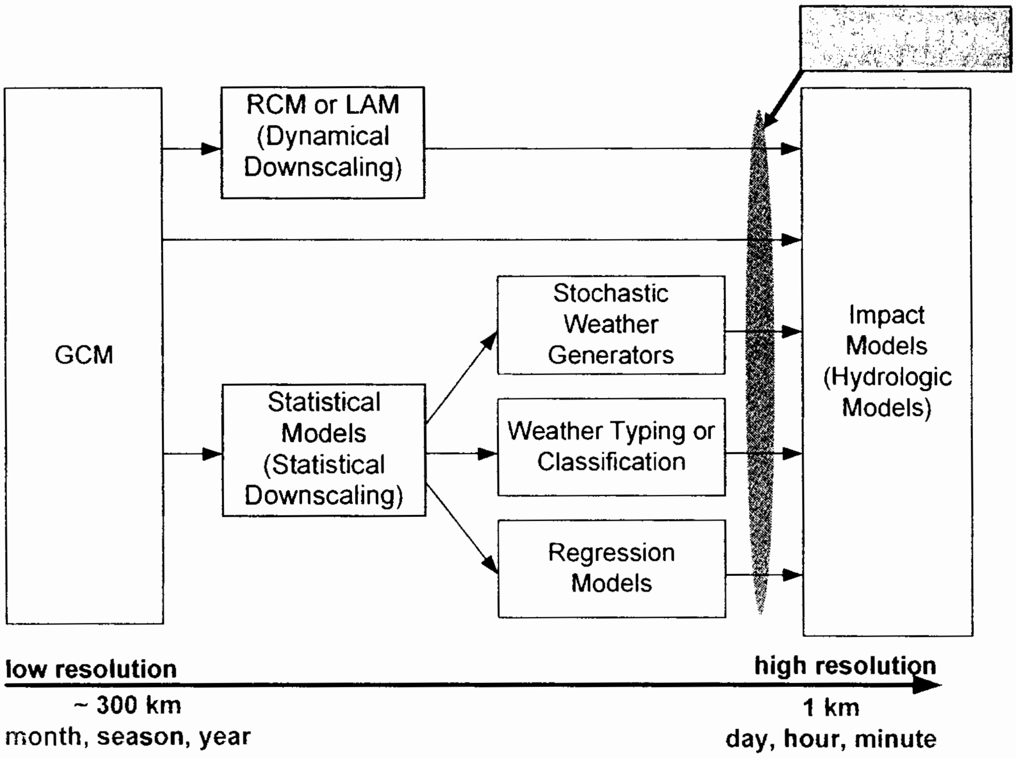
ภาพที่ 9 ภาพแสดงการจำลองภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยวิธี downscaling

ที่มา: Robert L. Wilby and Christian W. Dawson (2007)

3. เทคนิคการลดส่วน (Downscaling Technique)

เทคนิคการลดส่วนหรือการทำ downscaling ของตัวแปรด้านภูมิอากาศนี้ได้ถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านอุทกวิทยา โดยการทำ downscaling คือ การนำชุดตัวแปรด้านภูมิอากาศ (predictors) ที่ได้จากแบบจำลอง GCMs มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านอุทกวิทยา (predictands) เช่น ปริมาณฝน อุณหภูมิ เป็นต้น ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน เพื่อให้ได้ฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่า (transfer function) จากนั้นสามารถนำฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่ามาประยุกต์ใช้กับผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรภูมิอากาศตามสมมุติฐานต่าง ๆ (scenarios) ในอนาคต ก็จะได้ตัวแปรด้านอุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลกระทบและแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงรวมทั้งหาแนวทางการจัดการต่อไป

ในการทำ downscaling นั้น โดยทั่วไปมีวิธีการหลัก ๆ 2 วิธี คือ วิธีการทางพลศาสตร์ (Dynamical Downscaling) และวิธีการทางสถิติ (Statistical Downscaling) ดังแสดงในภาพที่ 10 สำหรับวิธีการแรกนั้นจะประยุกต์ใช้ในแบบจำลองภูมิอากาศในระดับภูมิภาคที่มีความละเอียดสูง (high resolution Regional Climate Models, RCMs) ซึ่งจะใช้ผลลัพธ์ของตัวแปรภูมิอากาศที่มีความละเอียดในระดับต่ำ (coarser resolution) จาก GCMs เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิ ความดันไอน้ำความดันพื้นผิวโลก เป็นต้น มาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และเงื่อนไขควบคุม (lateral boundary condition) ซึ่งจะได้เป็นผลลัพธ์ของตัวแปรด้านภูมิอากาศที่มีความละเอียดมากขึ้น (higher resolution) ที่แสดงผลลัพธ์ในพื้นที่ขนาดใหญ่ (mesoscale information) อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้วิธีการนี้มีข้อด้อยที่สำคัญคือต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่สูงและผลที่ได้รับขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแบบจำลอง GCMs รวมทั้งมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภูมิอากาศตามสมมุติฐานต่างๆ (scenarios) ในอนาคต



ภาพที่ 10 หลักการและวิธีในการทำ downscaling

ที่มา: Dimitri (2008)

วิธีที่สองคือวิธีการทางสถิติ (Statistical Downscaling) จะแบ่งออกเป็นสองวิธีการย่อย คือ วิธีการแบบถดถอย (regression based approaches) และวิธีการทางสโตคาสติก (stochastic weather state based approaches) สำหรับวิธีการแบบถดถอย (regression based approaches) นั้นเป็นการหาความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างตัวแปรด้านภูมิอากาศ (predictors) ที่ได้จากแบบจำลอง GCMs กับตัวแปรด้านอุทกวิทยา (predictands) ที่ตรวจวัดได้จากสถานีภาคพื้นดิน เพื่อนำมาสร้างฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่า (transfer function) (Wigley et al., 1990 และ Karl et al., 1990) สำหรับวิธีการแบบถดถอยที่มีการประยุกต์กันทั่วไปประกอบด้วยวิธี linear regression, non linear regression, artificial neural networks, canonical correlation และ principal component analysis (Conway et al., 1996) สำหรับข้อดีของวิธีการแบบถดถอยคือไม่ยุ่งยากในการคำนวณ แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือเป็นแบบจำลองที่แสดงผลของข้อมูลภูมิอากาศและข้อมูลด้านอุทกวิทยาเพียงบางส่วนเท่านั้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ตัวแปรด้านอุทกวิทยา (predictands) คือข้อมูลฝน ซึ่งจะทำให้เหตุการณ์ในลักษณะ

รุนแรง (extreme events) ที่ไม่มีการบันทึกไว้ไม่สามารถประเมินได้โดยวิธีดังกล่าว (Wilby et al., 2002)

สำหรับในส่วนของวิธีการทางสโตคาสติก (stochastic weather state based approaches) นั้น โดยทั่วไปจะทำการจัดกลุ่มสถานะของภูมิอากาศท้องถิ่น (weather state) ที่แตกต่างในแต่ละช่วงเวลา ตามอิทธิพลของตัวแปรด้านภูมิอากาศที่มีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวที่แตกต่างกันของการเกิดฝนบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (distinct rainfall distribution patterns on the ground)

วิธี Statistical Downscaling มีข้อได้เปรียบกว่าวิธี Dynamical Downscaling คือ ใช้ต้นทุนต่ำ มีการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในพื้นที่จำกัดได้รวดเร็วกว่า ไม่ใช้เทคโนโลยีมากนักดังนั้น Statistical Downscaling ในปัจจุบันจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจมากกว่า ดังสรุปจุดเด่น-จุดด้อยของวิธี downscaling ทั้งสองวิธีในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 จุดเด่น (strengths) จุดด้อย (weakness) **ของ** statistical **และ** dynamical downscaling

	statistical downscaling	**dynamical downscaling**
จุดเด่น (strengths)	- ใช้ข้อมูลภูมิอากาศความละเอียดในระดับที่เท่ากับผลของแบบจำลอง GCM - ราคาถูก ใช้งานง่ายไม่ยุ่งยาก - สามารถวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและภัยพิบัติจากการจำลองภูมิอากาศในอนาคตได้ - สามารถนำมาวิเคราะห์ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย	- ให้ความละเอียดของข้อมูลภูมิอากาศในระดับ 10-50 กม. จากผลของแบบจำลอง GCM - สามารถตอบสนองต่อผลกระทบหรือปัจจัยด้านต่าง ๆ ได้ - มีกระบวนการวิเคราะห์ในบรรยากาศ เช่น ฝนปะทะภูเขา (orographic precipitation) - มีความเหมาะสมกับแบบจำลอง GCM
จุดด้อย (weakness)	- ขึ้นอยู่กับขอบเขตเงื่อนไขที่ได้จาก GCM - การเลือกขนาดพื้นที่และที่ตั้งที่ได้รับผลกระทบ - ต้องการข้อมูลที่มีคุณภาพสูงสำหรับการปรับเทียบ - ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านภูมิอากาศและอุทกวิทยาไม่อยู่นิ่ง (non-stationary) - ผลลัพธ์ที่ได้จะแปรผันตามตัวแปรด้านภูมิอากาศที่เลือกใช้ - การคัดเลือกวิธีการส่งผ่าน (transfer) จะมีผลต่อผลลัพธ์ - จะมีปัญหาในช่วงเมื่อการผันแปรของภูมิอากาศ (low-frequency climate variability problematic) - ประยุกต์ใช้แบบ off-line ผลที่ได้จะไม่เหมือนกับใน GCM	- ขึ้นอยู่กับขอบเขตเงื่อนไขที่ได้จาก GCM - การเลือกขนาดพื้นที่และที่ตั้งที่ได้รับผลกระทบ - ต้องการความสามารถในการคำนวณสูง - สภาพการณ์จำลองภูมิอากาศในอนาคตจะกระทำนาน ๆ ครั้งเพราะใช้เวลาประมวลผลนานและใช้ข้อมูลมาก - การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้นจะมีผลต่อผลลัพธ์ - เมฆและการพาความร้อนจะมีผลต่อผลลัพธ์ (ปริมาณฝน) ที่ได้ - ใช้ได้เฉพาะพื้นที่ ไม่สามารถใช้ร่วมกันได้ - ประยุกต์ใช้แบบ off-line ผลที่ได้จะไม่เหมือนกับใน GCM

ที่มา: Robert L. Wilby and Christian W. Dawson (2007)

4. ทฤษฎีต่าง ๆ ในการลดส่วนทางด้านสถิติ (Statistical Downscaling Methods)

หลักการเบื้องต้นของทฤษฎี Statistical Downscaling จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในชั้นบรรยากาศโลก (atmospheric variables or pridictors) กับตัวแปรภาคพื้นดิน (predictands) ในรูปสมการทั่วไปดังนี้ (1) (Said, 2007)

$$R_t = F(X_T) \text{ โดยที่ } T \le t \quad (1)$$

เมื่อ R_t = ตัวแปรภูมิอากาศท้องถิ่น (local-scale predictand) ทั้งแบบสถานีเดียวหรือเป็นกลุ่มที่เวลา t

X_T = ชุดตัวแปรภูมิอากาศ (predictor set) จากอดีต (T) ถึงปัจจุบันที่เวลา t

F = ฟังก์ชั่น (function) หรือวิธีการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง 2 พื้นที่ที่แตกต่างกัน

การทำ Statistical Downscaling ส่วนมากจะเน้นข้อมูลตัวแปรทางด้านอุทกวิทยา (predictand) เป็นแบบรายวัน เนื่องจากเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการจำลองระบบในธรรมชาติทั่วไป

สำหรับการทำ Statistical Downscaling มีอยู่หลายวิธี แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึง 3 วิธีหลัก ๆ คือ Weather-Pattern Methods, Regression Methods และ Stochastic Weather Generators

1) Weather-Pattern Methods

Weather-Pattern Methods เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงกันระหว่างภูมิอากาศในสเกลใหญ่กับสภาพอากาศในระดับท้องถิ่น

$$R_T = F_R(S_t) \quad (2)$$

$$(S_t) = F_s(X_T) \text{ โดยที่ } T \le t \quad (3)$$

เมื่อ S_t = สถานะของสภาพอากาศที่เวลา t

โดยทั่วไปทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายความหมายสภาพอากาศ F_s ที่สำคัญโดยตรงกับการประยุกต์ใช้ทฤษฎีนี้ เช่น cluster analysis ในชั้นบรรยากาศ หรือ การใช้ subjective circulation classification schemes

ข้อดีของวิธีนี้ คือ มีความเรียบง่าย และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกันซึ่งอยู่ในพื้นที่ภูมิภาคขนาดใหญ่ภายใต้รูปแบบของการหมุนเวียน (circulation pattern) ที่มีแบบเดียวกัน ข้อจำกัดหลักของวิธีการนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบสภาพอากาศต่าง ๆ อาจไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากแบบจำลอง GCM (host GCM)

2) ทฤษฎีเชิงถดถอย (Regression Methods)

Wilby and Wigley (1997) ได้ให้คำจำกัดความของ Regression Methods ไว้โดยเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นแบบเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงของพารามิเตอร์จากกริดย่อยกริดหนึ่ง (sub grid scale) และ ตัวแปรด้านภูมิอากาศในกริดที่มีค่าความละเอียดที่หยาบกว่า (coarser-resolution) โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือแบบไม่เป็นเส้นตรงระหว่าง R และ X แสดงดังสมการที่ (4)

$$R_T = F_Y\left(X_T;\theta\right) \text{ โดยที่ } T \le t \tag{4}$$

เมื่อ θ = ค่าพารามิเตอร์

F_Y = ฟังก์ชั่นเชิงถดถอยแบบเส้นตรง (linear) และแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear)

โดยหลักพื้นฐานของ Regression Downscaling Methods จะอาศัยความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ในทางสถิติ (empirical statistical relationship) ระหว่าง predictors จากของสเกลใหญ่ (large scale) กับพารามิเตอร์ของสเกลในระดับท้องถิ่น (local scale) (Said, 2007)

ข้อดีหลัก ๆ ในกระบวนการของ Regression Downscaling คือ เป็นวิธีการที่ง่ายและใช้รูปแบบการคำนวณที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการ downscaling ด้วยวิธีอื่น แต่อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้วิธีทาง regression จะมีข้อจำกัดตรงที่ต้องหาความสัมพันธ์ที่ดีของ predictors และ predictand ให้ได้ด้วย

3) Stochastic Weather Generators

Stochastic Weather Generators ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการวางแผนออกแบบ และการจัดการของระบบแหล่งน้ำต่าง ๆ ทฤษฎีของ Stochastic Weather Generators เป็นการใช้คุณลักษณะหลักการพื้นฐานทางด้านการหมุนเวียนต่าง ๆ ร่วมกัน แต่ต่างกันในทางที่ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) เป็นเงื่อนไขโดยตรงกับ predictands แทนที่การใช้รูปแบบของสภาพอากาศ (Weather patterns) ต่าง ๆ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_T = F_W(\theta|X_T) \text{ โดยที่ } T \leq t \tag{5}$$

หรือ

$$R_T = F_W(\theta|S_t) \tag{6}$$

เมื่อ θ = ชุดพารามิเตอร์ของ Weather Generator ซึ่งอธิบายโดย F_W

สำหรับรูปแบบพื้นฐานของ Daily Weather Generators จะมี 2 รูปแบบ คือ Markov Chain Approach และ Spell-Length Approach สิ่งที่เหมือนกันคือค่าพารามิเตอร์ในด้านสถิติของข้อมูลที่วัดจริง (observed data) จะถูกดึงออกมาและใช้ร่วมกับส่วนประกอบต่าง ๆ แบบสุ่ม (random components) เพื่อใช้ในการสร้างข้อมูลที่ช่วงเวลาเดียวกันและความยาวของข้อมูลต่าง ๆ กันไป

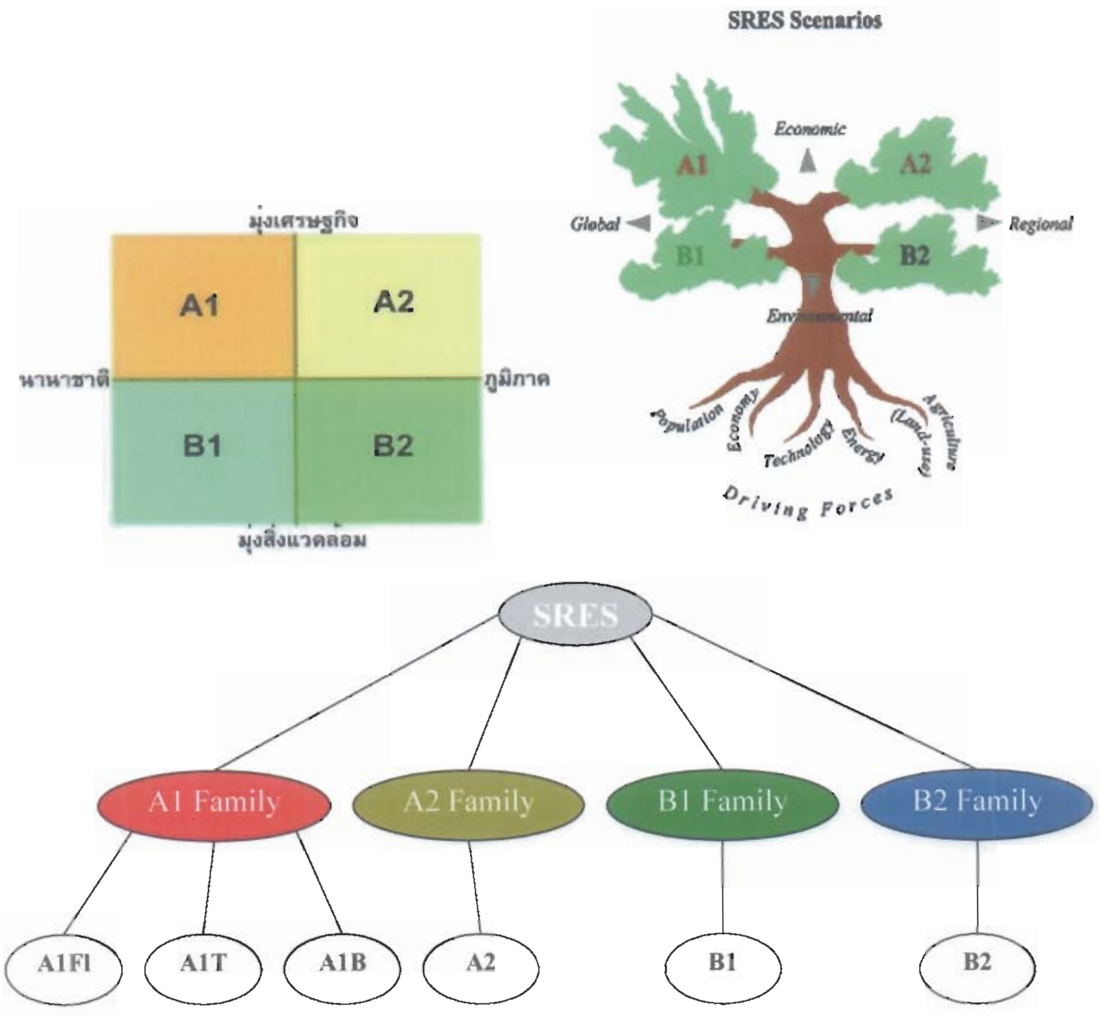
โดยทั่วไปข้อดีที่สำคัญของกระบวนการใน Stochastic Weather Generators คือ มีความสามารถทำซ้ำหลายครั้งของลักษณะเชิงสถิติของตัวแปรสภาพอากาศที่เป็นรายวัน ณ ตำแหน่งเฉพาะจุดได้ นอกจากนั้นยังสามารถสร้างชุดข้อมูลขนาดใหญ่ภายใต้สมมติฐานของภูมิอากาศที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการประเมินและศึกษาได้ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยหลักของกระบวนการนี้คือ

จะถูกนำไปสัมพันธ์กับวิธีการที่ไม่มีกฎเกณฑ์ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับเงื่อนไขต่าง ๆ ของภูมิอากาศในอนาคต

5. สมมติฐานการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในโลกอนาคตของ IPCC SRES Scenarios (Special Report on Emission Scenarios)

สมมติฐาน (scenario) คือ การอธิบายถึงสถานการณ์ในอนาคตภายใต้เงื่อนไขบางอย่างที่กำหนดขึ้นซึ่งเป็นการอธิบายสภาพการณ์ของอนาคตโดยอิงกับหลักการทางวิทยาศาสตร์บางประการ สมมติฐานนี้จัดว่าเป็นการอธิบายสภาพการณ์ของอนาคต โดยอาจใช้หรือไม่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการกำหนดสมมติฐานในอนาคต (ศุภกร, 2550)

ข้อมูลสำคัญที่ต้องใช้นำเข้าในแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCMs) คือ ข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต แต่การประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตมีความไม่แน่นอนสูง เนื่องจากขึ้นอยู่กับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม การเติบโตของประชากรและเทคโนโลยีในอนาคต ดังนั้นจึงมีการสร้างสมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission scenarios) และจัดทำเป็นรายงาน SRES (Special Report on Emission Scenarios) ขึ้นโดย IPCC เพื่อใช้ในรายงาน Third Assessment Report (TAR) ในปี ค.ศ.2001 โดยแบ่งออกเป็น 4 ตระกูล (Families) หลัก คือ A1, A2, B1 และ B2 ดังภาพที่ 11 โดยทั้ง 4 ตระกูล จะแบ่งเป็น 6 กลุ่มหลัก ซึ่งอยู่ในตระกูล A2, B1 และ B2 อย่างละกลุ่มและอีก 3 กลุ่มจะอยู่ในตระกูลของ A1 (กัณฑรีย์, 2548)



ภาพที่ 11 สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission scenarios) ของโลกในอนาคต

ที่มา: IPCC (2001)

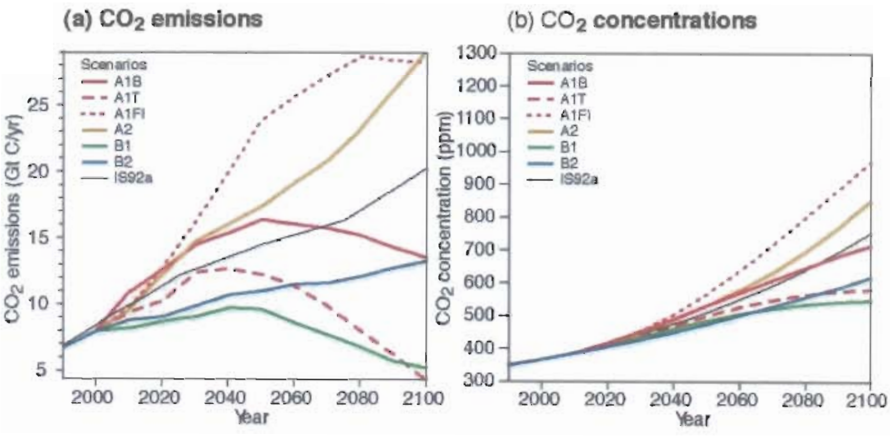
ก) A1 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่การพัฒนาเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วของโลกในอนาคต มีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นถึง 9 พันล้านคนในปี ค.ศ.2050 หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น มีการพัฒนาและกระจายตัวทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ข) A2 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มีความต่างกันมากในโลก มีการพึ่งพาตนเองและอนุรักษ์ไว้ซึ่งวัฒนธรรมท้องถิ่น การร่วมมือกันระหว่างภูมิภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จำนวนประชากรเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ การพัฒนาด้านเศรษฐกิจ รายได้ต่อหัว และการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีจะกระจายและเป็นไปอย่างช้า ๆ

ค) B1 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มีการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม อนาคตประชากรสูงเหมือนกับ A1 มีการเติบโตทางเศรษฐกิจเหมือนกับ A1 แต่โครงสร้างเศรษฐกิจเปลี่ยนไปเป็นภาคบริการและสารสนเทศ มีการใช้เทคโนโลยีที่สะอาด เน้นการแก้ปัญหาเศรษฐกิจและสังคมสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน

ง) B2 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มองในระดับท้องถิ่น–ภูมิภาค เน้นการแก้ปัญหาท้องถิ่นด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน มีการเจริญเติบโตของประชากรโลกอย่างต่อเนื่องแต่มีอัตราเพิ่มขึ้นช้ากว่า A2 มีการพัฒนาเศรษฐกิจในระดับปานกลาง มีการเพิ่มขึ้นในด้านเทคโนโลยีน้อยกว่า B1 และ A1

กล่าวโดยสรุปคือตระกูล A (A family) เป็นการพัฒนาที่มุ่งเน้นด้านเศรษฐกิจเป็นหลัก (more economic) ตระกูล B (B family) เป็นการพัฒนาที่ดูแลสิ่งแวดล้อม (more environmental) สำหรับ 1 และ 2 ที่ต่อท้ายนั้นมาจากสายพันธุ์ที่ 1 เป็นการพัฒนาที่มีความร่วมมือระหว่างประเทศ มีการถ่ายทอดเทคโนโลยี (more global) ส่วน สายพันธุ์ที่ 2 เป็นความร่วมมือระหว่างภูมิภาค (more regional) นอกจากนี้ยังมี กลุ่ม A1Fl คือ ใช้พลังงานฟอสซิลอย่างเข้มข้น (fossil fuel intensive) กลุ่ม A1T มีเทคโนโลยีด้านพลังงานหมุนเวียนทันสมัย (non fossil energy sources and technology) และกลุ่ม A1B เป็นการพัฒนาดูแลสิ่งแวดล้อมและมีความร่วมมือระหว่างโลกและภูมิภาคอย่างสมดุล (balance of all sources) ภาพที่ 12 แสดงการปล่อยและความเข้มของก๊าซ CO_2 ภายใต้สมมติฐานต่างๆ จากรายงานของ IPCC

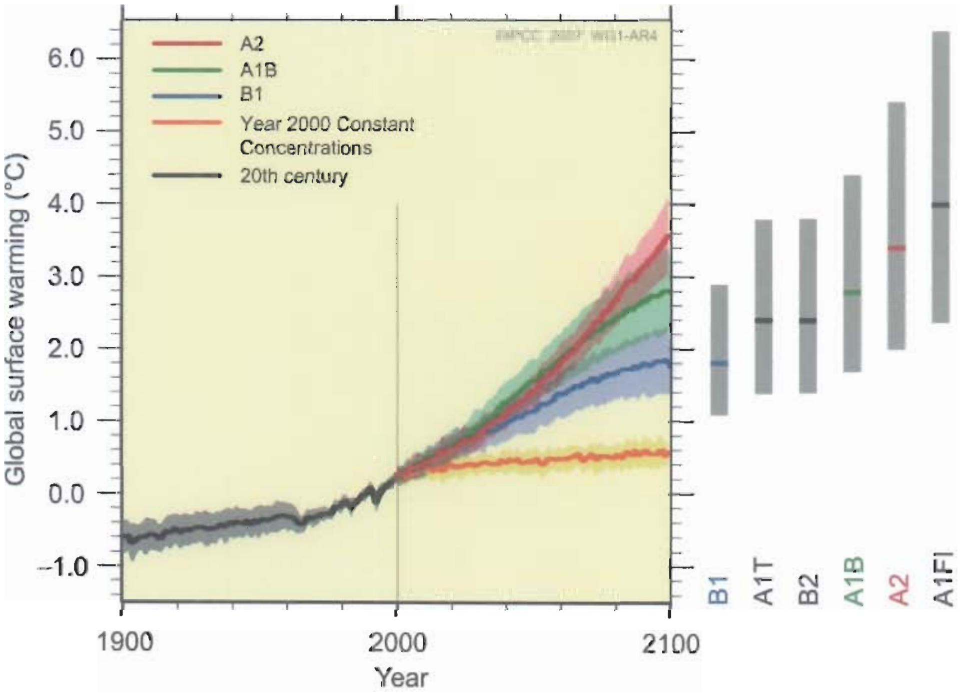


ภาพที่ 12 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ (scenarios)

ที่มา: IPCC (2001)

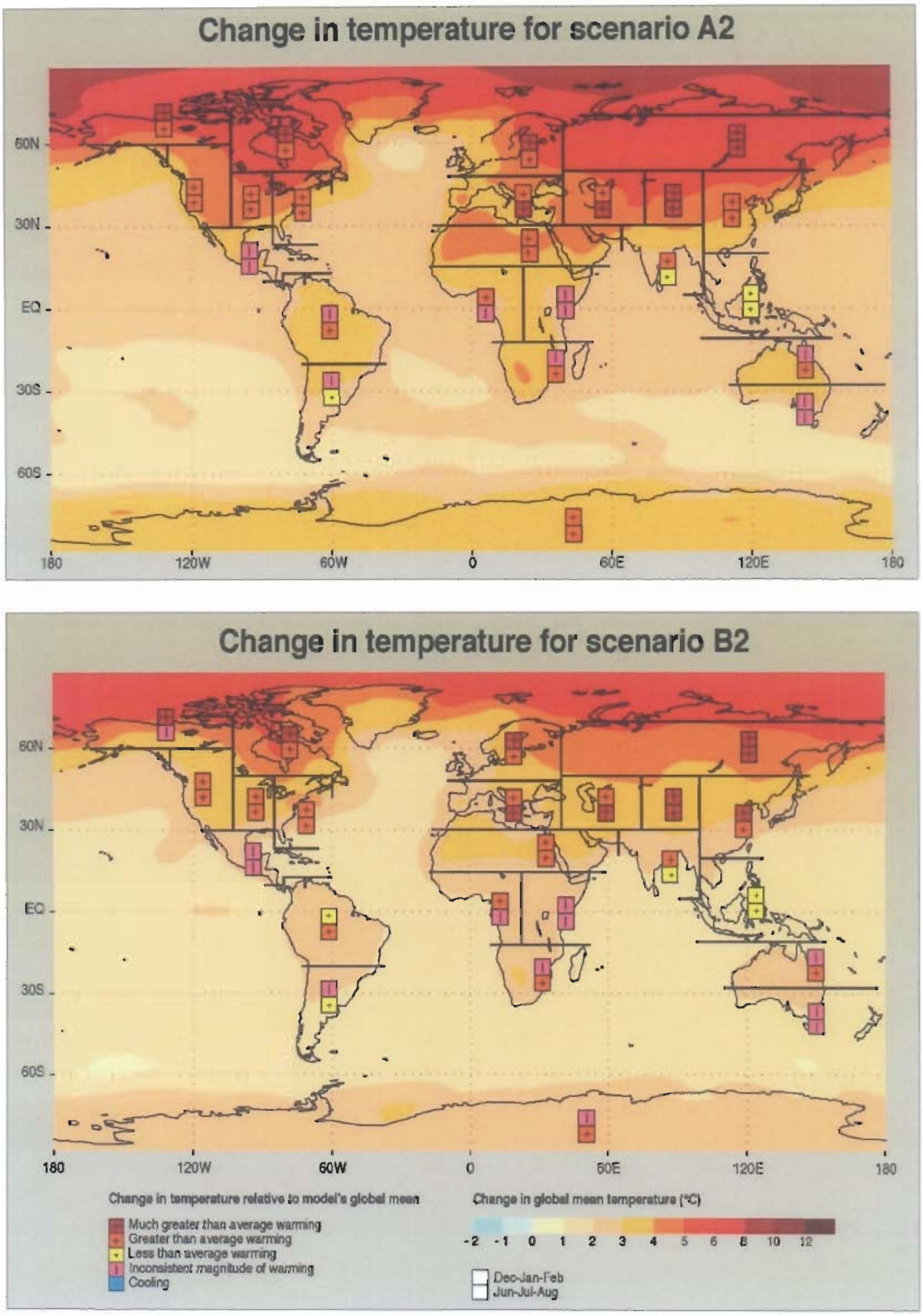
6. ภาพจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนของโลกในอนาคต

จากรายงาน Third Assessment Report (TAR) ของ IPCC (2001) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตภายใต้การจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตตาม IPCC SRES รูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 13 และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงในที่ต่าง ๆ ของโลกจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCMs) ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 โดยใช้แนวทางการพัฒนาแบบ A2 และ B2 ของ IPCC SRES ซึ่งคาดว่าจะเกิดขึ้นในคริสศตวรรษที่ 21 นี้ ซึ่งการนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ของประเทศต่างๆ อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง



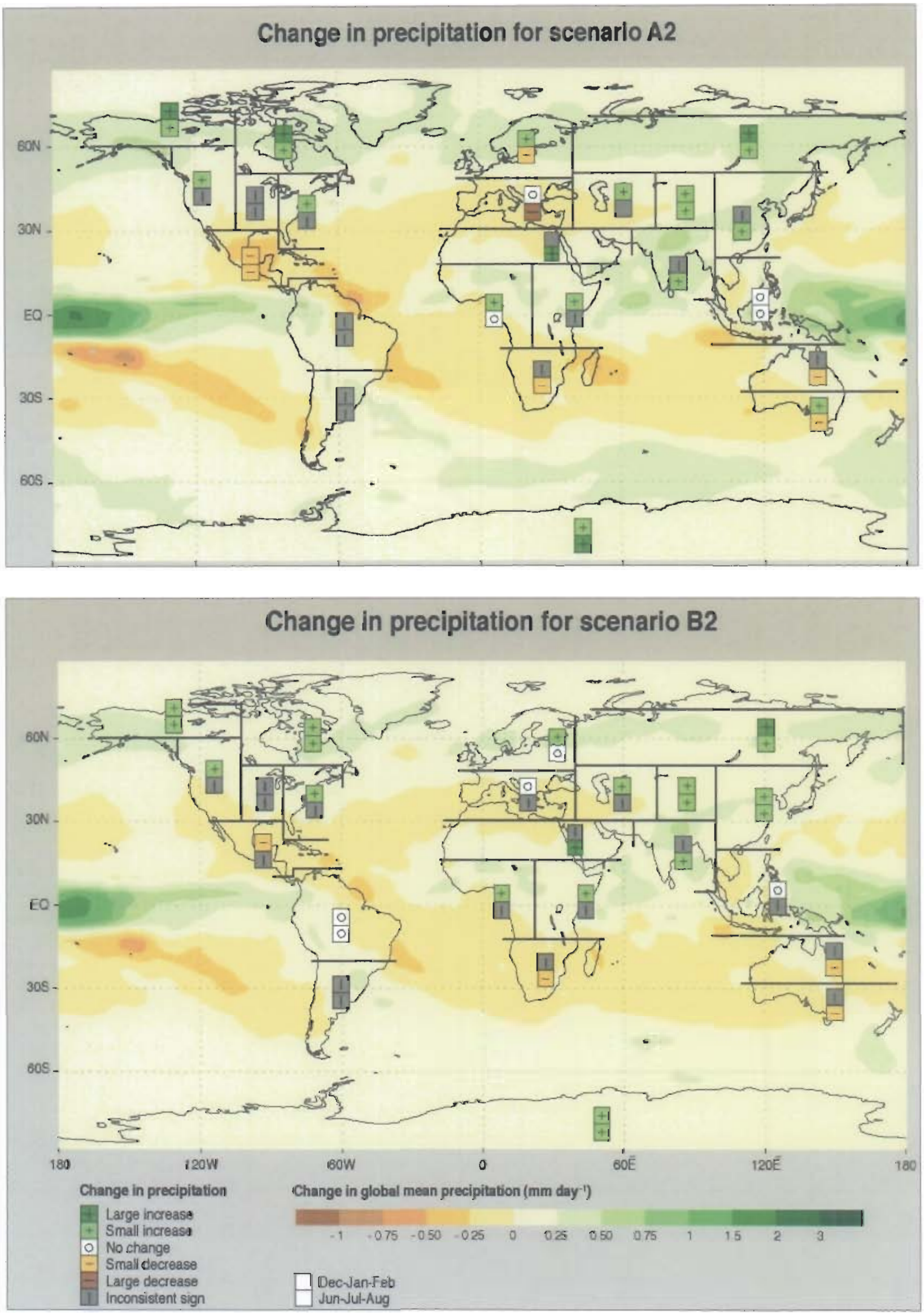
ภาพที่ 13 ผลการจำลองอุณหภูมิในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศต่างๆ ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต

ที่มา: IPCC (2001)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในที่ต่างๆ ของโลกตามแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ที่มา: IPCC (2001)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในที่ต่างๆ ของโลกตามแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ที่มา: IPCC (2001)

7. การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในปัจจุบันได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการศึกษาในพื้นที่ที่มีขนาดเล็กลงกว่าในระดับโลก เช่น ในระดับภูมิภาคหรือระดับลุ่มน้ำ รวมไปถึงประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้หันมาให้ความสำคัญกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก (Global Climate Change) กันอย่างจริงจังมากขึ้น

ประเทศไทยก็เป็นหนึ่งในหลาย ๆ ประเทศที่ให้ความสำคัญและมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศมาแล้วในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีทั้งการศึกษาเชิงสถิติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน อุณหภูมิ พายุ หรือการใช้ผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกมาศึกษาผลกระทบที่มีต่อพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย โดยได้ทำการรวบรวมผลการศึกษาต่าง ๆ ได้ดังนี้

เจษฎา (2544) ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ที่ดินที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพป่าไม้และปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน โดยการใช้ผลของแบบจำลอง ECHAM4 และ HadCM2 ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากผลการสอบเทียบแบบจำลองจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบนจากแบบจำลอง ECHAM4 เท่ากับ 26.6 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงซึ่งเท่ากับ 26.3 องศาเซลเซียส มากกว่าแบบจำลอง HadCM2 ซึ่งให้ผลการคำนวณ อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 24.7 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาผลการประเมินปริมาณฝนจากแบบจำลองทั้งสองประเภทกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงพบว่าแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยในช่วงของการปรับเทียบ (ค.ศ. 1961-1990) จากแบบจำลอง ECHAM4 และแบบจำลอง HadCM2 มีค่าเท่ากับ 1,414 และ 1,771 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงมีค่าเท่ากับ 1,225 มิลลิเมตร และเมื่อนำแบบจำลองทั้งสอง มาใช้ในการประเมินสภาพอากาศในอนาคตกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 2 เท่า ซึ่งสมมติให้เกิดขึ้นในช่วง ค.ศ. 2070-2099 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยที่ประเมินได้จากแบบจำลอง ECHAM4 และ แบบจำลอง HadCM2 จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าในปัจจุบัน 3.2 องศาเซลเซียส และ 2.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนปริมาณฝนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 1,6834 และ 2,009 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ จากการประเมินด้วยแบบจำลอง ECHAM4 และ แบบจำลอง HadCM2 ตามลำดับ โดยภาพรวมสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยใช้ผลของแบบจำลอง GCMs ดังกล่าว ยังไม่เหมาะกับการทำนายภูมิอากาศสำหรับในระดับพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสม หรือพัฒนาเทคนิคการประเมินด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อไป

นงค์นาถ (2545) ได้ศึกษาดัชนีและแนวโน้มของฝนและอุณหภูมิในประเทศไทยช่วงปี ค.ศ.1961-2000 (40 ปี) โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝน อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน จากสถานีตรวจอากาศจำนวน 46 สถานี มาทำการวิเคราะห์สรุปได้ว่าดัชนีชี้วัดอุณหภูมิส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยวันอากาศอุ่น (warm days) คืนอากาศอุ่น (warm nights) วันอากาศร้อน (hot days) และคืนอากาศร้อน (hot nights) มีแนวโน้มสูงขึ้น ขณะที่วันอากาศเย็น (cool days) คืนอากาศเย็น (cool nights) วันอากาศหนาว (cold days) และคืนอากาศหนาว (cold nights) มีแนวโน้มลดลง สำหรับแนวโน้มของดัชนีชี้วัดสภาวะฝนส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยปริมาณฝนรายปี จำนวนวันที่มีฝน ความถี่ที่มีฝนมากผิดปกติ และความแรงฝนส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง ขณะที่สัดส่วนฝนมีแนวโน้มสูงขึ้นเกือบทุกสถานี

นิพนธ์ (2548) ได้นำเสนอเอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง "ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำของประเทศไทย" ในการประชุมสัมมนาด้านสิ่งแวดล้อม สำหรับผู้บริหารระดับสูงองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นทั่วประเทศ ซึ่งจัดโดยโครงการสิ่งแวดล้อมศึกษา สถาบันเอเชียตะวันออกศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2548 ณ ห้องวีนัส โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพมหานคร โดยในส่วนหนึ่งของเอกสารการบรรยายดังกล่าวได้อ้างอิงถึงผลการศึกษาเรื่อง "ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบนและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์" ซึ่งศึกษาโดย ดร.อานนท์ สนิทวงษ์ ณ อยุธยา และ คณะฯ ซึ่งมีเนื้อหาโดยสรุปดังนี้

การศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มีผลต่อทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบนและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในอนาคตนี้ ได้ใช้แบบจำลอง Conformal Cubic Atmospheric Model (CCAM) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย CSIRO Division of Atmospheric Research ในประเทศออสเตรเลีย ทำการจำลองสภาพภูมิอากาศรายวัน สำหรับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นเวลา 3,650 วัน โดยทำการคำนวณภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศซึ่งจะเพิ่มขึ้นจาก 360 ppm ในปัจจุบัน เป็น 540 ppm (ตรงกับช่วงปี ค.ศ. 2040-2049) และ 720 ppm (ตรงกับช่วงปี ค.ศ. 2066-2075) ซึ่งการปรับเทียบแบบจำลองจะใช้ข้อมูลปริมาณฝนที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลฝนที่ตรวจวัดได้จริงจำนวน 11 สถานี ในช่วงปี ค.ศ. 1980-1989 โดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า ช่วงปี ค.ศ. 1980-1989 มีค่าเฉลี่ยปริมาณ CO_2 อยู่ที่ 360 ppm ซึ่งการปรับเทียบได้ใช้วิธีการปรับแบบ

nonlinear cumulative rainfall จากนั้นจึงนำแบบจำลองที่ผ่านการปรับเทียบมาทำการศึกษาสภาพการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศในอนาคต ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 720 ppm การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีทิศทางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยเฉลี่ยทั้งปีเพิ่มขึ้น 0.5-1 องศาเซลเซียส ช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 3.5 % ในขณะที่ช่วงอากาศเย็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นไปอย่างเล็กน้อยไม่เกิน 3 % นอกจากนี้ จำนวนวันที่ร้อนจัด จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง บางจังหวัดจะมีวันที่ร้อนจัดเพิ่มขึ้นบางจังหวัดจะมีวันที่ร้อนจัดลดลง จังหวัดที่ได้รับผลกระทบซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือ จังหวัดนครสวรรค์ ตาก เชียงใหม่ และน่าน มีจำนวนวันที่ร้อนจัดเพิ่มขึ้นที่ 720 ppm จะเพิ่มขึ้นมากกว่า 40 วัน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นชัดเจน ในขณะที่จังหวัดอย่างเช่น พิษณุโลก กำแพงเพชร มีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิลดต่ำลง ในขณะเดียวกันจำนวนวันที่มีอากาศเย็นก็จะลดลงค่อนข้างชัดเจนในทุกพื้นที่ จำนวนวันร้อนอาจจะลดบ้างเพิ่มบ้าง แต่จำนวนวันที่มีอากาศเย็นน้อยลงทุกจังหวัด สรุปแล้วจังหวัดในภาคเหนือที่ 540 ppm ได้รับผลกระทบค่อนข้างน้อย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ที่ 720 ppm จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน สำหรับในส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนพบว่า เมื่อ CO_2 ที่ 540 ppm (ระหว่างปี ค.ศ. 2040-2049) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่อ CO_2 ที่ 720 ppm (ระหว่างปี ค.ศ. 2066-2075) ปริมาณฝนโดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และเมื่อดูในเชิงพื้นที่ที่ 540 ppm มีบางพื้นที่มีฝนน้อยลง บางพื้นที่มีฝนมากขึ้น โดยเฉลี่ยทั้งภูมิภาคการเปลี่ยนแปลงสุทธิไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่โดยเฉลี่ยที่ระดับ 540 ppm (ระหว่าง ปี ค.ศ.2040-2049) ลุ่มน้ำทางด้านตะวันออก โดยเฉพาะลุ่มน้ำยม ลุ่มน้ำน่าน ลุ่มน้ำปิงตอนล่าง มีปริมาณฝนที่น้อยลงแต่ในขณะที่ลุ่มน้ำปิงกับลุ่มน้ำวังจะได้รับฝนมากขึ้น และที่ระดับ 720 ppm (ระหว่างปีค.ศ. 2066-2075) ปริมาณฝนเพิ่มขึ้น และส่วนสุดท้าย คือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ พบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่เขื่อนภูมิพล ที่ระดับปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้นมาที่ 540 ppm ปริมาณน้ำจะลดลงจาก 2,712-3,080 MCM เป็น 2,041-2,079 MCM และเมื่อปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้นมาที่ระดับ 720 ppm จะทำให้ปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นมาใกล้เคียงกับช่วงปี ค.ศ. 1980-1989 (Baseline) สำหรับในส่วนของปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่เขื่อนสิริกิติ์ ทั้งในระดับปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้นมาที่ 540 ppm และ 720 ppm ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่เขื่อนสิริกิติ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับช่วงปี ค.ศ. 1980-1989

กัณฑรีย์ (2548) ได้ศึกษาข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่ปี ค.ศ.1951-2002 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของฝนรายปีในประเทศไทย การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดรายปี และอุณหภูมิต่ำสุดรายปี นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาผลลัพธ์ของแบบจำลองภูมิอากาศ (GCMs) ในประเทศไทยจำนวน 7 แบบ และเลือก 3 แบบที่เหมาะสมกับประเทศไทยมาทำการศึกษาการ

เปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิในพื้นที่ของประเทศไทย (TEI, 1999) แบบจำลองที่เลือกมา 3 แบบ คือ UK 82, UKMO และ GISS โดยทุกแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของอุณหภูมิเฉลี่ยจาก 21.5-27.5 องศาเซลเซียส เป็น 25-32 องศาเซลเซียสโดยประมาณ โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 2.5 องศาเซลเซียส ภาคกลาง ภาคเหนือและภาคตะวันตกเพิ่มขึ้น 3-3.5 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนมีการกระจายแตกต่างจากปีฐาน (base case) โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือปริมาณน้ำฝนไม่เพิ่มขึ้น ภาคใต้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40 ส่วนภาคอื่น ๆ มีปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20

บุญเชิด (2549) ทำการศึกษาและประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำท่าผิวดินในพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำดอกกราย หนองปลาไหลและคลองใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Conformal Cubic Atmospheric Model (CCAM) ร่วมกับแบบจำลอง SWAT และแบบจำลองความสูงของภูมิประเทศเชิงเลข (DEM) โดยตั้งสมมติฐานของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CO_2 เป็น 1.5 เท่า (540 ppm) ซึ่งคาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างปี ค.ศ. 2024-2033 และเป็น 2 เท่า (720 ppm) ระหว่างปี ค.ศ. 2052-2061 สำหรับผลจากแบบจำลอง CCAM ได้นำผลการศึกษาที่จัดทำไว้โดยศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (SEA START RC) มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษาโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงของภูมิประเทศเชิงเลข ซึ่งให้ค่าความละเอียดเชิงพื้นที่ขนาด 50 x 50 เมตร จากนั้นนำผลจากแบบจำลองความสูงของภูมิประเทศเชิงเลข เช่น ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ ความลาดชันของลุ่มน้ำ และความยาวลำน้ำ มาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง SWAT ซึ่งเป็นแบบจำลองอุทกวิทยาในการประเมินน้ำฝนเป็นน้ำท่า สำหรับผลการศึกษาสรุปได้ว่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ CO_2 เป็น 1.5 เท่า และ 2 เท่า ทำให้ปริมาณฝนที่ตกลงพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำดอกกราย หนองปลาไหลและคลองใหญ่ ลดลงเฉลี่ยประมาณ 150 และ 200 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อปริมาณและอัตราการไหลของน้ำท่าเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่ศึกษา และเมื่อพิจารณาคุณภาพของน้ำท่าที่ผิวดินที่ประเมินได้จากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำของน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำดอกกรายที่มีความอ่อนไหว (Sensitivity) ของการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือ Nitrate-Nitrogen และออกซิเจนละลายน้ำ ในขณะที่อ่างเก็บน้ำหนองปลาไหลจะพบว่าปริมาณ Ammonia-Nitrogen มีความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และสำหรับในส่วนของอ่างเก็บน้ำคลองใหญ่นั้นพบว่า ปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจน และสารอินทรีย์ฟอสฟอรัส มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

ศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้, SEA START RC (2549) ร่วมมือกับหน่วยงาน Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) ประเทศออสเตรเลียดำเนินงานวิจัยในโครงการ Southeast Asia Regional Vulnerability to Changing Water Resource and Extreme Hydrological Events Due to Climate Change เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำและการเกษตรของกลุ่มประเทศในเขตลุ่มแม่น้ำโขงตอนล่าง ซึ่งการดำเนินงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลอง Conformal Cubic Atmospheric Model, CCAM มาใช้ในการจำลองสภาพภูมิอากาศภายใต้สมมติฐานที่ปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นจาก 360 ppm ซึ่งเป็นค่าตรวจวัดได้ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ที่กำหนดให้เป็นช่วงปีฐานที่ใช้ในการศึกษา เพิ่มขึ้นเป็น 540 ppm และ 720 ppm หรือ เพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าครึ่งและสองเท่า จากผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง CCAM ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 x10 กิโลเมตร มาใช้การประเมินสภาพอากาศรายวันในช่วง 10 ปีข้างหน้า พบว่า ปริมาณฝนในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั่วทุกภาค ส่วนอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก (เพิ่มขึ้นหรือลดลงประมาณ 1-2 °C) แต่กลับพบว่าจำนวนวันที่อากาศเย็น (ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส) ในรอบปีจะลดลง แต่วันที่อากาศร้อน (สูงกว่า 33 °C) จะมีมากขึ้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดลงไปในแต่ละพื้นที่โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการคำนวณในปีฐานเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแล้วพบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์อยู่พอสมควรเนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองในด้านความละเอียดเชิงพื้นที่ แต่เมื่อมองภาพโดยรวมแล้วพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยในอนาคตมีทิศทางที่สอดคล้องกับข้อสรุปจาก IPCC Working Group 1 ที่ได้นำเสนอใน Fourth Assessment Report คือ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดจะร้อนขึ้นเล็กน้อยแต่ระยะเวลาที่อากาศร้อนในรอบปีจะนานขึ้นมาก โดยที่จะไม่แล้งขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้ปริมาณฝนโดยรวมจะเพิ่มสูงขึ้นหากแต่ความผันผวนแปรปรวนของภูมิอากาศจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ศุภกร (2550) ได้จำลองสภาพการณ์ภูมิอากาศในอนาคตของภูมิภาคโดยละเอียด (high resolution regional climate change scenarios) ของประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศ Conformal Cubic Atmospheric Model (CCAM) ของหน่วยงาน CSIRO ประเทศออสเตรเลีย ซึ่งแสดงได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงและการผันแปรของภูมิอากาศ ผลที่ได้จะเป็นข้อมูลรายวัน นอกจากนี้ยังมีลักษณะสำคัญอื่นๆ เช่น การคำนวณมีลักษณะเป็นกริดสี่เหลี่ยม มีความละเอียด 10x10 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมประเทศไทยและลุ่มแม่น้ำโขง (ละจิจูด 5°N- 35°N และลองจิจูด 92°E- 110°E) มีความละเอียดของผลลัพธ์ 0.1° สำหรับข้อมูลที่เลือกให้แสดงผลลัพธ์จากการจำลองการ

เปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในระดับรายวัน เป็นเวลา 10 ปี ในแต่ละเงื่อนไข โดยจะแสดงผลตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ย ปริมาณฝน ความเร็วลม การแผ่รังสี ผลการศึกษาสรุปว่า สถานการณ์ภูมิอากาศในอนาคตของประเทศไทยภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 360 ppm (ช่วงปี ค.ศ.1980-1989) เป็น 540 ppm (1.5 เท่า) และ 720 ppm (2 เท่า) ส่งผลให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ โดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นเล็กน้อย 1-2 องศาเซลเซียส ฤดูร้อนจะยาวนานขึ้น 1-2 เดือน ฤดูหนาวจะหดสั้นลง 1-2 เดือน ฤดูฝนจะมีปริมาณฝนและความเข้มของฝนเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความผันผวนระหว่างฤดูและระหว่างปีจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาแยกเฉพาะทางตอนเหนือของประเทศไทยซึ่งครอบคลุมลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่าเมื่อก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า อุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0-1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดรายวันเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 1-2 องศาเซลเซียส และมีปริมาณฝนรายปีเพิ่มขึ้นประมาณ 100-200 มิลลิเมตร

กรมอุตุนิยมวิทยา (2552) ได้นำข้อมูลน้ำฝนปริมาณฝนรายปีของประเทศไทยใน 6 ทศวรรษที่ผ่านมา (ค.ศ.1951-2006) มาทำการวิเคราะห์หาค่าเปลี่ยนแปลงของน้ำฝนรายปีในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคใต้ฝั่งตะวันออกและภาคใต้ฝั่งตะวันตก จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณฝนทุกภาคมีแนวโน้มลดลง โดยภาคตะวันออกลดลงมากที่สุด และภาคเหนือลดลงน้อยที่สุด อย่างไรก็ดีในทศวรรษสุดท้าย (ค.ศ.2000-2006) พบว่าปริมาณน้ำฝนรายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าน้ำฝนในประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ทางด้านอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิสูงสุดใน 6 ทศวรรษที่ผ่านมา โดยอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยรายปีใน 6 ทศวรรษที่ผ่านมาพบว่าทุกภาคมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในทศวรรษสุดท้าย ส่วนค่าเปลี่ยนแปลงรายปีในภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยเฉลี่ยรายปีของอุณหภูมิต่ำสุดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ส่วนอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยรายปีใน 6 ทศวรรษที่ผ่านมา ในภาคต่างๆ ของประเทศไทยพบว่าทุกภาคมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย

8. แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองการลดส่วนด้วยวิธีทางสถิติ หรือ Statistical Downscaling Model (SDSM) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในระดับภูมิภาค (regional) หรือระดับท้องถิ่น (local scale) โดยแบบจำลอง SDSM เป็นการผสมผสานระหว่างทฤษฎี Stochastic Weather Generators และ Regression Methods ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถใช้หาความสัมพันธ์แบบมีเงื่อนเชิงเส้นของรูปแบบการหมุนเวียนในขนาดสเกลใหญ่และตัวแปรในชั้นบรรยากาศกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพอากาศในระดับท้องถิ่น (local scale) ได้

สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกแบบจำลอง SDSM เวอร์ชั่น 4.2.2 (สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/software.html) ดังแสดงหน้าจอเริ่มใช้งานของแบบจำลองในภาพที่ 16 โดยแบบจำลอง SDSM จะแบ่งหน้าที่การทำงานออกเป็น 7 ส่วนหลัก ๆ คือ

ก) การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงข้อมูล (quality control and data transformation)

ข) การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables screening)

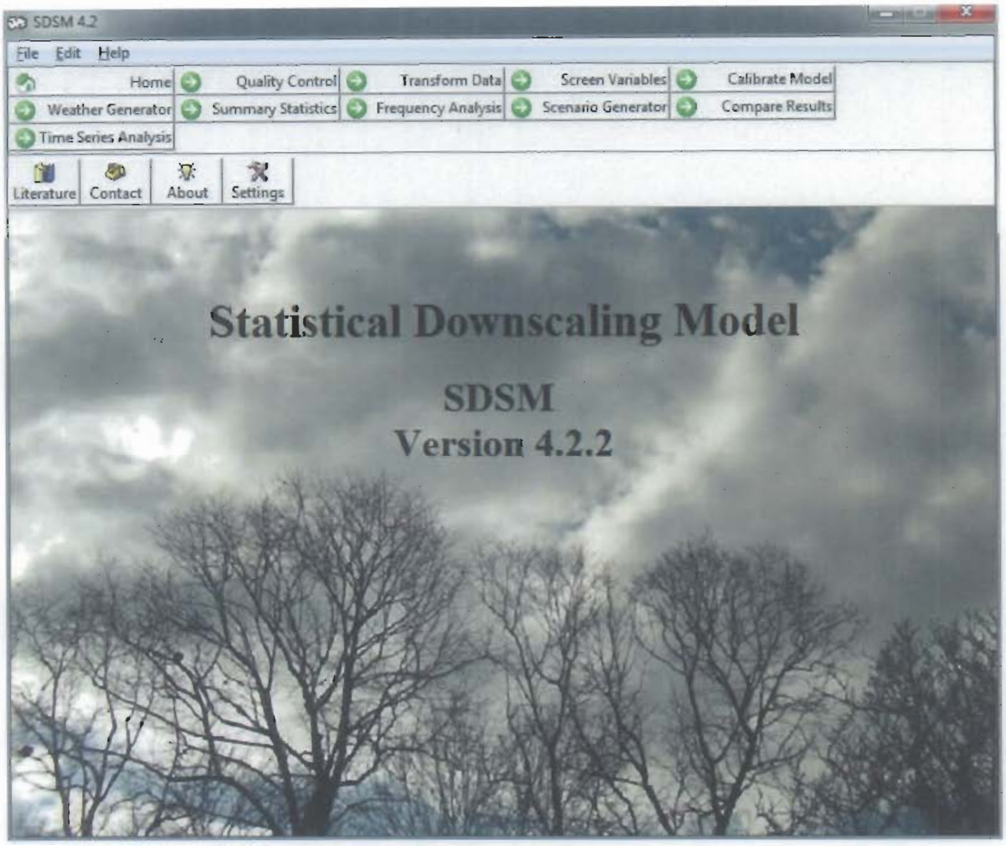
ค) การสอบเทียบแบบจำลอง (model calibration)

ง) การสร้างสภาพอากาศ (weather generation)

จ) การวิเคราะห์เชิงสถิติ (statistical analyses)

ฉ) การแสดงผลในรูปแบบกราฟ (graphing model output)

ช) การสร้างตามสมมติฐานต่างๆ (scenario generation)



ภาพที่ 16 หน้าจอและเมนูหลักของแบบจำลอง SDSM เวอร์ชั่น 4.2.2

2.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงข้อมูล (Quality Control and Data Transformation)

เป็นกระบวนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพข้อมูลก่อนนำเข้าแบบจำลอง ซึ่งจะบอกจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของข้อมูล จำนวนข้อมูลที่ใช้การได้ และจำนวนข้อมูลที่ผิดพลาดซึ่งผู้ใช้จะต้องเติมเอง โดยจะมีการกำหนดค่าที่แสดงความผิดพลาดโดยสามารถกำหนดได้เองหรือใช้ค่าที่กำหนดให้มาตั้งแต่ต้น คือ -999 ก่อนจะทำการวิเคราะห์ต่อไป

หากจะต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูล ให้อยู่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น อยู่ในรูปยกกำลัง หรือการเหลื่อมกันของข้อมูล (lag) ก็สามารถทำได้ เพื่อที่จะสามารถให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีกับตัวแปร predictand ต่อไป ยกเว้นข้อมูลการตรวจวัดปริมาณฝนรายวันจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ 4^{th} root ก่อนนำไปใช้เพื่อให้เป็นลักษณะการกระจายแบบปกติก่อน (normalize distribution) และทำให้ค่าความเอนเอียงน้อยลง (less skewed)

2.2 การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (Screening Variables)

เป็นการหาความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (empirical relationships) ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) จากกริดของ NCEP กับข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดิน เช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ เป็นต้น โดยเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการทำ downscaling ด้วยวิธี Statistical Method เพราะจะเป็นตัวช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกตัวแปรภูมิอากาศได้อย่างเหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (model calibration) ต่อไป ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เวลามากที่สุดในขั้นตอนนี้

2.3 การสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration)

ขั้นตอนในการสอบเทียบแบบจำลองจะเป็นการนำ predictand และ predictors ที่ได้เลือกไว้ก่อนหน้านี้ในขั้น screening variables มาสร้างการจำลองแบบ downscaling ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงซ้อน (multiple linear regression equations) ดังแสดงในรูปของสมการทั่วไปในสมการที่ (7)

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \ldots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \tag{7}$$

โดยที่	Y	=	predictand
	$X_1, X_2, \ldots, X_k$	=	predictor variables
	$\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย
	ε	=	ค่าคลาดเคลื่อน (error term)
	i	=	ลำดับที่ของข้อมูล

ในขั้นตอนของแบบจำลองนั้นจะมีทั้งแบบมีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไข (conditional and unconditional processes) ในกรณีแบบมีเงื่อนไขจะใช้กับข้อมูลฝนที่ปริมาณฝน (precipitation amount) ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ฝนที่เกิดขึ้น (precipitation occurrence) ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ predictors บริเวณภูมิภาคนั้นด้วย (regional scale) เช่น ความชื้น และความดันในชั้นบรรยากาศ เป็นต้น ส่วนในกรณีแบบไม่มีเงื่อนไข มีความสัมพันธ์โดยตรงกันระหว่าง predictors และ predictand เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น สำหรับปริมาณฝนในแบบจำลอง SDSM นั้น จะให้ค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย, ค่ากลาง (median), ค่าสูงสุด, ผลรวม, ค่าการผันแปร (variance), ช่วงความยาวของวันที่ฝนตกและไม่ตก, และค่าเฉลี่ยของวันฝนตก ส่วนค่าต่ำสุดจะเท่ากับศูนย์เสมอจึงไม่ต้องวิเคราะห์

2.4 การสังเคราะห์ข้อมูลตรวจวัด (Synthesize Observed Data)

เป็นการสังเคราะห์ชุดข้อมูล (ensembles) สภาพอากาศรายวัน จากตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมาจากการตรวจวัดหรือจาก NCEP re-analysis และความสัมพันธ์เชิงถดถอย (regression model weight) ที่ได้มาจากการสอบเทียบแบบจำลองก่อนหน้านี้ ซึ่งในขั้นตอนนี้ยังสามารถใช้ตรวจสอบ (verification) การสอบเทียบแบบจำลองได้ด้วย โดยการสมมติช่วงข้อมูลที่เป็นอิสระไม่ได้อยู่ในช่วงสอบเทียบ

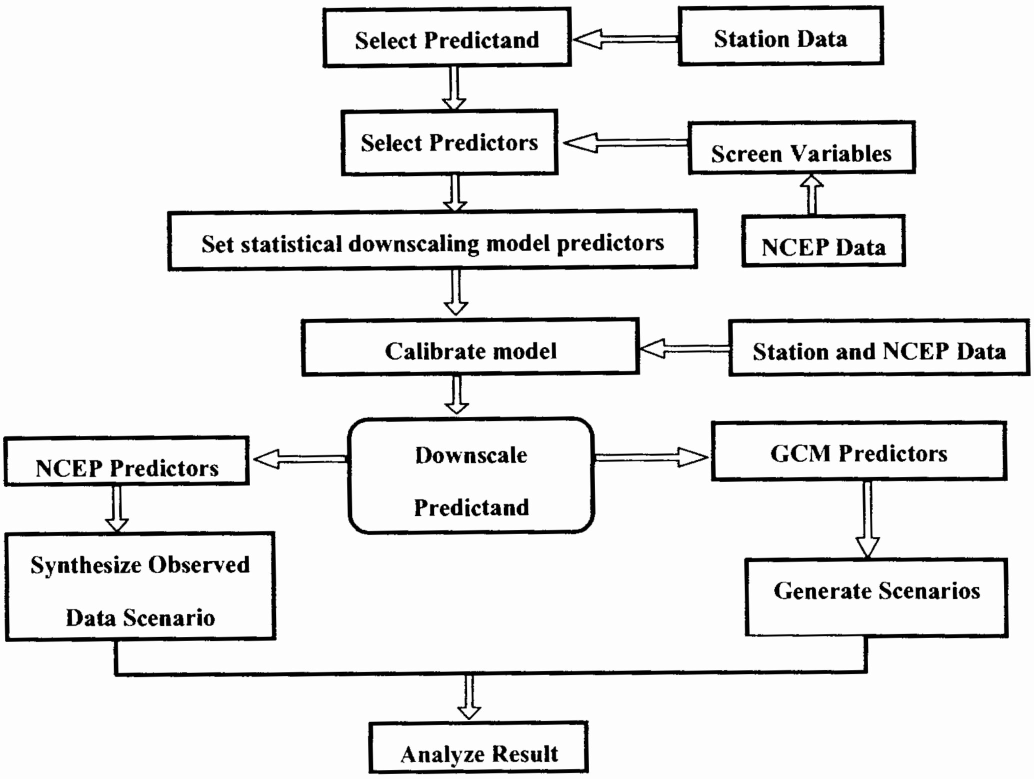
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลในแบบจำลอง SDSM จะใช้ในการทดสอบทั้งกับชุดข้อมูลภูมิอากาศที่สร้างขึ้นมาและชุดข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยสามารถแสดงออกได้ในรูปของรายเดือน รายฤดูกาล เฉลี่ยรายปี ค่าสูงสุด ต่ำสุด และผลรวมเฉลี่ย โดยผลของการวิเคราะห์นี้สามารถนำเข้าในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดในแบบจำลองและสร้างกราฟเปรียบเทียบกันได้ด้วย

2.6 การสร้างตามสมมติฐานต่าง ๆ (Scenario Generation)

ในขั้นตอนนี้เป็นการสร้างหรือสังเคราะห์ชุดข้อมูลสภาพอากาศรายวัน ภายใต้ตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศ (daily atmospheric predictor variables) ที่มีการทดลองสร้างขึ้นมาทั้งในปัจจุบันและอนาคต หรือภายใต้สมมติฐาน (scenarios) ต่าง ๆ ที่ต้องการพิจารณา ซึ่งได้มาจากแบบจำลอง GCM

สำหรับหน้าที่และกลไกการทำงานหลักในการทำ Statistical Downscaling ของแบบจำลอง SDSM แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 โครงสร้างกลไกการทำงานของแบบจำลอง SDSM

ที่มา: Said (2007)

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธี Statistical Downscaling มีดังนี้

Hessami *et al.* (2550) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกที่มีผลต่อปริมาณฝนและอุณหภูมิในพื้นที่ภาคตะวันออกของแคนนาดา โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CGCM1 และ HadCM3 มาทำการลดส่วน (downscaling) ด้วยแบบจำลอง ASD และ SDSM แล้วทำการเปรียบกัน โดยในด้านปริมาณฝนตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีผลต่อปริมาณฝนได้แก่ Specific humidity 500 hPa, Surface airflow strength, Zonal velocity 850 hPa และ 500 hPa geopotential height ส่วนตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่ออุณหภูมิ ได้แก่ Mean sea level pressure, Surface vorticity และ 850 hPa geopotential height นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบกันของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ASD และ SDSM สรุปได้ว่าผลที่ได้ทั้งสองแบบจำลองเป็นตัวแทนที่ไม่ดีนัก แต่

อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองที่ต่างกันกับข้อมูล GCMs ต่าง ๆ จะสามารถสร้างช่วงของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศได้

สุจริต (2551) ได้ศึกษาและนำเสนอผลการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกที่มีต่อการจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก (Climate Impact Assessment Methodology to Water Resources Management in East Coast Basin) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการในการประเมินผลกระทบในประเทศไทย การ ownscaling ข้อมูลทางอุทกวิทยาจากแบบจำลอง GCM ลงสู่ภูมิภาคลุ่มน้ำ ได้แก่ ปริมาณฝน อุณหภูมิ และการระเหย นอกจากนี้ยังทำการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่มีผลต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ในการศึกษาได้ใช้แบบจำลอง SDSM ในการทำ downscaling ตัวแปรภูมิอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 พบว่าตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน (ข้อมูลปริมาณฝนจากสถานีวัดน้ำฝนที่จังหวัดระยองและชลบุรี) ได้แก่ Near surface specific humidity, Relative humidity at 850 hPa, Divergence@surface, Zonal velocity component@ surface, Surface meridional velocity, Divergence@500 hPa, Vorticity@500 hPa ส่วนตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ไดแก่ Mean temperature at 2m, Near surface specific humidity, Relative humidity at 850 hPa, Zonal velocity component@ surface, Surface meridional velocity, Vorticity@surface, 500 hPa geopotential height ทางด้านผลการคาดการณ์ปริมาณฝนและอุณหภูมิในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 พบว่าปริมาณฝนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากช่วงปี ค.ศ.1974-2001 ประมาณ 30-45% ของปริมาณฝนทั้งปี ส่วนอุณหภูมิในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอดีตประมาณ 1-3 องศาเซลเซียส

Abdo (2551) ทำการประเมินผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในพื้นที่ Gilgel Abbay Catchment in Lake Tana Bain ประเทศเอธิโอเปีย โดยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และปริมาณฝนรวมทั้งน้ำท่าในพื้นที่ศึกษาที่จะเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกด้วยแบบจำลอง SDSM และได้คัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุด ได้แก่ Mean temperature at 2m และ 500 hPa geopotential height ส่วนทางด้านอุณหภูมิสูงสุด ได้แก่ Mean temperature at 2m, 500 hPa geopotential height และ Surface divergence สำหรับปริมาณฝนจะประกอบด้วยตัวแปรภูมิอากาศ Relative humidity at 500 hPa, Surface meridional velocity และ Surface divergence

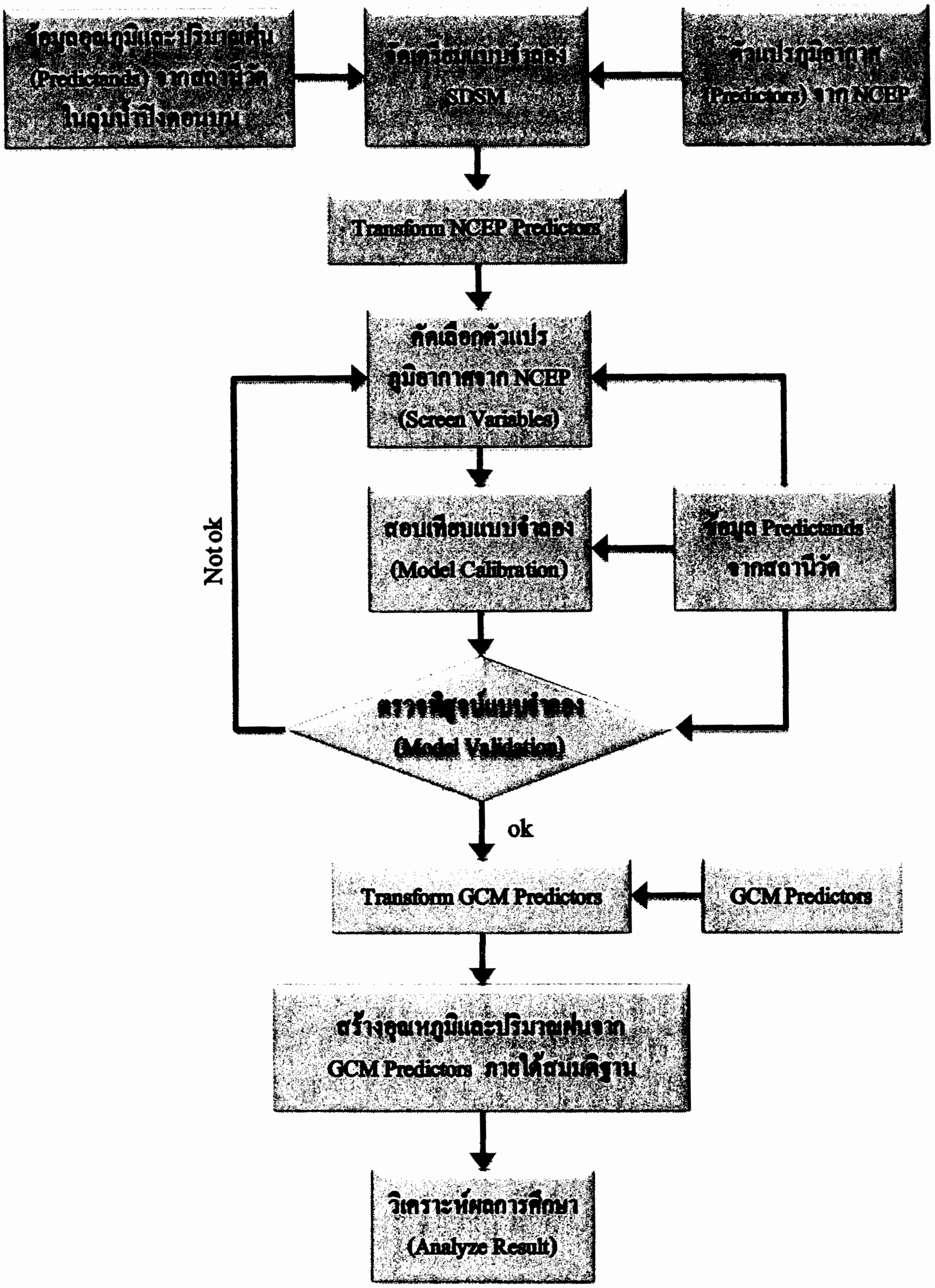
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ Notebook
2. เครื่องพิมพ์เลเซอร์สี
3. โปรแกรมแบบจำลอง SDSM พร้อมคู่มือ
4. ข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ของลุ่มน้ำปิงตอนบนจากกรมชลประทาน
5. โปรแกรมซอฟต์แวร์ Operation System ช่วยในการศึกษา เช่น Microsoft Window, Microsoft Office Word และ Excel, MapInfo เป็นต้น

วิธีการ

วิธีศึกษาจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิรายวัน (อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุด และต่ำสุดรายวัน) ของสถานีตรวจอากาศและข้อมูลปริมาณฝนรายวันของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งรวบรวมข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ในชั้นบรรยากาศที่มีการตรวจวัดในอดีตถึงปัจจุบันจากเก็บรวบรวมของ NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 2) การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณฝนในอดีตจากข้อมูลที่รวบรวมได้ในเชิงสถิติ 3) คัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศของ NCEP ด้วยแบบจำลอง SDSM เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง predictors ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนและ transfer functions ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและปริมาณฝน 4) เมื่อได้ตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) และ transfer functions ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนที่สถานีต่าง ๆ แล้วก็นำไปประยุกต์ใช้กับตัวแปรภูมิอากาศแบบเดียวกันจากผลการคาดการณ์ในอนาคตของแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG emission scenarios) แบบ A2 และ B2 ดังแสดงขั้นตอนและวิธีการศึกษารวมทั้งการทำ downscaling ด้วยแบบจำลอง SDSM ในภาพที่ 18 โดยรายละเอียดวิธีการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้



ภาพที่ 18 แผนผังขั้นตอนการศึกษา statistical downscaling ด้วยแบบจำลอง SDSM ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

1. การรวบรวมข้อมูล

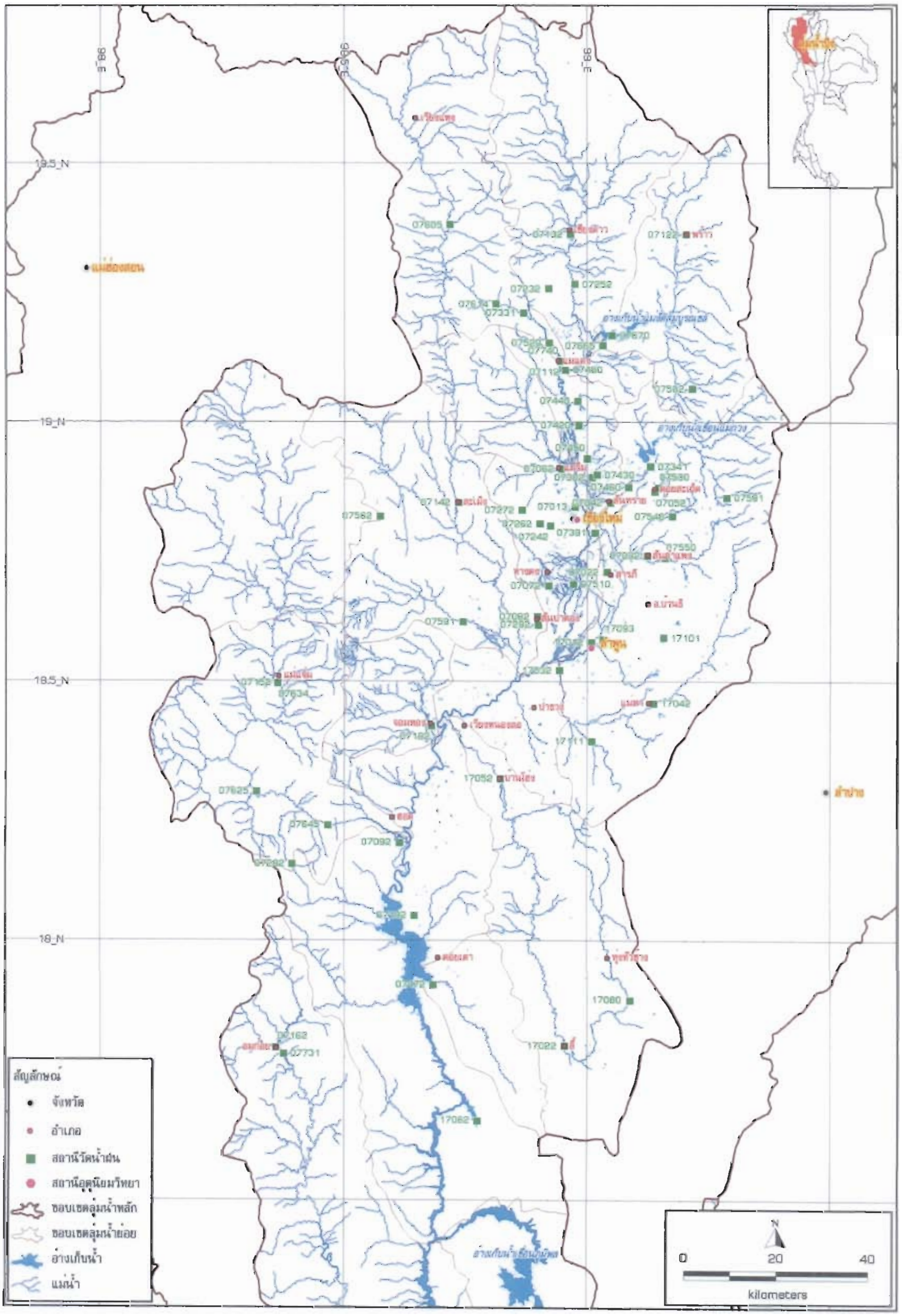
1.1 อุณหภูมิและปริมาณฝน

ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 25,369 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน มีสถานีตรวจวัดอากาศ (สถานีอุตุนิยมวิทยา) และสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนดังแสดงที่ตั้งสถานีในภาพที่ 19

ก) ข้อมูลอุณหภูมิ

จากการรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิรายวันของสถานีตรวจอากาศในลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งเป็นของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 2 สถานี คือ อำเภอเมืองเชียงใหม่ (ละติจูด 18° 47′ เหนือ และลองจิจูด 98° 59′ ตะวันออก) และอำเภอเมืองลำพูน (ละติจูด 18° 55′ เหนือ และลองจิจูด 99° 02′ ตะวันออก) เมื่อดูจากที่ตั้งของทั้งสองสถานีพบว่าอยู่ไม่ไกลกันนัก ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิที่อำเภอเมืองเชียงใหม่เพียงสถานีเดียว เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิของลุ่มน้ำปิงตอนบน

จากข้อมูลอุณหภูมิรายวันที่รวบรวมได้ของสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่ตั้งแต่ปี ค.ศ.1961 ถึงปี ค.ศ.2008 สรุปเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน อุณหภูมิต่ำสุดรายเดือนและอุณหภูมิสูงสุดรายเดือน ในตารางผนวกที่ ก1, ตารางผนวกที่ ก2, และตารางผนวกที่ ก3 ตามลำดับ



ภาพที่ 19 ตำแหน่งสถานีตรวจอากาศและสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ข) ข้อมูลปริมาณฝน

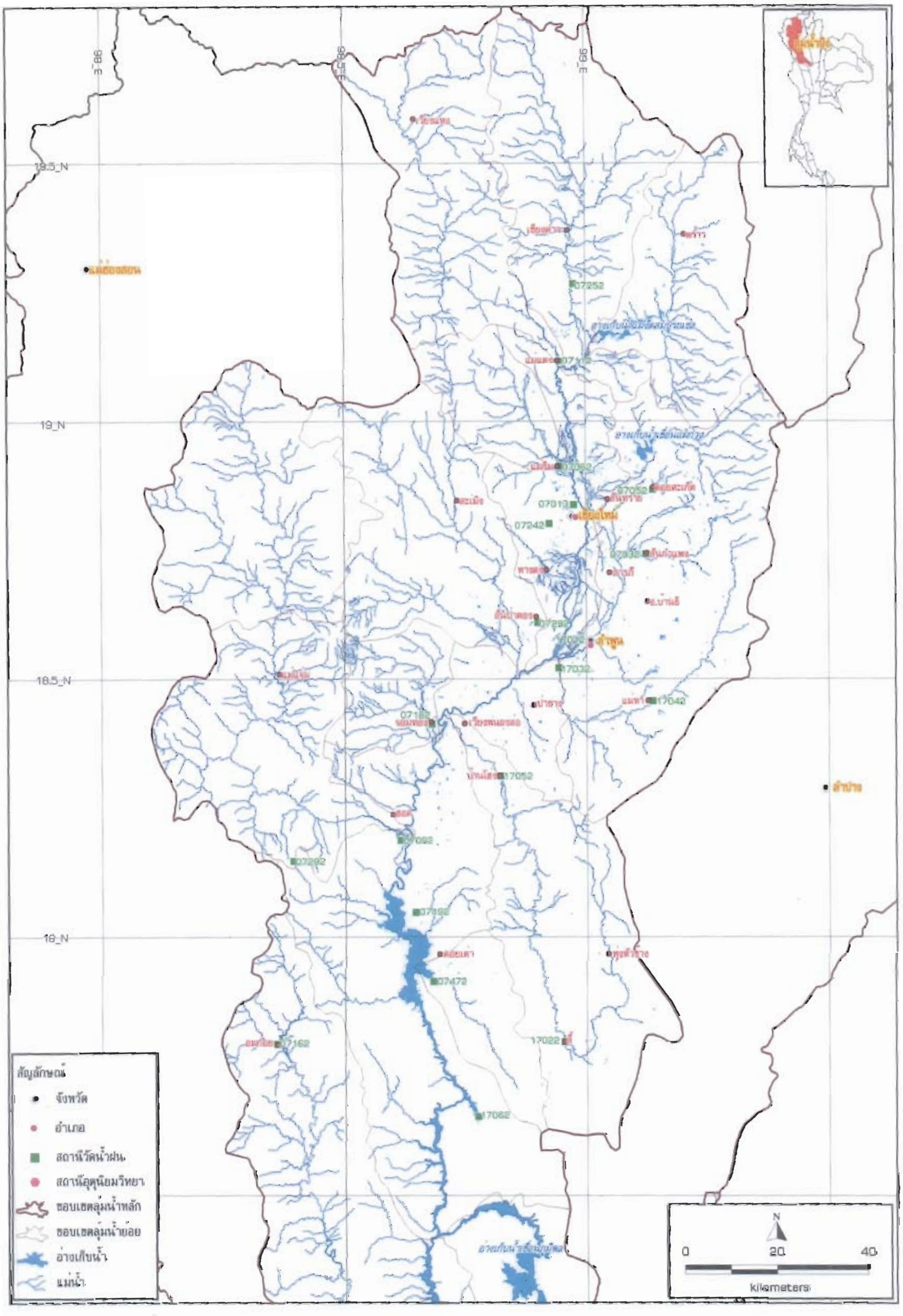
รวบรวมข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนบน ที่มีการเก็บข้อมูลยาวนานกว่า 15 ปี เป็นหลัก ดังแสดงรายชื่อสถานีในตารางผนวกที่ ข1 และตำแหน่งที่ตั้งสถานีในภาพที่ 19 ส่วนตารางผนวกที่ ข2 แสดงสถิติและความสมบูรณ์ของข้อมูลแต่ละสถานีซึ่งมีข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ.1961 ถึงปี ค.ศ.2007 จากนั้นทำการคัดเลือกสถานีวัดน้ำฝนที่จะใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคตของลุ่มน้ำปิงตอนบน โดยเลือกสถานีให้มีการกระจายที่เหมาะสม สุดท้ายจะเหลือสถานีวัดน้ำฝนที่จะนำไปใช้จำนวน 20 สถานี กระจายตัวตั้งแต่ทางตอนเหนือลงมาถึงตอนใต้ของลุ่มน้ำปิงตอนบน สรุปรายชื่อสถานีได้ดังตารางที่ 8 ส่วนภาพที่ 20 แสดงสถานีวัดน้ำฝนที่ได้คัดเลือกและนำมาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนในอดีตและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตแบบ A2 และ B2 (ของ IPCC SRES) ต่อไป

1.2 ข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศของ NCEP/NCAR และ HadCM3

สำหรับตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ในชั้นบรรยากาศตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ใช้ในแบบจำลอง SDSM เพื่อทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองจะใช้ข้อมูลจาก National Centers for Environmental Prediction/Nation Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) ซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพอากาศต่าง ๆ ทั่วโลก แล้วนำมาประมวลผลใหม่โดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกเพื่อสร้างกริดของตัวแปรภูมิอากาศที่ระดับต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศออกมาโดยจะอยู่ในรูปของกริดในแนวราบ (2.5° x 2.5°)

ตารางที่ 8 รายชื่อสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ใช้ในการศึกษา

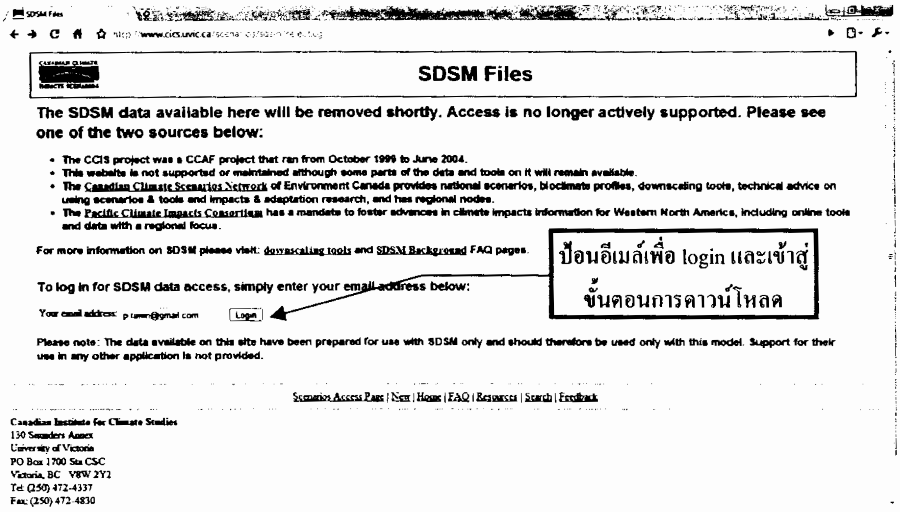
ลำดับที่	รหัสสถานี	สถานี	ละติจูด o	ละติจูด '	ละติจูด ''	ลองจิจูด o	ลองจิจูด '	ลองจิจูด ''	ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี (มิลลิเมตร)
จังหวัดเชียงใหม่									
1	07013	อ.เมือง	18	50	23	98	58	32	1,163.2
2	07032	อ.สันกำแพง	18	44	39	99	07	28	900.6
3	07052	อ.คอยสะเก็ค	18	52	08	99	08	22	1,143.9
4	07062	อ.แม่ริม	18	54	47	99	56	52	996.4
5	07092	อ.ฮอค	18	11	26	98	36	52	992.2
6	07112	อ.แม่แตง	19	07	08	98	56	52	1,167.1
7	07162	อ.อมก๋อย	17	47	45	98	21	36	996.8
8	07182	อ.จอมทอง	18	24	57	98	40	47	908.9
9	07192	บ้านแอ่น อ.คอยเต่า	18	03	00	98	38	43	981.5
10	07242	อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย	18	48	10	98	55	30	1,633.5
11	07252	ศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำคอยเชียงดาว	19	16	07	98	58	32	1,553.7
12	07282	คอยบ่อแก้ว อ.ฮอค	18	09	01	98	23	35	1,098.6
13	07292	สถานีทคลองพันธ์ข้าวสันป่าตอง	18	36	40	98	54	02	981.7
14	07472	ศูนย์พัฒนาเขื่อนภูมิพล	17	55	00	98	41	00	935.2
จังหวัดลำพูน									
15	17012	อ.เมือง	18	34	38	99	00	34	937.6
16	17022	อ.ลี้	17	48	01	98	57	17	1,051.2
17	17032	อ.ป่าซาง	18	31	25	98	56	38	1,000.7
18	17042	อ.แม่ทา	18	27	35	99	08	14	1,119.3
19	17052	อ.บ้านโฮ่ง	18	18	52	98	49	21	990.8
20	17062	อ.ลี้ บ้านก้อ	17	39	20	98	46	30	989.2

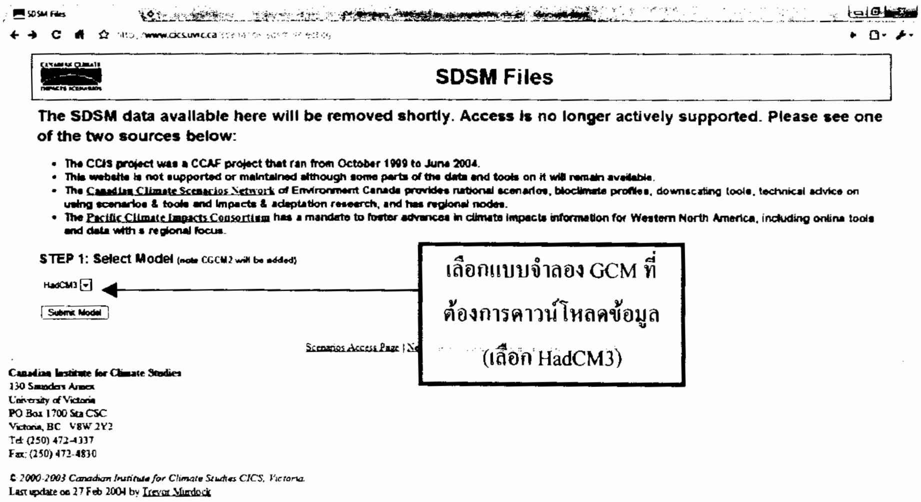


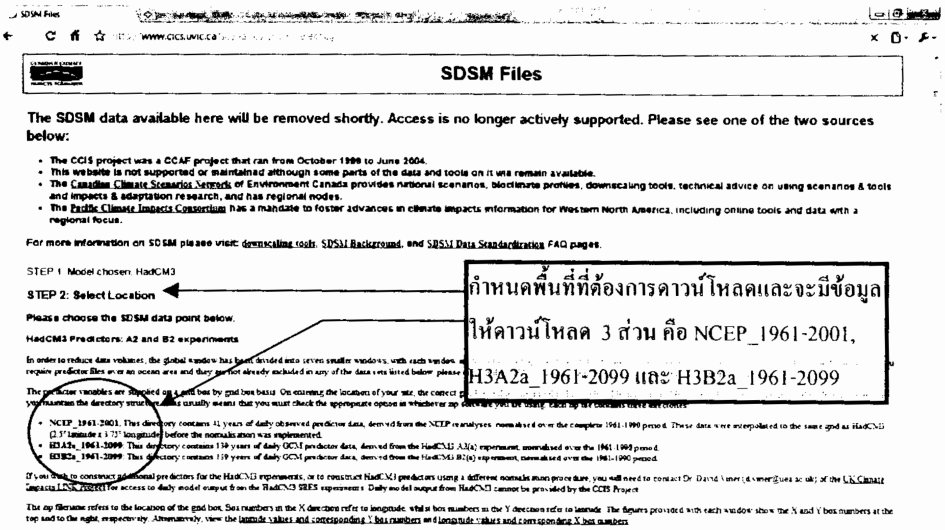
ภาพที่ 20 ตำแหน่งสถานีตรวจอากาศและสถานีวัดน้ำฝนที่ได้รับคัดเลือกในลุ่มน้ำปิงตอนบน

การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรด้านภูมิอากาศที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก Hadley Centre Coupled Model, 3rd generation (HadCM3) ของประเทศอังกฤษ ภายใต้สมมติฐานการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในโลกอนาคต (Special Report on Emission Scenarios, SRES) แบบ A2 และ B2 ซึ่งแบบจำลอง HadCM3 นี้จะมีการศึกษาตัวแปรภูมิอากาศที่อยู่ในชั้นบรรยากาศทั้งในมหาสมุทรและบนพื้นดินเข้าด้วยกัน นอกจากนี้แบบจำลอง HadCM3 ยังได้ทำการปรับแก้ความเข้มของก๊าซเรือนกระจกลงให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของประชากรโลกและการนำเทคโนโลยีทางเลือกมาใช้มากขึ้น โดยขนาดของข้อมูลกริดในแนวราบเท่ากับ 2.5° lat x 3.75° long (เทียบเท่ากับพื้นที่ประมาณ 100,000 ตารางกิโลเมตร บริเวณพื้นที่ศึกษา)

ข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศโลกของ NCEP และผลจากการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศโลกในอนาคตจากแบบจำลอง HadCM3 ภายใต้สมมติฐาน A2 และ B2 ได้ทำการรวบรวมจากเว็บไซต์ http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi ซึ่งจัดทำขึ้นโดย Canadian Institute for Climate Studies (CICS) ดังแสดงขั้นตอนการดาวน์โหลดในภาพที่ 21 ข้อมูลจากเว็บไซต์นี้ได้จัดเตรียมไว้สำหรับใช้กับแบบจำลอง SDSM เท่านั้น โดยได้ทำการปรับแก้พื้นที่ที่ซ้อนทับกันระหว่างข้อมูลจาก NCEP (2.5° lat x2.5° long) และข้อมูลจากแบบจำลอง HadCM3 (2.5° lat x 3.75° long) ให้เป็นพื้นที่เดียวกันเรียบร้อยแล้ว แต่เนื่องจากตำแหน่งกริดข้อมูลที่ตรงกับพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยตรงไม่มี จึงได้ดาวน์โหลดกริดหรือ box mapping จำนวน 4 ชุดข้อมูล ซึ่งอยู่ล้อมรอบพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ต่อไป สำหรับขนาดพื้นที่ของกริดที่ดาวน์โหลดนั้นครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 100,000 ตารางกิโลเมตร มีขอบเขตพื้นที่ครอบคลุมเกือบทั้งภาคเหนือของประเทศไทยดังแสดงในภาพที่ 22

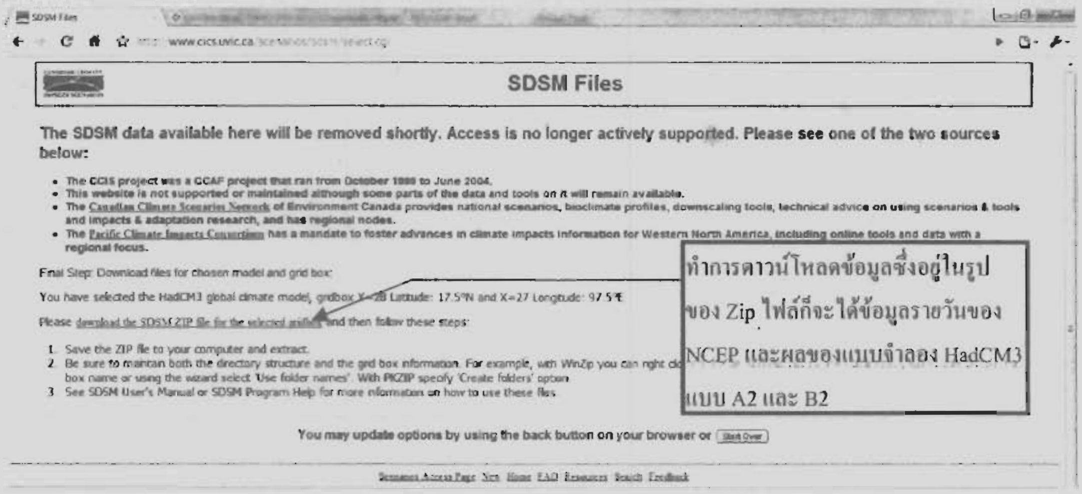




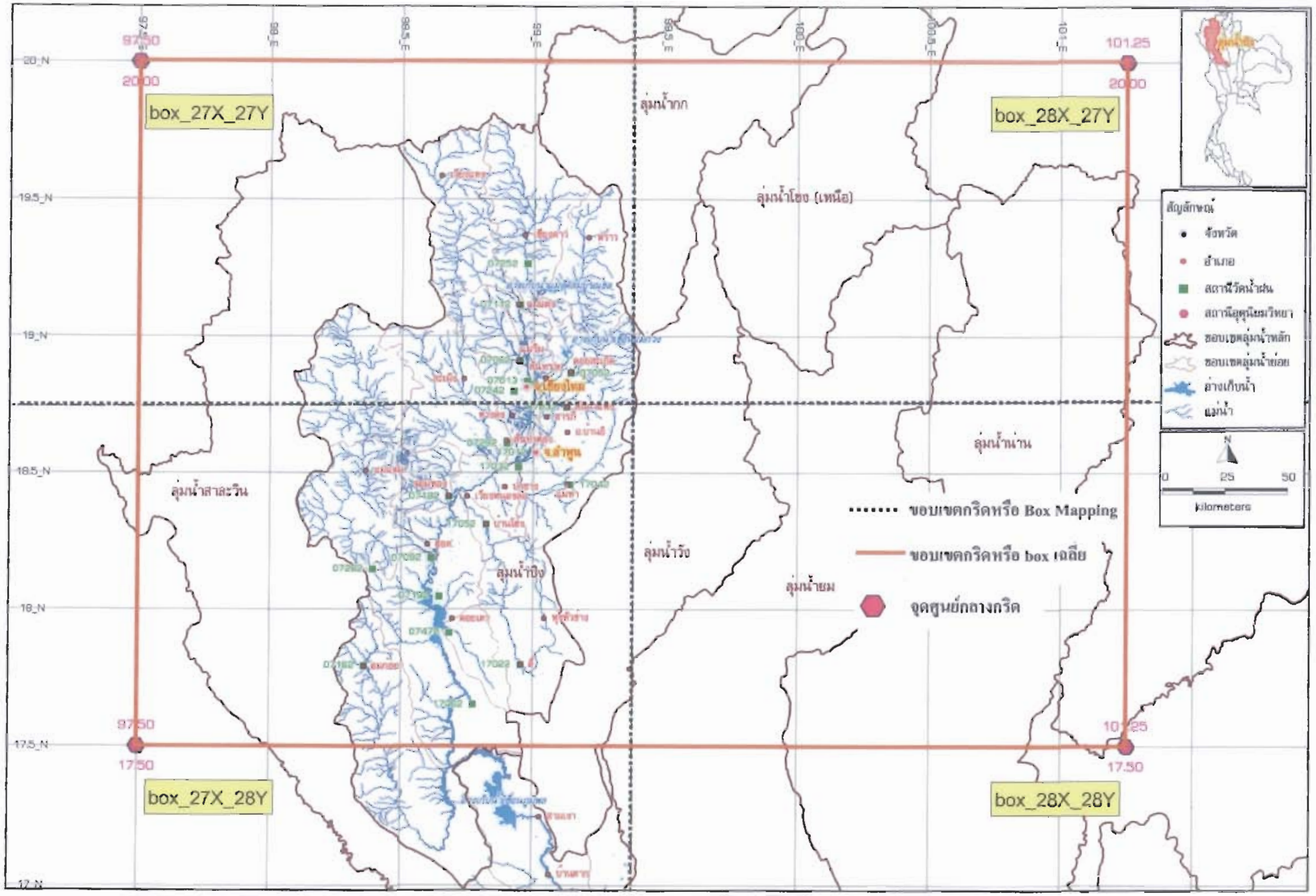


ภาพที่ 21 การดาวน์โหลดข้อมูลภูมิอากาศของ NCEP และ HadCM3

SDSM Files
http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi
6. Asia (Russia, India, China, SE Asia)
17.5 °N Longitude: 97.5 °E Select ASI gridbox
Asian Window
กริดครอบที่คลุมพื้นที่
ลุ่มน้ำปิงตอนบน
2.5°
3.75°


SDSM Files
The SDSM data available here will be removed shortly. Access is no longer actively supported. Please see one of the two sources below:
The CCIS project was a CCAF project that ran from October 1999 to June 2004.
This website is not supported or maintained although some parts of the data and tools on it will remain available.
Final Step: Download files for chosen model and grid box:
You have selected the HadCM3 global climate model, gridbox
Save the ZIP file to your computer and extract.
You may update options by using the back button on your browser or
ทำการดาวน์โหลดข้อมูลซึ่งอยู่ในรูป
ของ Zip ไฟล์ก็จะได้ข้อมูลรายวันของ
NCEP และผลของแบบจำลอง HadCM3
แบบ A2 และ B2

ภาพที่ 21 (ต่อ)



ภาพที่ 22 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางกริดหรือ box mapping และ box เฉลี่ยซึ่งครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

ข้อมูลและรายชื่อตัวแปรภูมิอากาศที่รวบรวมได้จากการดาวน์โหลดข้างต้น (http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi) จะมีจำนวน 26 ตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยช่วงเวลาของชุดข้อมูลจาก NCEP ซึ่งเป็นข้อมูลภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศในอดีตจะอยู่ในช่วงปี ค.ศ.1961-2001 จะเป็นข้อมูลรายวันตามปีอธิกสุรทิน (leap year) คือเดือนกุมภาพันธ์มีวันที่ 29 ด้วย ส่วนข้อมูลการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศจากแบบจำลอง HadCM3 ภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 จะเป็นข้อมูลรายวันอยู่ในช่วงปี ค.ศ.1961-2099 โดยในแต่ละปีจะมีข้อมูลจำนวน 360 ชุดข้อมูล

2. การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงสถิติของอุณหภูมิและปริมาณฝนจากข้อมูลในอดีต

จากข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนรายวันในอดีตที่รวบรวมได้ของสถานีตรวจวัดที่ได้คัดเลือกไว้ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน จะนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง (trend) ในอดีตว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และเพื่อศึกษาว่าในอนาคตข้างหน้านั้น แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณฝนแต่ละสถานีและลุ่มน้ำปิงตอนบนจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

3. การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนในแต่ละสถานีและการคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง HadCM3

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้แบบจำลอง SDSM (Statistical Downscaling Model) ในการทำ downscaling ตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) รายวันจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 เพื่อทำการคาดการณ์หรือประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน รวมทั้งปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนในอนาคต โดยใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดที่อยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศในอดีต (NCEP predictors) กับตัวแปรภาคพื้นดิน (predictand) ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิและปริมาณฝน เพื่อให้ได้ predictors ที่เหมาะสมและมีความสัมพันธ์กับ predictand หลังจากนั้นจึงนำ predictors แบบเดียวกันในอนาคตที่เป็นผลจากแบบจำลอง HadCM3 ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบ A2 และ B2 มาคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 9 รายชื่อตัวแปรภูมิอากาศและการกำหนดชื่อไฟล์สำหรับแบบจำลอง SDSM

ลำดับที่	รหัสตัวแปรของ NCEP (ค.ศ.1961-2001)	รหัสตัวแปรของ HadCM3 (ค.ศ.1961-2099)	คำบรรยาย (Description)	คำแปล
1	ncepmslpas	h3a2mslpas	Mean sea level pressure	ความดันที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง
2	ncepp__fas	h3a2p__fas	Surface airflow strength	ความแรงของกระแสลมเหนือพื้นผิว
3	ncepp__uas	h3a2p__uas	Surface zonal velocity	เขตความเร็วเหนือพื้นผิว
4	ncepp__vas	h3a2p__vas	Surface meridional velocity	ความเร็วในแนวเหนือใต้เหนือพื้นผิว
5	ncepp__zas	h3a2p__zas	Surface vorticity	พลศาสตร์ของไหลเหนือพื้นผิว
6	ncepp_thas	h3a2p_thas	Surface wind direction	ทิศทางลมเหนือพื้นผิว
7	ncepp_zhas	h3a2p_zhas	Surface divergence	การขึ้นลงเหนือพื้นผิว
8	ncepp5_fas	h3a2p5_fas	500 hPa airflow strength	ความแรงของกระแสลมที่ความดัน 500 hPa
9	ncepp5_uas	h3a2p5_uas	500 hPa zonal velocity	เขตความเร็วที่ความดัน 500 hPa
10	ncepp5_vas	h3a2p5_vas	500 hPa meridional velocity	.ความเร็วในแนวเหนือใต้ที่ความดัน 500 hPa
11	ncepp5_zas	h3a2p5_zas	500 hPa vorticity	พลศาสตร์ของไหลที่ความดัน 500 hPa
12	ncepp5thas	h3a2p5thas	500 hPa wind direction	ทิศทางลมที่ความดัน 500 hPa
13	ncepp5zhas	h3a2p5zhas	500 hPa divergence	การขึ้นลงที่ความดัน 500 hPa
14	ncepp8_fas	h3a2p8_fas	850 hPa airflow strength	ความแรงของกระแสลมที่ความดัน 850 hPa
15	ncepp8_uas	h3a2p8_uas	850 hPa zonal velocity	เขตความเร็วที่ความดัน 850 hPa
16	ncepp8_vas	h3a2p8_vas	850 hPa meridional velocity	ความเร็วในแนวเหนือใต้ที่ความดัน 850 hPa
17	ncepp8_zas	h3a2p8_zas	850 hPa vorticity	พลศาสตร์ของไหลที่ความดัน 850 hPa

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ลำดับที่	รหัสตัวแปรของ NCEP (ค.ศ.1961-2001)	รหัสตัวแปรของ HadCM3 (ค.ศ.1961-2099)	คำบรรยาย (Description)	คำแปล
18	ncepp8thas	h3a2p8thas	850 hPa wind direction	ทิศทางลมที่ความดัน 850 hPa
19	ncepp8zhas	h3a2p8zhas	850 hPa divergence	การขึ้นลงที่ความดัน 850 hPa
20	ncepp500as	h3a2p500as	500 hPa geopotential height	ประสิทธิภาพของแรงดึงดูดที่ 500 hPa
21	ncepp850as	h3a2p850as	850 hPa geopotential height	ประสิทธิภาพของแรงดึงดูดที่ 850 hPa
22	ncepr500as	h3a2r500as	Relative humidity at 500 hPa	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความดัน 500 hPa
23	ncepr850as	h3a2r850as	Relative humidity at 850 hPa	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความดัน 850 hPa
24	ncеprhumas	h3a2rhumas	Near surface relative humidity	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ใกล้กับพื้นผิว
25	ncepshumas	h3a2shumas	Surface specific humidity	ความชื้นจำเพาะเหนือพื้นผิว
26	nceptempas	h3a2tempas	Mean temperature at 2m	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูง 2 เมตร

3.1 การจัดเตรียมและตรวจสอบข้อมูลในแบบจำลอง SDSM

ดำเนินการจัดเตรียมข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนรายวันจากที่ได้รวบรวมมาในรูปแบบ (format) ที่ใช้กับแบบจำลอง SDSM และทำการเติมค่าที่ผิดพลาดหรือไม่มีการตรวจวัดด้วยค่าที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง (default ของแบบจำลองคือ -999 ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้)

3.2 การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (selection of predictors)

การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่เหมาะสมและมีความสัมพันธ์กับข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการทำ downscaling เพราะจะส่งผลต่อความถูกต้องของการคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ

ในการศึกษานี้ได้นำตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศที่ได้จาก NCEP re-analysis ในอดีต (ค.ศ.1961-1990) ซึ่งจะอยู่ในรูปของกริดสี่เหลี่ยม (2.5°lat x 3.75°long) ที่มีขนาดและตำแหน่งเดียวกันกับผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 และครอบคลุมพื้นที่ศึกษามาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ในชั้นบรรยากาศกับข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝน (predictands) ของสถานีวัดภาคพื้นดินที่อยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ขั้นตอนในการคัดเลือก predictors นั้นจะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง predictands (ข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนรายวันของสถานีตรวจวัด) กับ predictors ทั้ง 26 ตัวแปร โดยใช้แบบจำลอง SDSM ซึ่งในการคัดเลือกของแบบจำลอง SDSM จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง predictors-predictand ด้วยการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) เป็นวิธีที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร หรือข้อมูลมากกว่า 2 ชุด โดยจะทำการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทีละคู่ ในขณะที่ทำการขจัดอิทธิพลของตัวแปรที่เหลือออกไป (ให้ตัวแปรที่เหลือคงที่) โดยผลของความสัมพันธ์ในแบบจำลอง SDSM จะแสดงเป็นรายเดือนซึ่ง predictors ที่มีความสัมพันธ์กับ predictand มากที่สุดจะเป็นสีแดง (ดังแสดงในภาพที่ 23) นอกจากนี้แบบจำลอง SDSM ยังสามารถกำหนด significance level ในรูปของค่าความเชื่อมั่น p-value (ค่า default ของแบบจำลองคือ $p<0.05$ หรือค่าความเชื่อมั่นที่ 95%) โดย predictor ตัวไหนไม่สัมพันธ์หรือ insignificance จะไม่แสดงผลหรือเป็นช่องว่าง (ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 23)

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE

Analysis Period: 1/1/1961 - 31/12/1975 ← ช่วงเวลาวิเคราะห์
Significance level: .05

Total missing values: 0

Predictand: 07013.dat ← ฝนสถานี 07013

Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepp__zas.dat	0.029		0.039	0.039	0.016				0.015	0.025		
ncepp8zhas.dat	0.037		0.084	0.047	0.142	0.012	0.020	0.024	0.037	0.090	0.040	0.095
ncepr500as.dat	0.070	0.056	0.047	0.058	0.075	0.023	0.077	0.098	0.129	0.059	0.085	0.024
ncepr850as.dat	0.061		0.092	0.066	0.123	0.024			0.094	0.096	0.065	0.101
nceprhumas.dat	0.096		0.062	0.055	0.043	0.013		0.026	0.097	0.080	0.109	0.136

ให้ค่าความสัมพันธ์ (seasonal correlation)ดีที่สุดในบรรดา predictors ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง

CORRELATION MATRIX

Analysis Period: 1/1/1961 - 31/12/1975 (Annual)

Missing values: 0
Missing rows: 0
Values less than or equal to threshold: 3698

		1	2	3	4	5	6
1	07013.dat	1	0.113	-0.142	0.172	0.080	0.107
2	ncepp__zas.dat	0.113	1	0.002	-0.112	-0.089	-0.254
3	ncepp8zhas.dat	-0.142	0.002	1	0.043	-0.125	0.007
4	ncepr500as.dat	0.172	-0.112	0.043	1	0.459	0.577
5	ncepr850as.dat	0.080	-0.089	-0.125	0.459	1	0.676
6	nceprhumas.dat	0.107	-0.254	0.007	0.577	0.676	1

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกันของ predictor แต่ละตัว

PARTIAL CORRELATIONS WITH 07013.dat

	Partial r	P value
ncepp__zas.dat	0.149	0.0000
ncepp8zhas.dat	-0.161	0.0000
ncepr500as.dat	0.145	0.0000
ncepr850as.dat	-0.052	0.0519
nceprhumas.dat	0.063	0.0172

ถ้า predictor ตัวที่ให้ค่า partial correlation มากกว่าตัวอื่น แสดงว่ามีความเกี่ยวข้องกับ predictand

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE

Analysis Period: 1/1/1961 - 31/12/1975
Significance level: .05

Total missing values: 16

Predictand: ChiangMai_Mean.dat ← อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน

Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepr500as.dat	0.028	0.022		0.161	0.162	0.048	0.273	0.202	0.107		0.091	0.111
ncepr850as.dat	0.080			0.107	0.364	0.139	0.037		0.037	0.052	0.098	0.098
nceptempas.dat	0.335	0.193	0.123	0.231	0.231	0.026	0.105	0.045	0.101	0.244	0.410	0.355

CORRELATION MATRIX

Analysis Period: 1/1/1961 - 31/12/1975 (Annual)

Missing values: 4
Missing rows: 4

		1	2	3	4
1	ChiangMai_Mean.dat	1	0.367	0.206	0.574
2	ncepr500as.dat	0.367	1	0.666	-0.157
3	ncepr850as.dat	0.206	0.666	1	-0.388
4	nceptempas.dat	0.574	-0.157	-0.388	1

PARTIAL CORRELATIONS WITH ChiangMai_Mean.dat

	Partial r	P value
ncepr500as.dat	0.306	0.0000
ncepr850as.dat	0.312	0.0000
nceptempas.dat	0.723	0.0000

ภาพที่ 23 ตัวอย่างการคัดเลือก predictor ที่เหมาะสมของแบบจำลอง SDSM

ภาพที่ 23 แสดงตัวอย่างการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่เหมาะสมกับข้อมูลฝนรายวันของสถานีวัดน้ำฝนอำเภอเมืองเชียงใหม่ (07013) และอุณหภูมิรายวันเฉลี่ยที่สถานีตรวจอากาศอำเภอเมืองเชียงใหม่

3.3 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Validation)

ขั้นตอนการสอบเทียบแบบจำลองจะเป็นการหาตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่ให้ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) กับอุณหภูมิและปริมาณฝน (predictands) และการสร้างความสัมพันธ์แบบสมการถดถอยเส้นตรงเชิงซ้อน (multiple linear regression equations) หรือ transfer function โดยมีตัวแปรอิสระคือ predictors และตัวแปรตามคือ predictands จากนั้นทำการตรวจพิสูจน์โดยใช้ predictors ชนิดเดียวกันแต่มีช่วงเวลาต่างกันมาทดสอบและใช้ transfer function ที่ได้จากการสอบเทียบมาสร้าง predictands ขึ้นใหม่และนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงเพื่อดูความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ต่อไป

ข้อมูลที่ใช้ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองประกอบด้วย ชุดข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุด และต่ำสุดรายวันจากสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่ รวมทั้งข้อมูลปริมาณฝนรายวันของสถานีต่าง ๆ ที่ได้คัดเลือกไว้ในลุ่มน้ำปิงตอนบนจำนวน 20 สถานี โดยจะเป็นข้อมูลรายวันรวมทั้งสิ้น 30 ปี (ค.ศ.1961-1990) และชุดข้อมูล predictors จาก NCEP ที่มีจำนวนความยาวของข้อมูลเท่ากันกับอุณหภูมิและปริมาณฝน สำหรับการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองจะแบ่งข้อมูลออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ใช้สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง ส่วนข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1976-1990 จะใช้สำหรับตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

ในการสอบเทียบแบบจำลองนั้น แบบจำลอง SDSM จะสร้างไฟล์ที่เก็บค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (model parameters) เพื่อนำไปใช้สร้างตัวแปร predictand ช่วงสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองต่อไป ดังแสดงตัวอย่างไฟล์ที่สร้างขึ้นในภาพที่ 24 และภาพที่ 25

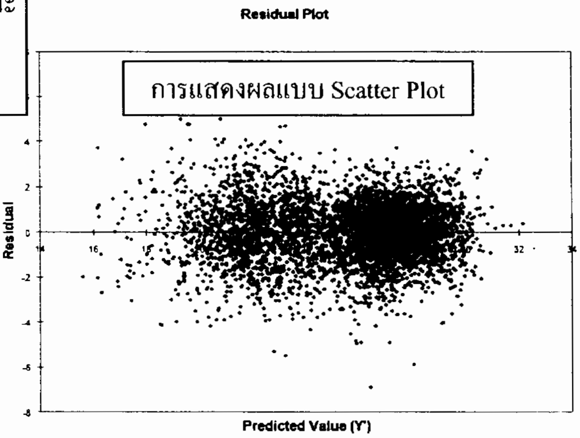
Predictand: ChiangMai_Mean.dat

Predictors:
ncepr500as.dat
ncepr850as.dat
nceptempas.dat

ผลการสอบเทียบที่แสดงค่า R^2 และ Standard error ในแต่ละเดือน ระหว่าง predictors-predictand

Unconditional Statistics

Month	RSquared	SE	Durbin-Watson
January	0.440	1.497	0.625
February	0.258	1.473	0.820
March	0.222	1.368	0.819
April	0.296	1.350	0.733
May	0.391	1.229	0.831
June	0.194	0.793	1.126
July	0.364	0.900	1.175
August	0.197	0.941	1.438
September	0.237	0.859	1.423
October	0.269	1.043	0.847
November	0.465	1.349	0.679
December	0.420	1.706	0.620
Mean	0.313	1.209	0.928



ภาพที่ 24 การแสดงผลการสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration Results) ของแบบจำลอง SDSM

TmeanNCEP_61-75.PAR - Notepad

File Edit Format View Help

```
3
12
366
1/1/1961
10957
1/1/1961
10957
#FALSE#
1
1
False
ChiangMai_Mean.dat
ncepr500as.dat
ncepr850as.dat
nceptempas.dat
```

Model parameters ในแต่ละเดือนของ predictors | Standard error (SE) | R^2

23.048	0.347	0.781	2.073	1.496	0.443
24.271	0.796	0.624	1.961	1.632	0.292
25.891	-0.109	0.798	1.615	1.569	0.243
27.951	-0.452	1.000	1.453	1.643	0.234
28.638	-0.394	-1.072	0.899	1.433	0.364
28.567	-0.199	-0.562	1.219	1.049	0.141
28.365	-0.364	-0.477	1.538	1.051	0.311
28.187	-0.715	-0.208	1.244	1.084	0.182
27.712	-0.441	-0.359	1.407	1.079	0.154
26.964	-0.136	-0.351	1.696	1.133	0.219
25.915	0.235	0.061	2.593	1.491	0.424
23.379	0.660	0.892	1.582	1.613	0.405

```
D:\Thesis\Downscaling\HadCM3_1961-2099\Temp_1961-1990\Tmean\ChiangMai_Mean.dat
```

ภาพที่ 25 การสร้างไฟล์พารามิเตอร์ของ transfer function ในขั้นตอนของการสอบเทียบแบบจำลอง (model calibration)

เมื่อได้ไฟล์พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง predictors และ predictand ในรูปของสมการถดถอยเชิงซ้อนแล้ว ก็นำมาใช้วิเคราะห์ในการสร้างชุดข้อมูลสำหรับช่วงสอบเทียบแบบจำลอง (ค.ศ.1961-1975) และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1976-1990) โดยข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจะเป็นข้อมูลรายวันที่สร้างขึ้นมาจำนวน 100 ชุดข้อมูล (100 ensembles) แล้วนำมาหาค่าทางสถิติต่างๆ เช่น ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ค่าสูงสุด ช่วงความยาวเวลาการเกิดฝน (wet-spell length) เป็นต้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างค่าจากการตรวจวัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง

3.4 การทำ downscaling ตัวแปรภูมิอากาศภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตแบบ A2 และ B2 ด้วยแบบจำลอง SDSM

หลังจากทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองเพื่อให้ได้ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนจากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนรวมทั้ง transfer function แล้ว ก็ทำการ downscaling ข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศของแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบ A2 และ B2 ด้วยแบบจำลอง SDSM เพื่อใช้ในการสร้างชุดข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนขึ้นและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนต่อไป ซึ่งในการจำลอง (simulation) หรือสังเคราะห์ (synthesis) ข้อมูลแต่ละครั้งจะกำหนดให้แบบจำลอง SDSM สร้างชุดข้อมูลจำนวน 100 ชุดข้อมูล (ensembles) ซึ่งเป็นจำนวนสูงสุดที่สามารถกำหนดได้ในแบบจำลอง SDSM โดยสามารถกำหนดค่าที่น้อยกว่านี้ได้ตามต้องการเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐาน (emission scenarios) แบบ A2 และ B2 นั้นจะแบ่งช่วงเวลาการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะใกล้ : ช่วงทศวรรษที่ 20 ของคาบปี ค.ศ. 2000 หรือ ค.ศ. 2010-2039 (2020s)
ระยะกลาง : ช่วงทศวรรษที่ 50 ของคาบปี ค.ศ. 2000 หรือ ค.ศ. 2040-2069 (2050s)
ระยะยาว : ช่วงทศวรรษที่ 80 ของคาบปี ค.ศ. 2000 หรือ ค.ศ. 2070-2099 (2080s)

3.5 วิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนตามพื้นที่ (areal rainfall) ของลุ่มน้ำปิงตอนบนในอนาคตด้วยวิธีรูปเหลี่ยมธีเอสเสน (thiessen polygon)

เมื่อได้ผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนที่คัดเลือกไว้จากการทำ downscaling ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 แล้ว จะใช้วิธีรูปเหลี่ยมธีเอสเสน (thiessen polygon) เพื่อหาขอบเขตอิทธิพลของสถานีวัดน้ำฝนต่าง ๆ ครอบคลุมลุ่มน้ำปิงตอนบน เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำฝนของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ.1961-1990) ต่อไป

ผลและวิจารณ์

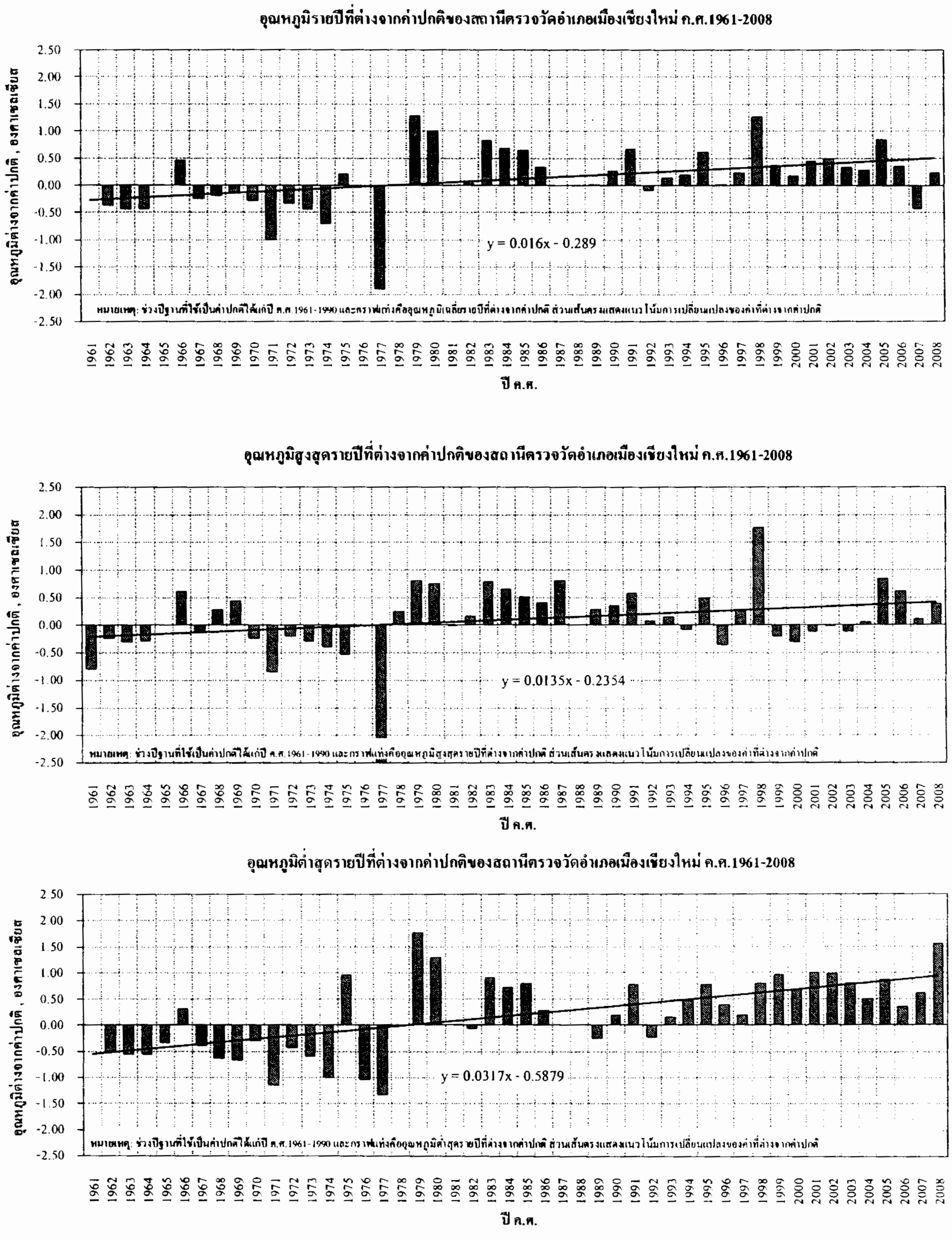
ผลที่ได้ในการศึกษานี้เป็นผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนของลุ่มน้ำปิงตอนบนในอดีตถึงปัจจุบันในเชิงสถิติ การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่เหมาะสมและ transfer function ที่สามารถไปใช้สำหรับคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตของลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยใช้ตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ในอนาคตซึ่งเป็นผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก HadCM3 ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (SRES) ที่มีความใกล้เคียงกับแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นจริง (realistic) ในอนาคต คือแบบ A2 และ B2

การนำเสนอผลการศึกษาได้แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและการเปลี่ยนแปลงในอนาคตภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิ

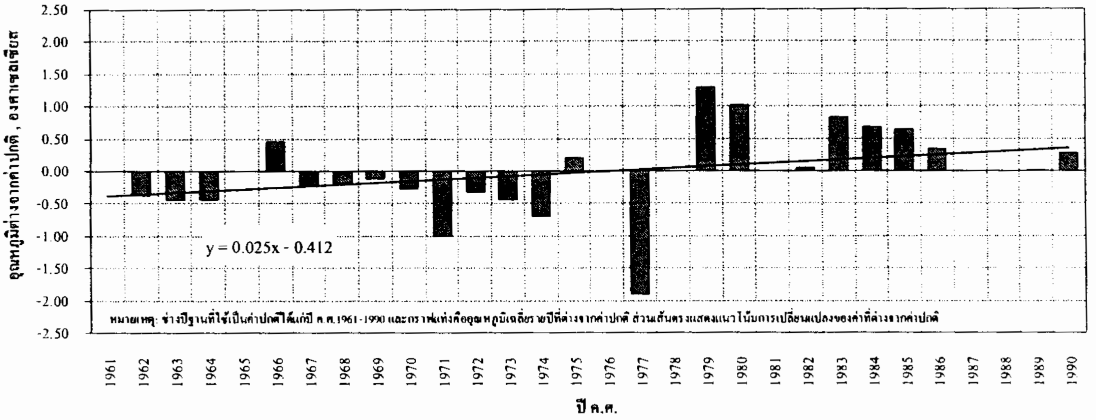
1.1 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหูมิในอดีต (ค.ศ.1961-2008)

ผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุด และต่ำสุดรายปีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายปีของช่วงปี ค.ศ.1961-1990 (โดยถือว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากข้อมูลช่วงนี้เป็นค่าปกติหรือค่าในอดีตก่อนการเปลี่ยนแปลง) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลรายปีในอดีตมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายปีของข้อมูลช่วงนี้ก็จะเห็นถึงแนวโน้มและโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต โดยการพิจารณาแยกออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-2008, ค.ศ.1961-1990 และ ค.ศ.1991-2008 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะยาวในอดีต และช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับปัจจุบันดังแสดงในภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 28 นอกจากนี้ได้นำสถิติข้อมูลรายปีของอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีมาพล็อตเพื่อดูแนวโน้ม (trend) การเปลี่ยนแปลงในอดีตโดยพิจารณาแยกเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 31 ตามลำดับ

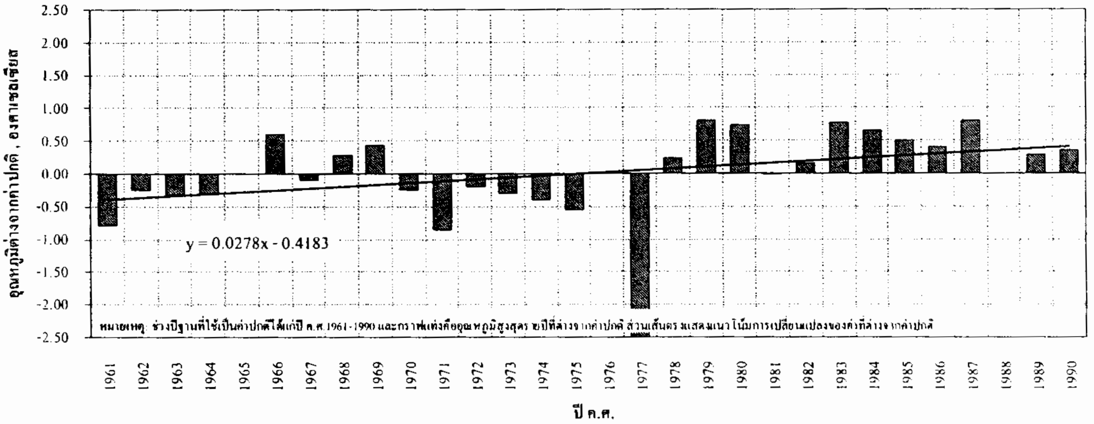


ภาพที่ 26 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงปี ค.ศ.1961-2008

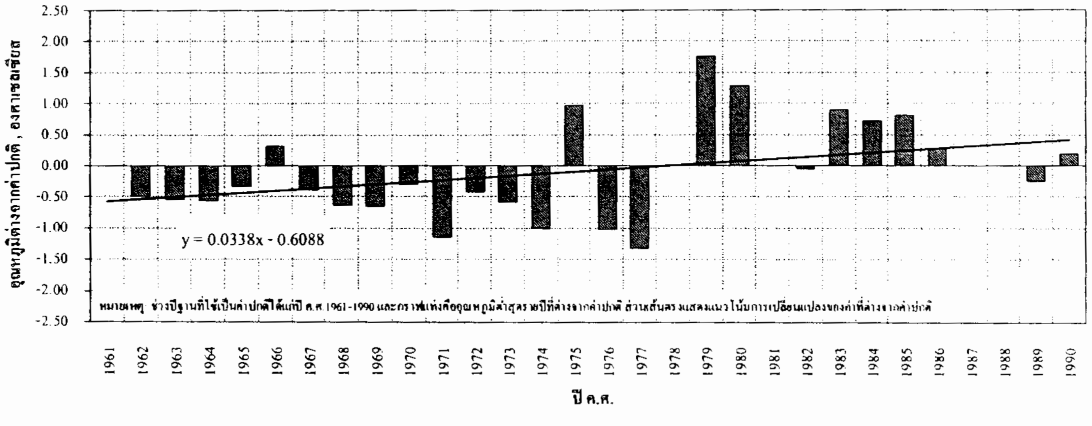
อุณหภูมิรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดอำเภอเมืองเชียงใหม่ ค.ศ.1961-1990



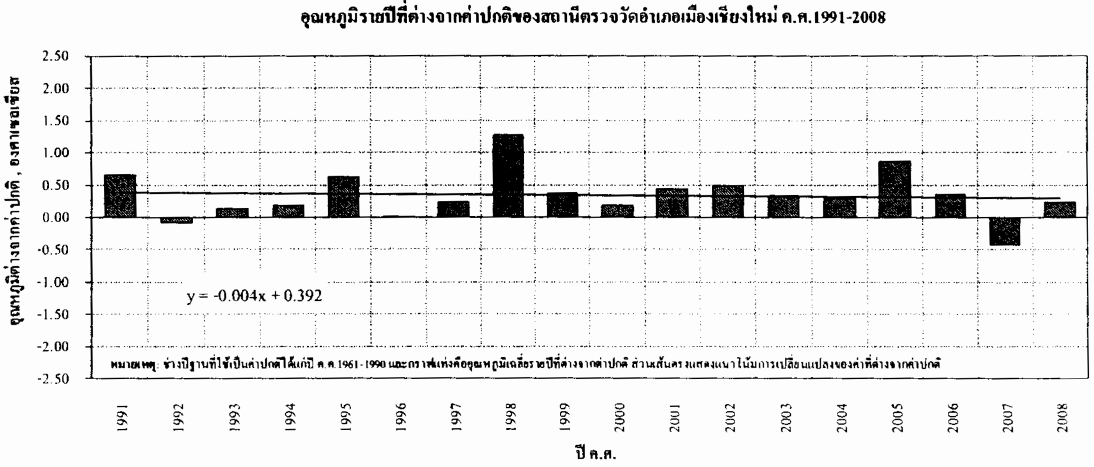
อุณหภูมิสูงสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดอำเภอเมืองเชียงใหม่ ค.ศ.1961-1990

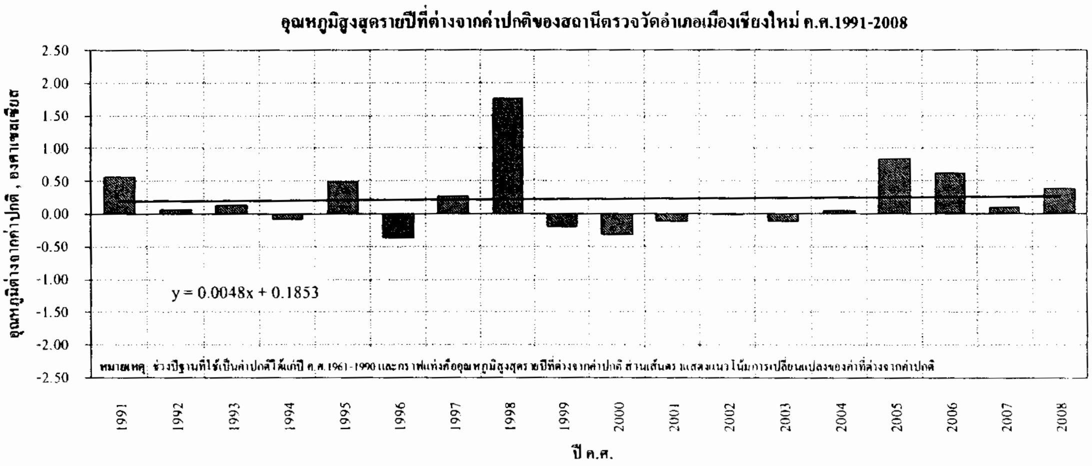


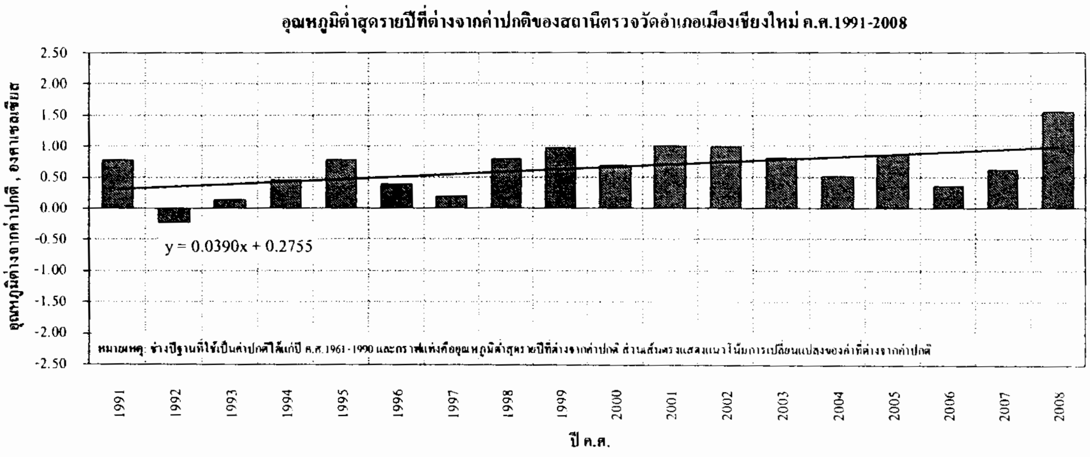
อุณหภูมิต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดอำเภอเมืองเชียงใหม่ ค.ศ.1961-1990



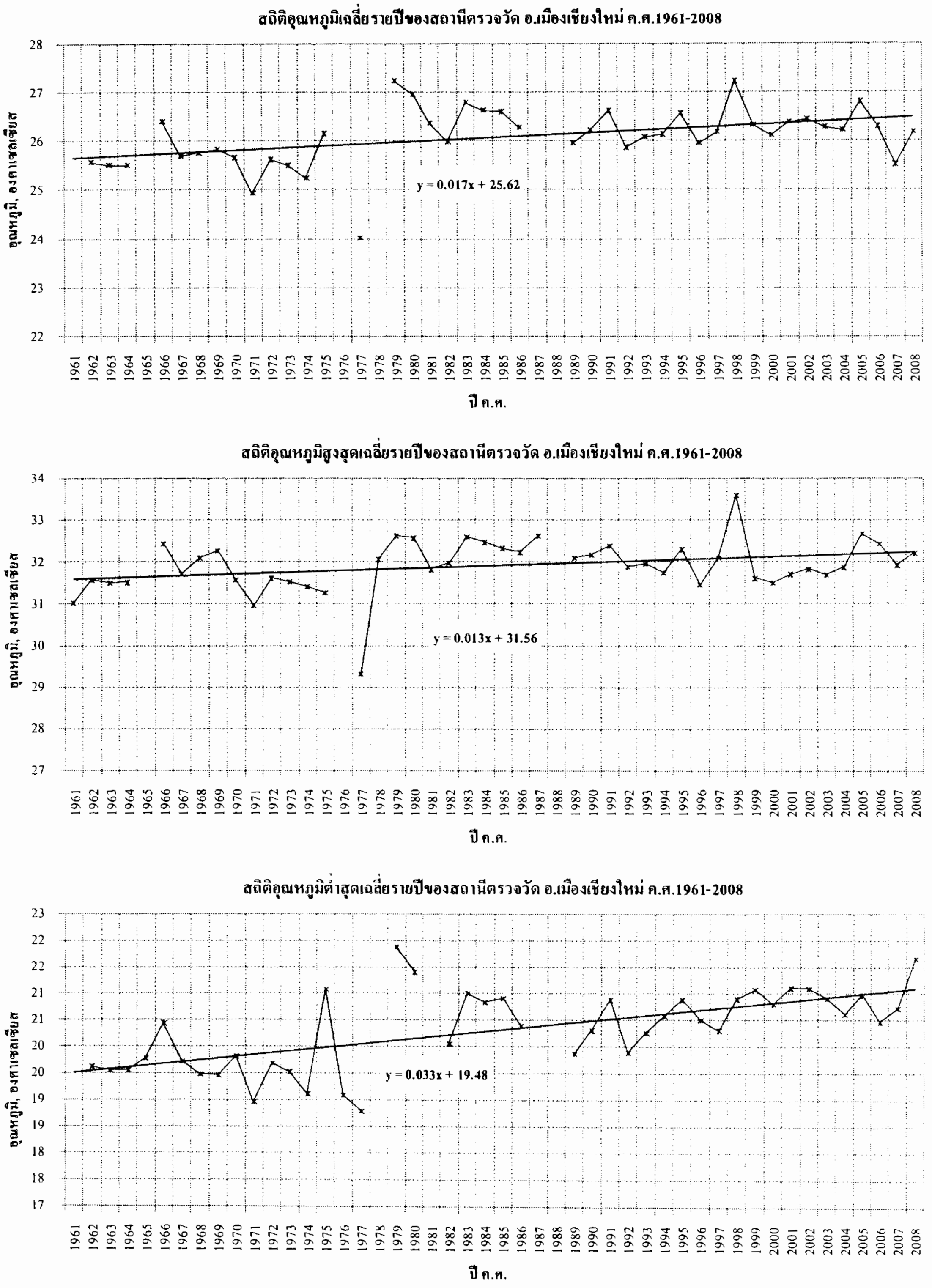
ภาพที่ 27 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงปี ค.ศ.1961-1990



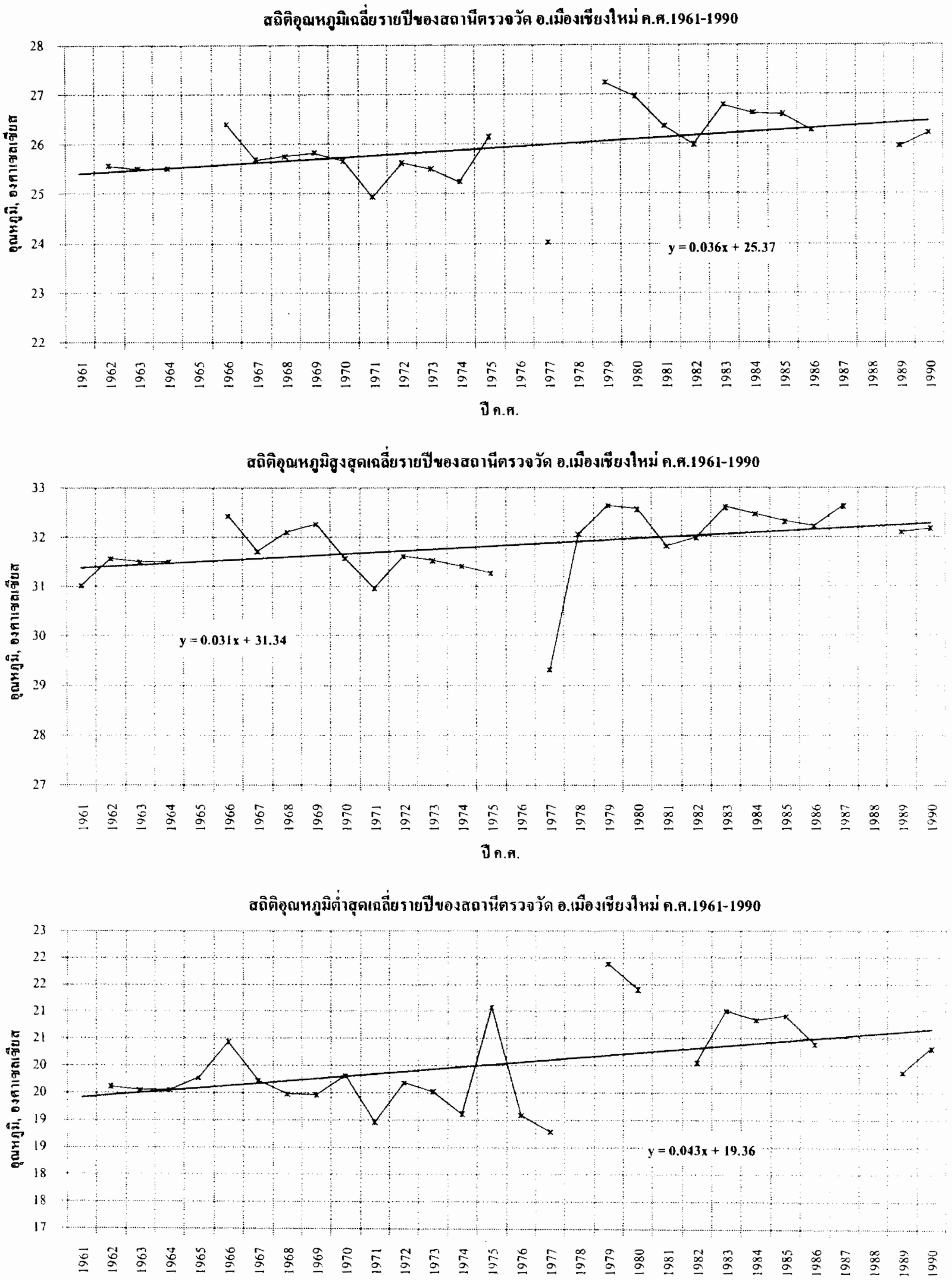




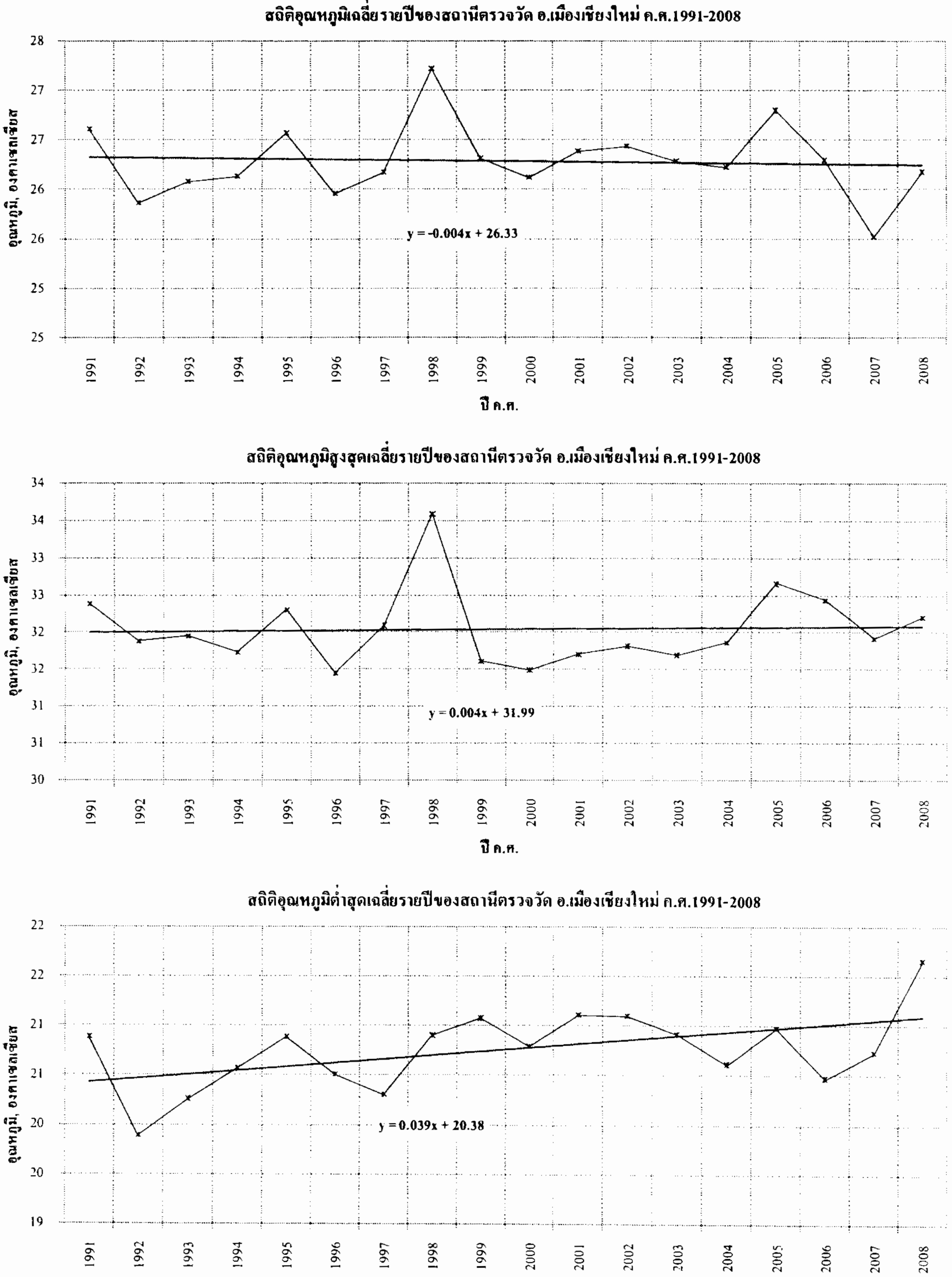
ภาพที่ 28 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีที่ต่างจากค่าปกติของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงปี ค.ศ.1991-2008



ภาพที่ 29 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1961-2008 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 30 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 31 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีของสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ช่วงปี ค.ศ.1991-2008 และเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง

ผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายปีเชิงสถิติของสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1961-2008 เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1990 จากภาพที่ 26 จะเห็นว่าอุณหภูมิรายปีทั้ง 3 กรณี (เฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปี) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยอุณหภูมิต่ำสุดรายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่เมื่อแยกพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ ค.ศ.1961-1990 และช่วงปี ค.ศ.1991-2008 ดังแสดงในภาพที่ 27 และภาพที่ 28 พบว่าในช่วงปี ค.ศ. 1961-1990 (ภาพที่ 27) อุณหภูมิมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้ง 3 กรณี โดยจะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิรายปีมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1990 เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ.1978 เป็นต้นไป และเมื่อพิจารณาช่วงปี ค.ศ.1991-2008 จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีและสูงสุดรายปีมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายปียังคงมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับอดีต นอกจากนี้จากภาพที่ 28 จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีและต่ำสุดรายปีมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ. 1961-1990 เกือบทุกปี อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งต่างจากอุณหภูมิสูงสุดรายปีที่ยังมีค่ามากกว่าและน้อยกว่าค่าเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1990 สลับกันเป็นช่วง ๆ ไม่ต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยในอดีต

สำหรับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่างๆ ของอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดรายปีและต่ำสุดรายปีจากภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 31 นำมาสรุปได้ดังตารางที่ 10 ในกรณีการนำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีมาศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอดีตดังแสดงในภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 31 พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ.1961 ถึงปี ค.ศ.2008 อุณหภูมิรายปีทั้ง 3 กรณีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดรายปีมีอัตราการเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.013-0.033 องศาเซลเซียสต่อปี แต่เมื่อพิจารณาแยกออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และ ช่วงปี ค.ศ.1991-2008 พบว่าอุณหภูมิทั้ง 3 กรณีเพิ่มขึ้นชัดเจนในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 0.031-0.043 องศาเซลเซียสต่อปี แต่ในระยะหลังช่วงปี ค.ศ.1991-2008 อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี และสูงสุดรายปีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ยกเว้นอุณหภูมิต่ำสุดรายปียังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประมาณ 0.039 องศาเซลเซียสต่อปี

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่าง ๆ ระหว่างช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และช่วงปี ค.ศ.1991-2008 จะมีความแตกต่างกัน คือ อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีเพิ่มขึ้น 0.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดรายปีเพิ่มขึ้น 0.2 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิต่ำสุดรายปีเพิ่มขึ้นมากสุด 0.8 องศาเซลเซียส แสดงว่าในอนาคตโดยรวมแล้วอุณหภูมิน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงเวลาต่าง ๆ ในอดีต

อุณหภูมิ	ช่วงเวลาของข้อมูลในอดีต					
	ค.ศ.1961-2008		ค.ศ.1961-1990		ค.ศ.1991-2008	
	เฉลี่ย	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง	เฉลี่ย	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง	เฉลี่ย	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง
เฉลี่ยรายปี	26.1	0.017	25.9	0.036	26.3	-0.004
สูงสุดรายปี	31.9	0.013	31.8	0.031	32.0	0.004
ต่ำสุดรายปี	20.3	0.033	20.0	0.043	20.8	0.039

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส และองศาเซลเซียสต่อปีตามลำดับ

ในการศึกษายังได้ทดสอบการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตในทศวรรษต่าง ๆ (2020s, 2050s และ 2080s) จากสมการแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-2008 ซึ่งเกิดจากข้อมูลที่มีความยาวเกือบ 50 ปี พบว่าอุณหภูมิจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีเพิ่มขึ้น 0.62-1.64 องศาเซลเซียส (2.4-6.3 เปอร์เซ็นต์) อุณหภูมิสูงสุดรายปีเพิ่มขึ้น 0.50-1.28 องศาเซลเซียส (1.6-4.0 เปอร์เซ็นต์) และอุณหภูมิต่ำสุดรายปีเพิ่มขึ้น 1.31-3.29 องศาเซลเซียส (6.4-16.2 เปอร์เซ็นต์) ดังสรุปในตารางที่ 11 ซึ่งจากผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังกล่าวไม่น่าเป็นไปได้ เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต้องดูเป็นหลาย ๆ ร้อยปี และธรรมชาติมีขึ้นมีลงเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้การทำ downscaling มาช่วยในการศึกษาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ.1961-2008 กับผลการคาดการณ์อุณหภูมิในอนาคตจากสมการเชิงเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง

หน่วย : องศาเซลเซียส

	อุณหภูมิเฉลี่ย ช่วงปี ค.ศ.1961-2008	คาดการณ์จาก Trend ช่วงปี ค.ศ.1961-2008			% การเปลี่ยนแปลง		
		2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
เฉลี่ยรายปี	26.08	26.72	27.23	27.74	2.4	4.4	6.4
สูงสุดรายปี	31.91	32.40	32.79	33.18	1.5	2.8	4.0
ต่ำสุดรายปี	20.32	21.61	22.60	23.59	6.3	11.2	16.1

1.2 การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (Selection of Predictors)

ผลการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่ใช้สำหรับคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบนสรุปได้ดังตารางที่ 12 ส่วนตารางที่ 13 แสดงตัวอย่างค่าสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับตัวแปรภูมิอากาศ (predictors)โดยตัวแปรภูมิอากาศที่เหมาะสมและมีอิทธิพลต่อการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ประกอบด้วย Relative humidity at 500 hPa, Relative humidity at 850 hPa, Surface specific humidity, Mean temperature at 2m สำหรับอุณหภูมิสูงสุดรายวันนั้นตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย 850 hPa divergence, Relative humidity at 500 hPa , Relative humidity at 850 hPa, Mean temperature at 2m ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะประกอบด้วยตัวแปรภูมิอากาศ 500 hPa zonal velocity, 850 hPa geopotential height, Relative humidity at 850 hPa, Near surface relative humidity, Surface specific humidity

ตารางที่ 12 ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่

อุณหภูมิ	**รหัสตัวแปรภูมิอากาศ (predictors)**	**คำจำกัดความ (definition)**
เฉลี่ยรายวัน	r500as, r850as, shumas, tempas	Relative humidity at 500 hPa, Relative humidity at 850 hPa, Surface specific humidity, Mean temperature at 2m
สูงสุดรายวัน	p8zhas, r500as, r850as, tempas	850 hPa divergence, Relative humidity at 500 hPa , Relative humidity at 850 hPa, Mean temperature at 2m
ต่ำสุดรายวัน	p5_uas, p850as, r850as, rhumas, shumas	500 hPa zonal velocity, 850 hPa geopotential height, Relative humidity at 850 hPa, Surface specific humidity

ตารางที่ 13 รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

ลำดับที่	รายชื่อตัวแปร (variable name)	รายชื่อตัวแปร (ลำดับที่)				
		1	2	3	4	5
1	Tmean	1	-0.189	0.206	0.704	0.589
2	Relative humidity at 500 hPa	-0.189	1	-0.059	-0.164	-0.012
3	Relative humidity at 850 hPa	0.206	-0.059	1	0.706	-0.325
4	Surface specific humidity	0.704	-0.164	0.706	1	0.074
5	Mean temperature at 2m	0.589	-0.012	-0.325	0.074	1

สำหรับตารางที่ 13 แสดงค่าสหสัมพันธ์แบบรายปี (annual correlations) ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศด้วยกันเองและระหว่างตัวแปรภูมิอากาศกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน นอกจากนี้แบบจำลอง SDSM ยังแสดงค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation, partial r) ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศและอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (predictand) ด้วยดังแสดงผลในตารางที่ 14 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงสถิติที่ช่วยในการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ โดยตัวแปรภูมิอากาศที่ให้ค่า partial r ที่สูงและค่านัยสำคัญ $p<0.05$ (ค่าความเชื่อมั่นที่ 95%) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (ดังแสดงในตารางที่ 14 จะเห็นว่าค่า p value เท่ากับ 0.000 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่าความเชื่อมั่นมากกว่า 95% และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ)

ตารางที่ 14 ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

รายชื่อตัวแปรภูมิอากาศ (variable name)	partial r	p value
Relative humidity at 500 hPa	-0.139	0.0000
Relative humidity at 850 hPa	-0.302	0.0000
Surface specific humidity	0.761	0.0000
Mean temperature at 2m	0.656	0.0000

ในการวิเคราะห์หาตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีอิทธิพลและมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันและต่ำสุดรายวันจะมีลักษณะการคัดเลือกแบบเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 15 ถึง ตารางที่ 18

ตารางที่ 15 รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิสูงสุดรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

ลำดับที่	รายชื่อตัวแปร (variable name)	รายชื่อตัวแปร (ลำดับที่)				
		1	2	3	4	5
1	Tmax	1	0.318	-0.172	-0.400	0.780
2	850 hPa divergence	0.318	1	0.002	-0.169	0.253
3	Relative humidity at 500 hPa	-0.172	0.002	1	-0.059	0.004
4	Relative humidity at 850 hPa	-0.400	-0.169	-0.059	1	-0.388
5	Mean temperature at 2m	0.780	0.253	0.004	-0.388	1

ตารางที่ 16 ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิสูงสุดรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

รายชื่อตัวแปรภูมิอากาศ (variable name)	partial r	p value
850 hPa divergence	0.196	0.0000
Relative humidity at 500 hPa	0.300	0.0000
Relative humidity at 850 hPa	-0.182	0.0000
Mean temperature at 2m	0.740	0.0000

ตารางที่ 17 รายละเอียดของสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่าง predictand (อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน) และตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

ลำดับที่	รายชื่อตัวแปร	รายชื่อตัวแปร (ลำดับที่)				
	(variable name)	1	2	3	4	5
1	Tmax	1	-0.668	-0.589	0.563	0.882
2	500 hPa zonal velocity	-0.668	1	0.404	-0.569	-0.745
3	850 hPa geopotential height	-0.589	0.404	1	-0.444	-0.621
4	Relative humidity at 850 hPa	0.563	-0.569	-0.444	1	0.704
5	Surface specific humidity	0.882	-0.745	-0.621	0.704	1

ตารางที่ 18 ค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่มีต่ออุณหภูมิต่ำสุดรายวันของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่

รายชื่อตัวแปรภูมิอากาศ (variable name)	partial r	p value
500 hPa zonal velocity	-0.065	0.0000
850 hPa geopotential height	-0.123	0.0000
Relative humidity at 850 hPa	-0.181	0.0000
Surface specific humidity	0.699	0.0000

1.3 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองเป็นการทำ downscaling จากตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ที่ได้คัดเลือกไว้แล้วเพื่อให้ได้ตัวแปรภาคพื้นดิน (predictand) โดยอาศัยความสัมพันธ์ในรูปของสมการถดถอยเชิงซ้อน (multiple linear regression equations) เปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในอดีตในช่วงเวลาเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าตัวแปรภูมิอากาศและสมการที่ได้ (จากแบบจำลอง SDSM) มีความถูกต้องและสามารถใช้ได้ผลจริงสำหรับการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลง predictands ในอนาคตต่อไป

จากข้อมูลอุณหูมิรายวันจำนวน 30 ปี ในอดีต (ค.ศ.1961-1990) ถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงสำหรับทำการสอบเทียบ (calibration) และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (verification) คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1975 และ ช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ตามลำดับ สำหรับข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศหรือ predictors ในอดีตนั้น ใช้ข้อมูลของ NCEP ที่เป็นข้อมูลรายวันและมีช่วงเวลาข้อมูลเดียวกัน (ค.ศ.1961-1990) ส่วนผลการวิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง SDSM ซึ่งผลจากแบบจำลอง SDSM เป็นข้อมูลรายวันจำนวน 100 ชุดข้อมูล (ensembles) หรือ 100 เหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นจะได้ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน สูงสุดรายวันและต่ำสุดรายวัน แสดงดังตารางที่ 19 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน

ผลการสอบเทียบแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน แสดงในภาพที่ 32 เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลจากการตรวจวัดในอดีตตั้งแต่ปี ค.ศ.1961-1975 และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง SDSM ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยภาพกราฟแท่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลตรวจวัดช่วงปี ค.ศ.1961-1975 และข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง SDSM โดยนำผลจากแบบจำลอง SDSM จาก 100 ชุดข้อมูลมาหาค่ารายเดือนในแต่ละปี และนำมาเฉลี่ยในแต่ละเดือนอีกครั้งหนึ่งในช่วงปี ค.ศ.1961-1975 จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละเดือน ส่วนภาพกราฟเส้นด้านล่างนั้นเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยจากข้อมูลตรวจวัดและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองในแต่ละเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ.1961-1975 ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากการตรวจวัดมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าผลการวิเคราะห์เล็กน้อย

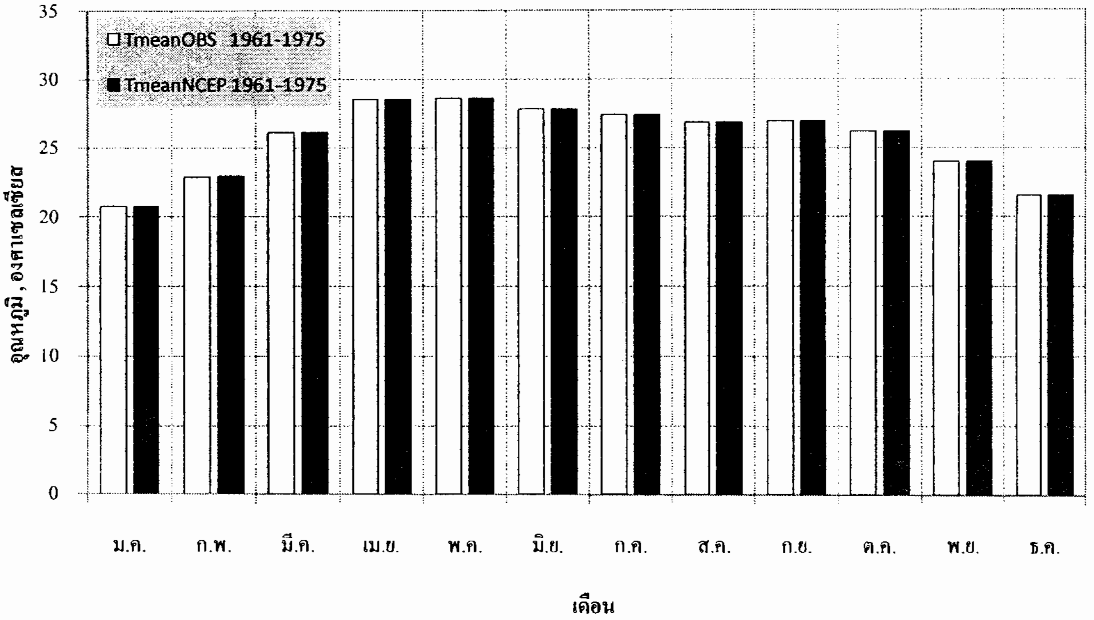
ตารางที่ 19 สรุปผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางสถิติของอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบน

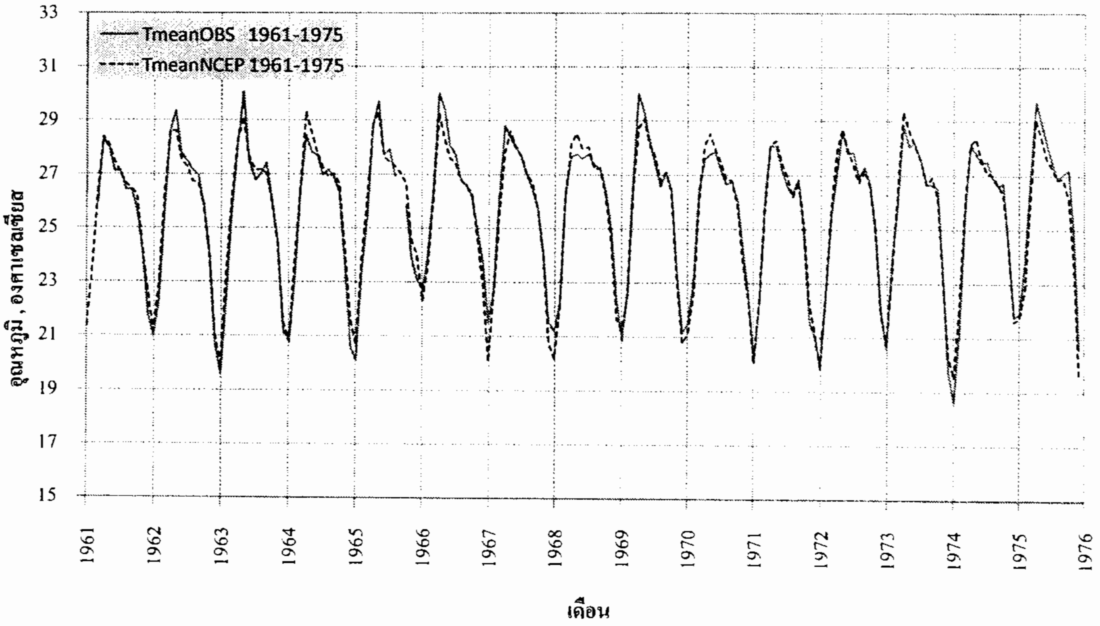
อุณหภูมิ	ข้อมูลศึกษา	การสอบเทียบแบบจำลอง (ค.ศ.1961-1975), °C						ตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1976-1990), °C					
		เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r	เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r
เฉลี่ยรายวัน	Observed	25.64	26.41	24.94	0.37	-	-	26.26	27.23	24.03	0.89	-	-
	NCEP	25.64	26.15	25.06	0.26	0.48	0.98	25.75	25.99	25.32	0.17	1.02	0.94
สูงสุดรายวัน	Observed	31.60	32.43	30.97	0.42	-	-	32.07	32.62	29.32	0.87	-	-
	NCEP	31.63	32.08	31.15	0.25	0.63	0.97	31.75	32.00	31.37	0.17	1.07	0.91
ต่ำสุดรายวัน	Observed	19.69	21.07	18.96	0.52	-	-	20.41	21.88	18.78	0.94	-	-
	NCEP	19.71	20.18	19.22	0.31	0.71	0.98	19.73	20.04	19.32	0.22	1.42	0.95

หมายเหตุ r = correlation coefficient (ไม่มีหน่วย)

STD = standard deviation (°C)

RMSE = root mean square error (°C)





ภาพที่ 32 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1961-1975

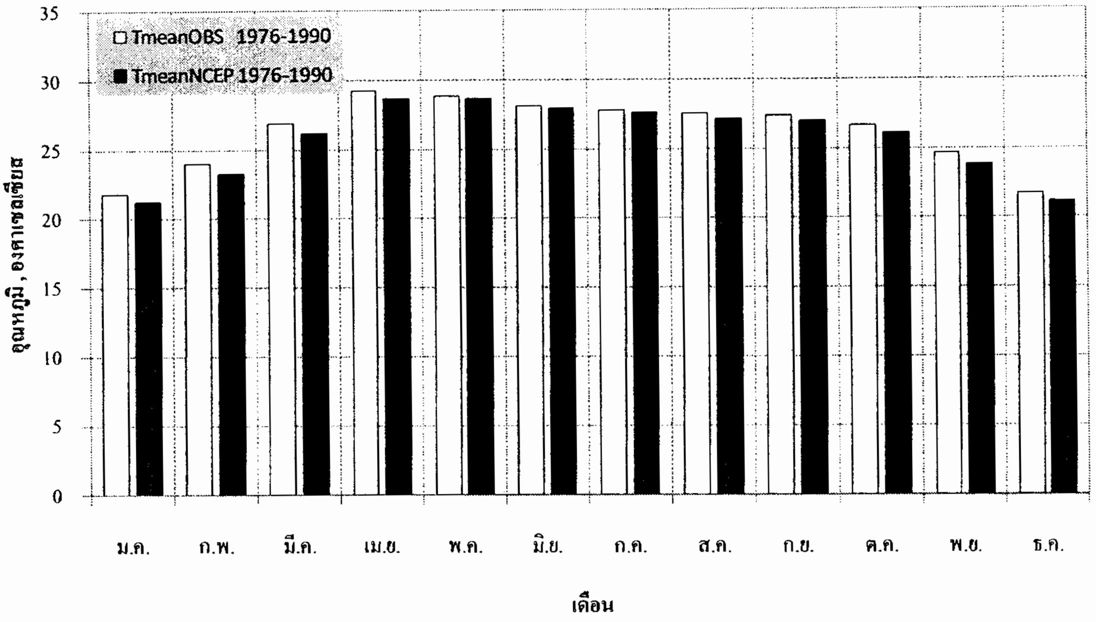
ในการวัดผลทางสถิตินั้น (จากตารางที่ 19) ได้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งเป็นตัวแปรทางสถิติที่แสดงความคาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Absolute error) ระหว่างข้อมูลจากการตรวจวัดและจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 0.48 องศาเซลเซียส ซึ่งค่า RMSE มีค่าคลาดเคลื่อนพอสมควรเมื่อเทียบกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.98 อยู่ในเกณฑ์ดี

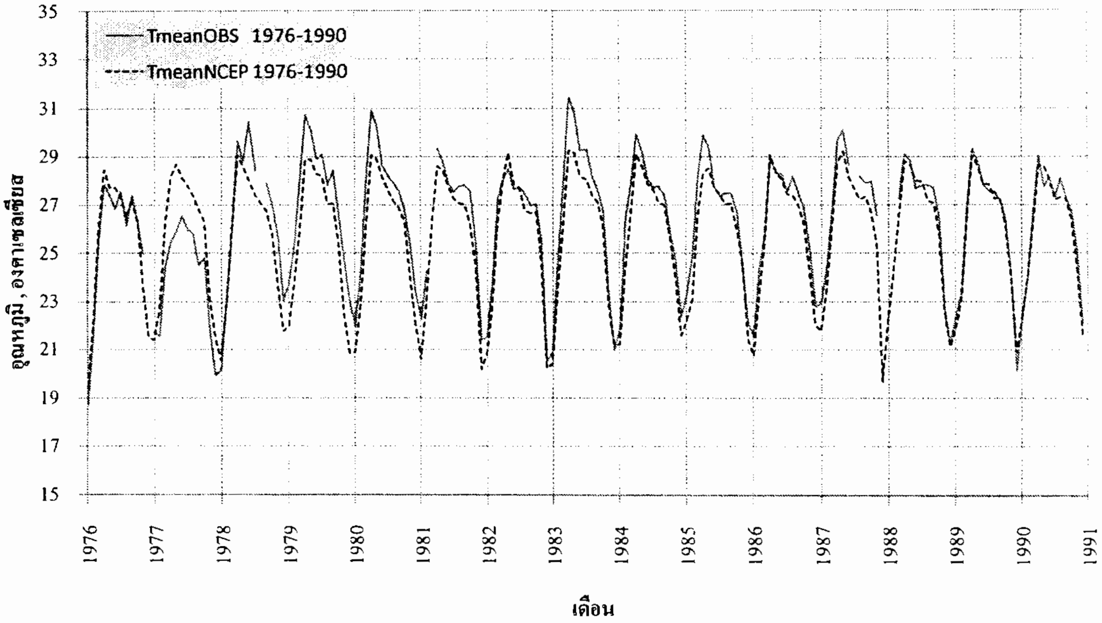
การตรวจพิสูจน์แบบจำลองเป็นการนำตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) ของ NCEP ช่วงปี ค.ศ.1976-1990 มาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันด้วยแบบจำลอง SDSM และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในอดีตในช่วงเวลาดังกล่าว เพื่อให้แน่ใจว่าตัวแปรภูมิอากาศที่เลือกใช้ในช่วงการสอบเทียบแบบจำลองสามารถนำมาใช้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคตได้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบการตรวจพิสูจน์แบบจำลองแสดงในภาพที่ 33 เป็นการเปรียบเทียบในช่วงปี ค.ศ.1976-1990 โดยกราฟแท่งที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าผลจากการวิเคราะห์เล็กน้อยเกือบทุกเดือน ส่วนกราฟเส้นด้านล่างเป็นค่ารายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ.1976-1990 จะเห็นว่าค่าจากการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ช่วงปี ค.ศ.1976-1983 ไม่ค่อยเข้ากันนักแต่หลังจากนั้นมีค่าใกล้เคียงกันดี โดยในการวิเคราะห์ช่วงปี ค.ศ.1976-1990 จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 1.02 องศาเซลเซียส (ดังแสดงในตารางที่ 19) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าขั้นตอนการสอบเทียบแบบจำลองประมาณสองเท่า ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.94

อย่างไรก็ตามการวัดผลข้างต้นโดยใช้ค่าทางสถิติ RMSE และ r มีข้อจำกัด คือ RMSE มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของค่าที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนค่า r เป็นค่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ซึ่งอาจไม่เป็น 45 เปอร์เซ็นต์ระหว่างค่าตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่ก็มีค่า r สูงได้เช่นกัน

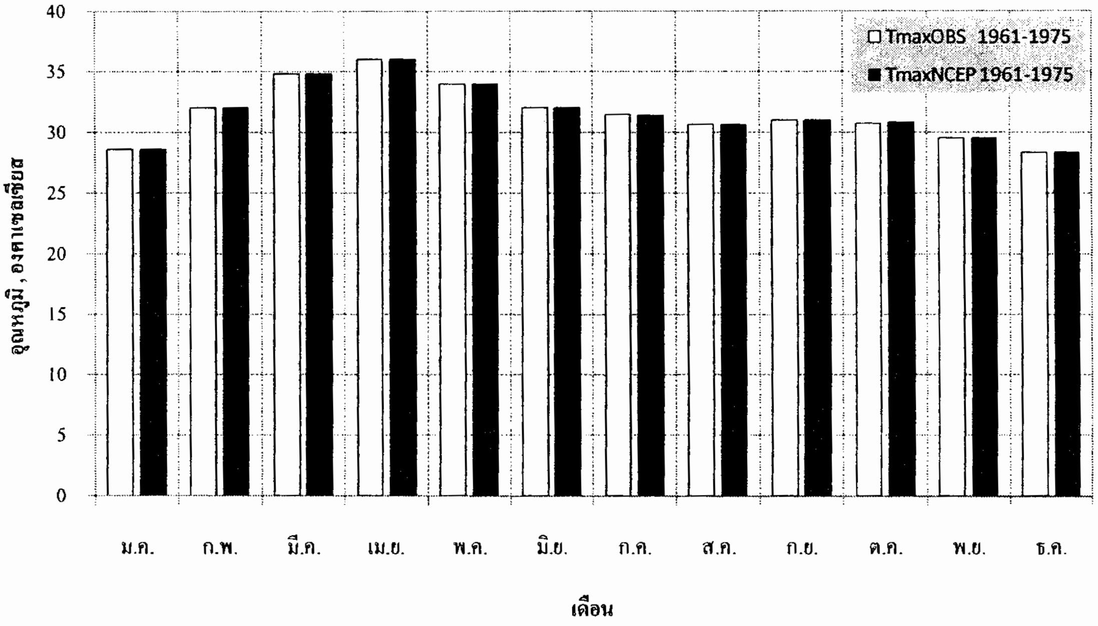
ข) อุณหภูมิสูงสุดรายวัน

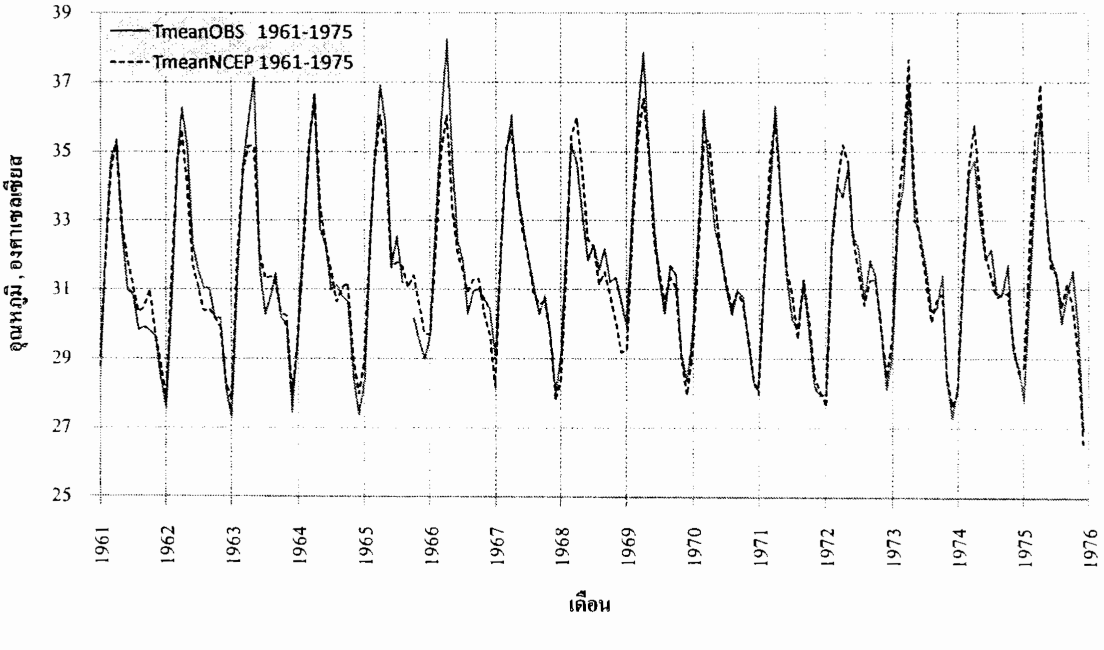
ผลการสอบเทียบแบบจำลองอุณหภูมิสูงสุดรายวัน แสดงในภาพที่ 34 ลักษณะการเปรียบเทียบภาพกราฟแท่งและกราฟเส้น รวมทั้งการวิเคราะห์มีลักษณะแบบเดียวกันกับการเปรียบเทียบในอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน แต่เปลี่ยนจากอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันเป็นอุณหภูมิสูงสุดรายวันโดยจะเห็นว่ากราฟแท่งมีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละเดือน ส่วนภาพกราฟเส้นด้านล่างนั้นจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในแต่ละเดือนจากการตรวจวัดช่วงปี ค.ศ.1961-1975 มีค่าสูงสุดส่วนใหญ่มากกว่าผลการวิเคราะห์เล็กน้อย ในการวัดผลทางสถิติ (ตารางที่ 19) ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.63 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ค่อยดีนัก





ภาพที่ 33 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1976-1990





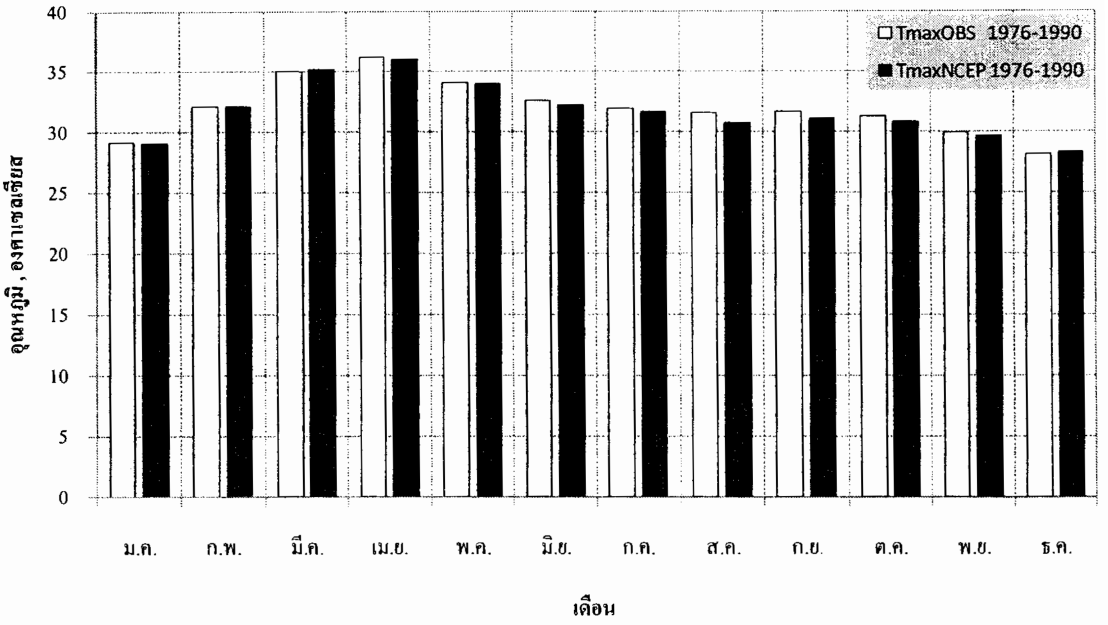
ภาพที่ 34 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1961-1975

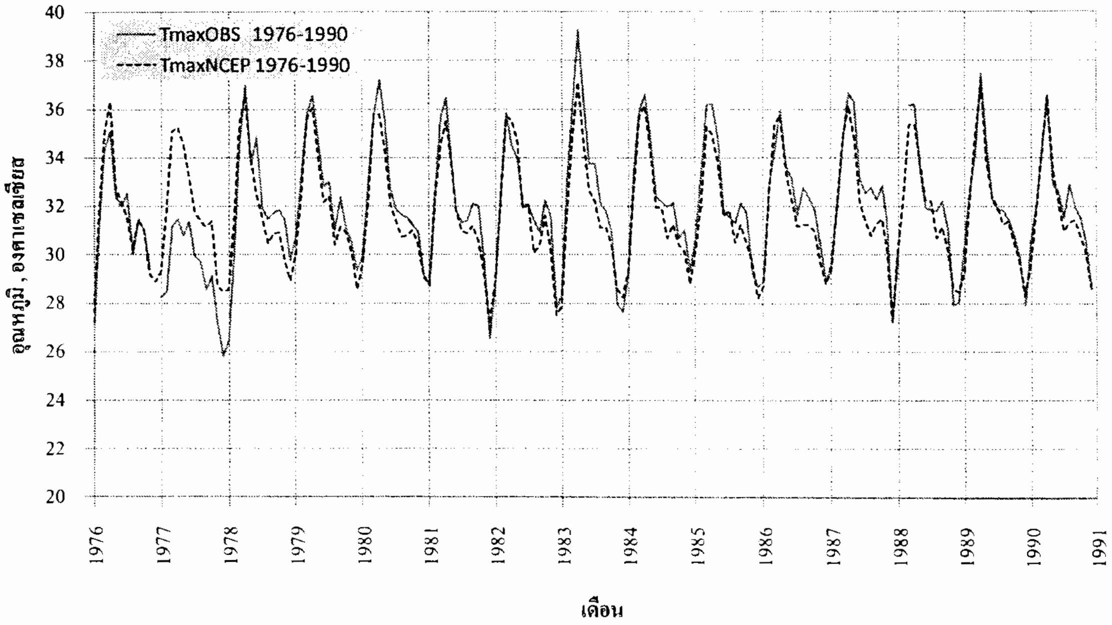
ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองช่วงปี ค.ศ.1976-1990 แสดงในภาพที่ 35 โดยกราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละเดือนจะเห็นว่าส่วนใหญ่อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยจากการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง ส่วนกราฟเส้นด้านล่างเป็นค่ารายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ.1976-1990 จะเห็นว่าส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยในการวิเคราะห์ช่วงปี ค.ศ. 1976-1990 จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 1.07 องศาเซลเซียส (ดังตารางที่ 19)

ค) อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน

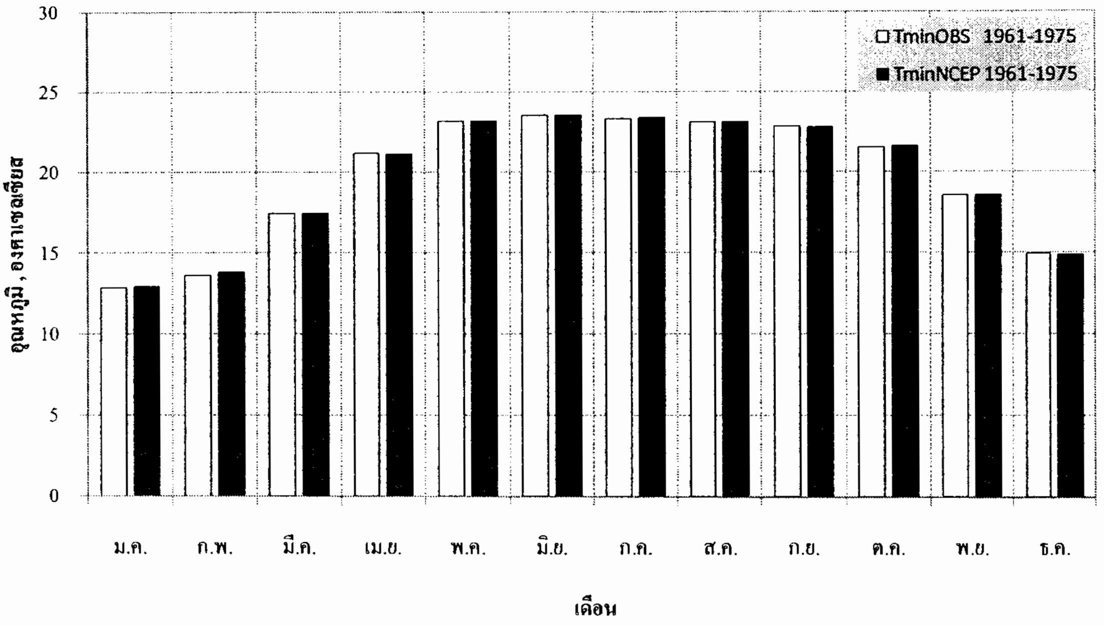
ผลการสอบเทียบแบบจำลองอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน แสดงในภาพที่ 36 ลักษณะการเปรียบเทียบภาพกราฟแท่งและกราฟเส้น โดยจะเห็นว่ากราฟแท่งมีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละเดือน ส่วนภาพกราฟเส้นด้านล่างนั้นจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดในแต่ละเดือนจากการตรวจวัดช่วงปี ค.ศ. 1961-1975 มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ ในการวัดผลทางสถิติ (ดังตารางที่ 19) ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.71 องศาเซลเซียส แสดงว่ามีการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวิเคราะห์กับข้อมูลตรวจวัดพอสมควร

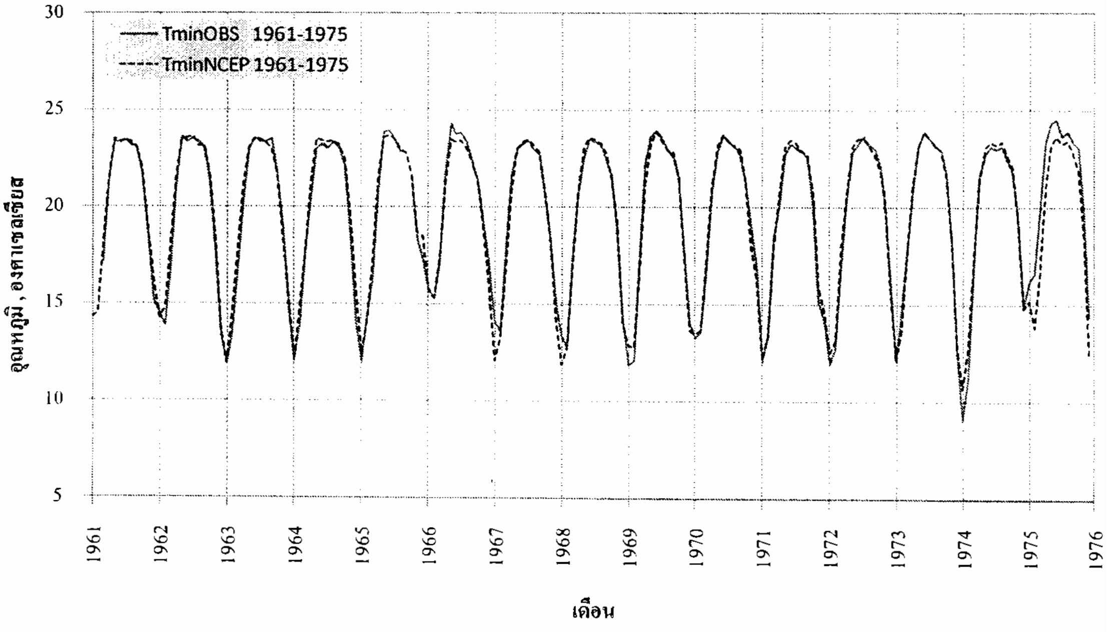
ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองช่วงปี ค.ศ.1976-1990 แสดงในภาพที่ 37 โดยกราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละเดือนจะเห็นว่าส่วนใหญ่อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยจากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองเล็กน้อย ส่วนกราฟเส้นด้านล่างในภาพที่ 37 เป็นค่ารายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ.1976-1990 จะเห็นว่าส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน จะมีค่าต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในช่วงปี ค.ศ.1977-1984โดยในการวิเคราะห์ช่วงปี ค.ศ.1976-1990 จะได้ค่า RMSE เท่ากับ 1.42 องศาเซลเซียส (ดังตารางที่ 19) ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนพอสมควรและมากกว่าในขั้นตอนการสอบเทียบประมาณสองเท่า



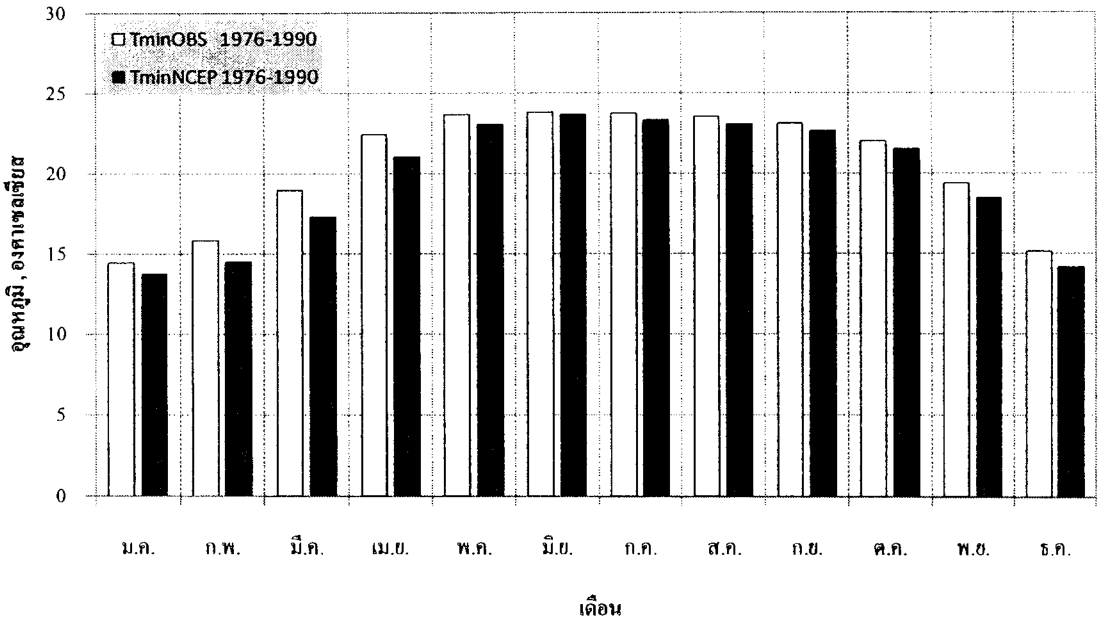


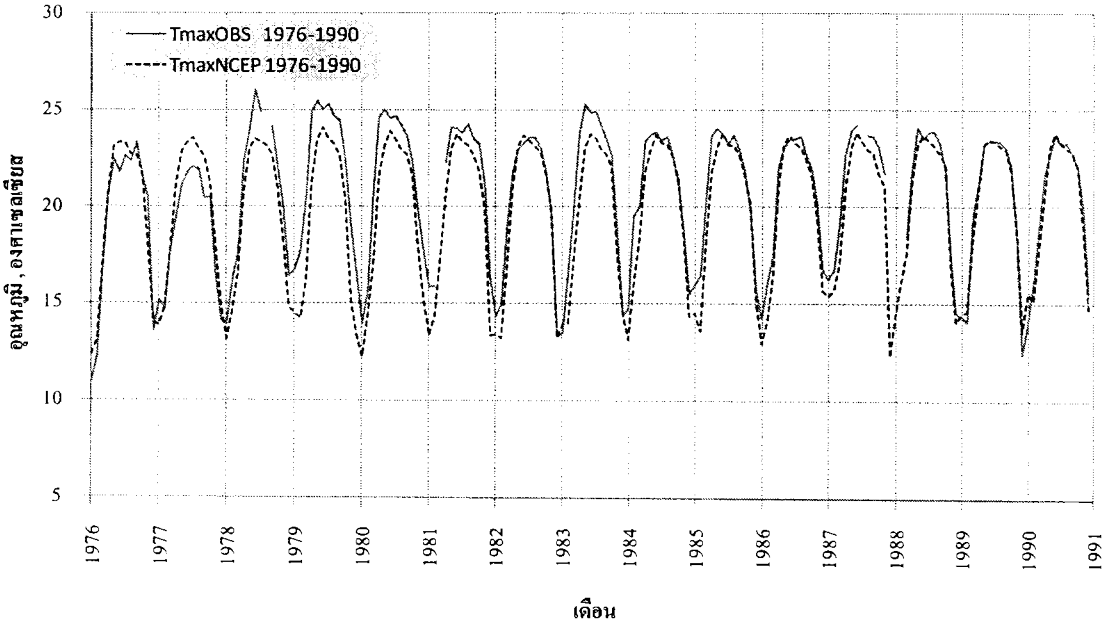
ภาพที่ 35 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือน ช่วงปี ค.ศ.1976-1990





ภาพที่ 36 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองของอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือนช่วงปี ค.ศ.1961-1975





ภาพที่ 37 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองของอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือน ช่วงปี ค.ศ.1976-1990

1.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2

เมื่อนำข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศจากแบบจำลอง HadCM3 ในอนาคตภายใต้สมมติฐาน A2 และ B2 ชนิดเดียวกันกับที่ได้จากการสอบเทียบตรวจพิสูจน์แบบจำลอง นำเข้าในแบบจำลอง SDSM และแบ่งเป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ในอนาคต คือ ทศวรรษที่ 2020 (ค.ศ.2010-2039), ทศวรรษที่ 2050 (ค.ศ.2040-2069) และทศวรรษที่ 2080 (ค.ศ.2070-2099) จะได้ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 ดังนี้

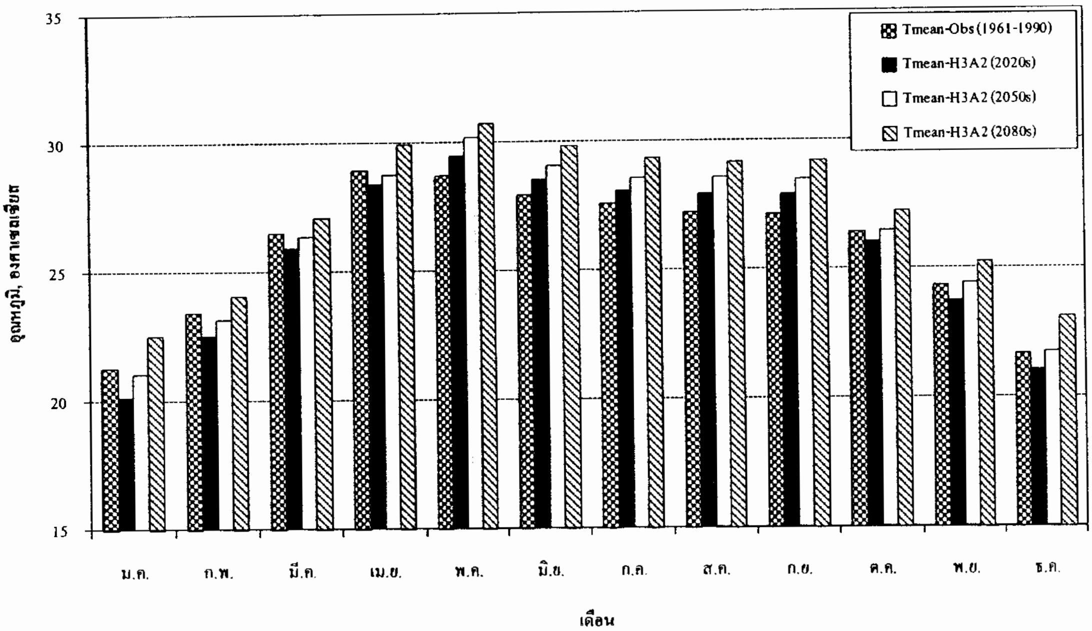
ก) อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน

ผลการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 ในอนาคตพบว่า (ดังแสดงในตารางที่ 20) ช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะลดลงในช่วงเดือนตุลาคมถึงเมษายนโดยมีค่าระหว่าง 0.34-1.12 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.66 องศาเซลเซียส) ส่วนช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายนจะสูงขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 0.46-0.78 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.66 องศาเซลเซียส) ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะลดลงช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนโดยมีค่าระหว่าง 0.16-0.29 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.22 องศาเซลเซียส) ส่วนเดือนพฤษภาคมถึงธันวาคมจะสูงขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 0.06-1.47 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.83 องศาเซลเซียส) และในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะสูงขึ้นทุกเดือนตั้งแต่ 0.51-2.09 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.36 องศาเซลเซียส) โดยเดือนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากสุด คือ เดือนกันยายน นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งดังภาพที่ 38 ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990

ตารางที่ 20 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน

เดือน	**การสอบเทียบแบบจำลอง**		**ผลต่างของอุณหภูมิรายวันเฉลี่ย, °C ($T_{scenario}$ - $T_{observed}$)**					
	Observed	**NCEP**	**A2**			**B2**		
	(1961-1990)	**(1961-1990)**	**2020s**	**2050s**	**2080s**	**2020s**	**2050s**	**2080s**
ม.ค.	21.29	20.98	-1.12	-0.24	1.27	-0.86	-0.57	0.08
ก.พ.	23.46	23.09	-0.92	-0.29	0.63	-0.87	-0.54	-0.02
มี.ค.	26.58	26.17	-0.66	-0.20	0.51	-0.61	-0.26	0.02
เม.ย.	28.93	28.63	-0.52	-0.16	1.00	-0.53	-0.14	0.25
พ.ค.	28.72	28.64	0.78	1.47	2.00	0.88	1.09	1.80
มิ.ย.	27.97	27.89	0.58	1.11	1.86	0.57	1.02	1.33
ก.ค.	27.61	27.52	0.46	0.98	1.73	0.49	0.89	1.28
ส.ค.	27.24	27.00	0.72	1.35	1.91	0.80	1.18	1.49
ก.ย.	27.14	26.96	0.78	1.34	2.09	0.78	1.21	1.71
ต.ค.	26.40	26.16	-0.34	0.06	0.82	-0.55	-0.24	0.34
พ.ย.	24.33	23.96	-0.56	0.10	0.94	-0.63	-0.43	0.21
ธ.ค.	21.59	21.38	-0.51	0.21	1.52	-0.59	-0.14	0.59
เฉลี่ยทั้งปี	25.94	25.70	-0.11	0.48	1.36	-0.09	0.26	0.76
สูงสุด	28.93 (เม.ย.)	28.64 (พ.ค.)	0.78	1.47	2.09	0.88	1.21	1.80
ต่ำสุด	21.29 (ม.ค.)	20.98 (ม.ค.)	-1.12	-0.29	0.51	-0.87	-0.57	-0.02
STDEV	2.64	2.69	0.72	0.71	0.57	0.72	0.74	0.71

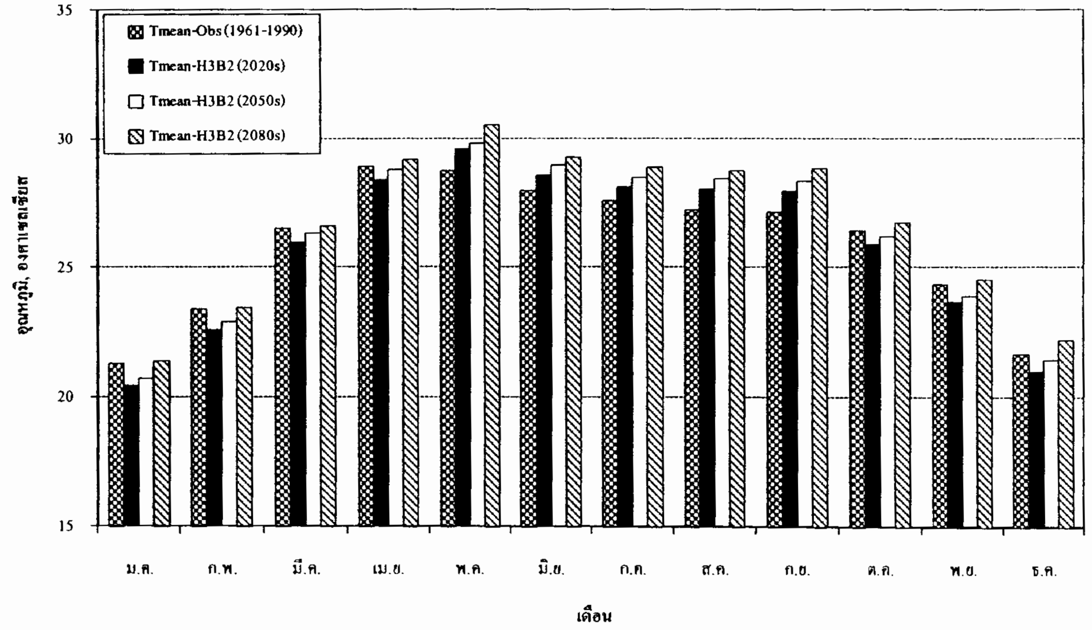
ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 ในอนาคตพบว่า (ดังแสดงในตารางที่ 20) ช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะลดลงช่วงเดือนตุลาคมถึงเมษายนโดยมีค่าระหว่าง 0.53-0.87 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.66 องศาเซลเซียส) ส่วนช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเมษายนจะสูงขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 0.49-0.88 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.70 องศาเซลเซียส) ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะลดลงช่วงเดือนตุลาคมถึงเมษายนโดยมีค่าระหว่าง 0.14-0.57 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.33 องศาเซลเซียส) ส่วนช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายนจะสูงขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 0.89-1.21 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.08 องศาเซลเซียส) และในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันจะสูงขึ้นเกือบทุกเดือนตั้งแต่ 0.08-1.80 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.91 องศาเซลเซียส) ยกเว้นเดือนกุมภาพันธ์และมีนาคมเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยเดือนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากสุด คือ เดือนพฤษภาคม



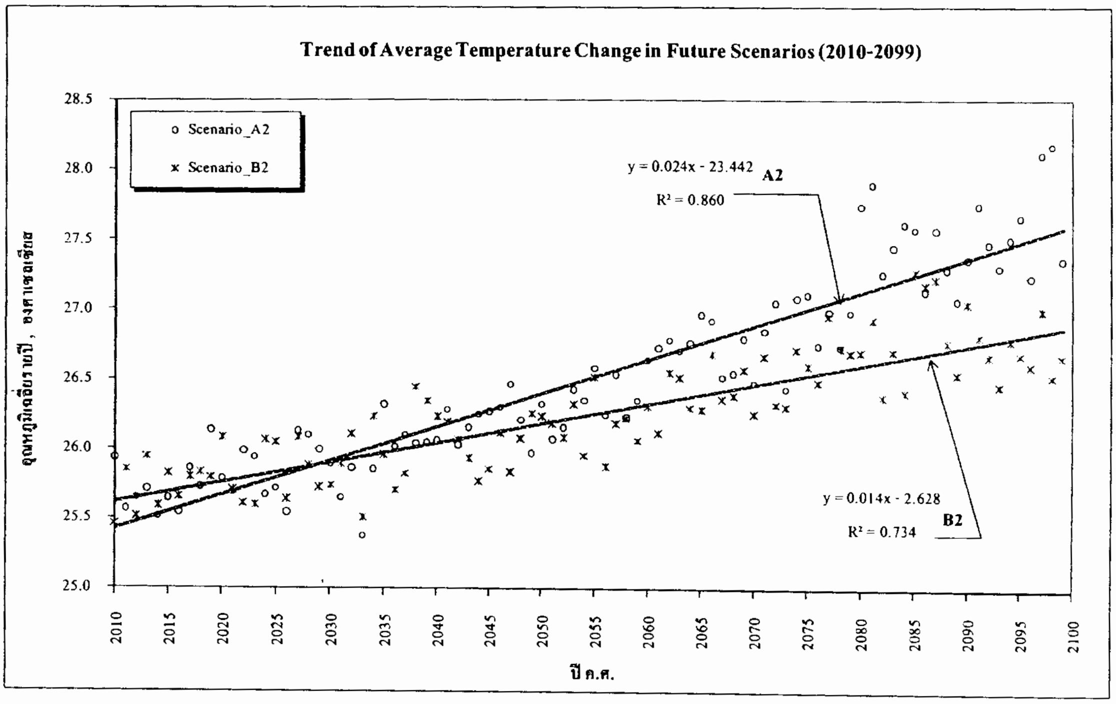
ภาพที่ 38 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือนในอนาคต ภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990

สำหรับภาพที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ส่วนภาพที่ 40 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอนาคตตั้งแต่ปี ค.ศ.2010-2099 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (เพิ่มขึ้น 0.014 องศาเซลเซียสต่อปีแบบ B2 จนถึง 0.024 องศาเซลเซียสต่อปีแบบ A2)

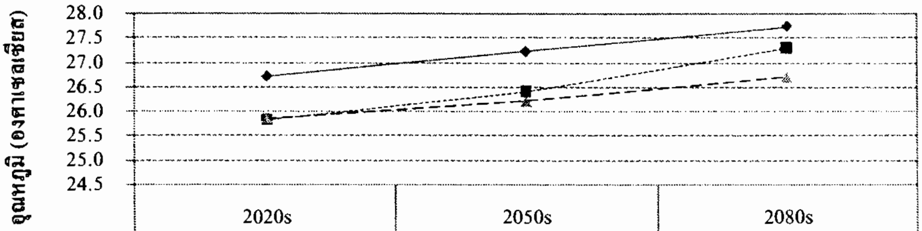
จากผลการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงทางสถิติระยะยาวในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-2008 โดยใช้ trend ในอดีตต่อขยายออกไป เปรียบเทียบกับการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตด้วยวิธี downscaling ภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ช่วง 3 ทศวรรษในอนาคต (2020s, 2050s และ 2080s) พบว่ามีความแตกต่างกันพอสมควร โดยผลจากแบบ A2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 0.89, 0.81 และ 0.44 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ ส่วนแบบ B2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 0.87, 1.03 และ 1.04 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 41) ซึ่งจากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการทำ downscaling ที่ให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าการต่อขยายข้อมูลจาก trend ในอดีต



ภาพที่ 39 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือน ในอนาคตภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990



ภาพที่ 40 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099



	2020s	2050s	2080s
คาดการณ์จาก Trend ช่วงปี ค.ศ.1961-2008	26.72	27.23	27.74
A2	25.83	26.42	27.30
B2	25.85	26.20	26.70

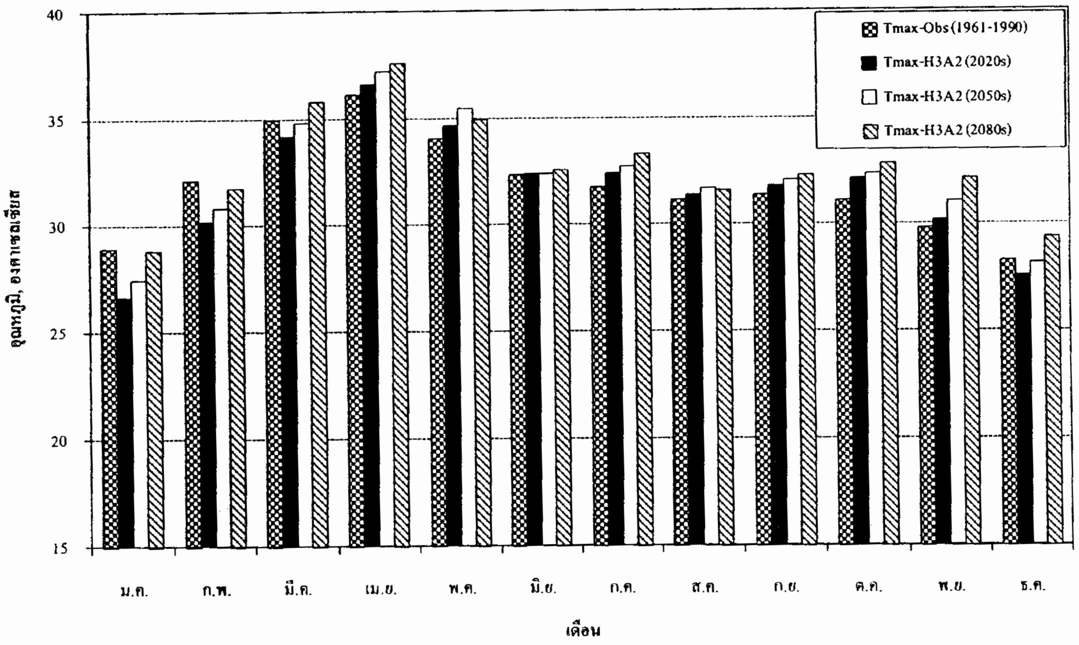
ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2

ข) อุณหภูมิสูงสุดรายวัน

ผลการคาดการณ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 ในอนาคตแสดงดังตารางที่ 21 ซึ่งพบว่าช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะลดลงช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมโดยมีค่าระหว่าง 0.75-2.29 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 1.45 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.08-1.03 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.50 องศาเซลเซียส) ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะมีลักษณะลดลงและเพิ่มขึ้นเหมือนกับทศวรรษที่ 20 โดยจะลดลงช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมโดยมีค่าระหว่าง 0.13-1.51 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.78 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.07-1.42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.92 องศาเซลเซียส) และในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะเพิ่มขึ้นเกือบทุกเดือนตั้งแต่ 0.25-2.36 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.15 องศาเซลเซียส) ยกเว้นเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์จะลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าระหว่าง 0.11-0.44 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.27 องศาเซลเซียส) โดยเดือนที่อุณหภูมิสูงสุดรายวันเพิ่มสูงขึ้นมากสุดในช่วงทศวรรษที่ 20, 50 และ 80 คือ เดือนตุลาคม, พฤษภาคม และพฤศจิกายนโดยมีค่าเท่ากับ 1.03, 1.42 และ 2.36 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งดังภาพที่ 42 ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดรายวันทั้ง 3 ทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990

ตารางที่ 21 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน

เดือน	การสอบเทียบแบบจำลอง		ผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ย, °C ($T_{scenario}$ - $T_{observed}$)					
	Observed	NCEP	A2			B2		
	(1961-1990)	(1961-1990)	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
ม.ค.	28.94	29.44	-2.29	-1.51	-0.11	-2.14	-1.77	-1.23
ก.พ.	32.14	32.16	-1.99	-1.35	-0.44	-1.85	-1.55	-1.05
มี.ค.	34.96	35.27	-0.78	-0.15	0.83	-0.61	-0.22	0.20
เม.ย.	36.10	35.98	0.50	1.10	1.47	0.28	0.78	1.33
พ.ค.	34.05	34.21	0.64	1.42	0.89	0.79	0.64	1.61
มิ.ย.	32.32	32.15	0.08	0.07	0.25	0.01	0.09	0.33
ก.ค.	31.70	31.73	0.67	1.01	1.58	0.79	1.09	1.26
ส.ค.	31.13	30.89	0.23	0.56	0.42	0.26	0.49	0.25
ก.ย.	31.35	31.15	0.45	0.68	0.90	0.36	0.47	0.79
ต.ค.	31.06	30.89	1.03	1.26	1.77	0.92	1.25	1.58
พ.ย.	29.75	29.92	0.41	1.25	2.36	0.32	0.71	1.48
ธ.ค.	28.29	28.53	-0.75	-0.13	1.05	-0.80	-0.44	0.18
เฉลี่ยทั้งปี	31.81	31.86	-0.15	0.35	0.91	-0.14	0.13	0.56
สูงสุด	36.10 (เม.ย.)	35.98 (เม.ย.)	1.03	1.42	2.36	0.92	1.25	1.61
ต่ำสุด	28.29 (ธ.ค.)	28.53 (ธ.ค.)	-2.29	-1.51	-0.44	-2.14	-1.77	-1.23
STDEV	2.33	2.29	1.07	0.99	0.81	1.01	0.97	0.97

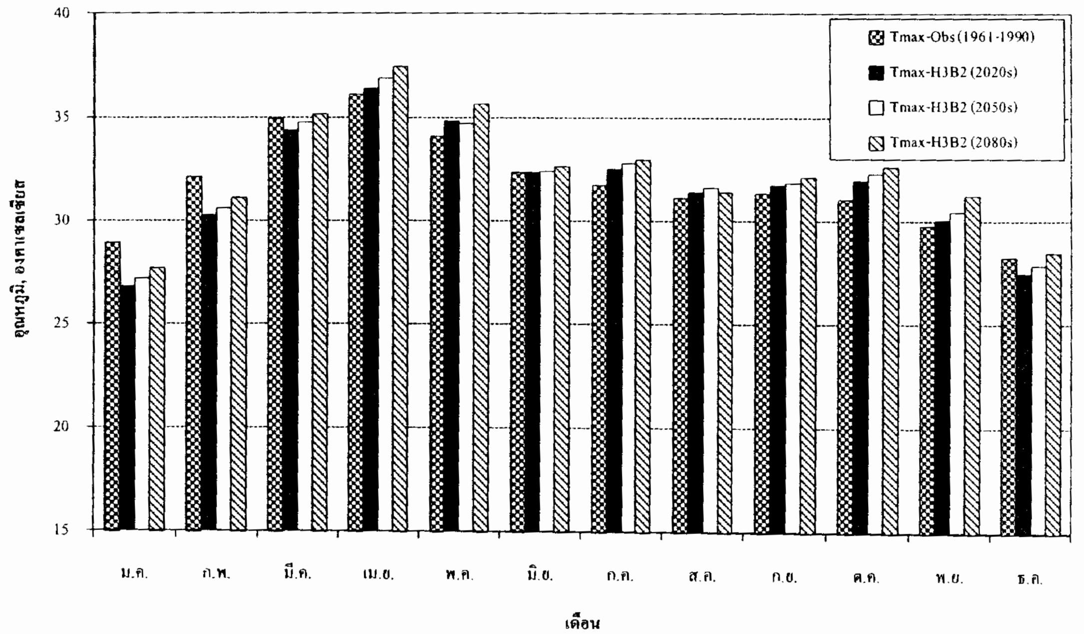


ภาพที่ 42 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคต ภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990

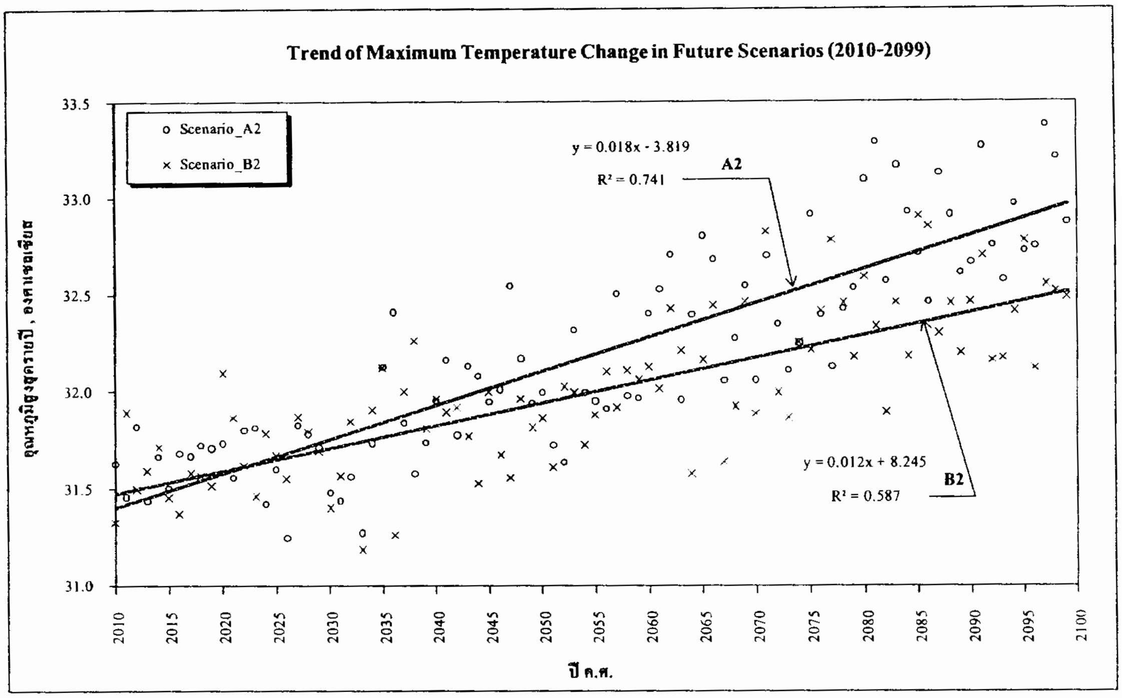
ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 ในอนาคตพบว่า (ดังแสดงในตารางที่ 21) การเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนเหมือนกับสมมติฐาน A2 กล่าวคือ ช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะลดลงช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมโดยมีค่าระหว่าง 0.61-2.14 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 1.35 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.01-0.92 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.47 องศาเซลเซียส) ยกเว้นเดือนมิถุนายนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับในอดีต ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะลดลงช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมโดยมีค่าระหว่าง 0.22-1.77 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.99 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.09-1.25 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.69 องศาเซลเซียส) และในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะเพิ่มขึ้นเกือบทุกเดือนตั้งแต่ 0.18-1.61 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.90 องศาเซลเซียส) ยกเว้นเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์จะลดลงโดยมีค่าระหว่าง 1.05-1.23 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 1.14 องศาเซลเซียส) โดยเดือนที่อุณหภูมิสูงสุดรายวันเพิ่มสูงขึ้นมากสุดในช่วงทศวรรษที่ 20 และ 50 คือ เดือนตุลาคม โดยมีค่าเท่ากับ 0.92 และ 1.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนในช่วงทศวรรษที่ 80 คือเดือนพฤษภาคมมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1.61 องศาเซลเซียส

สำหรับภาพที่ 43 แสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งระหว่างอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ส่วนภาพที่ 44 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละปีในอนาคตตั้งแต่ปี ค.ศ.2010-2099 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 0.012 องศาเซลเซียสต่อปี ในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ B2 ไปจนถึง 0.018 องศาเซลเซียสต่อปีภายใต้สมมติฐานแบบ A2

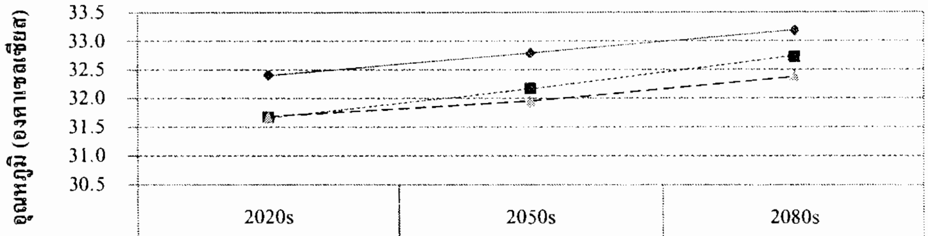
จากผลการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวัน โดยใช้วิธีต่อขยายเส้นแนวโน้ม (trend) ข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-2008 ต่อขยายออกไป เปรียบเทียบกับการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตด้วยวิธี downscaling ภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ช่วง 3 ทศวรรษในอนาคต (2020s, 2050s และ 2080s) พบว่ามีความแตกต่างกัน โดยผลจากแบบ A2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 0.74, 0.63 และ 0.46 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ ส่วนแบบ B2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 0.73, 0.85 และ 0.81 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 45) ซึ่งจากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการทำ downscaling ที่ให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าการต่อขยายข้อมูลจาก trend ในอดีตเช่นเดียวกันกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน



ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิสูงสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคต ภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990



ภาพที่ 44 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099



	2020s	2050s	2080s
คาดการณ์จาก Trend ช่วงปี ค.ศ.1961-2008	32.40	32.79	33.18
A2	31.66	32.16	32.72
B2	31.67	31.94	32.37

ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2

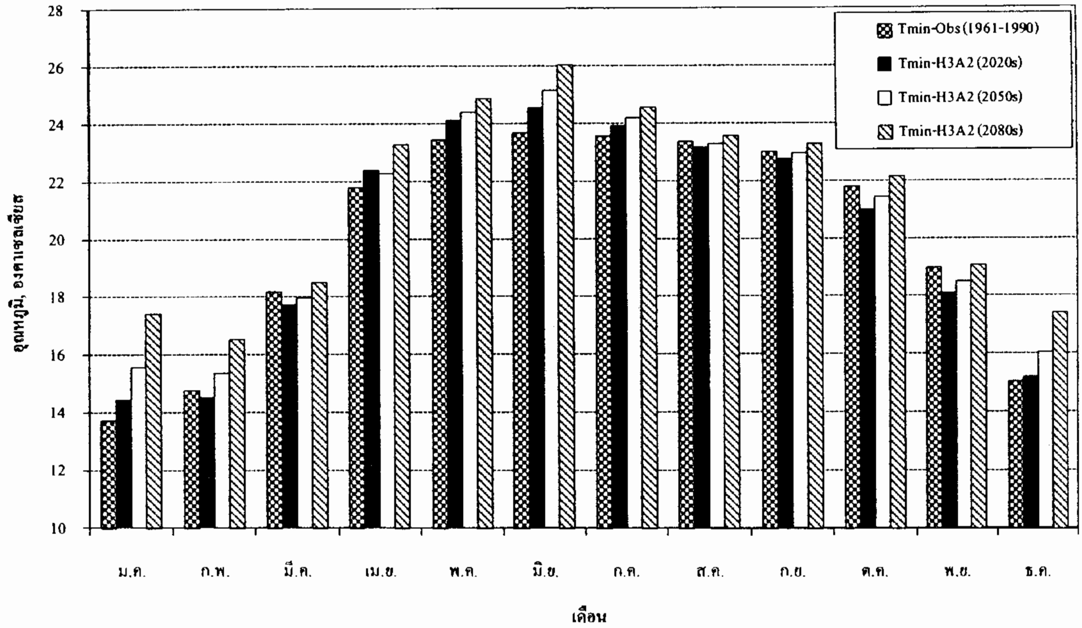
ค) อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน

ผลการคาดการณ์อุณหภูมิต่ำสุดรายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 ในอนาคตแสดงดังตารางที่ 22 จากการศึกษาพบว่าช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะลดลง 2 ช่วงคือในเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมและช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.20-0.87 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.48 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงกรกฎาคมและเดือนธันวาคมถึงมกราคมโดยมีค่าระหว่าง 0.25-0.88 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.58 องศาเซลเซียส) ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะลดลงในเดือนมีนาคมและช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.03-0.44 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.25 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงกรกฎาคมและช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์โดยมีค่าระหว่าง 0.47-1.88 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.01 องศาเซลเซียส) ในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะเพิ่มขึ้นทุกเดือนตั้งแต่ 0.09 องศาเซลเซียส ในเดือนพฤศจิกายนจนถึง 3.73 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคม นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งดังภาพที่ 46 ระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดรายวันทั้ง 3 ทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990

ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 ในอนาคตพบว่า (ดังแสดงในตารางที่ 22) ช่วงทศวรรษที่ 20 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะลดลง 2 ช่วงคือในเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมและช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.12-0.99 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.49 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นช่วงเดือนเมษายนถึงกรกฎาคมและเดือนธันวาคมถึงมกราคมโดยมีค่าระหว่าง 0.08-1.12 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.63 องศาเซลเซียส) ช่วงทศวรรษที่ 50 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะลดลงในเดือนมีนาคม สิงหาคม ตุลาคมและพฤศจิกายนโดยมีค่าระหว่าง 0.11-0.92 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.50 องศาเซลเซียส) และจะเพิ่มขึ้นในเดือนที่เหลือทั้งหมดโดยมีค่าระหว่าง 0.14-1.39 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.75 องศาเซลเซียส) ในช่วงทศวรรษที่ 80 อุณหภูมิต่ำสุดรายวันจะเพิ่มขึ้นเกือบทุกเดือนโดยมีค่าระหว่าง 0.13-2.25 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.04 องศาเซลเซียส) ยกเว้นเดือนมีนาคม ตุลาคมและพฤศจิกายนจะลดลงโดยมีค่าระหว่าง 0.07-0.47 องศาเซลเซียส (เฉลี่ยลดลง 0.25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 22 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่ำสุดรายวันเฉลี่ยในแต่ละเดือน

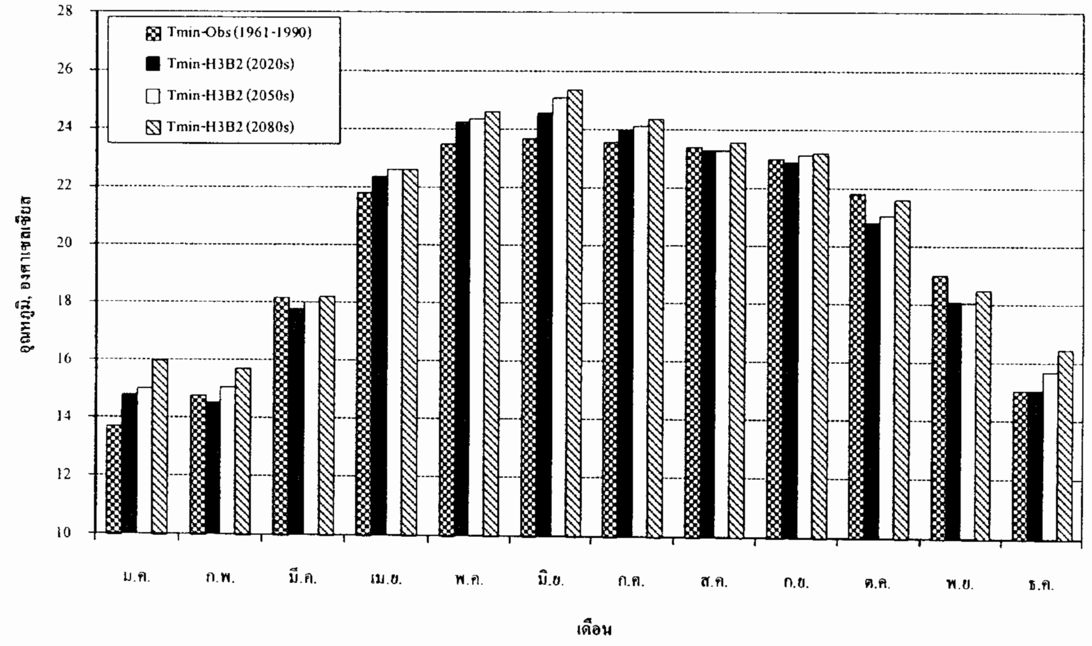
เดือน	การสอบเทียบแบบจำลอง		ผลต่างของอุณหภูมิต่ำสุดรายวันเฉลี่ย, °C ($T_{scenario}$ - $T_{observed}$)					
	Observed	NCEP	A2			B2		
	(1961-1990)	(1961-1990)	2020s	2050s	2080s	2020s	2050s	2080s
ม.ค.	13.70	13.34	0.76	1.88	3.73	1.12	1.33	2.25
ก.พ.	14.84	14.15	-0.30	0.54	1.68	-0.31	0.20	0.85
มี.ค.	18.25	17.36	-0.50	-0.27	0.25	-0.49	-0.25	-0.07
เม.ย.	21.81	21.08	0.59	0.47	1.46	0.55	0.78	0.76
พ.ค.	23.45	23.16	0.67	0.97	1.43	0.77	0.89	1.13
มิ.ย.	23.67	23.60	0.88	1.51	2.36	0.88	1.39	1.69
ก.ค.	23.57	23.38	0.34	0.61	1.00	0.36	0.55	0.78
ส.ค.	23.40	23.11	-0.24	-0.14	0.14	-0.14	-0.11	0.13
ก.ย.	22.97	22.75	-0.20	-0.03	0.32	-0.12	0.14	0.23
ต.ค.	21.80	21.59	-0.79	-0.38	0.34	-0.99	-0.74	-0.21
พ.ย.	18.96	18.57	-0.87	-0.44	0.09	-0.88	-0.92	-0.47
ธ.ค.	14.95	14.53	0.25	1.11	2.45	0.08	0.72	1.50
เฉลี่ยทั้งปี	20.11	19.72	0.05	0.49	1.27	0.07	0.33	0.71
สูงสุด	23.67 (มิ.ย.)	23.60 (มิ.ย.)	0.88	1.88	3.73	1.12	1.39	2.25
ต่ำสุด	13.70 (ม.ค.)	13.34 (ม.ค.)	-0.87	-0.44	0.09	-0.99	-0.92	-0.47
STDEV	3.83	3.95	0.61	0.77	1.14	0.68	0.75	0.83



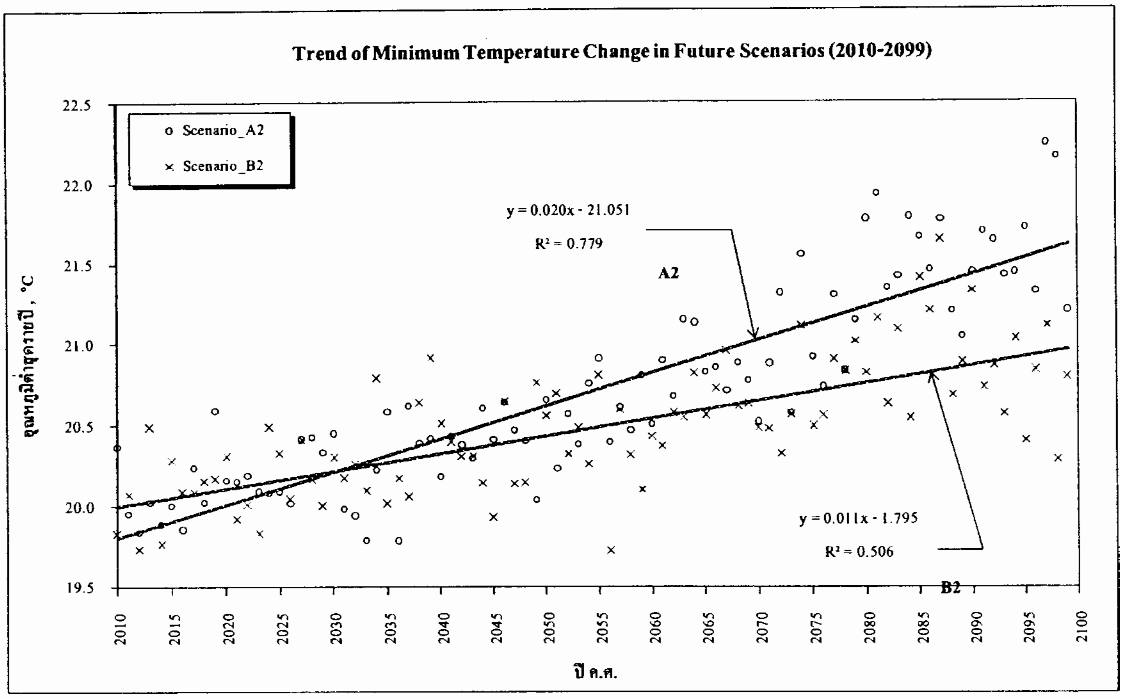
ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคต ภายใต้สมมติฐาน A2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990

สำหรับภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟแท่งระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ B2 กับข้อมูลจากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ส่วนภาพที่ 48 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละปีในอนาคตตั้งแต่ปี ค.ศ.2010-2099 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต ประมาณ 0.011 องศาเซลเซียสต่อปีภายใต้สมมติฐานแบบ B2 ไปจนถึง 0.020 องศาเซลเซียสต่อปีภายใต้สมมติฐานแบบ A2

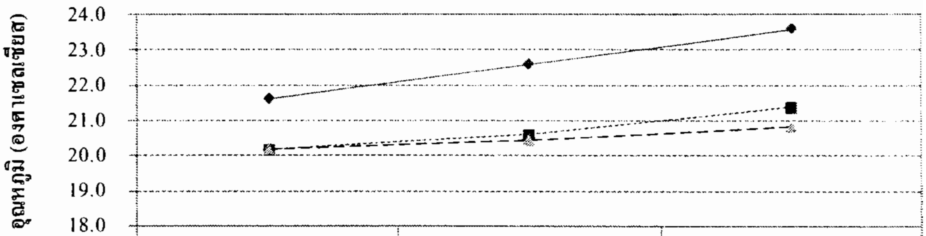
จากผลการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน โดยใช้วิธีต่อขยายเส้นแนวโน้ม (trend) ข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-2008 ต่อขยายออกไป เปรียบเทียบกับการคาดการณ์อุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตด้วยวิธี downscaling ภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ช่วง 3 ทศวรรษในอนาคต (2020s, 2050s และ 2080s) พบว่ามีความแตกต่างกันมากที่สุดในการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 แบบ โดยผลจากแบบ A2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวันน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 1.45, 2.00 และ 2.21 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ ส่วนแบบ B2 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวันน้อยกว่าการใช้ trend คาดการณ์เท่ากับ 1.43, 2.16 และ 2.77 องศาเซลเซียส ในทศวรรษที่ 2020, 2050 และ 2080 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 49) ซึ่งจากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการทำ downscaling ที่ให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าการต่อขยายข้อมูลจาก trend ในอดีตเช่นเดียวกันกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน



ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบผลการคาดการณ์อุณหภูมิต่ำสุดรายวันในแต่ละเดือนในอนาคต ภายใต้สมมติฐาน B2 เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990



ภาพที่ 48 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในอนาคตช่วงปี ค.ศ.2010-2099



	2020s	2050s	2080s
คาดการณ์จาก Trend ช่วงปี ค.ศ.1961-2008	21.61	22.60	23.59
A2	20.16	20.60	21.38
B2	20.18	20.44	20.82

ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบอุณหภูมิต่ำสุดรายวันในอนาคตระหว่างค่าที่ได้จากแนวโน้มการเกิดในอดีตและการคาดการณ์จากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งแบบเฉลี่ยรายวัน สูงสุดรายวันและต่ำสุดรายวัน ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตแบบ A2 และ B2 สรุปได้ว่าในช่วงทศวรรษที่ 2020 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั้งปีไม่ต่างจากในอดีตช่วงปี ค.ศ. 1961-1990 มากนัก (มีค่าระหว่าง -0.15 ถึง +0.07 องศาเซลเซียส) ส่วนในช่วงทศวรรษที่ 2050 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั้งปีไปในทางเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990 เล็กน้อย (มีค่าระหว่าง +0.13 ถึง +0.49 องศาเซลเซียส) โดยในทศวรรษที่ 2020 และ 2050 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายน และลดลงช่วงตุลาคมถึงมีนาคม สำหรับในช่วงทศวรรษที่ 2080 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั้งปีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990 อยู่ในช่วงระหว่าง +0.56 ถึง +1.36 องศาเซลเซียส โดยเกือบทุกเดือนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 จะเปลี่ยนแปลงในทางเพิ่มขึ้นมากกว่า B2 แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (A2 > B2) มีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

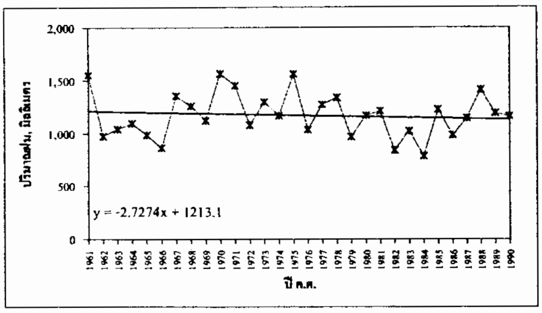
2. ปริมาณฝน

2.1 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอดีต (ค.ศ.1961-2007)

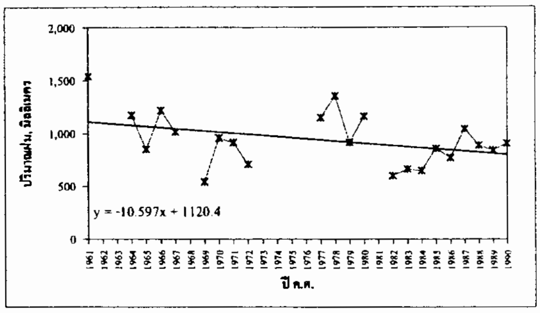
นำข้อมูลฝนรายปีในอดีตของสถานีที่ได้คัดเลือกไว้จำนวน 20 สถานี มาศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงสถิติตั้งแต่ปี ค.ศ.1961-2007 โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1990, ช่วงปี ค.ศ.1991-2007 และช่วงปี ค.ศ.1961-2007 เพื่อพิจารณาในช่วงปีที่จะใช้ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1961-1990) และช่วงปีต่อ ๆ มาจนใกล้เคียงกับปัจจุบัน รวมทั้งพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอดีตของข้อมูลทั้งหมดว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างไรดังแสดงในภาพที่ 50 ถึงภาพที่ 52 ส่วนตารางที่ 23 เป็นการสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีของทั้ง 20 สถานี ซึ่งพบว่าช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝน 17 สถานี จากทั้งหมด 20 สถานีมีแนวโน้มลดลง โดยสถานีที่มีอัตราการลดลงของปริมาณฝนมากสุด คือ สถานีศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำดอยเชียงดาว (07252) ประมาณ 17.5 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนสถานีที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนมากที่สุดในจำนวน 3 สถานี ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 นั้น คือ สถานีอำเภออมก๋อย (07162) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตรต่อปี

เมื่อพิจารณ์ข้อมูลฝนรายปีช่วงปี ค.ศ.1991-2007 ของสถานีวัดน้ำฝน 20 สถานี พบว่าปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝน 18 สถานี จากทั้งหมด 20 สถานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสถานีที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนมากสุด คือ สถานีอำเภอดอยสะเก็ด (07052) ประมาณ 30.9 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนสถานีที่มีอัตราการลดลงของปริมาณฝนที่เหลือจำนวน 2 สถานี คือ สถานีอำเภอแม่ริม (07062) และอำเภอลี้ บ้านก้อ (17062) มีอัตราการลดลงของปริมาณฝนเท่ากับ 6.1 และ 7.7 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ

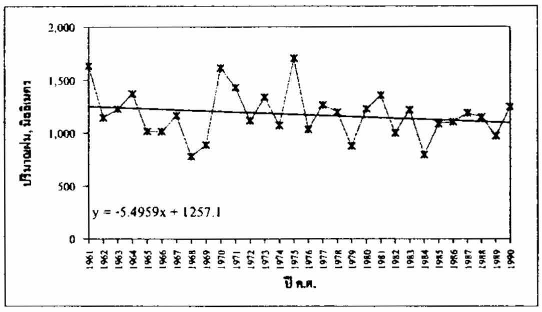
จากผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนรายปีทั้ง 2 ช่วง (ค.ศ.1961-1990 และ ค.ศ.1991-2007) พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยจะเห็นว่าปริมาณฝนในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนมีแนวโน้มลดลง แต่ในช่วงเกือบ 20 ปีให้หลัง ปริมาณฝนรายปีของลุ่มน้ำปิงตอนบนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จากข้อมูลในช่วงปี ค.ศ.1991-2007



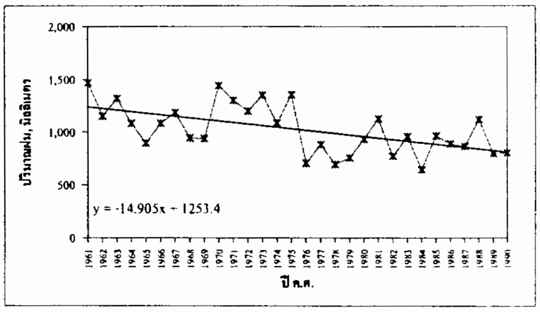
สถานี 07013



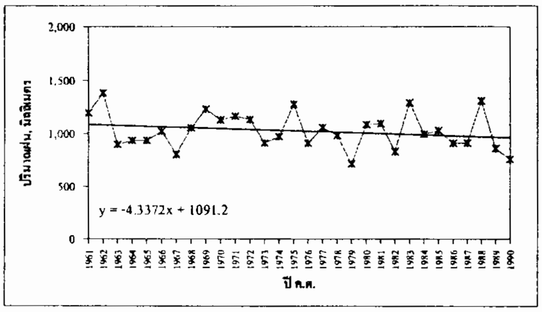
สถานี 07032



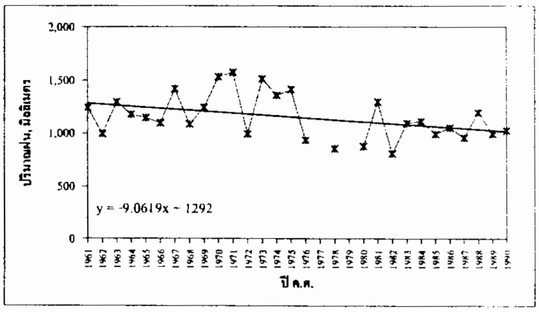
สถานี 07052



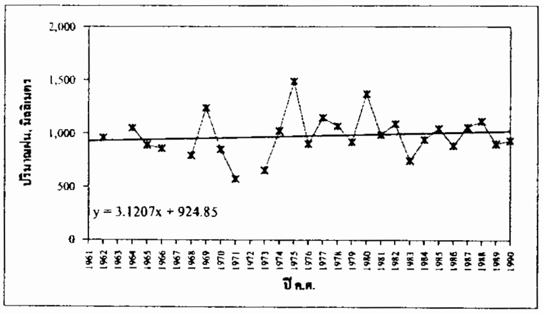
สถานี 07062



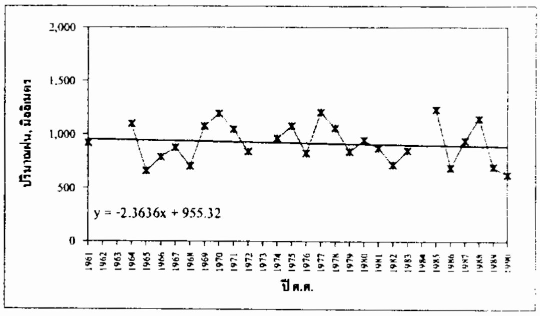
สถานี 07092



สถานี 07112

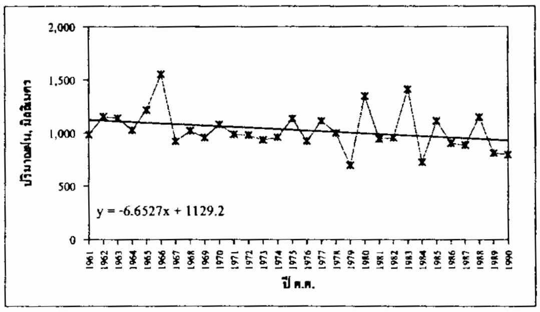


สถานี 07162

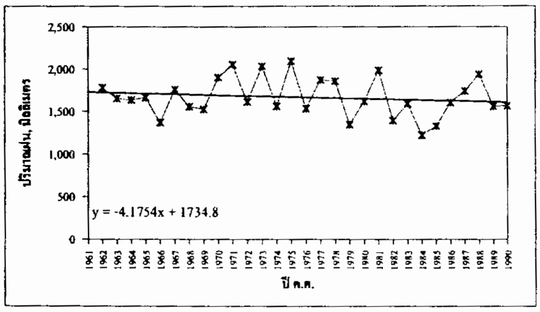


สถานี 07182

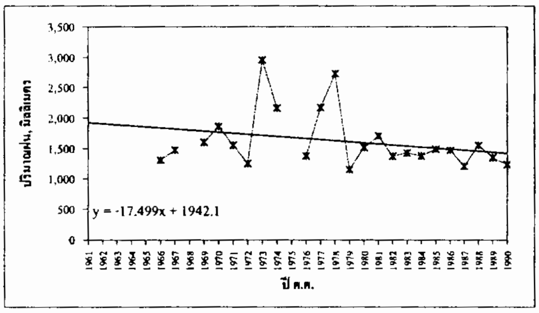
ภาพที่ 50 ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-1990



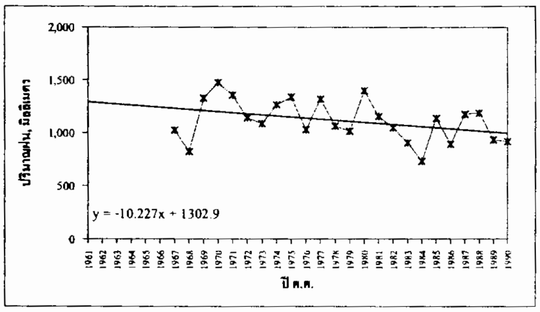
สถานี 07192



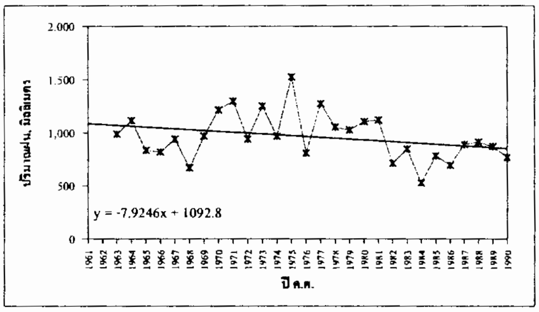
สถานี 07242



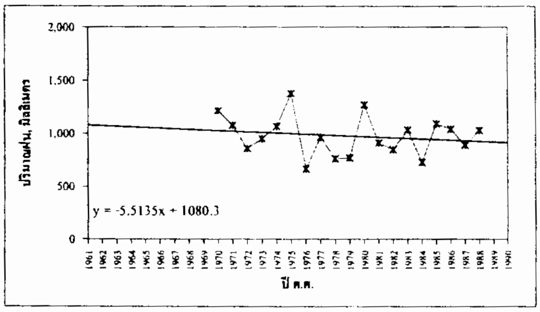
สถานี 07252



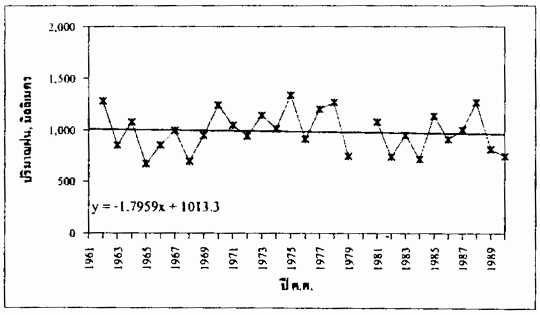
สถานี 07282



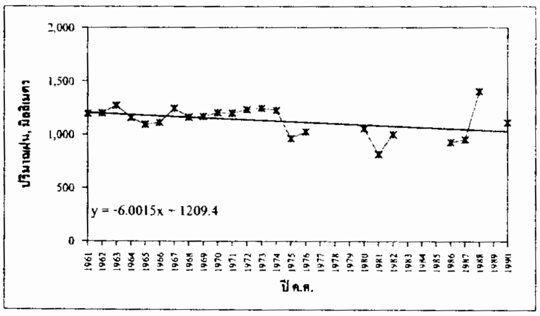
สถานี 07292



สถานี 07472

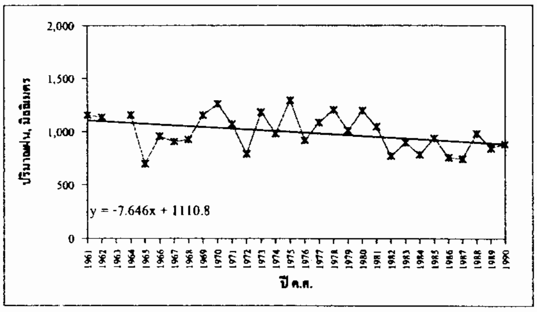


สถานี 17012

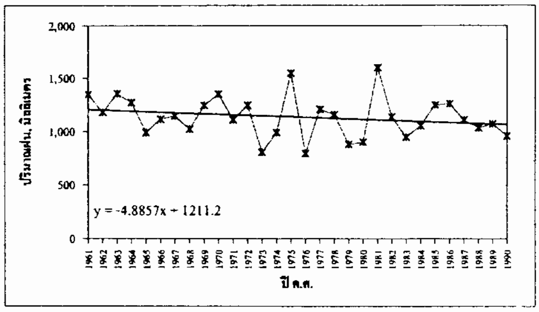


สถานี 17022

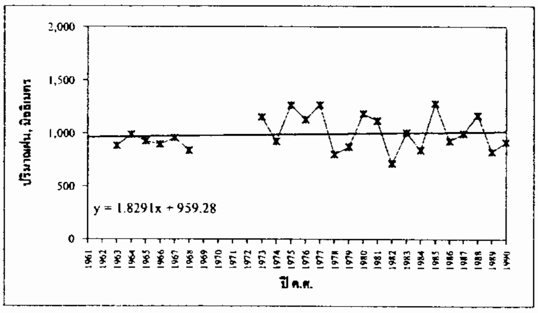
ภาพที่ 50 (ต่อ)



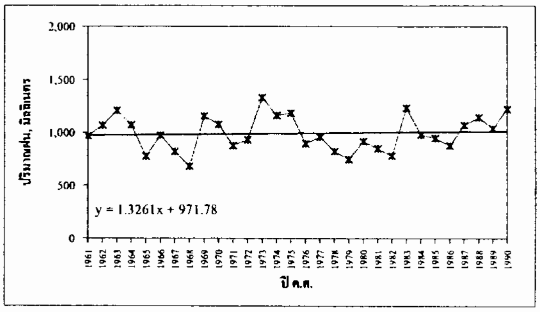
สถานี 17032



สถานี 17042

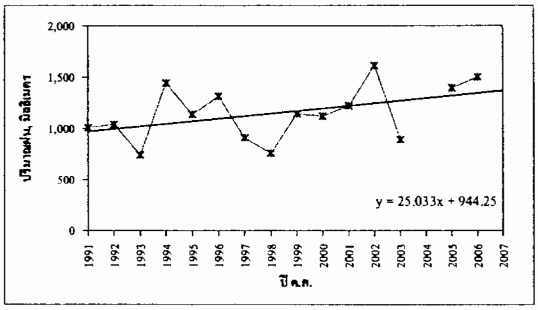


สถานี 17052

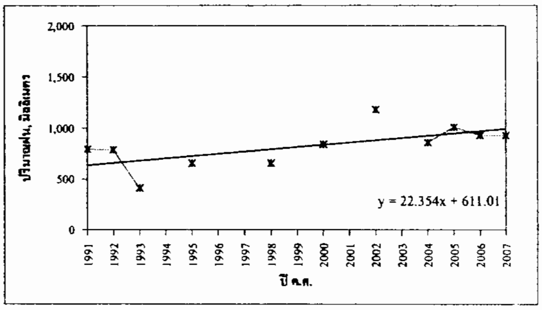


สถานี 17062

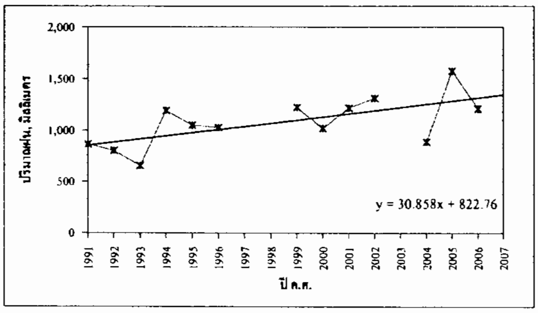
ภาพที่ 50 (ต่อ)



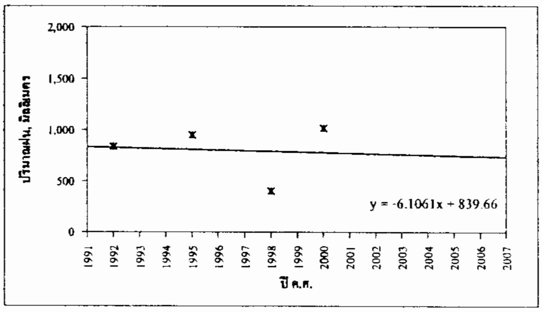
สถานี 07013



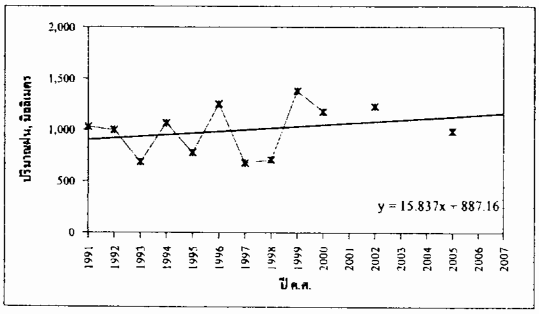
สถานี 07032



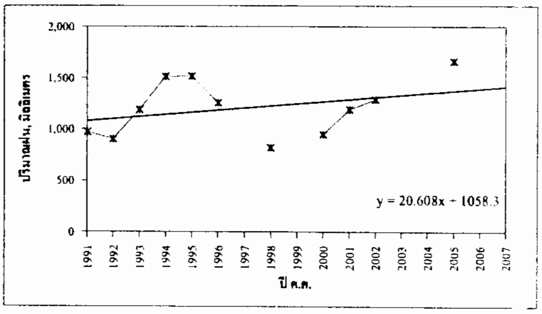
สถานี 07052



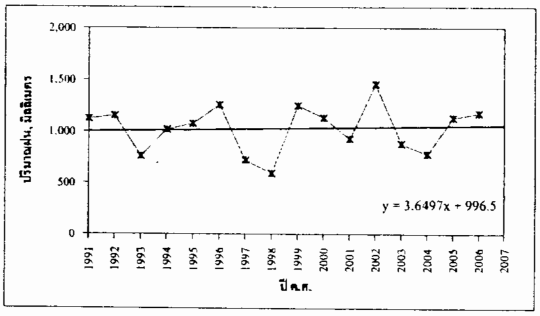
สถานี 07062



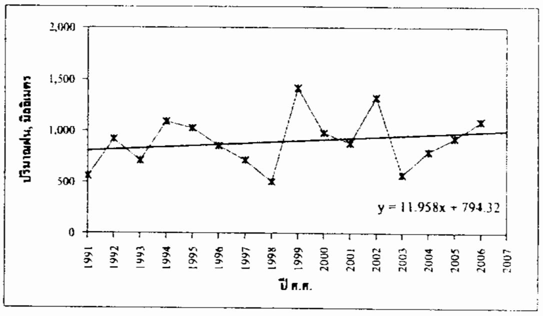
สถานี 07092



สถานี 07112

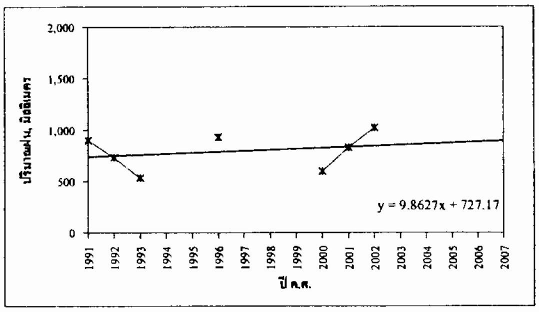


สถานี 07162

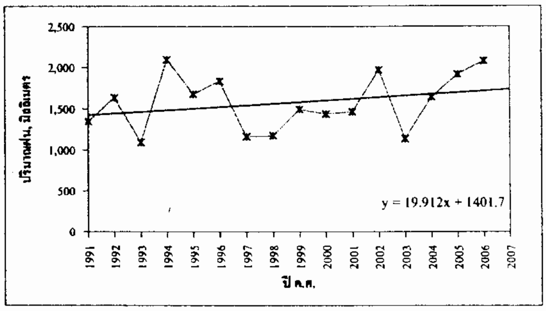


สถานี 07182

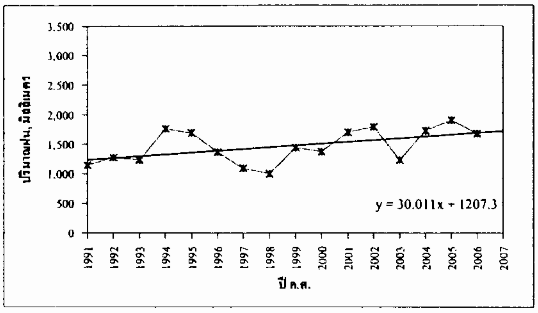
ภาพที่ 51 ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1991-2007



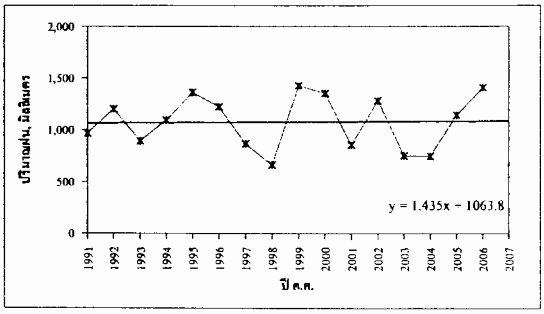
สถานี 07192



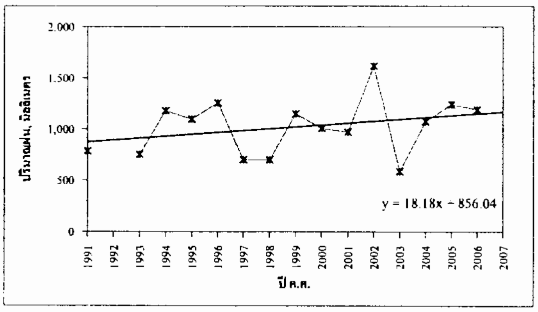
สถานี 07242



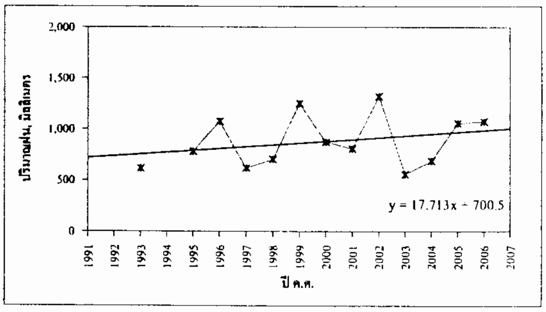
สถานี 07252



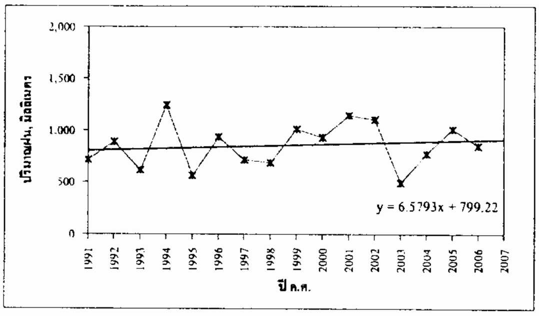
สถานี 07282



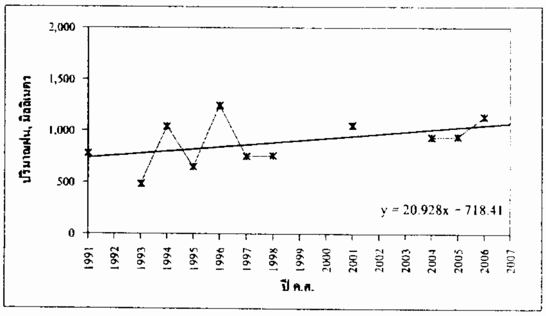
สถานี 07292



สถานี 07472

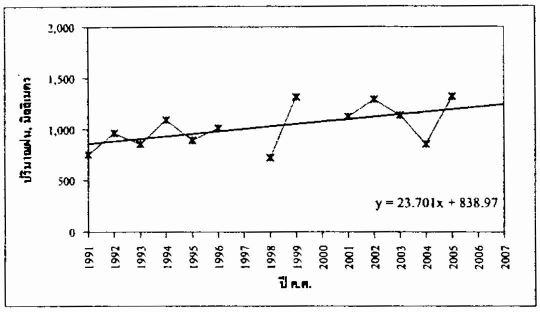


สถานี 17012

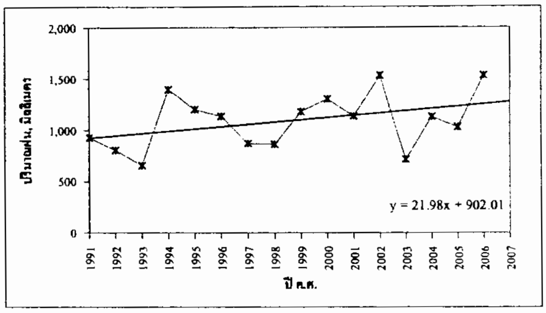


สถานี 17022

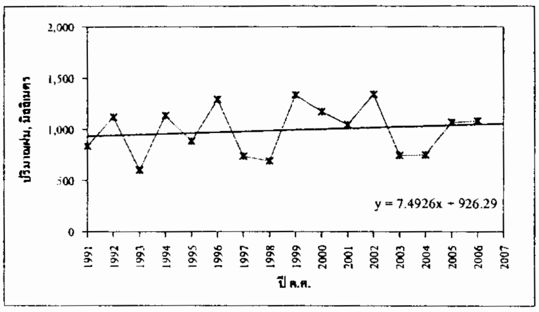
ภาพที่ 51 (ต่อ)



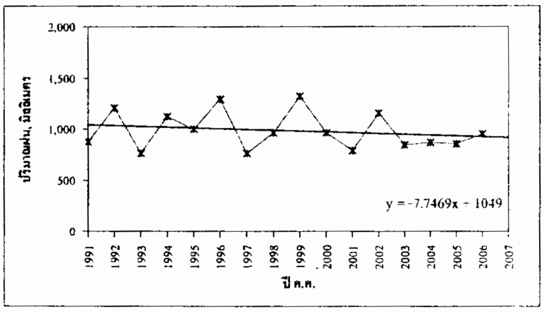
สถานี 17032



สถานี 17042

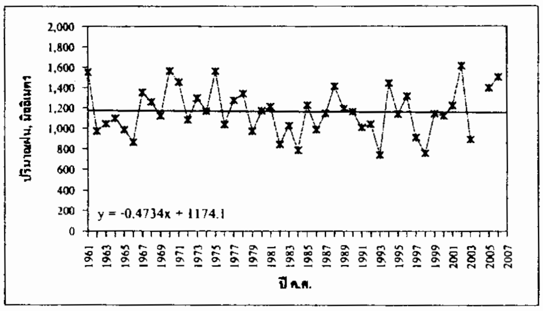


สถานี 17052

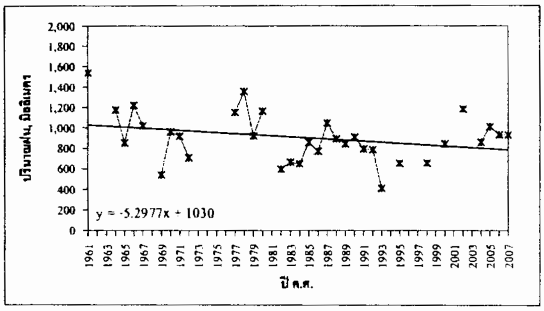


สถานี 17062

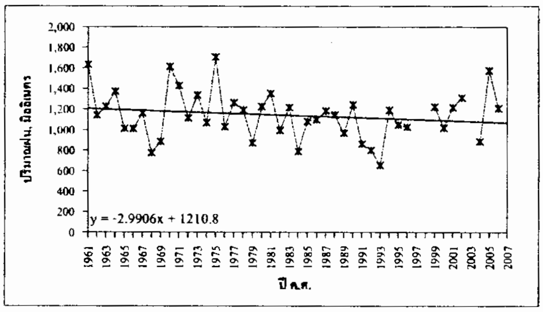
ภาพที่ 51 (ต่อ)



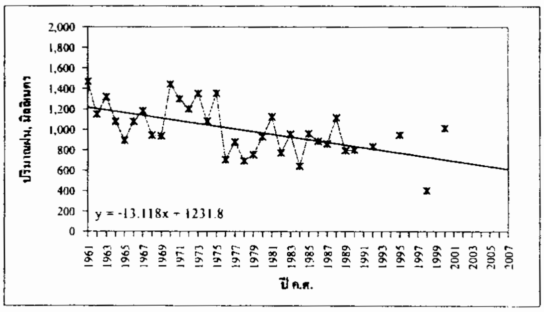
สถานี 07013



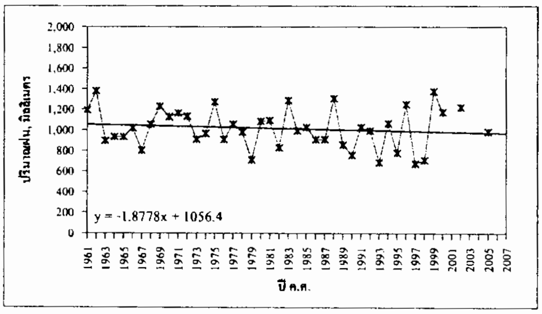
สถานี 07032



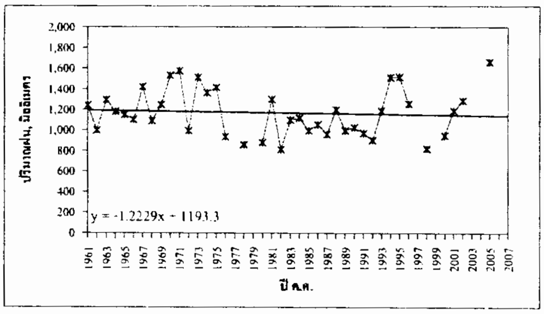
สถานี 07052



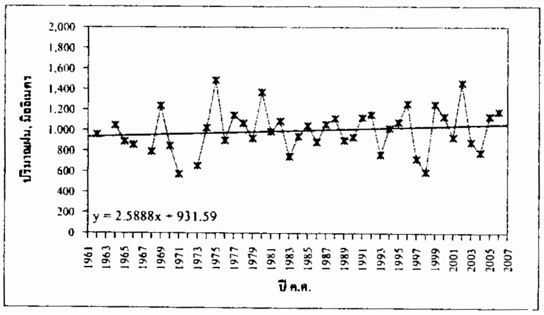
สถานี 07062



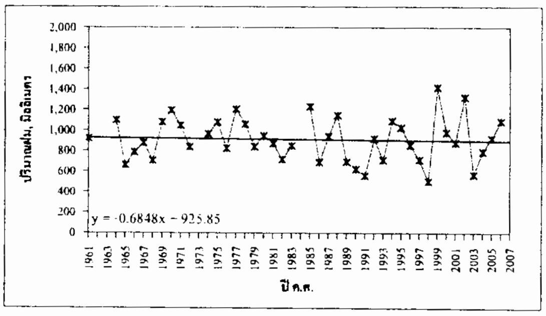
สถานี 07092



สถานี 07112

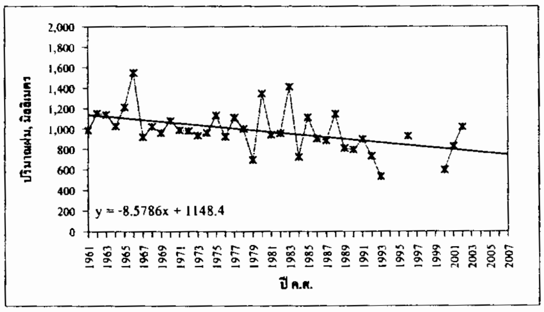


สถานี 07162

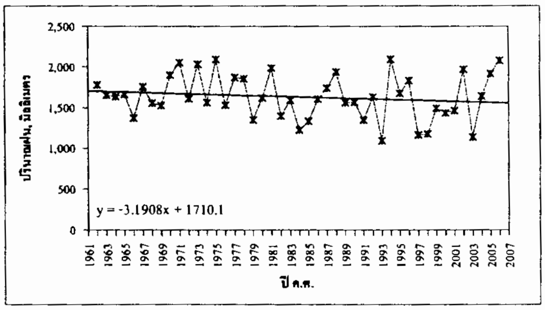


สถานี 07182

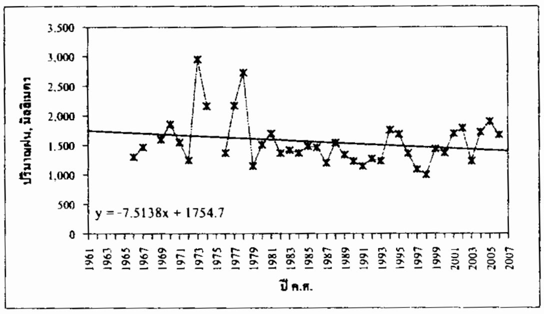
ภาพที่ 52 ปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนและเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-2007



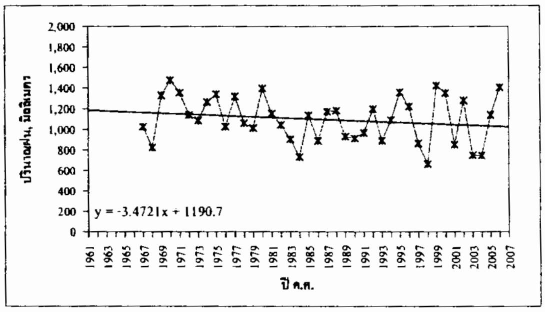
สถานี 07192



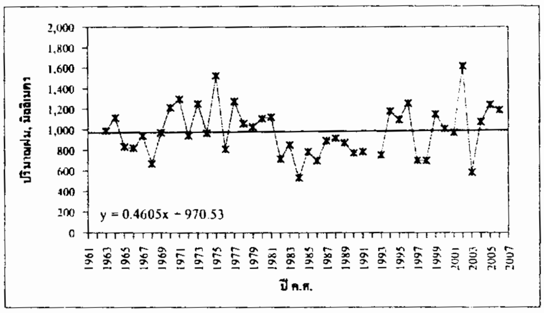
สถานี 07242



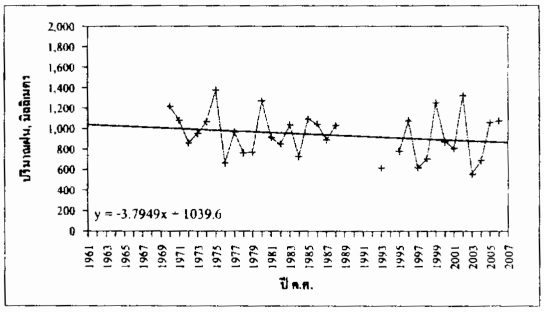
สถานี 07252



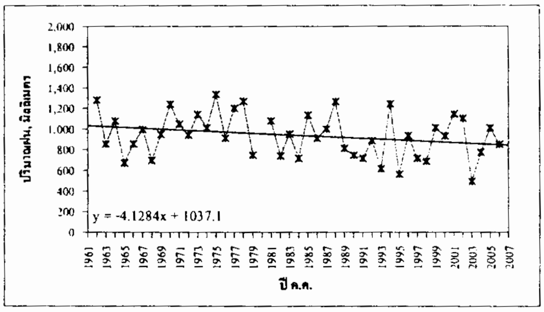
สถานี 07282



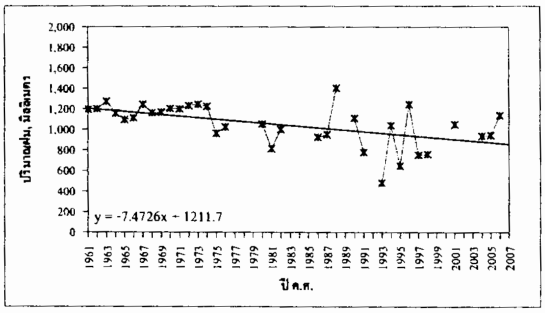
สถานี 07292



สถานี 07472

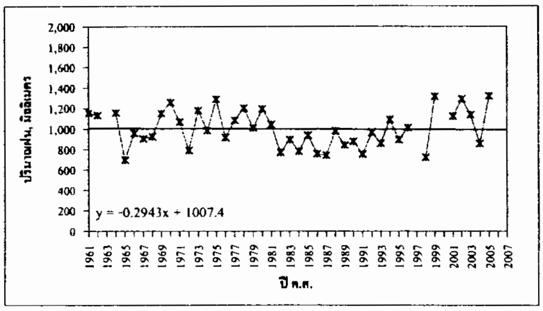


สถานี 17012

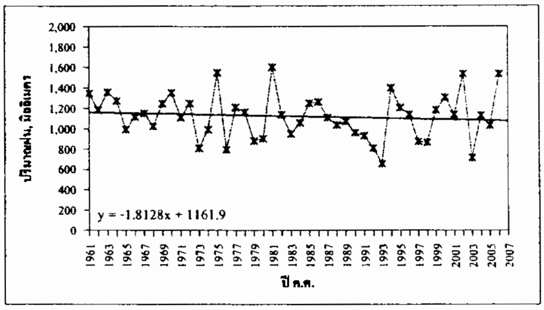


สถานี 17022

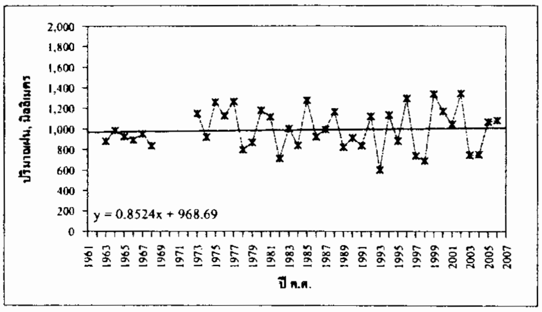
ภาพที่ 52 (ต่อ)



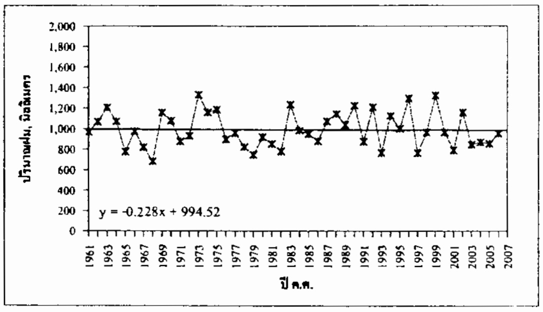
สถานี 17032



สถานี 17042



สถานี 17052



สถานี 17062

ภาพที่ 52 (ต่อ)

ตารางที่ 23 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	รหัสสถานี	สถานี	สถิติข้อมูลฝนเฉลี่ยรายปี (มิลลิเมตร)			แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตรต่อปี)		
			ค.ศ.1961-1990	ค.ศ.1991-2007	ค.ศ.1961-2007	ค.ศ.1961-1990	ค.ศ.1991-2007	ค.ศ.1961-2007
จังหวัดเชียงใหม่								
1	07013	อ.เมือง	1,171	1,148	1,163	-2.7	25.0	-0.5
2	07032	อ.สันกำแพง	941	820	901	-10.6	22.4	-5.3
3	07052	อ.ดอยสะเก็ด	1,172	1,079	1,144	-5.5	30.9	-3.0
4	07062	อ.แม่ริม	1,022	802	996	-14.9	-6.1	-13.1
5	07092	อ.ฮอด	1,024	995	1,016	-4.3	15.8	-1.9
6	07112	อ.แม่แตง	1,153	1,203	1,167	-9.1	20.6	-1.2
7	07162	อ.อมก๋อย	978	1,028	997	3.1	3.6	2.6
8	07182	อ.จอมทอง	917	896	909	-2.4	12.0	-0.7
9	07192	บ้านแอ่น อ.ดอยเต่า	1,026	791	982	-6.7	9.9	-8.6
10	07242	อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย	1,668	1,571	1,633	-4.2	19.9	-3.2
11	07252	ศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำดอยเชียงดาว	1,617	1,462	1,554	-17.5	30.0	-7.5
12	07282	ดอยบ่อแก้ว อ.ฮอด	1,114	1,076	1,099	-10.2	1.4	-3.5

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ลำดับที่	รหัสสถานี	สถานี	สถิติข้อมูลฝนเฉลี่ยรายปี (มิลลิเมตร)			แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตรต่อปี)		
			ค.ศ.1961-1990	ค.ศ.1991-2007	ค.ศ.1961-2007	ค.ศ.1961-1990	ค.ศ.1991-2007	ค.ศ.1961-2007
13	07292	สถานีทดลองพันธ์ข้าวสันป่าตอง	962	1,018	982	-7.9	18.2	0.5
14	07472	ศูนย์พัฒนาเขื่อนภูมิพล	976	876	935	-5.5	17.7	-3.8
<u>จังหวัดลำพูน</u>								
15	17012	อ.เมือง	985	855	938	-1.8	6.6	-4.1
16	17022	อ.ลี้	1,129	890	1,051	-6.0	20.9	-7.5
17	17032	อ.ป่าซาง	989	1,027	1,001	-7.6	23.7	-0.3
18	17042	อ.แม่ทา	1,135	1,089	1,119	-4.9	22.0	-1.8
19	17052	อ.บ้านโฮ่ง	991	990	991	1.8	7.5	0.9
20	17062	อ.ลี้ บ้านก้อ	992	983	989	1.3	-7.7	-0.2
		เฉลี่ย	**1,098**	**1,030**	**1,078**	**-5.8**	**14.7**	**-3.1**
		เพิ่มขึ้นสูงสุด	**1,668**	**1,571**	**1,633**	**3.1**	**30.9**	**2.6**
		ลดลงต่ำสุด	**917**	**791**	**901**	**-17.5**	**-7.7**	**-13.1**

2.2 การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (Selection of Predictors)

การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) เป็นการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์และมีอิทธิพลต่อกันระหว่างปริมาณฝนรายวัน (ใช้ข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ในการคัดเลือก) กับตัวแปรภูมิอากาศทั้งหมด 26 ตัวแปร ในช่วงเวลาเดียวกันและดูว่าตัวแปรภูมิอากาศตัวไหนมีความสัมพันธ์และมีอิทธิพลต่อการเกิดฝนมากที่สุด โดยผลการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศสำหรับคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนสรุปได้ดังตารางที่ 24 ซึ่งในการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศนั้นจะมีลักษณะเหมือนกับการคัดเลือกในหัวข้ออุณหภูมิ โดยพิจารณาค่าเมตริกสหสัมพันธ์ (correlation matrix) ระหว่างปริมาณฝนรายวันกับตัวแปรภูมิอากาศ (predictors) และค่าสหสัมพันธ์แยกส่วน (partial correlation, partial r) ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศและปริมาณฝนรายวัน (predictand)

จากการสอบเทียบแบบจำลอง (calibration) โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากการตรวจวัดช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของแต่ละสถานีจะได้ตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของสถานีในลุ่มน้ำปิงตอนบนแสดงในตารางที่ 24 ซึ่งตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนส่วนใหญ่ประกอบด้วย

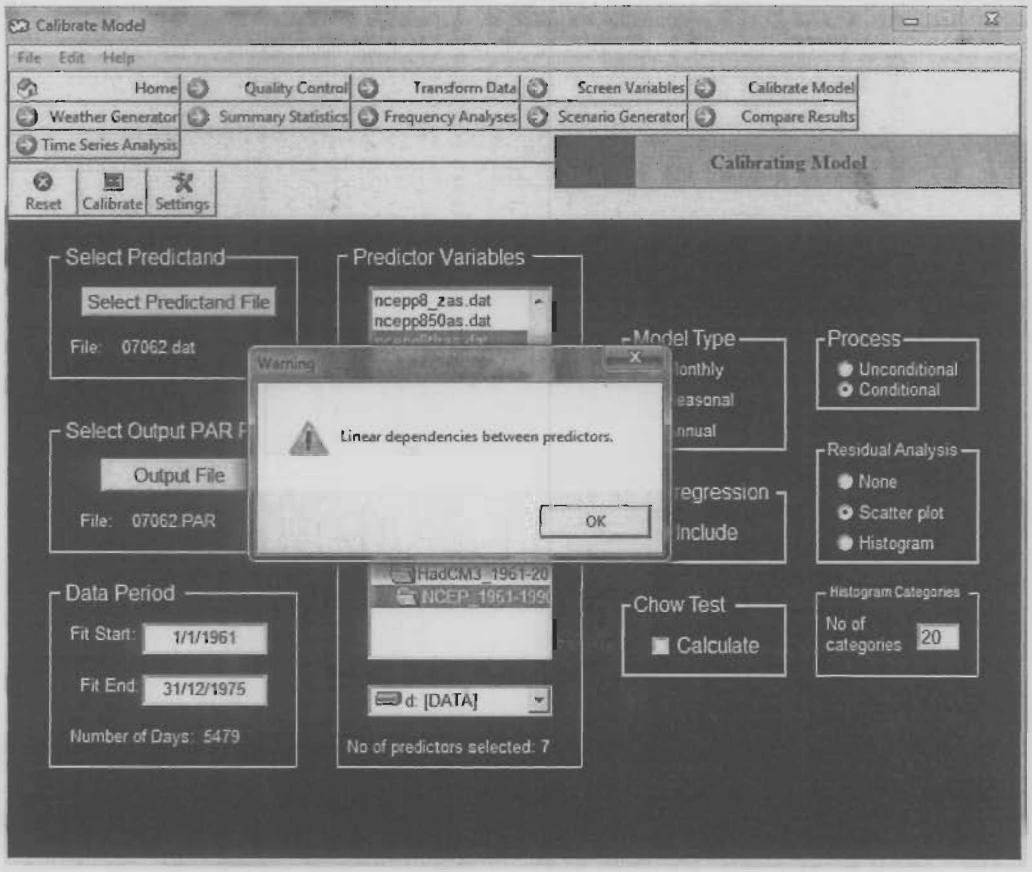
- Surface meridional velocity (ncepp__vas)	16	สถานี
- Surface divergence (ncepp_zhas)	9	สถานี
- 850 hPa divergence (ncepp8zhas)	14	สถานี
- Relative humidity at 500 hPa (ncepr500as)	19	สถานี
- Relative humidity at 850 hPa (ncepr850as)	14	สถานี
- Near surface relative humidity (nceprhumas)	16	สถานี

ส่วนตัวแปรภูมิอากาศอื่นๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนบ้างเล็กน้อย ประกอบด้วย Mean sea level pressure (ncepmslpas) 2 สถานี, Surface vorticity (ncepp__zas) 2 สถานี, 500 hPa vorticity (ncepp5_zas) 2 สถานี, 500 hPa geopotential height (ncepp500as) 2 สถานี, 850 hPa geopotential height (ncepp850as) 3 สถานี, Surface specific humidity (ncepshumas) 2 สถานี และ Mean temperature at 2m (nceptempas) 4 สถานี ซึ่งจากผลการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศพบว่าตัวแปรภูมิอากาศที่เกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ (humidity) ในชั้นบรรยากาศที่ระดับต่างๆ และทิศทางของลม (meridional velocity) มีอิทธิพลสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

ตารางที่ 24 ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	รหัส (code)	07013	07032	07052	07092	07112	07162	07182	07192	07242	07252	07282	07292	07472	17012	17022	17032	17042	17052	17062
1	ncepmslpas									●				●						
2	ncepp__fas											●								
3	ncepp__uas																			
4	ncepp__vas	●	●	●	●	●		●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●
5	ncepp__zas		●													●				
6	ncepp_thas																			
7	ncepp_zhas	●				●		●	●	●	●	●			●				●	
8	ncepp5_fas						●													
9	ncepp5_uas																			
10	ncepp5_vas																			
11	ncepp5_zas		●															●		
12	ncepp5thas																			
13	ncepp5zhas																			
14	ncepp8_fas																			
15	ncepp8_uas																			
16	ncepp8_vas	●																		
17	ncepp8_zas																			
18	ncepp8thas																			
19	ncepp8zhas	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	
20	ncepp500as		●												●					
21	ncepp850as						●											●	●	
22	ncepr500as	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
23	ncepr850as	●		●	●	●		●		●	●	●		●		●	●	●	●	●
24	nceprhumas	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●
25	ncepshumas								●						●					
26	nceptempas			●							●		●					●		

สำหรับสถานีวัดน้ำฝนอำเภอแม่ริม (07062) ไม่สามารถคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศได้ เพราะในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนรายวันและตัวแปรภูมิอากาศทั้ง 26 ตัวแปร จะให้ค่าที่น้อยมากและเมื่อนำมาสอบเทียบกับข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-1975 จะไม่สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศและข้อมูลฝนที่สถานีนี้ได้ โดยแบบจำลอง SDSM จะแสดงผลออกมาดังภาพที่ 53 จึงตัดสถานีนี้ออกไปจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคตของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ทำให้เหลือสถานีที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน 19 สถานี



ภาพที่ 53 การแสดงผลการสอบเทียบ (calibration) ของแบบจำลอง SDSM ของสถานีวัดน้ำฝนอำเภอแม่ริม (07062) ที่ไม่สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง predictors-predictand ได้

การหาความสัมพันธ์ในเชิงสหสัมพันธ์ (correlation) ของตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศ (atmospheric variables) กับข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนของแต่ละสถานีในลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่าในด้านการหาความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณฝนจะหาได้ยากและมีความสัมพันธ์ที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีปัจจัยหลายๆ อย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่นการกระจายแบบไม่ปกติ (non-normality distribution) ของปริมาณฝนที่เกิดขึ้น เงื่อนไขสภาพแต่ละพื้นที่ ความสมบูรณ์ของข้อมูลที่นำมาใช้หาความสัมพันธ์ รวมทั้งการกระจายตัวของฝนทั้งเวลาและสถานที่ไม่มีความแน่นอนมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้รับอิทธิพลหลัก คือ แสงอาทิตย์และเมฆปกคลุม ซึ่งแต่ละภูมิภาคโดยเฉพาะเมืองไทยอยู่ในเขตศูนย์สูตรจึงมีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ หรือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลก็จะเป็นไปอย่างค่อนข้างแน่นอนไม่เหมือนกับฝน

2.3 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

จากข้อมูลปริมาณฝนรายวันจำนวน 30 ปี ในอดีต (ค.ศ.1961-1990) แบ่งออกเป็นสองช่วงสำหรับทำการสอบเทียบ (calibration) และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (verification) คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1975 และ ช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ตามลำดับ สำหรับข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศหรือ predictors ในอดีตนั้น ใช้ข้อมูลของ NCEP ที่เป็นข้อมูลรายวันและมีช่วงเวลาข้อมูลเดียวกัน (ค.ศ.1961-1990) ส่วนผลการวิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง SDSM ซึ่งผลจากแบบจำลอง SDSM เป็นข้อมูลรายวันจำนวน 100 ชุดข้อมูล (ensembles) หรือ 100 เหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นจะได้ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองปริมาณฝนของแต่ละสถานี (19 สถานี) ในเชิงสถิติสรุปได้ดังตารางที่ 25

ผลการสอบเทียบช่วงปี ค.ศ.1961-1975 และตรวจพิสูจน์แบบจำลองช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัดน้ำฝนที่ได้คัดเลือกไว้จำนวน 19 สถานี พบว่าส่วนใหญ่จะมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 43-88 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) อยู่ในช่วง 0.71-0.87 นอกจากนี้ในการวัดค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการตรวจวัดสำหรับการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองของสถานีต่าง ๆ จำนวน 19 สถานี ในรูปของ box plot ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค1 ถึงภาพผนวกที่ ค38 ซึ่งการแสดงแบบ box plot นั้นสามารถบ่งบอกถึงค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล (ค่ามัธยฐาน) ความเบ้ของข้อมูล และสามารถใช้วิเคราะห์ค่าข้อมูลที่สูงหรือต่ำผิดปกติ (outlier) ได้ สำหรับวิธีการสร้าง box plot แสดงดังภาพที่ 54 โดยขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 25 สรุปผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางสถิติปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน (19 สถานี)

รหัสสถานี	ข้อมูลศึกษา	การสอบเทียบแบบจำลอง (ค.ศ.1961-1975), มิลลิเมตร						ตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1976-1990), มิลลิเมตร					
		เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r	เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r
<u>จังหวัดเชียงใหม่</u>													
07013	Observed	1,224	1,563	863	231.1	-	-	1,118	1,412	784	176.0	-	-
	NCEP	1,206	1,536	845	206.4	54.4	0.86	1,176	1,350	839	124.0	54.6	0.83
07032	Observed	990	1,538	540	294.8	-	-	907	1,355	596	223.0	-	-
	NCEP	1,048	1,589	629	299.3	59.6	0.79	891	1,126	725	107.0	43.2	0.84
07052	Observed	1,233	1,706	777	277.6	-	-	1,111	1,354	790	156.0	-	-
	NCEP	1,116	1,431	783	193.2	54.6	0.87	1,215	1,539	883	149.0	54.3	0.84
07092	Observed	1,067	1,380	802	163.3	-	-	981	1,307	713	171.0	-	-
	NCEP	997	1,217	807	129.8	53.1	0.82	1,065	1,273	793	113.0	46.6	0.82
07112	Observed	1,272	1,574	992	191.5	-	-	1,016	1,299	810	138.0	-	-
	NCEP	1,171	1,439	807	189.7	56.6	0.87	1,129	1,289	833	106.0	55.7	0.81
07162	Observed	941	1,486	572	258.0	-	-	1,005	1,369	742	147.0	-	-
	NCEP	988	1,234	711	159.0	57.5	0.71	935	1,071	759	74.0	43.0	0.85
07182	Observed	935	1,192	658	168.0	-	-	901	1,229	621	196.0	-	-
	NCEP	1,027	1,322	727	165.0	49.6	0.83	966	1,208	813	117.0	54.3	0.74
07192	Observed	1,069	1,550	919	160.0	-	-	983	1,411	694	210.0	-	-
	NCEP	1,059	1,255	855	141.0	51.3	0.82	1,012	1,215	798	114.0	42.7	0.85
07242	Observed	1,729	2,094	1,371	219.0	-	-	1,611	1,988	1,223	232.0	-	-
	NCEP	1,736	2,399	1,169	409.0	74.0	0.86	1,623	1,834	1,201	174.0	68.9	0.85

ตารางที่ 25 (ต่อ)

รหัสสถานี	ข้อมูลศึกษา	การสอบเทียบแบบจำลอง (ค.ศ.1961-1975), มิลลิเมตร						ตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1976-1990), มิลลิเมตร					
		เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r	เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r
07252	Observed	1,767	2,954	1,249	563.0	-	-	1,537	2,727	1,151	409.0	-	-
	NCEP	1,379	1,693	1,004	208.0	88.4	0.72	1,524	1,788	1,286	138.0	76.2	0.82
07282	Observed	1,204	1,475	823	203.0	-	-	1,059	1,398	732	174.0	-	-
	NCEP	1,021	1,297	824	147.0	56.4	0.86	1,050	1,276	810	110.0	48.7	0.85
07292	Observed	1,040	1,525	670	232.0	-	-	894	1,274	530	194.0	-	-
	NCEP	926	1,225	668	208.0	54.9	0.78	956	1,151	751	104.0	47.9	0.80
07472	Observed	1,090	1,375	858	185.0	-	-	923	1,270	665	170.0	-	-
	NCEP	1,004	1,289	773	173.0	59.4	0.77	946	1,130	695	116.0	44.1	0.83
<u>จังหวัดลำพูน</u>													
17012	Observed	1,007	1,337	669	202.0	-	-	963	1,269	716	201.0	-	-
	NCEP	1,074	1,438	740	209.0	56.3	0.79	1,039	1,310	772	128.0	48.5	0.83
17022	Observed	1,178	1,271	963	77.0	-	-	1,035	1,405	813	174.0	-	-
	NCEP	1,115	1,582	784	244.0	54.7	0.83	1,145	1,437	880	127.0	54.3	0.81
17032	Observed	1,046	1,290	696	175.0	-	-	935	1,203	743	150.0	-	-
	NCEP	991	1,188	769	133.0	48.7	0.83	1,051	1,302	773	126.0	46.1	0.84
17042	Observed	1,181	1,547	806	186.0	-	-	1,090	1,600	793	197.0	-	-
	NCEP	1,138	1,381	787	180.0	53.0	0.81	1,230	1,504	909	144.0	56.1	0.82

ตารางที่ 25 (ต่อ)

รหัสสถานี	ข้อมูลศึกษา	การสอบเทียบแบบจำลอง (ค.ศ.1961-1975), มิลลิเมตร						ตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (ค.ศ.1976-1990), มิลลิเมตร					
		เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r	เฉลี่ยรายปี	สูงสุดรายปี	ต่ำสุดรายปี	STD	RMSE	r
17052	Observed	977	1,260	835	139.0	-	-	1,000	1,278	711	179.0	-	-
	NCEP	1,009	1,253	715	164.0	59.6	0.83	1,034	1,294	774	122.0	47.5	0.83
17062	Observed	1,019	1,330	683	179.4	-	-	966	1,234	747	150.5	-	-
	NCEP	979	1,243	748	159.4	58.0	0.76	998	1,314	684	145.8	42.9	0.85

หมายเหตุ r = correlation coefficient (ไม่มีหน่วย)

STD = standard deviation (มิลลิเมตร)

RMSE = root mean square error (มิลลิเมตร)

ก) เรียงลำดับข้อมูลจากน้อยไปมาก

ข) quartile คือ การแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 ส่วนเท่ากัน โดยมีความถี่ของข้อมูลในแต่ละส่วนเท่า ๆ กัน

ค) หาค่า quartile$_1$ (Q_1) เพื่อใช้เป็นค่าขอบล่าง (หรือขอบซ้าย) โดย Q_1 คือ มัธยฐานของข้อมูลส่วนที่มีค่าน้อยกว่ามัธยฐาน ดังนั้น จะมีค่าของตัวแปรในข้อมูลจำนวน 1 ใน 4 หรือ 25% ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ quartile ล่าง และมีค่าของตัวแปรในข้อมูลอีก 3 ใน 4 หรือ 75% ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ quartile ล่าง

ง) หาค่า quartile$_3$ (Q_3) เพื่อใช้เป็นค่าขอบบน (หรือขอบขวา) โดย Q_3 คือ คือมัธยฐานของข้อมูลส่วนที่มีค่ามากกว่ามัธยฐาน ดังนั้น จะมีค่าของตัวแปรในข้อมูลจำนวน 3 ใน 4 หรือ 75% ที่มีค่าน้อยกว่าหรือ quartile บน และมีค่าของตัวแปรในข้อมูลอีก 1 ใน 4 หรือ 25% ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ quartile บน

จ) ความยาวของ box จะอยู่ในช่วง inter-quartile range (IQR) โดย IQR คือ พิสัยของข้อมูล 50% ตรงกลาง เรียกว่า พิสัยระหว่าง quartile (Interquartile Range) เป็นผลต่าง quartile บน และ quartile ล่าง

ฉ) หาค่า quartile$_2$ (Q_2) และทำเครื่องหมายของตำแหน่ง Q_2 ไว้ใน box plot เพื่อใช้แสดงค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล

ช) สร้าง upper whisker (หนวดด้านบน) โดยลากเส้นตรงต่อจากขอบบน ความยาวของเส้นตรงมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างค่าที่มากที่สุดของข้อมูลกับค่า (Q_3 + IQR)

ซ) สร้าง lower whisker (หนวดด้านล่าง) โดยลากเส้นตรงต่อจากขอบบน ความยาวของเส้นตรงมีค่าเท่ากับค่าที่มากที่สุดระหว่างค่าที่น้อยที่สุดของข้อมูลกับค่า (Q_3 - IQR)

The Box Plot

หาค่าขอบเขตล่าง (lower inner and outer fence) และ บน (upper inner and outer fence) จาก

lower inner fence (L1): Q_1 - 1.5*IQR

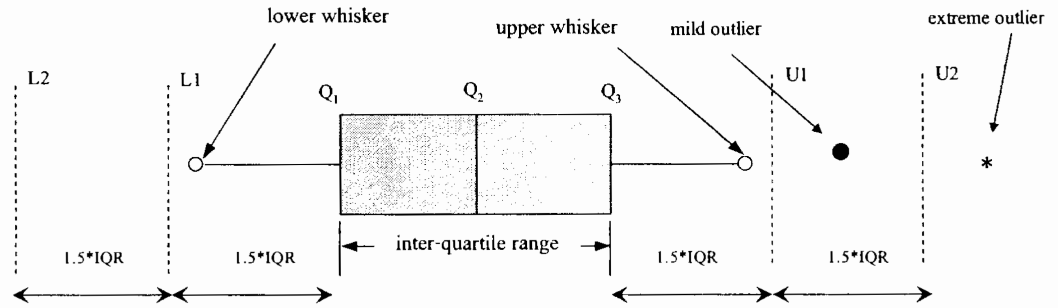
lower outer fence (L2): Q_1 - 3*IQR

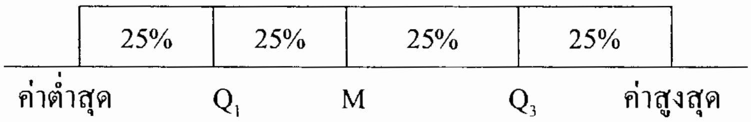
upper inner fence (U1): Q_3 + 1.5*IQR

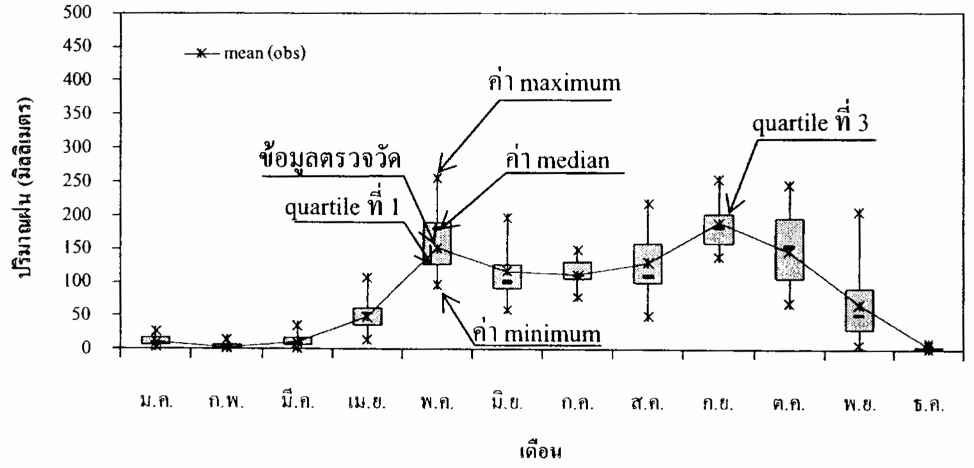
upper outer fence (U2): Q_3 + 3*IQR

ข้อมูลที่อยู่ระหว่าง L1 และL2 หรือระหว่าง U1และ U2 เรียกว่า mild outlier

ข้อมูลที่อยู่ระหว่าง L1 และL2 หรือระหว่าง U1และ U2 เรียกว่า extreme outlier







ภาพที่ 54 วิธีการสร้าง box plot เบื้องต้นและความหมายของเทอมต่าง ๆ

ในการวัดผลและพิจารณาว่าช่วงของข้อมูลที่เกิดจากการวิเคราะห์ว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดนั้น จะดูค่าที่มีแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูลตรวจวัด และความเบ้ของข้อมูลตรวจวัดที่อยู่ใน box plot ถ้าอยู่ใน box plot และใกล้จุดศูนย์กลาง box แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัด โดยจากผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่แสดงในภาพผนวกที่ ค1 ถึงภาพผนวกที่ ค38 จะเห็นว่าปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลตรวจวัดส่วนมากอยู่ในช่วงหรือขอบเขตบน (quartile ที่ 3) และขอบเขตล่าง (quartile ที่ 1) ของ box plot ซึ่งเกิดจากผลวิเคราะห์ 100 ชุดข้อมูล (ensembles) แสดงว่าตัวแปรภูมิอากาศที่เลือกไว้มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคตต่อไป

2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายสถานี

เมื่อนำข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศของแบบจำลอง HadCM3 ในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ชนิดเดียวกันกับที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองนำเข้าในแบบจำลอง SDSM และแบ่งเป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ในอนาคต คือ ทศวรรษที่ 2020 (ค.ศ. 2010-2039), ทศวรรษที่ 2050 (ค.ศ.2040-2069) และทศวรรษที่ 2080 (ค.ศ.2070-2099) จะได้ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 ของสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 19 สถานี ดังแสดงในรูปของกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ในภาพผนวกที่ ค39 ถึงภาพผนวกที่ ค57 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณฝนเกือบทุกสถานีในฤดูฝนช่วงเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม มีปริมาณฝนเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับข้อมูลช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ทำให้ปริมาณฝนโดยรวมทั้งปีของทุกสถานีมีมากขึ้นกว่าในอดีต ส่วนในฤดูแล้งจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลในอดีต (ค.ศ.1961-1990)

สำหรับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ช่วงปี ค.ศ.2010-2099 แสดงในภาพผนวกที่ ค58 และสรุปแยกเป็นทศวรรษต่าง ๆ ดังตารางที่ 26 รวมทั้งได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990, ช่วงปี ค.ศ. 1991-2007 และช่วงปี ค.ศ.1961-2007 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

ตารางที่ 26 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ใช้ในการศึกษาในอดีตและอนาคต

ลำดับที่	รหัสสถานี	รายชื่อสถานี	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตร/ปี)														
			จากข้อมูลในอดีต (ค.ศ.)			ในอนาคต (ค.ศ.2010-2099)											
						A2				B2				ความแตกต่างของ A2 และ B2			
			1961-1990	1991-2007	1961-2007	2020s	2050s	2080s	2010-2099	2020s	2050s	2080s	2010-2099	2020s	2050s	2080s	2010-2099
<u>จังหวัดเชียงใหม่</u>																	
1	07013	อ.เมือง	-2.7	25.0	-0.5	-0.2	-3.8	20.2	2.3	6.2	4.2	-8.0	1.8	-6.4	-7.9	28.1	0.5
2	07032	อ.สันกำแพง	-10.6	22.4	-5.3	2.0	-2.3	-2.8	-2.0	-4.8	-2.5	-4.8	-2.9	6.9	0.2	2.0	0.9
3	07052	อ.ดอยสะเก็ด	-5.5	30.9	-3.0	7.9	8.4	11.2	8.5	2.7	5.2	-7.2	2.6	5.1	3.2	18.4	5.9
4	07092	อ.ฮอด	-4.3	15.8	-1.9	1.9	-4.0	5.6	-0.1	-2.7	1.2	-8.4	-2.3	4.7	-5.2	14.0	2.2
5	07112	อ.แม่แตง	-9.1	20.6	-1.2	5.4	-1.8	4.7	0.8	0.6	1.6	-4.7	-1.6	4.8	-3.4	9.3	2.4
6	07162	อ.อมก๋อย	3.1	3.6	2.6	3.3	2.9	4.1	2.9	0.4	1.2	-0.7	0.3	3.0	1.6	4.8	2.6
7	07182	อ.จอมทอง	-2.4	12.0	-0.7	-3.5	1.9	19.9	10.3	1.2	4.5	-15.6	2.4	-4.7	-2.6	35.5	7.9
8	07192	บ้านแอ่น อ.ดอยเต่า	-6.7	9.9	-8.6	-0.2	10.9	30.8	9.7	3.4	6.0	-0.8	3.2	-3.6	4.9	31.6	6.5
9	07242	อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย	-4.2	19.9	-3.2	3.8	-1.6	8.7	1.4	-6.7	2.0	-10.9	-1.2	10.5	-3.6	19.6	2.6
10	07252	ศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำดอยเชียงดาว	-17.5	30.0	-7.5	10.4	5.3	21.7	8.3	3.0	2.9	-17.3	1.7	7.4	2.3	39.0	6.6
11	07282	ดอยบ่อแก้ว อ.ฮอด	-10.2	1.4	-3.5	2.4	11.4	20.2	15.8	5.0	12.5	-1.2	4.3	-2.6	-1.1	21.4	11.5

ตารางที่ 26 (ต่อ)

ลำดับที่	รหัสสถานี	รายชื่อสถานี	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตร/ปี)														
			จากข้อมูลในอดีต (ค.ศ.)			ในอนาคต (ค.ศ.2010-2099)											
						A2				B2				ความแตกต่างของ A2 และ B2			
			1961-1990	1991-2007	1961-2007	2020s	2050s	2080s	2010-2099	2020s	2050s	2080s	2010-2099	2020s	2050s	2080s	2010-2099
12	07292	สถานีทดลองพันธ์ข้าวสันป่าตอง	-7.9	18.2	0.5	7.0	8.5	27.2	16.3	10.2	9.0	-9.8	7.8	-3.2	-0.4	37.0	8.5
13	07472	ศูนย์พัฒนาเขื่อนภูมิพล	-5.5	17.7	-3.8	-2.5	5.1	7.8	9.7	0.0	9.8	-0.6	2.9	-2.5	-4.6	8.4	6.8
จังหวัดลำพูน																	
14	17012	อ.เมือง	-1.8	6.6	-4.1	-2.5	-13.9	4.4	-3.4	2.0	-2.3	-7.6	-1.1	-4.5	-11.7	12.0	-2.3
15	17022	อ.ลี้	-6.0	20.9	-7.5	-0.2	-2.8	2.6	1.5	-1.8	-0.6	-9.2	-1.8	1.5	-2.2	11.7	3.3
16	17032	อ.ป่าซาง	-7.6	23.7	-0.3	-5.0	-1.2	7.0	3.1	0.6	3.4	-5.8	0.8	-5.6	-4.6	12.9	2.3
17	17042	อ.แม่ทา	-4.9	22.0	-1.8	11.4	2.5	10.9	7.5	-0.3	7.8	-5.9	2.2	11.7	-5.4	16.7	5.3
18	17052	อ.บ้านโฮ่ง	1.8	7.5	0.9	2.1	-7.9	6.5	-1.2	2.5	0.2	-11.5	-1.6	-0.4	-8.1	18.0	0.4
19	17062	อ.ลี้ บ้านก้อ	1.3	-7.7	-0.2	-0.2	5.6	5.5	6.4	1.1	7.1	-0.4	1.7	-1.2	-1.5	5.9	4.7
		เฉลี่ย	-5.3	15.8	-2.6	2.3	1.2	11.4	5.1	1.2	3.9	-6.9	1.0	1.1	-2.6	18.2	4.1
		เพิ่มขึ้นสูงสุด	3.1	30.9	2.6	11.4	11.4	30.8	16.3	10.2	12.5	-	7.8	11.7	4.9	39.0	11.5
		ลดลงต่ำสุด	-17.5	-7.7	-8.6	-5.0	-13.9	-2.8	-3.4	-6.7	-2.5	-17.3	-2.9	-6.4	-11.7	-	-2.3

1) การเปลี่ยนแปลงภายใต้สมมติฐาน A2 : ในช่วงทศวรรษที่ 2020 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 2.3 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 11 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 1.9-11.4 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 5.2 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 8 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 0.2-5.0 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 1.8 มิลลิเมตรต่อปี) ในช่วงทศวรรษที่ 2050 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 1.2 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 10 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 1.9-11.4 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 6.2 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 9 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 1.2-13.9 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 4.4 มิลลิเมตรต่อปี) และในช่วงทศวรรษที่ 2080 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ยสูงถึง 11.4 มิลลิเมตรต่อปี โดยมีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 18 สถานี อัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 2.6-30.8 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 12.2 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่ลดลงมีเพียงสถานีเดียว โดยมีอัตราการลดลง 2.8 มิลลิเมตรต่อปี และเมื่อมองภาพรวมในอนาคตตลอดตั้งแต่ปี ค.ศ.2010-2099 จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 5.1 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 15 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 0.8-16.3 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 7.0 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 4 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 0.1-3.4 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 1.7 มิลลิเมตรต่อปี)

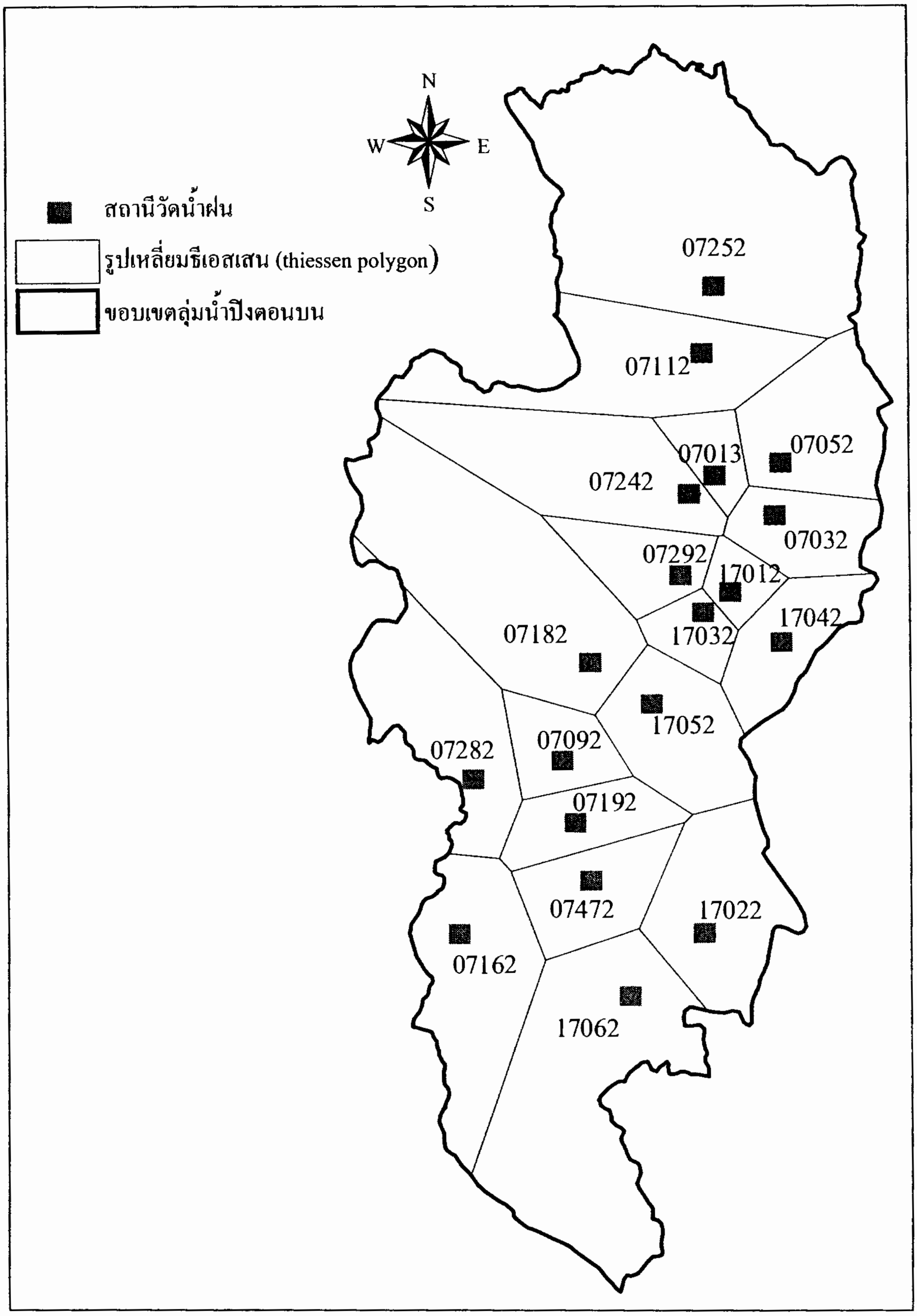
2) การเปลี่ยนแปลงภายใต้สมมติฐาน B2 : ในช่วงทศวรรษที่ 2020 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 1.2 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 13 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 0.4-10.2 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 3.0 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 5 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 0.3-6.7 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 3.3 มิลลิเมตรต่อปี) และไม่มีการเปลี่ยนแปลง 1 สถานี ในช่วงทศวรรษที่ 2050 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 3.9 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 16 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 0.2-12.5 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 4.9 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 3 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 0.6-2.5 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 1.8 มิลลิเมตรต่อปี) และในช่วงทศวรรษที่ 2080 มีอัตราการลดลงทุกสถานีเฉลี่ยลดลง 6.9 มิลลิเมตรต่อปี โดยอัตราลดลงมีค่าระหว่าง 0.4-17.3 มิลลิเมตรต่อปี และเมื่อมองภาพรวมในอนาคตตลอดตั้งแต่ปี ค.ศ.2010-2099 จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนเฉลี่ย 1.0 มิลลิเมตรต่อปี แยกเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเพิ่มขึ้นจำนวน 12 สถานี โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าระหว่าง 0.3-7.8 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 7.0 มิลลิเมตรต่อปี) ส่วนสถานีที่มีการลดลงของปริมาณฝนมีจำนวน 7 สถานี โดยอัตราการลดลงมีค่าระหว่าง 1.1-2.9 มิลลิเมตรต่อปี (เฉลี่ย 1.8 มิลลิเมตรต่อปี)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนระหว่างสมมติฐานแบบ A2 และ B2 ในอนาคตจะเห็นว่าในทศวรรษที่ 2020 มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายสถานีเฉลี่ยของ A2 เพิ่มขึ้นมากกว่า B2 ประมาณ 1.1 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในทศวรรษที่ 2050 มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยของ B2 กลับเพิ่มขึ้นมากกว่า A2 ประมาณ 2.6 มิลลิเมตรต่อปี แต่ในทศวรรษที่ 2080 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยของ A2 กลับมาเพิ่มขึ้นมากกว่า B2 อีกครั้ง ประมาณ 18.2 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่เป็นไปในทำนองแบบเดียวกันตลอดในอนาคต และถึงแม้ว่าการที่ A2 จะมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า B2 ก็ไม่ได้แสดงว่าในอนาคตการเปลี่ยนแปลงจะต้องเป็นไปในทำนองเดียวกันเสมอไป อาจจะมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องด้วย

ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนตามพื้นที่ (areal rainfall) ของลุ่มน้ำปิงตอนบน

จากผลการคาดการณ์ปริมาณฝนในอนาคตอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงแบบ A2 และ B2 ของแบบจำลอง HadCM3 ของสถานีวัดน้ำฝนต่าง ๆ 19 สถานี ในหัวข้อก่อนหน้านี้ นำมาแบ่งพื้นที่ areal rainfall ครอบคลุมลุ่มน้ำปิงตอนบนด้วยวิธีรูปเหลี่ยมธีเอสเสน (thiessen polygon) เพื่อเป็นตัวแทนของปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่ลุ่มน้ำดังแสดงในภาพที่ 55 โดยคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละสถานีแสดงในตารางที่ 27 โดยสถานีที่มีอิทธิพลต่อลุ่มน้ำมากสุดได้แก่ สถานี 07252 (ร้อยละ 17) รองลงมาได้แก่สถานี 17062 (ร้อยละ 11.5) ซึ่งตั้งอยู่ทางตอนเหนือและใต้ของลุ่มน้ำปิงตอนบนตามลำดับ

จากผลการแบ่งพื้นที่อิทธิพลหรือสัดส่วนน้ำหนัก (weighted ratio) เพื่อหา areal rainfall ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนทำให้สามารถประเมินปริมาณฝนในอนาคตของลุ่มน้ำปิงตอนบนได้ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 ดังแสดงในตารางที่ 28 รวมทั้งยังได้มีการคาดการณ์จำนวนวันที่ฝนตก (rainy day), ช่วงความยาวฝนตกต่อเนื่อง (wet spell length), และช่วงฝนแล้งหรือฝนไม่ตกต่อเนื่องกัน (dry spell length) ของลุ่มน้ำปิงตอนบนไว้ด้วย



ภาพที่ 55 การแบ่งพื้นที่อิทธิพลของสถานีวัดน้ำฝนที่มีการคาดการณ์ปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนด้วยวิธีรูปเหลี่ยมธีเอสเสน (thiessen polygon)

ตารางที่ 27 ค่าถ่วงน้ำหนักหรือ weighting factor ของสถานีวัดน้ำฝนที่มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคต

ลำดับที่	รหัสสถานี	ร้อยละครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน
1	07013	1.4
2	07032	2.7
3	07052	4.6
4	07092	2.2
5	07112	6.8
6	07162	6.4
7	07182	11.1
8	07192	2.5
9	07242	6.8
10	07252	17.0
11	07282	6.0
12	07292	2.4
13	07472	3.2
14	17012	1.1
15	17022	5.4
16	17032	1.4
17	17042	3.1
18	17052	4.2
19	17062	11.5
	รวม	**100**

ตารางที่ 28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน, จำนวนวันที่ฝนตก, ช่วงความยาวฝนตกและช่วงความยาวฝนแล้งเฉลี่ยรายเดือนในลุ่มน้ำปิงตอนบน เมื่อเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990

ผลการวิเคราะห์		เฉลี่ยรายเดือน												ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รวมทั้งปี	% เปลี่ยนแปลงเทียบกับ
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	(พ.ค.-ต.ค.)	(พ.ย.-เม.ย.)		ช่วงปี ค.ศ.1961-1990
ปริมาณฝน, มิลลิเมตร																	
ข้อมูลจากการ	ค.ศ. 1961-1990	9	4	13	53	173	130	152	198	220	142	49	13	1,016	142	1,158	-
	ค.ศ. 1991-2007	4	8	23	57	165	122	143	199	220	110	41	16	960	149	1,109	-
ผลการคาดการณ์ภายใต้สมมติฐานที่ทศวรรษต่างๆ	- A2-2020s	69	24	14	50	203	315	362	404	247	104	35	42	1,635	233	1,868	61%
	- A2-2050s	62	23	12	37	206	342	399	427	255	139	32	36	1,769	202	1,971	70%
	- A2-2080s	41	19	11	56	253	304	515	525	292	170	28	28	2,058	182	2,240	93%
	- B2-2020s	84	27	13	58	205	330	351	376	264	101	28	45	1,627	255	1,882	62%
	- B2-2050s	56	25	14	49	224	312	401	411	289	105	29	36	1,742	209	1,951	68%
	- B2-2080s	51	20	11	40	192	332	420	451	269	124	26	30	1,788	178	1,966	70%
% ความแตกต่างระหว่าง A2 และ B2	2020s	-23	-11	7	-17	-1	-5	3	7	-7	3	20	-7	1	-9	-1	
	2050s	9	-11	-11	-32	-9	9	-1	4	-13	25	10	-2	2	-4	1	
	2080s	-23	-6	-5	28	24	-9	18	14	8	27	7	-8	13	2	12	

ตารางที่ 28 (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์		เฉลี่ยรายเดือน												ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รวมทั้งปี	% เปลี่ยนแปลงเทียบกับ
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	(พ.ค.-ต.ค.)	(พ.ย.-เม.ย.)		ช่วงปี ค.ศ.1961-1990
จำนวนวันที่ฝนตก (Rainy Day), วัน																	
ข้อมูลจากการ	- ค.ศ. 1961-1990	0.8	0.5	1.3	3.4	12.9	13.6	14.5	16.7	15.8	11.0	4.2	1.2	84.5	11.4	95.9	-
ผลการคาดการณ์ภายใต้สมมติฐานที่ทศวรรษต่างๆ	- A2-2020s	1.8	1.0	1.3	5.4	12.2	18.8	19.4	22.4	14.8	6.8	2.9	2.0	94.4	14.4	108.8	13%
	- A2-2050s	1.8	1.0	1.1	4.5	12.0	19.1	19.5	22.2	14.5	8.0	2.8	1.9	95.3	13.2	108.5	13%
	- A2-2080s	1.6	0.9	0.9	5.9	14.0	18.1	19.6	23.3	14.8	8.7	2.6	1.7	98.5	13.6	112.1	17%
	- B2-2020s	2.0	1.0	1.2	6.1	12.5	18.9	18.9	22.2	15.5	6.7	2.6	2.1	94.8	15.0	109.8	14%
	- B2-2050s	1.8	1.0	1.2	5.5	13.0	18.5	19.5	22.4	16.0	6.9	2.7	2.0	96.2	14.0	110.2	15%
	- B2-2080s	1.7	0.9	1.0	4.8	10.9	18.8	19.4	22.8	14.5	7.3	2.6	1.8	93.7	12.9	106.6	11%
% ความแตกต่างระหว่าง A2 และ B2	2020s	-8	1	7	-13	-2	-1	2	1	-5	1	9	-5	0	-4	-1	
	2050s	3	2	-4	-22	-8	4	0	-1	-10	14	6	-2	-1	-6	-2	
	2080s	-7	-3	-7	19	22	-4	1	2	2	16	-1	-10	5	5	5	

ตารางที่ 28 (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์		เฉลี่ยรายเดือน												ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รวมทั้งปี	% เปลี่ยนแปลงเทียบกับ
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	(พ.ค.-ต.ค.)	(พ.ย.-เม.ย.)		ช่วงปี ค.ศ.1961-1990
ช่วงความยาวฝนตก (Wet Spell Length), วัน																	
ข้อมูลจากการ	- ค.ศ. 1961-1990	0.7	0.4	0.8	2.1	5.5	5.3	5.5	7.0	6.3	4.3	2.4	0.9	5.6	1.2	3.4	-
ผลการคาดการณ์ภายใต้สมมติฐานที่ทศวรรษต่างๆ	- A2-2020s	0.9	0.6	0.7	2.2	6.0	10.5	8.6	11.7	6.6	2.8	1.5	1.0	7.7	1.2	4.4	29%
	- A2-2050s	0.9	0.6	0.7	1.8	6.1	10.4	9.0	11.9	6.5	3.5	1.4	1.0	7.9	1.1	4.5	31%
	- A2-2080s	0.8	0.6	0.6	2.3	7.3	9.8	9.3	13.5	6.7	4.0	1.2	0.9	8.4	1.1	4.8	39%
	- B2-2020s	1.0	0.6	0.7	2.3	5.9	11.0	8.6	11.3	6.6	2.9	1.3	1.1	7.7	1.2	4.4	29%
	- B2-2050s	0.9	0.6	0.7	2.1	6.7	10.2	8.7	11.8	7.3	2.8	1.3	1.0	7.9	1.1	4.5	32%
	- B2-2080s	0.9	0.6	0.6	2.0	5.7	10.6	9.2	12.5	6.5	3.1	1.3	1.0	7.9	1.1	4.5	31%
% ความแตกต่างระหว่าง A2 และ B2	2020s	-4	-1	5	-6	2	-4	0	4	-1	-4	11	-2	0	0	0	
	2050s	1	2	-2	-18	-10	2	3	0	-14	21	7	-1	-1	-4	-1	
	2080s	-5	-1	-5	16	22	-9	2	7	3	23	-10	-6	6	2	5	

ตารางที่ 28 (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์		เฉลี่ยรายเดือน												ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รวมทั้งปี	% เปลี่ยนแปลงเทียบกับ
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	(พ.ค.-ต.ค.)	(พ.ย.-เม.ย.)		ช่วงปี ค.ศ.1961-1990
ช่วงความยาวฝนแล้ง (Dry Spell Length), วัน																	
ข้อมูลจากการ	- ค.ศ. 1961-1990	27.7	26.1	25.1	15.6	7.8	7.1	6.6	5.4	5.4	9.3	17.8	26.1	6.9	23.1	15.0	-
ผลการคาดการณ์ภายใต้สมมติฐานที่ทศวรรษต่างๆ	- A2-2020s	20.5	24.2	23.1	12.5	8.3	4.7	5.1	5.0	6.9	15.3	18.4	18.9	7.6	19.6	13.6	-9%
	- A2-2050s	20.6	24.4	23.6	14.1	8.7	4.6	5.4	6.4	7.6	13.7	18.8	19.6	7.8	20.2	14.0	-7%
	- A2-2080s	21.5	24.6	24.9	12.8	7.8	5.1	5.7	5.3	7.9	13.5	19.1	20.6	7.5	20.6	14.1	-6%
	- B2-2020s	19.8	24.3	23.9	11.8	8.1	4.7	5.4	5.3	6.9	14.6	19.1	18.5	7.5	19.6	13.5	-10%
	- B2-2050s	20.7	24.5	23.6	12.3	7.8	5.0	5.4	5.4	6.4	14.2	19.1	19.2	7.4	19.9	13.6	-9%
	- B2-2080s	21.1	24.6	24.3	13.8	9.5	5.1	5.4	5.0	7.3	15.2	18.5	20.0	7.9	20.4	14.1	-6%
% ความแตกต่างระหว่าง A2 และ B2	2020s	4	-1	-3	5	2	1	-6	-6	0	4	-3	2	1	0	0	
	2050s	0	0	0	13	10	-8	-1	16	15	-4	-1	2	5	2	2	
	2080s	2	0	2	-8	-21	1	6	5	8	-13	3	3	-5	1	-1	

จากตารางที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดในอดีตช่วงปี ค.ศ. 1961-1990 กับข้อมูลผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Statistical Downscaling ด้วยแบบจำลอง SDSM ช่วงทศวรรษต่าง ๆ 3 ทศวรรษในอนาคตภายใต้สมมติฐาน (scenarios) แบบ A2 และ B2 ในลักษณะของพื้นที่ลุ่มน้ำโดยลุ่มน้ำปิงตอนบน โดยจากการเปรียบเทียบพบว่าแบบ A2 และแบบ B2 ในทศวรรษที่ 2020 และ 2050 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของฝนรายปีจากอดีต (ช่วงปี ค.ศ.1961-1990) มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ในทศวรรษที่ 2020 สมมติฐานแบบ A2 มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น 61 เปอร์เซ็นต์ ส่วน B2 มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น 62 เปอร์เซ็นต์ และในทศวรรษที่ 2050 สมมติฐานแบบ A2 มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วน B2 มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้น 68 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงทศวรรษที่ 2080 ปริมาณฝนแบบ A2 สูงขึ้นมากประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของ B2 เพิ่มขึ้นจากทศวรรษที่ 2050 เล็กน้อยเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในอนาคตจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศส่งผลให้ลุ่มน้ำปิงตอนบนจะมีฝนมากขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 1,868-2,240 มิลลิเมตรต่อปี ภายใต้สมมติฐานแบบ A2 ส่วนแบบ B2 จะส่งผลให้มีฝนสูงขึ้นอยู่ระหว่าง 1,882-1,966 มิลลิเมตรต่อปี

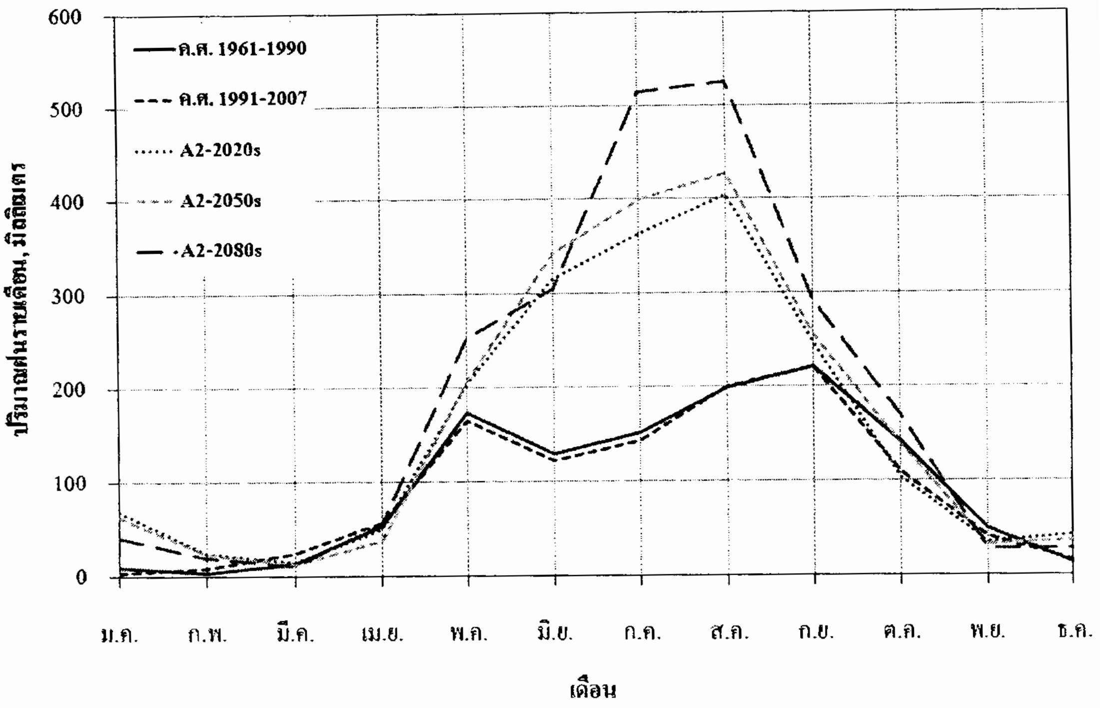
ในกรณีเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณฝนในอนาคตระหว่างแบบ A2 และ B2 (เปอร์เซ็นต์เทียบกับ A2) จากตารางที่ 28 พบว่ามีความแตกต่างกันในแต่ละเดือนรวมทั้งความแตกต่างกันในแต่ละทศวรรษก็ไม่ได้เป็นในทางเดียวกันด้วย โดยในทศวรรษที่ 2020 ปริมาณฝนของแบบ A2 น้อยกว่า B2 โดยเฉพาะฤดูแล้งมีปริมาณฝนน้อยกว่าประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพรวมทั้งปีมีปริมาณฝนน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในทศวรรษที่ 2050 ปริมาณฝนของแบบ A2 มากกว่า B2 เล็กน้อยแต่ยังคงน้อยกว่าในฤดูแล้ง โดยมีปริมาณฝนน้อยกว่าประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพรวมทั้งปีมีปริมาณฝนมากกว่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และในทศวรรษที่ 2080 ปริมาณฝนของแบบ A2 มากกว่า B2 มากขึ้นทั้งฤดูฝนและฤดูแล้ง โดยเฉพาะฤดูฝนมีปริมาณฝนมากกว่าประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฤดูแล้งมีปริมาณฝนมากกว่าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และภาพรวมทั้งปีมีปริมาณฝนมากกว่าประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงภายใต้สมมติฐานทั้งสองแบบไม่เป็นไปในทำนองเดียวกันตลอดทุกทศวรรษที่พิจารณา

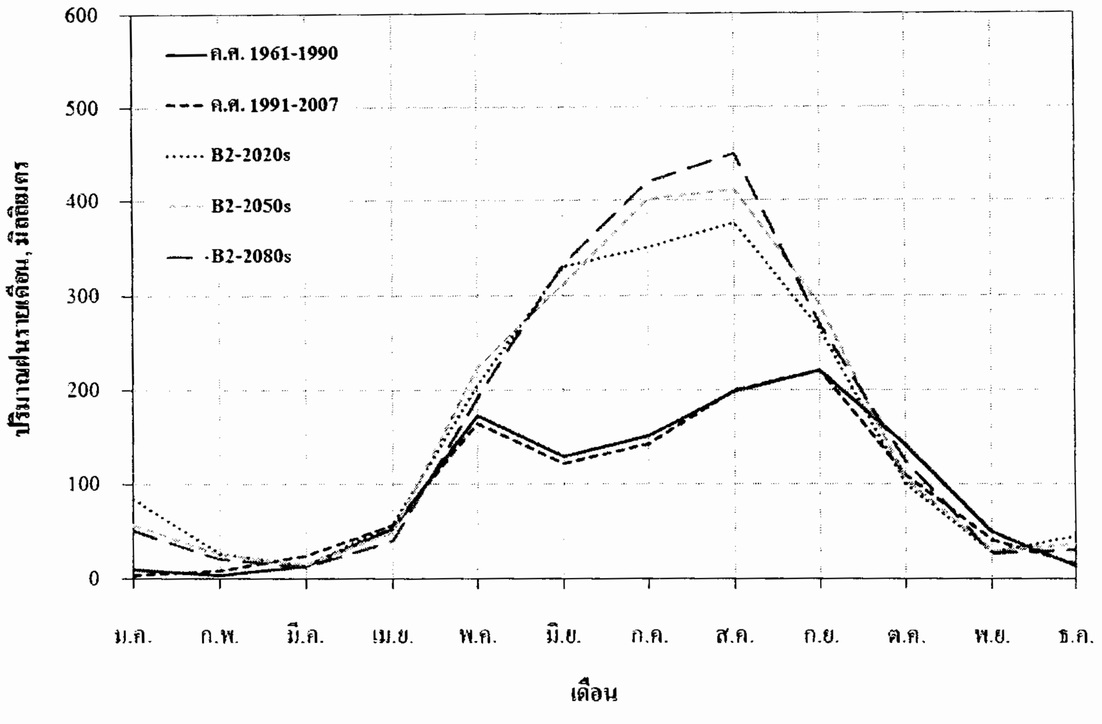
สำหรับจำนวนวันที่ฝนตก (rainy day) ช่วงความยาวฝนตก (wet spell length) และช่วงความยาวฝนแล้ง (dry spell length) ในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 จะมีลักษณะความแตกต่างเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน โดยการเปลี่ยนแปลงวันที่ฝนตกจะมากขึ้นกว่าอดีต (ช่วงปี ค.ศ.1961-1990) 13-17 เปอร์เซ็นต์ ในแบบ A2 และ 11-15 เปอร์เซ็นต์ ในแบบ B2 รวมทั้งมีความยาวของฝนตกต่อเนื่องกันเพิ่มขึ้น 29-39 เปอร์เซ็นต์ ในแบบ A2 และในแบบ B2 จะ

แบบ B2 จะเพิ่มขึ้น 29-32 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความยาวของช่วงฝนแล้งจะลดลงประมาณ 6-9 เปอร์เซ็นต์ ในแบบ A2 และ 6-10 เปอร์เซ็นต์ในแบบ B2 ซึ่งถ้าเป็นอย่างนี้จริงในอนาคตปัญหาการขาดแคลนน้ำก็จะลดน้อยลงมีปริมาณน้ำท่าและแหล่งน้ำต้นทุนมากขึ้นแต่จะประสบปัญหาน้ำท่วมตามมาด้วยเช่นกัน

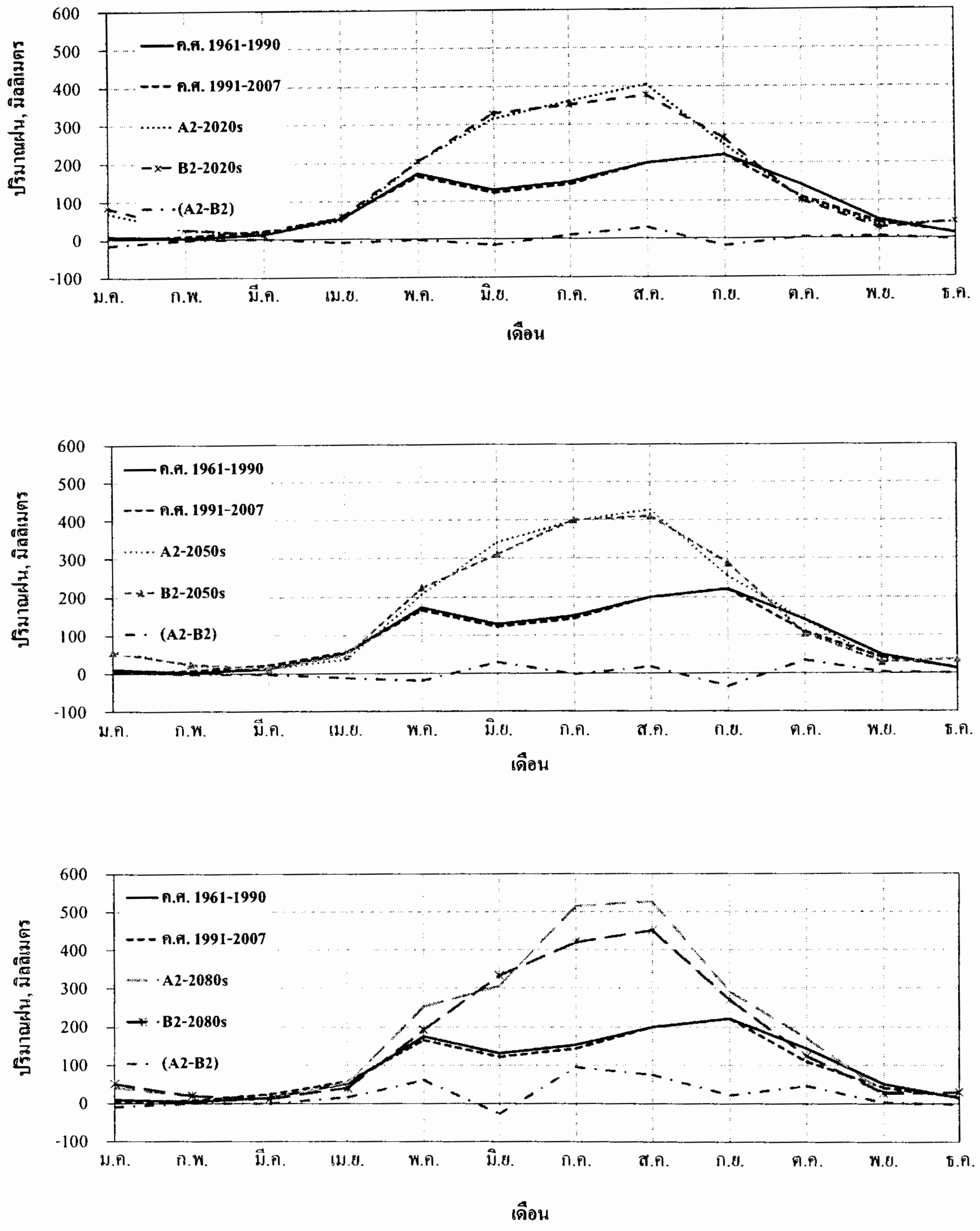
เมื่อพิจารณาปริมาณฝนรายเดือนจากข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และช่วงปี ค.ศ.1991-2007 เปรียบเทียบกับผลจากการคาดการณ์ปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 (ดังแสดงในภาพที่ 56 และภาพที่ 57) พบว่าในอดีตปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนจะเริ่มสูงขึ้นในเดือนพฤษภาคมช่วงเข้าสู่ฤดูฝนและจะลดต่ำลงเล็กน้อยในเดือนถัดไปก่อนจะเริ่มสูงขึ้นจนมีปริมาณฝนสูงสุดในเดือนกันยายน แต่ในอนาคตปริมาณฝนในแต่ละเดือนโดยเฉพาะในฤดูฝนจะเปลี่ยนแปลงไปโดยปริมาณฝนจะเริ่มสูงขึ้นในเดือนพฤษภาคมและสูงต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเดือนสิงหาคมหลังจากนั้นปริมาณฝนจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มต่ำกว่าในอดีตจนถึงเดือนธันวาคม สิ่งที่เปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัดคือในอนาคตทั้งแบบ A2 และ B2 จะมีปริมาณฝนมากในช่วง 3-4 เดือนแรกในฤดูฝน (พฤษภาคมถึงสิงหาคม) เพิ่มขึ้นจากเดิม (ค.ศ.1961-1990) ร้อยละ 56.5 เป็นร้อยละ 67.1 ถึงร้อยละ 71.3 ของปริมาณฝนทั้งปี นอกจากนี้ยังพบว่าในฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมในอนาคตทั้งแบบ A2 และ B2 มีปริมาณฝนมากกว่าในอดีตช่วงปี ค.ศ. 1961-1990 เกือบสองเท่าซึ่งดูแล้วอาจจะเป็นไปไม่ได้

จากภาพที่ 57 จะเห็นว่าปริมาณฝนในอนาคตช่วงทศวรรษที่ 2020 และ 2050 การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศระหว่างแบบ A2 และแบบ B2 จะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก (ดังแสดงรายละเอียดความแตกต่างในตารางที่ 28) โดยจะเห็นว่าบางเดือน A2 มากกว่าแต่บางเดือน B2 มากกว่า ไม่เป็นไปทางใดทางหนึ่ง แต่จะแตกต่างกันมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 2080 โดยเฉพาะในฤดูฝนปริมาณฝนแบบ A2 จะมากกว่าแบบ B2 ยกเว้นเดือนมิถุนายน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศแบบ A2 และ B2 พบว่าในฤดูฝนช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นไปในทางเดียวกันจึงเป็นข้อสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนน่าจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันด้วย





ภาพที่ 56 ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนจากข้อมูลตรวจวัดจริงช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และปี ค.ศ.1991-2007 เปรียบเทียบกับผลจากการคาดการณ์ปริมาณฝนภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2



ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือนในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 และ B2 ที่ทศวรรษต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในอดีต

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนในอดีต รวมทั้งคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตของลุ่มน้ำปิงตอนบนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกในอนาคต ภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission scenarios) แบบ A2 และ B2 ที่กำหนดขึ้นโดย IPCC โดยใช้แบบจำลองทางสถิติ Statistical Downscaling Model (SDSM) ในการลดส่วนหรือทำ downscaling ตัวแปรภูมิอากาศ (predictor variables) จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) HadCM3 โดยสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในอดีต

ก) การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากข้อมูลในอดีต ได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 (30 ปี), ค.ศ.1991-2008 (18 ปี) และ 2 ช่วงรวมกันเพื่อดูภาพรวมช่วงปี ค.ศ.1961-2008 (48 ปี) พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไป โดยในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงปี ค.ศ.1991-2008 ทั้งอุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปี และในช่วงเวลาดังกล่าว (ค.ศ.1991-2008) ซึ่งมีระยะเวลาใกล้เคียงกับปัจจุบัน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยมาก ยกเว้นอุณหภูมิต่ำสุดรายปียังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องใกล้เคียงกับอดีต แสดงว่าในอนาคตอันใกล้นี้สามารถคาดการณ์ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยและสูงสุดรายปี จะยังคงไม่ต่างจากปัจจุบันมากนักแต่อุณหภูมิต่ำสุดรายปีจะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่าอุณหภูมิในช่วงปี ค.ศ.1991-2008 เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 มีความแตกต่างในทางบวกหรือมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกัน แสดงว่าในช่วง 10-20 ปีที่ผ่านมานี้อุณหภูมิได้เพิ่มขึ้นจากในอดีตอย่างชัดเจนแต่ไม่มากนักประมาณ 0.2-0.4 องศาเซลเซียส และจากผลการศึกษาการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตในทศวรรษต่าง ๆ (2020s, 2050s และ 2080s) โดยใช้สมการแนวโน้ม (trend) การเปลี่ยนแปลงช่วงปี ค.ศ.1961-2008 ในการคาดการณ์พบว่า

อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันมากจนไม่น่าเป็นไปได้ โดยเฉพาะอุณหภูมิต่ำสุดรายปีมีการเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดรายปีและเฉลี่ยรายปีตามลำดับ

ข) การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีในอดีตของสถานีที่ได้คัดเลือกจำนวน 20 สถานี จากข้อมูลที่รวบรวมได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1961-2007 พบว่าภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงฝนรายสถานีมีแนวโน้มลดลงเกือบทุกสถานีมีเพียง 3 สถานีที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนเพิ่มขึ้นโดยจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของฝนรวมทั้ง 20 สถานี เฉลี่ยลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังได้แบ่งช่วงเวลาในอดีตออกเป็น 2 ช่วง ในการพิจารณา คือ ช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และช่วงปี ค.ศ.1991-2007 พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ในช่วงปี ค.ศ.1961-1990 ปริมาณฝนรายปีมีแนวโน้มลดลงแต่ในช่วงปี ค.ศ.1991-2007 กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอดีตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนช่วงปี ค.ศ.1991-2007 ซึ่งมีช่วงเวลาใกล้เคียงกับปัจจุบันบ่งบอกถึงแนวโน้มในอนาคตอันใกล้นี้ว่าปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอดีต

2. การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่เหมาะสม

จากการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศ (predictor) ที่เหมาะสมและมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเกิดฝนและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่าตัวแปรภูมิอากาศที่ถูกเลือกส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)ในชั้นบรรยากาศ อุณภูมิภาคพื้นดิน (mean temperature at 2 m) และทิศทางของลมเหนือพื้นผิวโลก โดยตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่ออุณหภูมิหลัก ๆ ได้แก่ Relative humidity at 500 hPa, Relative humidity at 850 hPa, Surface specific humidity และ Mean temperature at 2m ส่วนตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเกิดฝนและปริมาณฝนหลัก ๆ ได้แก่ Surface meridional velocity, Surface divergence, 850 hPa divergence, Relative humidity at 500 hPa, Relative humidity at 850 hPa และ Near surface relative humidity นอกจากนี้เมื่อเปรียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาจากการตรวจเอกสารจะเห็นว่าตัวแปรภูมิอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนจะมีลักษณะเดียวกัน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิเหนือพื้นผิวและทิศทางของลมเหนือผิวโลก หรือมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมีนัยสำคัญ

3. การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

ผลการสอบเทียบ (ช่วงปี ค.ศ.1961-1975) และตรวจพิสูจน์ (ช่วงปี ค.ศ.1961-1975) แบบจำลองของอุณหภูมิและปริมาณฝนรายสถานีในลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่าจะได้ค่า RMSE (root mean square error) มีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) อยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นในการใช้ตัวแปรภูมิอากาศที่ได้เลือกไว้จึงน่าจะใช้ได้แต่อาจจะไม่เหมาะสมนักในการนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนทั้งในรูปของแต่ละสถานีและในเชิงพื้นที่ของลุ่มน้ำปิงตอนบนต่อไป เพราะการวัดผลโดยใช้ค่าทางสถิติ คือ RMSE และ r มีข้อจำกัด คือ RMSE มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของค่าที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนค่า r เป็นค่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ซึ่งอาจไม่เป็น 45 เปอร์เซ็นต์ระหว่างค่าตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่ก็มีค่า r สูงได้เช่นกัน จึงอาจจะต้องใช้ค่าทางสถิติอื่นในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนด้วย เช่น ค่า efficiency index (EI) เป็นต้น นอกจากนี้ในการศึกษาพบว่าการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศและการสอบเทียบแบบจำลอง (SDSM) โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนในอดีตของสถานีในลุ่มน้ำปิงตอนบน กับข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศจาก NCEP โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศกับอุณหภูมิรายวันนั้นสามารถคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลอุณหภูมิได้ไม่ยากนัก ในขณะที่การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลฝนของทั้ง 20 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นไปอย่างค่อนข้างลำบากและให้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติไม่ค่อยดีนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ดังนั้นจะอาจส่งผลกระทบต่อการคาดการณ์ปริมาณฝนในอนาคต

4. ผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนในอนาคตภายใต้สมมติฐานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบ A2 และ B2 จากตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตที่ได้จากแบบจำลอง HadCM3

ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลุ่มน้ำปิงตอนบนในอนาคต (จากการศึกษาข้อมูลของสถานีตรวจอากาศเชียงใหม่) ทั้งอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย พบว่าช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนกันยายนมีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าอดีต (ค.ศ.1961-1990) และมีอุณหภูมิต่ำกว่าอดีตในช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคม สำหรับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคต (ค.ศ. 2010-2099) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 0.01-0.02 องศาเซลเซียสต่อปี ในกรณีเปรียบเทียบในแต่ละทศวรรษพบว่า ช่วงทศวรรษที่ 2020 อุณหภูมิเฉลี่ย สูงสุดและต่ำสุดรายปีและเมื่อเทียบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทั้งสองสมมติฐาน จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงภายใต้

สมมติฐานแบบ A2 ในช่วงทศวรรษที่ 2020 อุณหภูมิทั้ง 3 กรณี มีแนวโน้มลดลงจากข้อมูลอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-2008 ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทศวรรษที่ 2050 และ 2080 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีจะเพิ่มขึ้น 1.3 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดรายปีจะเพิ่มขึ้น 0.8 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำสุดรายปีจะเพิ่มขึ้น 1.4 และ 5.2 เปอร์เซ็นต์ ในทศวรรษที่ 2050 และ 2080 ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สมมติฐานแบบ B2 จะมีลักษณะคล้ายกับแบบ A2 กล่าวคือ ในช่วงทศวรรษที่ 2020 อุณหภูมิทั้ง 3 กรณี มีแนวโน้มลดลงจากข้อมูลอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-2008 เช่นกันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทศวรรษที่ 2050 และ 2080 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีจะเพิ่มขึ้น 0.5 และ 2.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดรายปีจะเพิ่มขึ้น 0.1 และ 1.4 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิต่ำสุดรายปีจะเพิ่มขึ้น 0.6 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ในทศวรรษที่ 2050 และ 2080 ตามลำดับ ซึ่งที่เกิดขึ้นจากแบบ A2 และแบบ B2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าในทศวรรษที่ 2020 การเปลี่ยนของแบบ B2 จะมากกว่าแบบ A2 เล็กน้อย (ประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์) แต่หลังจากนั้นในช่วงทศวรรษที่ 2050 และ 2080 อุณหภูมิทั้งเฉลี่ยรายปี สูงสุดและต่ำสุดรายปี ภายใต้การเปลี่ยนแปลงแบบ A2 จะเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบ B2 (ประมาณ 0.7-2.6 เปอร์เซ็นต์) แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของ GHGs ในชั้นบรรยากาศ (A2>B2) ในอนาคตมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยตรง

ข) การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของลุ่มน้ำปิงตอนบนในอนาคตจะได้จากผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายสถานีจำนวน 19 สถานี ไม่รวมสถานีอำเภอแม่ริม (07062) เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนรายวันและตัวแปรภูมิอากาศทั้ง 26 ตัวแปรมีค่าน้อยมาก หลังจากนั้นทำการหา weighting factor ของแต่ละสถานีครอบคลุมลุ่มน้ำปิงตอนบนเพื่อหาปริมาณฝนเชิงลุ่มน้ำ ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายสถานีในแต่ละทศวรรษมีความแตกต่างกันโดยภายใต้สมมติฐานแบบ A2 ในแต่ละทศวรรษ (2020s, 2050s และ 2080s) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อรวมทั้ง 3 ทศวรรษ (ค.ศ.2010-2099) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 5.1 มิลลิเมตรต่อปี ต่างจากอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-2007 ที่มีแนวโน้มลดลง 2.6 มิลลิเมตรต่อปี สำหรับแบบ B2 ในทศวรรษที่ 2020 และ 2050 เฉลี่ยจากทุกสถานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ในทศวรรษที่ 2080 มีแนวโน้มลดลง และเมื่อรวมทั้ง 3 ทศวรรษ (ค.ศ. 2010-2099) พบว่ามีในแบบ B2 จะแนวโน้มเพิ่มขึ้น 1.0 มิลลิเมตรต่อปี นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสมมติฐานแบบ A2 และ B2 พบว่าปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สมมติฐานแบบ A2 มีแนวโน้มปริมาณฝนเกิดขึ้นมากกว่าแบบ B2 เฉลี่ยจากทุกสถานีช่วงปี ค.ศ.2010-2099 เท่ากับ 4.1 มิลลิเมตรต่อปี และเมื่อพิจารณาในภาพของลุ่มน้ำและทำให้ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีปริมาณฝนรายปีเพิ่มสูงขึ้นกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับข้อมูลในอดีตช่วงปี ค.ศ.1961-1990 โดยปริมาณฝนรายปีภายใต้สมมติฐาน A2 ในอนาคต (ค.ศ.2010-2099) ปริมาณฝนในลุ่มน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 1,870-2,200 มิลลิเมตรต่อปี ส่วน

ปริมาณฝนรายปีภายใต้สมมติฐาน B2 ในอนาคต (ค.ศ.2010-2099) จะเพิ่มขึ้นเป็น 1,880-1,970 มิลลิเมตรต่อปี โดยเฉพาะฤดูฝนมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนมากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1990 และเดือนที่มีปริมาณฝนตกมากที่สุดได้แก่เดือนสิงหาคม ต่างจากข้อมูลในอดีตที่ปริมาณฝนสูงสุดจะอยู่ในเดือนกันยายน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคต รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงเวลาเดียวกัน คือ ช่วงฤดูฝน น่าจะมีความเกี่ยวข้องกันกับการเปลี่ยนแปลง (ในทางเพิ่มขึ้น) ของปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งการเคลื่อนไปของเดือนที่มีปริมาณฝนสูงสุดด้วย

จากผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณด้วยวิธี downscaling โดยใช้แบบจำลอง SDSM จะเห็นว่าทั้งในสมมติฐาน A2 และ B2 จะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับข้อมูลในอดีต โดยเฉพาะปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจจะเกิดจากการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาก (RMSE) โดยเฉพาะปริมาณฝน หรืออาจจะเกิดจากการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศที่ยังไม่เหมาะสม จึงเป็นผลทำให้การคาดการณ์ในอนาคตมีความแตกต่างจากอดีตมาก อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาแนวทางการคาดการณ์อุณหภูมิและปริมาณฝนในอนาคตอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก (global climate change) โดยใช้ตัวแปรภูมิอากาศจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง HadCM3 ในอนาคตซึ่งมีสเกลที่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับระดับลุ่มน้ำ จึงต้องใช้ความชำนาญและการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อให้ได้ผลที่มีนัยสำคัญและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. การนำผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCMs) อื่น ๆ ภายใต้สมมติฐาน (scenarios) แบบเดียวกันหรือสมมติฐานที่ต่างออกไปมาศึกษาและเปรียบเทียบผลว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

2. ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลในอดีตให้มีความใกล้เคียงกับปัจจุบันมากขึ้น หรือใช้ข้อมูลที่มีการรวบรวม (update) ถึงปี ค.ศ.2008 เพื่อให้การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิและปริมาณฝนมีความถูกต้องใกล้เคียงกับปัจจุบันมากขึ้น

3. ควรมีการตรวจสอบและเปรียบเทียบผลการศึกษาอื่น ๆ ในการคัดเลือก predictors ที่มีผลต่อการเกิดฝนและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน รวมทั้งอุณหภูมิ ว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

4. ควรทำการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิและปริมาณฝนว่ามีแนวโน้มสัมพันธ์กันอย่างไรทั้งข้อมูลที่เกิดขึ้นในอดีตและผลการคาดการณ์ในอนาคต

5. ใช้เทคนิคการลดส่วน (downscaling technique) แบบอื่น ๆ มาศึกษาและเปรียบเทียบกันว่าจะให้ผลลัพธ์ที่เหมือนหรือต่างกันอย่างไร

6. เนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ SDSM ขั้นต้น ซึ่งในการศึกษาต้องใช้ประสบการณ์ ความชำนาญและการเรียนรู้อีกมาก ทำให้อาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นควรต้องมีการศึกษาโดยละเอียดต่อไป โดยควรมีการทดสอบและศึกษาผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ว่ามีข้อผิดพลาดตรงไหนหรือข้อบกพร่องอะไรบ้าง เช่น ค่า RMSE ในการศึกษานี้ค่อนข้างมากซึ่งเป็นผลจากการคัดเลือก predictor และบางสถานการณ์ก็ได้ค่าไม่ดีนัก ดังนั้นต้องปรับแก้ให้ถูกต้องมากขึ้น หรือการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองควรใช้ค่า EI (Efficiency index) มาพิจารณาด้วย เพราะค่า r บอกแนวโน้มของการจับกลุ่มของข้อมูลซึ่งไม่เพียงพอ ในขณะที่ค่า RMSE จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณทำให้สรุปได้ยาก เป็นต้น เหล่านี้ทำให้ผลที่ออกมามีความผิดพลาดได้ โดยเฉพาะปริมาณฝนในฤดูฝนเพิ่มขึ้นมากในอนาคตทั้งแบบ A2 และ B2 ซึ่งถ้านำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประกอบการบริหารจัดการลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งหมายรวมถึง

เขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัด และแม่กวง ย่อมส่งผลกระทบอย่างมาก โดยอาจนำความเข้าใจที่คาดเคลื่อนและเป็นการสร้างแนวทางการบริหารจัดการน้ำที่ไม่เหมาะสมต่อไป ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นซึ่งจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบโดยละเอียดดังข้อเสนอแนะข้างต้น เพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการลุ่มน้ำปิงตอนบนที่เหมาะสมตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กัณฑรีย์ บุญประกอบ. 2548. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ: **ประมวลสถานภาพการศึกษา. เอกสารทางวิชาการ**. แหล่งที่มา: http://www.thaienviforum.net, 29 เมษายน 2551.

กัณฑรีย์ บุญประกอบ และ จิรสรณ์ สันติสิริสมบูรณ์. 2548. **เอกสารประกอบการบรรยาย "พรมแดนความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของโลกร้อนต่อประเทศไทย" จัดโดยสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย วันที่ 27 พฤษภาคม 2548 ณ ห้องประชุม (ชั้น 4) สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย**. กรุงเทพฯ.

กรมชลประทาน. 2553. **โครงการระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมตามเวลาจริงสำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบนและลุ่มน้ำยม (Interim Report)**. กรมชลประทาน, กรุงเทพ.

กรมทรัพยากรน้ำ. 2546. **รายงานฉบับสุดท้ายรายงานหลักโครงการจัดทำแผนรวม (Integrated Plan) การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำปิง.** กรมทรัพยากรน้ำ, กรุงเทพ.

กรมอุตุนิยมวิทยา. ม.ป.ป. **ความรู้อุตุนิยมวิทยา**. แหล่งที่มา: http://www.tmd.go.th/info/, 23 เมษายน 2551.

กรมอุตุนิยมวิทยา. ม.ป.ป. **ดัชนีและแนวโน้มของฝนและอุณหภูมิที่ผิดปกติในประเทศไทย.** หนังสืออุตุนิยมวิทยา / เอกสารเผยแพร่. แหล่งที่มา: http://www.tmd.go.th/info/, 23 เมษายน 2551.

เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย. 2549. **การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ**. แหล่งที่มา: http://www.teenet.chula.ac.th/sustainable/default8-3.asp?qname=cdm&qfrom, 24 เมษายน 2551.

ฝ่ายกรรมวิธีข้อมูล กองภูมิอากาศ. 2544. **สถิติภูมิอากาศของประเทศไทยในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2514-2543)**. กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ.

ศูนย์ประสานการจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. ม.ป.ป. **การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ**. แหล่งที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม http://www.onep.go.th/CDM/cmc.html, 24 เมษายน 2551.

ศุภกร ชินวรรโณ. 2550. **การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยในอนาคต**. ศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์ วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุทธิ ลีโทชวลิต, สุทธิสร สุทธิไชยากุล, วิรัช ฉัตรดรงค์ และ ชัยยุทธ สุขศรี. 2550. **การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ต่อการจัดการทรัพยากรน้ำ ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดระยอง**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Abdo Kedir. 2008. **Assessment of Climate Change Impacts on the Hydrology of Gilgel Abbay Catchment in Lake Tana Basin, Ethiopia**. M.S. Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands.

Dimitri Parishkura. 2008. **Evaluation and application of dynamical and statistical downscaling tools for reconstruction of the variability and extremes of current climate regime and future scenario projections**. Pacific Climate Impact Consortium, University of Victoria, Canada.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. **Climate change 2001: The scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

IPCC. 2001. **Special Report on Emissions Scenarios**. Available Source: http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/, April 28, 2008.

IPCC. 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

Robert L. Wilby and Christian W. Dawson. 2007. **SDSM 4.2 — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts "User Manual"**. Department of Geography, Lancaster University, Science Department, Environment Agency of England and Wales, Department of Computer Science, Loughborough University, UK.

Said Hassan Matan. 2007. **Statistical Precipitation Variability Changes under Climate Change Scenarios Simulations using a Statistical Downscaling Model (SDSM)**. University Technology Malaysia, Malaysia.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลอุณหภูมิในลุ่มน้ำปิงตอนบน (สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดเชียงใหม่)

ตารางผนวกที่ ก1 อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1961	20.72	**	25.96	28.31	27.98	27.10	27.14	26.47	26.45	25.68	24.15	21.75	**
1962	21.00	22.23	25.75	28.62	29.35	27.79	27.50	27.16	27.00	25.75	23.98	20.68	25.57
1963	19.56	22.33	25.65	28.09	30.08	27.52	26.77	27.05	27.45	25.93	24.46	21.15	25.50
1964	20.81	23.15	26.50	28.45	27.84	27.74	26.97	27.19	26.90	26.32	23.53	20.64	25.50
1965	20.14	23.36	25.50	28.84	29.76	27.75	27.94	26.95	**	25.85	23.91	23.11	**
1966	22.72	24.11	26.49	30.02	29.45	28.06	27.76	26.77	26.62	26.16	24.96	23.73	26.41
1967	21.52	22.74	26.38	28.83	28.37	28.08	27.65	26.99	26.47	25.73	24.07	21.52	25.69
1968	21.22	22.25	26.33	27.65	27.78	27.61	27.79	27.38	27.27	26.42	24.95	22.43	25.76
1969	20.88	22.66	26.69	30.03	29.28	28.25	27.41	26.59	27.13	26.44	23.38	21.17	25.83
1970	21.52	23.10	26.54	27.59	27.77	27.88	27.20	26.68	26.80	26.06	24.23	22.59	25.66
1971	20.09	22.39	26.05	28.11	28.05	27.22	26.56	26.34	26.86	24.91	21.63	21.03	24.94
1972	19.93	22.57	25.52	27.05	28.67	27.84	27.86	26.91	27.37	26.72	24.90	22.06	25.62
1973	20.57	23.89	25.87	28.83	28.07	28.19	27.53	26.72	26.64	26.55	23.29	19.80	25.50
1974	18.59	21.26	25.60	28.18	27.83	27.45	27.52	26.96	26.63	26.75	24.31	21.79	25.24
1975	21.93	23.82	26.99	29.75	28.96	28.18	27.47	26.92	27.05	27.23	24.85	20.60	26.15
1976	18.71	21.67	25.56	27.86	27.41	26.84	27.56	26.13	27.38	26.30	24.93	**	**
1977	21.70	21.51	24.45	25.46	25.94	26.55	25.97	25.82	24.48	24.79	21.80	19.93	24.03
1978	20.18	23.04	26.06	29.66	28.80	30.43	28.40	**	27.90	26.96	25.71	23.05	**
1979	23.76	25.48	28.12	30.71	30.07	28.89	29.13	27.81	28.40	26.68	24.73	22.94	27.23
1980	21.93	24.33	28.17	30.91	30.25	28.62	28.23	27.89	27.57	26.77	25.40	23.41	26.96
1981	22.25	24.25	**	29.34	28.79	27.89	27.54	27.78	27.81	27.56	25.35	21.39	**
1982	21.51	23.74	27.26	28.06	28.44	27.63	27.75	27.45	26.97	27.01	25.53	20.49	25.99
1983	20.88	24.78	27.94	31.47	30.83	29.27	29.30	28.17	27.64	26.79	23.33	20.95	26.78
1984	21.88	26.49	27.92	29.95	29.20	28.10	27.74	27.77	27.39	25.90	24.77	22.37	26.62
1985	23.31	24.83	28.18	29.91	29.37	27.76	27.36	27.47	27.51	26.77	24.46	22.13	26.59
1986	21.53	24.39	25.83	28.96	28.33	28.27	27.53	28.17	27.50	26.86	25.24	22.78	26.28
1987	22.93	24.30	26.85	29.65	30.08	28.63	**	28.18	27.92	27.94	26.56	**	**
1988	22.09	**	27.27	29.10	28.81	27.68	27.82	27.79	27.71	26.45	22.66	21.25	**
1989	22.38	23.32	26.84	29.28	28.77	27.80	27.59	27.55	27.20	26.38	24.17	20.14	25.95
1990	22.25	23.99	26.69	29.03	27.75	28.14	27.32	28.07	27.32	26.75	25.14	22.09	26.21
1991	22.31	24.31	28.21	29.99	30.24	28.03	28.09	27.38	27.92	26.89	24.05	21.89	26.61
1992	20.76	22.10	26.75	30.18	30.79	29.45	27.42	27.61	27.17	24.93	22.89	20.31	25.86
1993	20.73	22.67	26.90	28.59	28.84	28.78	28.63	27.38	27.48	26.60	24.20	22.14	26.08
1994	23.11	25.53	26.95	29.16	28.19	27.59	27.21	26.39	27.20	25.64	23.87	22.70	26.13

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1995	22.74	23.46	28.33	30.66	29.10	29.14	27.82	27.23	27.51	27.03	24.48	21.28	26.57
1996	21.01	23.01	27.45	29.05	28.65	27.71	27.45	26.59	26.86	26.51	24.90	22.25	25.95
1997	20.81	22.57	26.86	27.10	29.73	29.14	28.15	27.56	26.86	26.86	24.90	23.51	26.17
1998	22.82	23.88	27.92	30.36	30.14	29.93	28.15	28.38	27.86	27.61	25.31	24.25	27.22
1999	24.20	26.41	27.09	28.95	27.32	27.74	28.18	27.09	27.18	26.40	25.08	20.13	26.32
2000	23.10	24.39	26.27	28.89	27.51	27.40	27.23	27.60	26.75	26.77	24.06	23.46	26.12
2001	23.33	24.98	26.46	30.65	27.88	27.78	27.32	27.73	27.24	26.66	23.14	23.41	26.38
2002	22.41	24.80	26.97	29.67	28.86	28.04	27.33	27.14	26.96	26.59	24.74	23.68	26.43
2003	22.02	24.00	26.54	29.33	28.71	27.23	27.85	27.30	27.47	27.26	25.21	22.44	26.28
2004	22.38	24.33	28.21	30.50	28.43	27.39	26.99	27.43	26.71	26.25	24.97	21.06	26.22
2005	22.65	25.58	27.29	29.85	29.67	29.02	28.49	27.02	26.96	26.87	25.55	22.61	26.80
2006	22.43	25.14	28.04	29.28	27.55	28.60	27.09	27.02	27.74	26.76	23.96	21.85	26.29
2007	21.05	23.33	26.52	29.57	26.46	27.80	26.99	26.91	26.89	25.75	23.07	21.87	25.52
2008	22.28	24.50	27.75	29.88	27.35	27.95	27.77	27.25	26.95	26.62	24.20	21.59	26.17
เฉลี่ย	21.64	23.72	26.80	29.15	28.70	28.08	27.63	27.24	27.17	26.47	24.35	21.90	26.08
สูงสุด	24.20	26.49	28.33	31.47	30.83	30.43	29.30	28.38	28.40	27.94	26.56	24.25	27.30
ต่ำสุด	18.59	21.26	24.45	25.46	25.94	26.55	25.97	25.82	24.48	24.79	21.63	19.80	24.03
Standard Deviation	1.23	1.24	0.91	1.14	1.08	0.76	0.60	0.57	0.59	0.65	0.98	1.13	0.60

หมายเหตุ: ** คือ ข้อมูลไม่สมบูรณ์

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2552)

ตารางผนวกที่ ก2 อุณหภูมิสูงสุดรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1961	28.05	31.99	34.83	35.27	32.63	30.98	30.86	29.82	29.92	29.83	29.68	28.39	31.02
1962	27.56	30.68	34.82	36.28	35.13	32.31	31.57	31.05	31.02	30.19	30.18	28.07	31.57
1963	27.31	31.25	34.61	35.88	37.21	31.61	30.28	30.82	31.47	30.20	29.98	27.44	31.51
1964	29.62	32.41	35.25	36.53	32.74	32.30	30.98	31.11	30.80	30.65	28.45	27.35	31.51
1965	28.39	32.46	34.86	36.91	35.75	31.66	32.55	31.17	**	30.18	29.52	28.99	**
1966	29.71	33.06	35.83	38.26	34.64	32.42	31.78	30.29	30.94	31.03	30.75	30.43	32.43
1967	29.00	32.00	34.94	36.08	33.81	33.00	31.93	31.12	30.26	30.83	29.68	27.99	31.72
1968	29.18	31.81	35.24	34.65	33.16	31.83	32.31	31.57	32.20	31.23	31.35	30.65	32.10
1969	29.91	33.36	36.14	37.86	35.00	32.65	31.33	30.33	31.71	31.41	29.03	28.38	32.26
1970	29.79	32.70	36.19	34.41	32.74	32.17	31.08	30.27	30.96	30.79	29.48	28.26	31.57
1971	28.18	31.45	33.71	36.33	33.54	31.30	30.13	29.89	31.23	29.74	28.17	27.91	30.97
1972	27.97	32.43	34.06	33.67	34.57	32.56	32.14	30.71	31.84	31.38	29.85	28.11	31.61
1973	29.15	33.11	33.98	36.85	33.03	32.56	31.61	30.39	30.44	31.41	28.47	27.27	31.52
1974	28.16	31.35	34.32	34.75	33.02	31.83	32.15	30.85	30.87	31.71	29.17	28.78	31.41
1975	27.75	31.11	34.03	36.22	33.64	31.94	31.41	30.02	30.81	31.53	29.88	26.92	31.27
1976	26.53	31.09	34.32	35.06	32.42	31.96	32.54	29.98	31.49	31.02	29.44	**	**
1977	28.24	28.45	31.22	31.49	30.79	31.37	29.94	29.73	28.55	29.12	27.17	25.78	29.32
1978	26.48	29.93	34.55	36.99	33.71	34.84	31.95	31.49	31.71	31.84	31.45	29.77	32.06
1979	30.85	33.39	35.80	36.57	34.74	32.81	33.02	31.00	32.42	31.06	30.50	29.35	32.62
1980	30.04	33.05	35.75	37.23	35.56	32.74	31.86	31.65	31.51	31.23	30.92	29.18	32.56
1981	28.72	32.66	35.65	36.46	33.58	31.79	31.32	31.37	32.14	31.99	29.63	26.55	31.82
1982	28.76	32.64	35.81	34.49	33.96	32.06	32.02	31.41	30.93	32.25	31.57	27.79	31.97
1983	28.37	33.10	36.06	39.26	36.44	33.73	33.74	32.13	31.82	30.98	27.94	27.62	32.60
1984	29.12	33.50	35.90	36.62	34.75	32.38	32.16	31.97	32.18	30.68	30.99	29.34	32.47
1985	30.75	33.35	36.18	36.18	34.75	31.85	31.52	31.30	32.13	31.77	29.38	28.65	32.32
1986	28.92	32.82	34.24	35.97	33.66	33.14	31.60	32.76	32.37	31.86	30.46	28.89	32.22
1987	29.67	31.95	34.65	36.65	36.26	33.14	32.55	32.77	32.28	32.85	31.46	27.20	32.62
1988	30.23	**	36.16	36.20	33.58	31.91	31.84	31.79	32.23	31.05	27.92	28.05	**
1989	30.47	32.67	34.26	37.45	34.39	32.29	31.85	31.84	31.45	30.76	29.87	27.90	32.10
1990	30.60	31.96	34.38	36.41	32.90	32.65	31.50	32.91	31.99	31.54	30.50	28.69	32.17
1991	30.73	32.78	36.13	36.63	36.12	31.99	32.07	31.28	32.06	31.39	29.52	27.95	32.39
1992	28.07	30.27	35.34	37.64	37.13	34.37	31.48	31.91	31.57	28.95	28.36	27.55	31.89
1993	27.84	31.38	34.67	35.44	34.03	33.50	33.16	31.08	31.68	30.89	30.64	29.11	31.95
1994	31.28	34.01	33.96	35.47	32.83	31.42	30.96	29.68	31.28	30.85	30.20	28.82	31.73

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1995	30.21	31.96	36.51	38.44	33.99	33.40	31.39	30.80	31.79	31.95	29.08	28.04	32.30
1996	29.67	30.42	35.45	35.38	33.69	32.14	31.34	30.23	30.66	30.91	29.53	28.00	31.45
1997	28.76	31.84	35.08	33.78	35.35	33.93	31.93	31.28	30.65	31.72	30.33	30.44	32.09
1998	31.69	33.69	37.10	37.91	35.85	35.03	32.21	32.77	32.62	32.99	31.05	30.13	33.59
1999	30.74	33.13	34.99	34.17	31.81	31.94	32.61	30.98	31.33	30.81	30.39	26.43	31.61
2000	31.02	31.68	33.57	34.53	32.03	31.05	30.98	31.54	30.66	31.05	30.16	29.67	31.49
2001	30.70	33.13	31.92	37.60	32.18	31.91	30.84	31.62	31.21	30.79	29.07	29.45	31.70
2002	29.15	32.73	34.78	37.20	34.15	31.99	30.70	30.80	30.90	31.65	29.14	28.66	31.82
2003	27.65	31.87	33.84	35.78	33.78	30.79	31.70	30.91	31.48	31.93	31.59	29.07	31.70
2004	29.88	31.84	36.14	37.15	33.14	31.24	30.65	31.28	30.67	31.24	30.69	28.55	31.87
2005	30.53	34.58	34.92	37.54	35.74	33.85	33.37	30.45	30.94	31.68	30.59	27.75	32.66
2006	30.15	32.88	36.21	36.72	33.42	34.05	30.63	30.69	32.17	31.61	31.57	29.10	32.43
2007	29.75	32.35	35.75	36.66	31.48	33.08	31.45	31.61	31.68	31.02	28.62	29.58	31.92
2008	30.42	31.99	35.13	36.26	32.66	32.90	32.51	32.05	32.31	31.79	30.15	28.26	32.20
เฉลี่ย	29.29	32.22	34.98	36.19	33.99	32.47	31.70	31.13	31.39	31.15	29.87	28.43	31.91
สูงสุด	31.69	34.58	37.10	39.26	37.21	35.03	33.74	32.91	32.62	32.99	31.59	30.65	33.59
ต่ำสุด	26.48	28.45	31.22	31.49	30.79	30.79	29.94	29.68	28.55	28.95	27.17	25.78	29.32
Standard Deviation	1.26	1.13	1.11	1.41	1.46	0.98	0.82	0.82	0.77	0.80	1.07	1.06	0.63

หมายเหตุ: ** คือ ข้อมูลไม่สมบูรณ์

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2552)

ตารางผนวกที่ ก3 อุณหภูมิต่ำสุดรายเดือนเฉลี่ยของสถานีตรวจอากาศอำเมืองจังหวัดเชียงใหม่

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1961	13.44	**	17.13	21.40	23.38	23.25	23.47	23.16	23.05	21.58	18.69	15.15	**
1962	14.46	13.84	16.73	21.00	23.64	23.31	23.48	23.31	23.03	21.34	17.85	13.37	19.61
1963	11.87	13.46	16.74	20.35	22.99	23.48	23.32	23.32	23.48	21.72	18.97	14.92	19.55
1964	12.08	13.94	17.81	20.42	22.98	23.24	22.99	23.33	23.05	22.05	18.64	13.98	19.54
1965	11.95	14.31	16.19	20.83	23.83	23.90	23.36	22.78	22.91	21.57	18.34	17.27	19.77
1966	15.78	15.21	17.19	21.83	24.31	23.75	23.80	23.31	22.36	21.35	19.23	17.06	20.43
1967	14.10	13.53	17.87	21.64	22.99	23.22	23.41	22.91	22.72	20.68	18.50	15.08	19.72
1968	13.33	12.73	17.48	20.70	22.45	23.43	23.32	23.24	22.41	21.67	18.61	14.26	19.47
1969	11.90	12.03	17.31	22.25	23.60	23.91	23.55	22.91	22.60	21.52	17.79	14.01	19.45
1970	13.27	13.55	16.93	20.83	22.85	23.65	23.36	23.13	22.69	21.38	19.05	16.97	19.81
1971	12.03	13.36	18.44	19.95	22.61	23.19	23.05	22.84	22.55	20.13	15.14	14.20	18.96
1972	11.93	12.75	17.04	20.47	22.82	23.19	23.62	23.15	22.96	22.12	20.01	16.06	19.68
1973	12.05	14.70	17.79	20.85	23.17	23.85	23.50	23.11	22.90	21.74	18.16	12.39	19.52
1974	9.07	11.22	16.92	21.63	22.68	23.10	22.95	23.12	22.42	21.83	19.52	14.86	19.11
1975	16.15	16.59	20.00	23.34	24.31	24.47	23.59	23.86	23.33	22.99	19.89	14.35	21.07
1976	10.94	12.29	16.83	20.69	22.45	21.78	22.64	22.33	23.32	21.62	20.48	13.56	19.08
1977	15.20	14.63	17.72	19.46	21.14	21.76	22.04	21.95	20.44	20.50	16.47	14.12	18.78
1978	13.92	16.20	17.62	22.37	23.93	26.07	24.89	**	24.13	22.15	20.01	16.37	**
1979	16.73	17.65	20.47	24.89	25.45	25.03	25.32	24.66	24.41	22.35	19.02	16.56	21.88
1980	13.88	15.66	20.63	24.63	25.00	24.54	24.65	24.19	23.67	22.36	19.93	17.69	21.40
1981	15.82	15.90	**	22.28	24.07	24.03	23.81	24.25	23.53	23.20	21.12	16.28	**
1982	14.29	14.88	18.75	21.68	22.97	23.26	23.55	23.54	23.06	21.84	19.54	13.25	20.05
1983	13.44	16.51	19.87	23.72	25.28	24.85	24.92	24.27	23.51	22.65	18.76	14.33	21.01
1984	14.70	19.52	19.99	23.32	23.69	23.87	23.36	23.63	22.64	21.16	18.61	15.46	20.83
1985	15.93	16.38	20.24	23.70	24.05	23.72	23.24	23.70	22.94	21.82	19.61	15.65	20.91
1986	14.18	15.99	17.49	22.01	23.05	23.45	23.49	23.62	22.69	21.92	20.07	16.72	20.39
1987	16.22	16.69	19.10	22.69	23.93	24.17	**	23.66	23.61	23.07	21.71	**	**
1988	14.00	**	18.43	22.04	24.11	23.50	23.85	23.85	23.23	21.88	17.45	14.49	**
1989	14.34	14.03	19.47	21.18	23.19	23.37	23.39	23.32	23.03	22.05	18.54	12.42	19.86
1990	13.94	16.06	19.06	21.69	22.65	23.68	23.18	23.29	22.70	22.02	19.84	15.55	20.30
1991	13.94	15.90	20.34	23.41	24.41	24.12	24.18	23.55	23.82	22.45	18.61	15.87	20.88
1992	13.48	13.98	18.21	22.77	24.50	24.59	23.40	23.36	22.81	20.95	17.47	13.12	19.89
1993	13.67	14.01	19.18	21.80	23.70	24.11	24.15	23.72	23.35	22.35	17.81	15.21	20.25
1994	14.99	17.09	19.98	22.91	23.59	23.80	23.52	23.13	23.14	20.47	17.58	16.63	20.57

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

หน่วย : องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ.	เดือน												เฉลี่ยทั้งปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1995	15.32	15.02	20.18	22.94	24.26	24.93	24.29	23.71	23.28	22.14	19.94	14.56	20.88
1996	12.40	15.62	19.49	22.77	23.65	23.32	23.61	22.99	23.12	22.16	20.34	16.55	20.50
1997	12.90	13.35	18.69	20.46	24.13	24.39	24.42	23.89	23.14	22.07	19.53	16.64	20.30
1998	14.00	14.12	18.78	22.86	24.49	24.87	24.14	24.04	23.17	22.26	19.64	18.42	20.90
1999	17.71	19.76	19.25	23.76	22.87	23.60	23.82	23.26	23.09	22.04	19.82	13.88	21.07
2000	15.24	17.16	19.03	23.28	23.04	23.81	23.52	23.72	22.90	22.56	18.01	17.28	20.79
2001	16.00	16.88	21.06	23.74	23.62	23.70	23.84	23.87	23.29	22.58	17.26	17.45	21.11
2002	15.72	16.91	19.23	22.20	23.61	24.13	24.01	23.53	23.06	21.59	20.40	18.76	21.10
2003	16.43	16.19	19.30	22.94	23.70	23.70	24.03	23.75	23.52	22.65	18.87	15.88	20.91
2004	14.91	16.84	20.33	23.92	23.76	23.59	23.36	23.63	22.80	21.31	19.30	13.61	20.61
2005	14.81	16.64	19.71	22.19	23.67	24.23	23.63	23.64	23.01	22.11	20.54	17.51	20.98
2006	14.76	17.46	19.91	21.88	21.74	23.20	23.60	23.39	23.36	21.97	18.26	16.10	20.47
2007	14.50	15.53	18.37	23.31	23.37	24.40	24.13	24.02	23.72	22.15	19.12	16.14	20.73
2008	15.88	18.20	21.24	24.74	23.87	24.62	24.48	24.12	23.82	23.26	19.58	16.03	21.65
เฉลี่ย	14.12	15.31	18.71	22.20	23.53	23.82	23.69	23.47	23.08	21.90	18.99	15.45	20.32
สูงสุด	17.71	19.76	21.24	24.89	25.45	26.07	25.32	24.66	24.41	23.26	21.71	18.76	21.88
ต่ำสุด	9.07	11.22	16.19	19.46	21.14	21.76	22.04	21.95	20.44	20.13	15.14	12.39	18.78
Standard Deviation	1.69	1.89	1.33	1.32	0.83	0.75	0.59	0.50	0.59	0.68	1.21	1.56	0.76

หมายเหตุ: ** คือ ข้อมูลไม่สมบูรณ์

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2552)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลปริมาณฝนของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ตารางผนวกที่ ข1 รายชื่อสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	รหัสสถานี	สถานี	ละติจูด			ลองจิจูด			ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี
			o	'	"	o	'	"	(มิลลิเมตร)
จังหวัดเชียงใหม่									
1	07013	อ.เมือง	18	50	23	98	58	32	1,163.2
2	07022	อ.สารภี	18	42	48	99	02	29	961.4
3	07032	อ.สันกำแพง	18	44	39	99	07	28	900.6
4	07042	อ.สันทราย	18	50	51	99	02	54	1,028.0
5	07052	อ.ดอยสะเก็ด	18	52	08	99	08	22	1,143.9
6	07062	อ.แม่ริม	18	54	47	99	56	52	996.4
7	07072	อ.หางดง	18	41	10	98	55	19	1,088.2
8	07082	อ.สันป่าตอง	18	37	37	98	53	56	865.5
9	07092	อ.ฮอด	18	11	26	98	36	52	992.2
10	07102	อ.ฝาง	19	55	02	99	13	00	1,318.0
11	07112	อ.แม่แตง	19	07	08	98	56	52	1,167.1
12	07122	อ.พร้าว	19	21	52	99	12	17	1,120.1
13	07132	อ.เชียงดาว	19	21	53	98	58	00	1,340.8
14	07142	อ.สะเมิง	18	50	52	98	44	09	1,234.7
15	07152	อ.แม่แจ่ม	18	29	54	98	21	54	920.3
16	07162	อ.อมก๋อย	17	47	45	98	21	36	996.8
17	07172	สถานีทดลองเกษตรฝาง	19	57	35	99	09	38	1,531.4
18	07182	อ.จอมทอง	18	24	57	98	40	47	908.9
19	07192	บ้านแอ่น อ.ดอยเต่า	18	03	00	98	38	43	981.5
20	07222	บ่อน้ำมัน อ.ฝาง	19	51	00	99	12	45	1,276.9
21	07242	อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย	18	48	10	98	55	30	1,633.5
22	07252	ศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำดอยเชียงดาว	19	16	07	98	58	32	1,553.7
23	07262	พระตำหนักภูพิงค์	18	48	24	98	54	12	1,785.6

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	รหัสสถานี	สถานี	ละติจูด			ลองจิจูด			ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี
			o	'	''	o	'	''	(มิลลิเมตร)
24	07282	ดอยบ่อแก้ว อ.ฮอด	18	09	01	98	23	35	1,098.6
25	07292	สถานีทดลองพันธ์ข้าวสันป่าตอง	18	36	40	98	54	02	981.7
26	07341	P.25	18	55	04	99	07	50	1,218.4
27	07391	สชป.1	18	47	21	99	01	01	1,025.4
28	07420	ห้วยแม่แฝก อ.สันทราย	18	59	44	98	59	00	999.6
29	07430	ห้วยแม่โจ้	17	54	06	99	01	14	1,047.9
30	07440	ห้วยแก้ว	19	02	33	98	58	52	1,146.9
31	07450	ห้วยแม่เตาไฮ	19	55	57	99	00	02	1,015.4
32	07460	ท้ายประตูระบายแม่แฝก	18	52	40	99	05	08	1,062.0
33	07472	พัฒนาเขื่อนภูมิพล	17	55	00	98	41	00	935.2
34	07480	โครงการแม่แฝก	19	06	08	98	57	21	1,164.7
35	07492	อ.แม่อาย	19	59	47	99	15	33	1,533.9
36	07502	ปลูกป่าแม่หอพระ	19	04	00	99	13	00	1,240.0
37	07510	แม่ปิงเก่า	18	41	22	98	58	20	909.8
38	07520	หัวงานแม่แตง	19	09	16	98	55	22	1,273.2
39	07530	แม่ฮ่องฮัก อ.ดอยสะเก็ด	18	52	35	99	08	48	1,102.9
40	07540	ท้ายประตูระบายห้วยโป่ง	18	49	17	99	10	32	1,076.2
41	07550	บ้านร้องวัวแดง อ.สันกำแพง	18	44	26	99	09	37	997.2
42	07591	P.41	18	37	00	99	44	43	1,076.5
จังหวัดลำพูน									
43	17012	อ.เมือง	18	34	38	99	00	34	937.6
44	17022	อ.ลี้	17	48	01	98	57	17	1,051.2
45	17032	อ.ป่าซาง	18	31	25	98	56	38	1,000.7
46	17042	อ.แม่ทา	18	27	35	99	08	14	1,119.3
47	17052	อ.บ้านโฮ่ง	18	18	52	98	49	21	990.8
48	17062	อ.ลี้ บ้านก้อ	17	39	20	98	46	30	989.2

ตารางผนวกที่ ข2 แผนภูมิแสดงช่วงปีสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	จำนวนปี
	จังหวัดเชียงใหม่																																																	
1	อ.เมือง	07013																																												*			*	45
2	อ.สารภี	07022	*	*	*	*	*		*						*				*					*	*	**	*		*				*	*	*	*			*									*	*	27
3	อ.สันกำแพง	07032		*	*					*					*	*	**	*					*													*		*	*		*		*		*					33
4	อ.สันทราย	07042																			*	**	**	**	*								*	*															*	39
5	อ.ดอยสะเก็ด	07052																																					*	*					*				*	43
6	อ.แม่ริม	07062																															*		*	*		*	*		*		*	*	*	*	*	*	*	34
7	อ.หางดง	07072														*																							*		*					*		*	*	41
8	อ.สันป่าตอง	07082					*	*						*			*					*	*																						*			*	*	38
9	อ.ฮอด	07092																																									*		*	*		*	*	42
10	อ.ฝาง	07102					*					*			*	*										*	**	*																					*	39
11	อ.แม่แตง	07112																	*		*																		*		*				*	*		*	*	39
12	อ.พร้าว	07122																																*	*										*	**			*	43
13	อ.เชียงดาว	07132									*		*		*	*	*	*				*		*	*	*	*	*																					*	34
14	อ.สะเมิง	07142																																															*	46
15	อ.แม่แจ่ม	07152			*			*		*								*																						*									*	41
16	อ.อมก๋อย	07162	*		*				*					*																																			*	42
17	สถานีทดลองเกษตรฝาง	07172									*																																		*			*	**	43
18	อ.จอมทอง	07182		*	*										*											*																							*	42
19	บ้านแอ่น อ.ดอยเต่า	07192																																		*	*		*	*	*				*	*	**	**	**	37
20	บ่อน้ำมัน อ.ฝาง	07222	**	**	*					**	*		*		*	**	*					*												*	*	*			*										*	32

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	ปี ค.ศ. 1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	จำนวนปี
21	อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย	07242	*																																													*	45
22	ศูนย์พัฒนาลุ่มน้ำดอยเชียงดาว	07252	**	**	**	*	**			*							*																															*	39
23	พระตำหนักภูพิงค์	07262	**	**	**	**	*			*	*	**	*																		*	*	*																	*	33
24	ดอยบ่อแก้ว อ.ฮอด	07282	**	**	**	**	**	*																																										*	40
25	สถานีทดลองพันธ์ข้าวสันป่าตอง	07292	**	*																														*																*	43
26	P.25	07341	**	**	**	*								*									*									*	*	*	**	**	**	**	**	*	*	**	**	**	*	*	**	**	**	23
27	สชป.1	07391	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*									*																	*		*	*		*						31
28	ห้วยแม่แฝก อ.สันทราย	07420				*	*	*		*											*											*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	24
29	ห้วยแม่โจ้	07430				*		*														*										*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	26
30	ห้วยแก้ว	07440				*		*		*																						*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	26
31	ห้วยแม่เตาไฮ	07450				*		*		*	*											*										*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	24
32	ท้ายประตูระบายแม่แฝก	07460				*		*														*							*			*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	25
33	พัฒนาเขื่อนภูมิพล	07472	**	**	**	**	**	**	**	**	*																				*	*	*	*		*													*	32
34	โครงการแม่แฝก	07480				*																												**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	28
35	อ.แม่อาย	07492	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*																																			*	*	**	34
36	ปลูกป่าแม่หอพระ	07502	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*												*											*		*										*	31
37	แม่ปิงเก่า	07510	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	*	**	**	**	*															*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	14
38	หัวงานแม่แตง	07520	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*			*													*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	14
39	แม่ฮ่องฮัก อ.ดอยสะเก็ด	07530	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**													*			*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	14
40	ท้ายประตูระบายห้วยโป่ง	07540	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**																*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	15
41	บ้านร้องวัวแดง อ.สันกำแพง	07550																							*							*	*	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**	**	28
42	P.41	07591	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*													*	**	**	**	**	**	*	*	**	**	**	**	**	**	**	**	13

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
43	อ.เมือง	17012	**																			*				
44	อ.ลี้	17022																	*	*	*				*	**
45	อ.ป่าซาง	17032			*																					
46	อ.แม่ทา	17042																								
47	อ.บ้านโฮ่ง	17052	**								*	*	**	*												
48	อ.ลี้ บ้านก้อ	17062																								

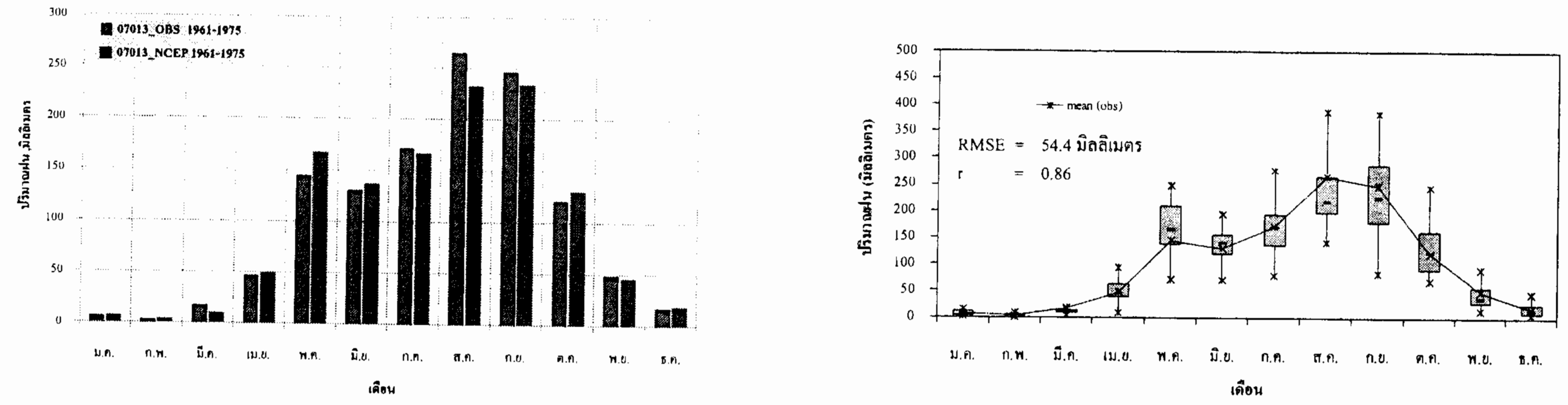
ลำดับที่	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	จำนวนปี
43	อ.เมือง	17012																							*	44
44	อ.ลี้	17022	*				*			*							*	*		*	*				*	34
45	อ.ป่าซาง	17032													*			*						*	*	42
46	อ.แม่ทา	17042																							*	46
47	อ.บ้านโฮ่ง	17052																							*	40
48	อ.ลี้ บ้านก้อ	17062																							*	46

หมายเหตุ * ไม่มีการบันทึกข้อมูลบางเดือน

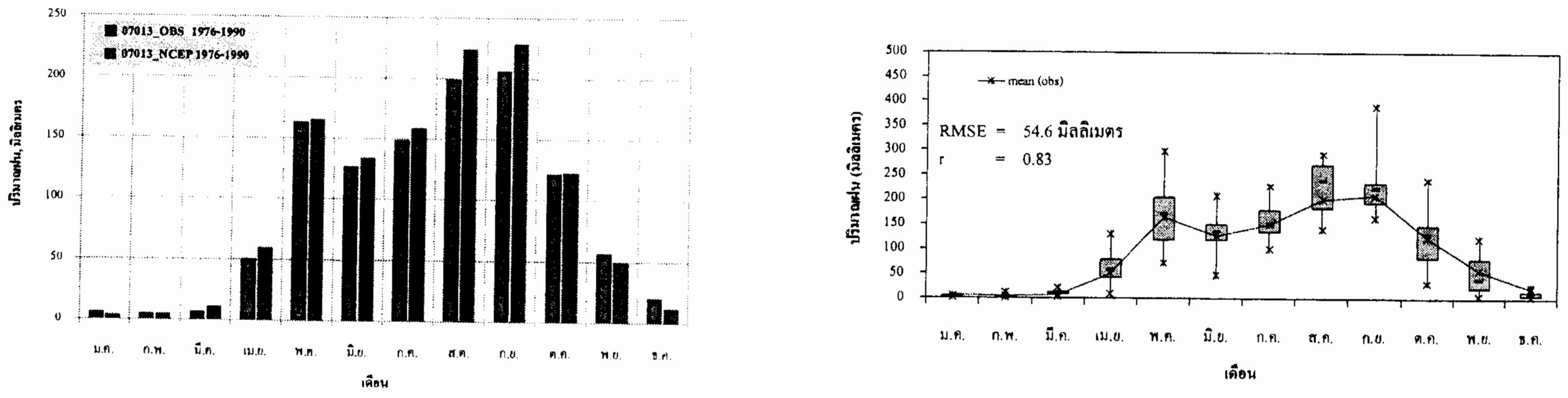
** ไม่มีการบันทึกข้อมูลทั้งปี

ภาคผนวก ค

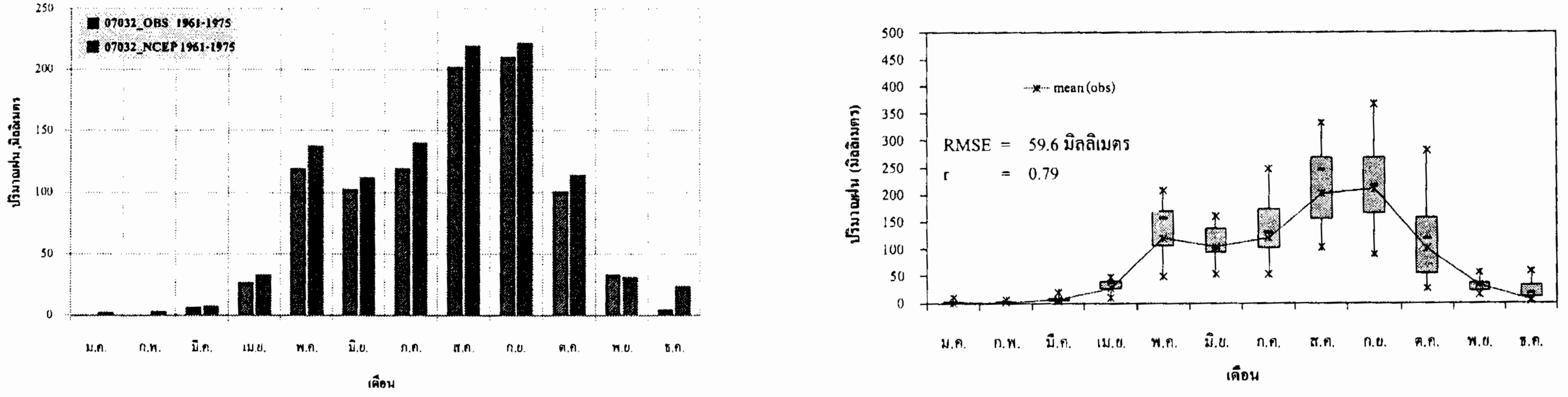
ผลการคาดการณ์ปริมาณฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน



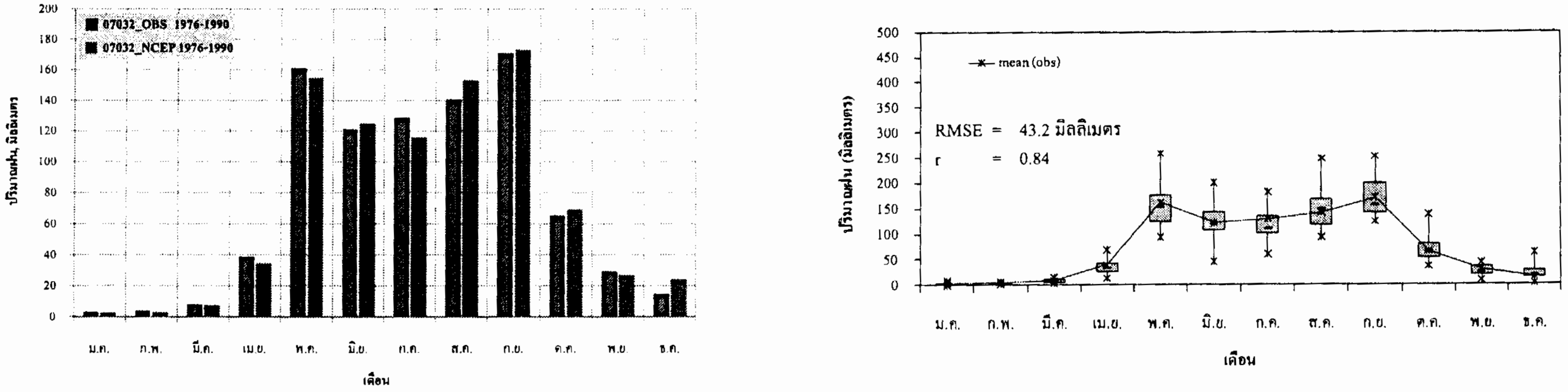
ภาพผนวกที่ ค1 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07013



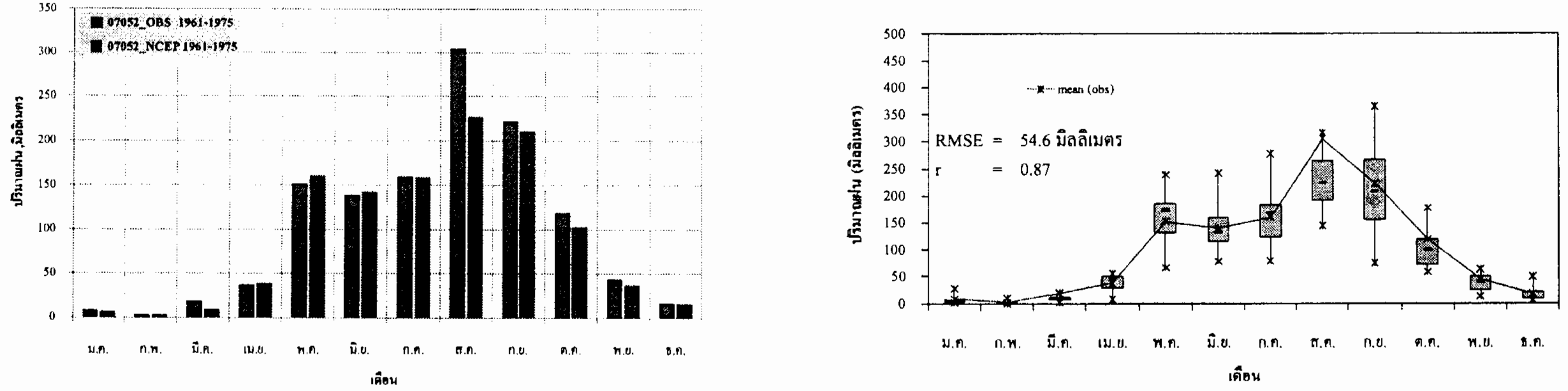
ภาพผนวกที่ ค2 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07013



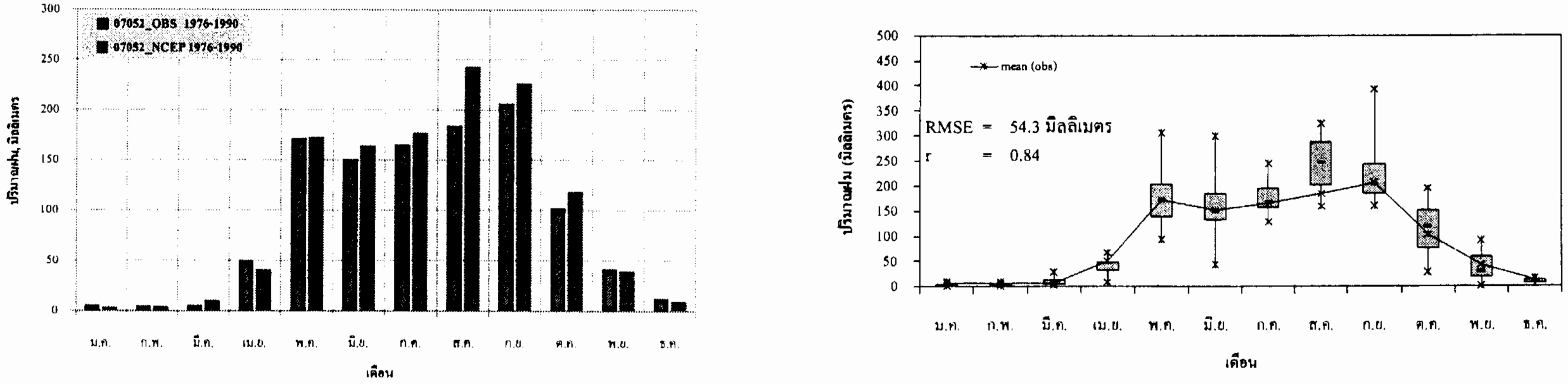
ภาพผนวกที่ ค3 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07032



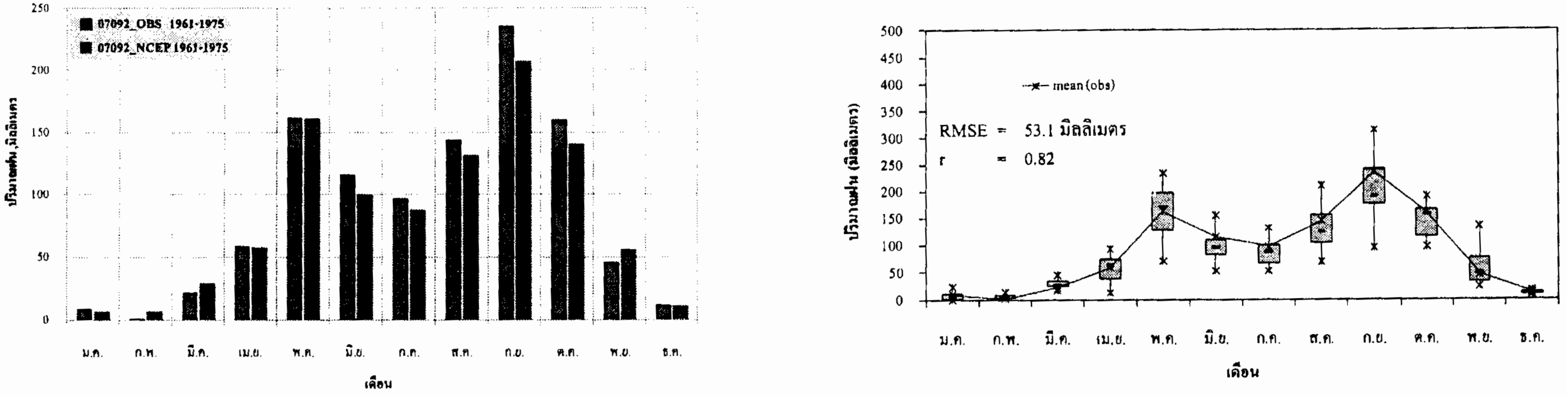
ภาพผนวกที่ ค4 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07032



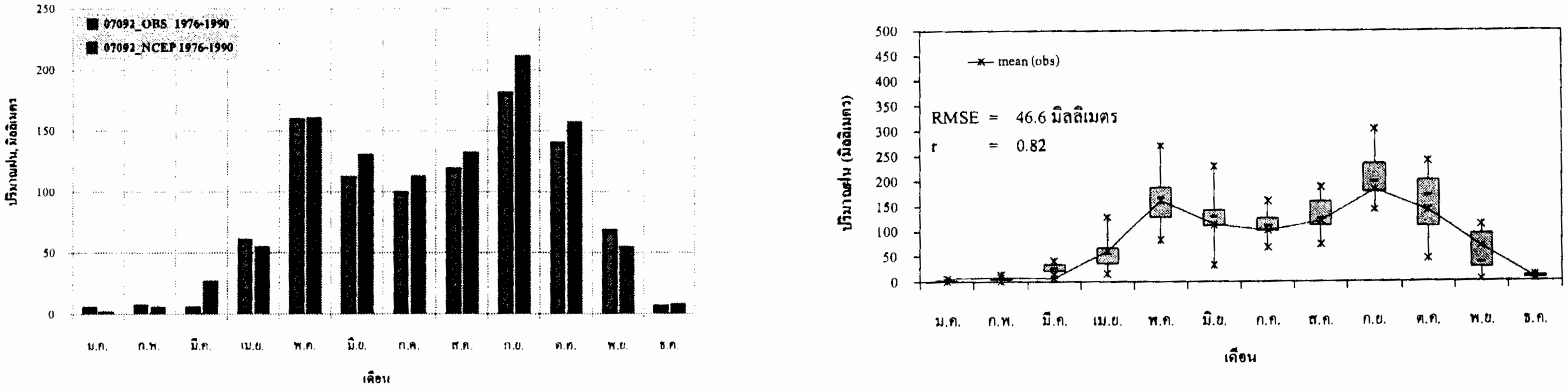
ภาพผนวกที่ ค5 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07052



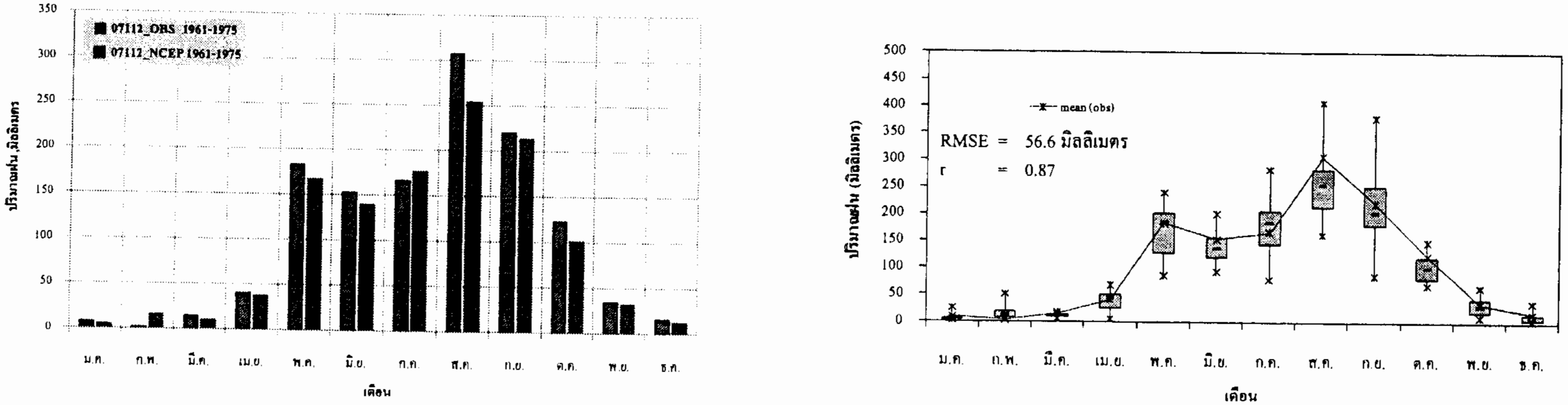
ภาพผนวกที่ ค6 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07052



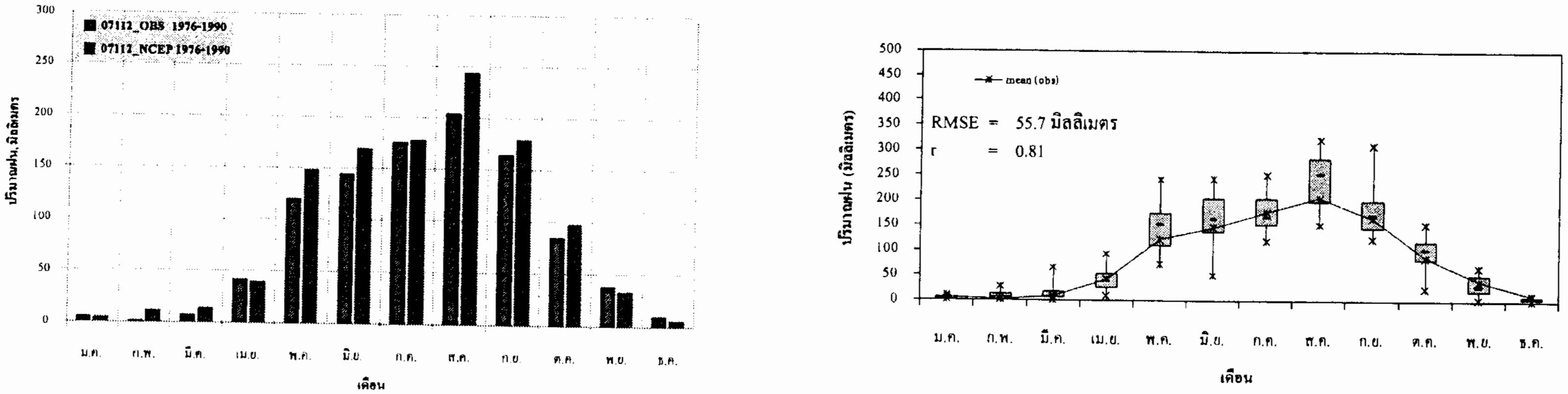
ภาพผนวกที่ ค7 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07092



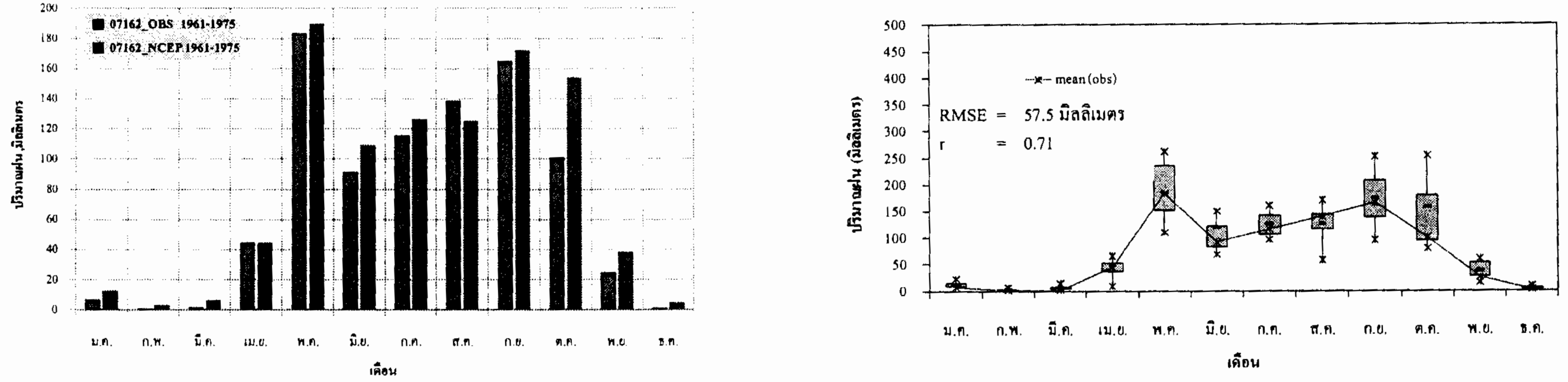
ภาพผนวกที่ ค8 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07092



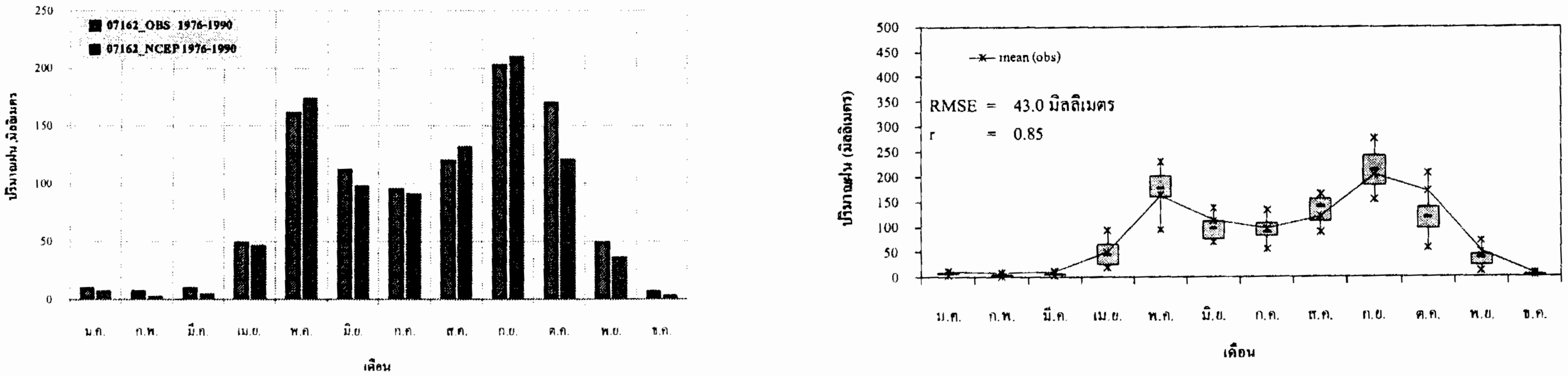
ภาพผนวกที่ ค9 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07112



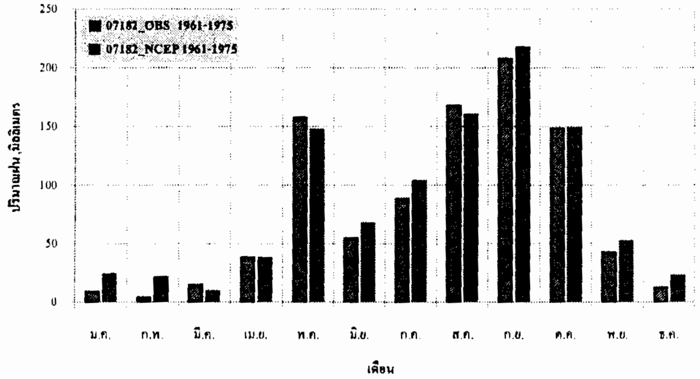
ภาพผนวกที่ ค10 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07112

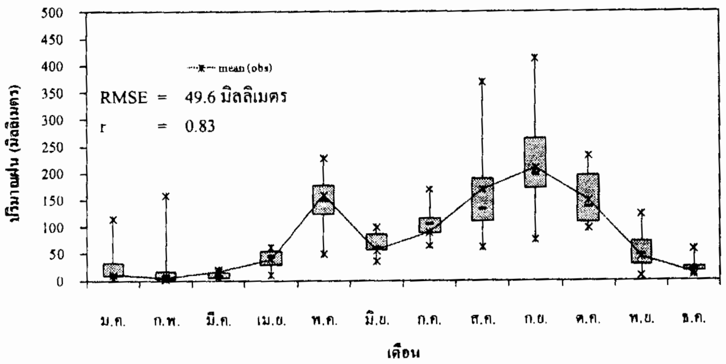


ภาพผนวกที่ ค11 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17162

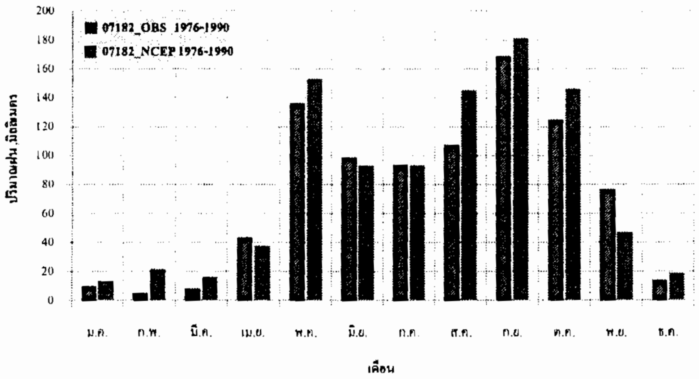


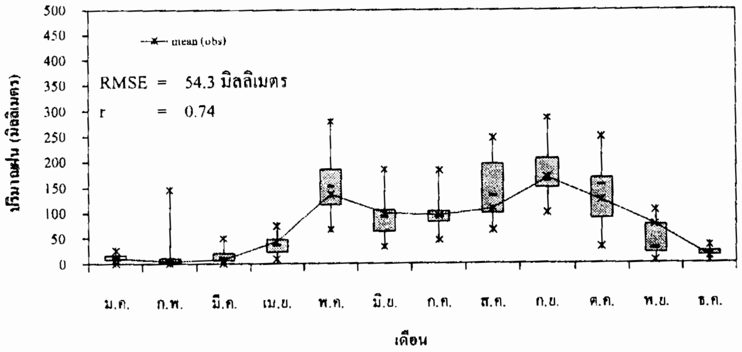
ภาพผนวกที่ ค12 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17162



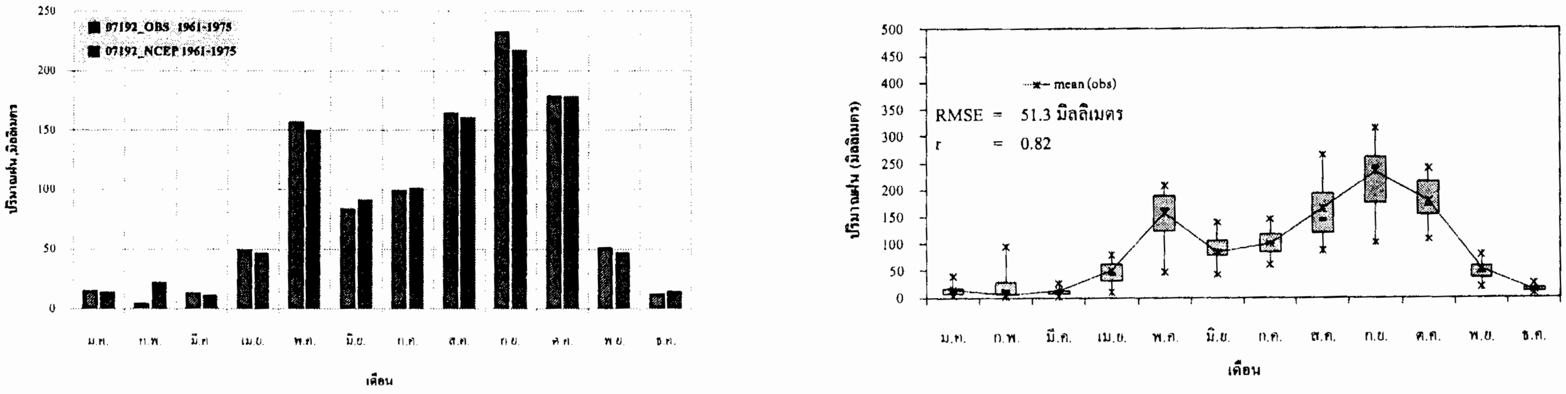


ภาพผนวกที่ ค13 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17182

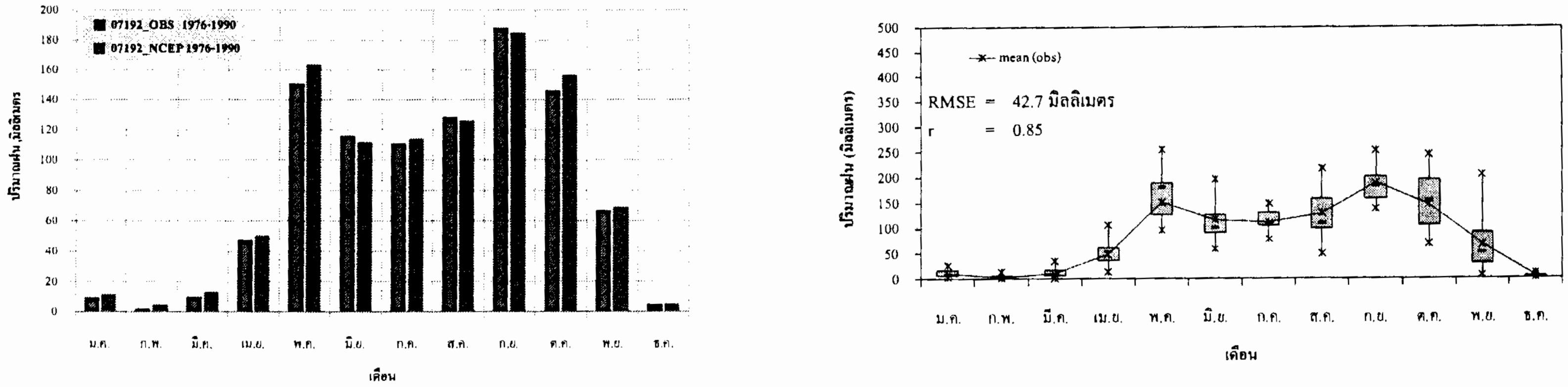




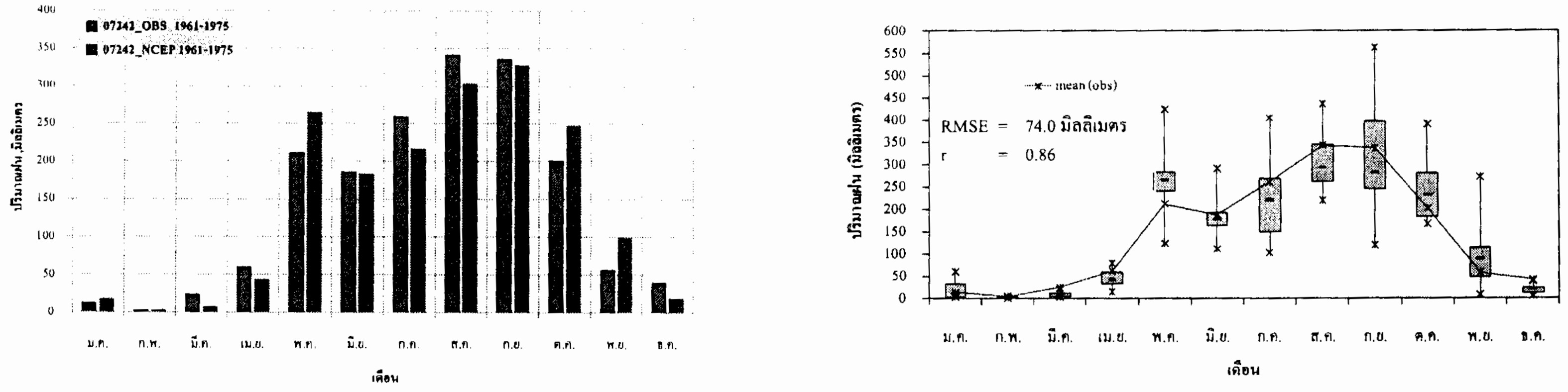
ภาพผนวกที่ ค14 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17182



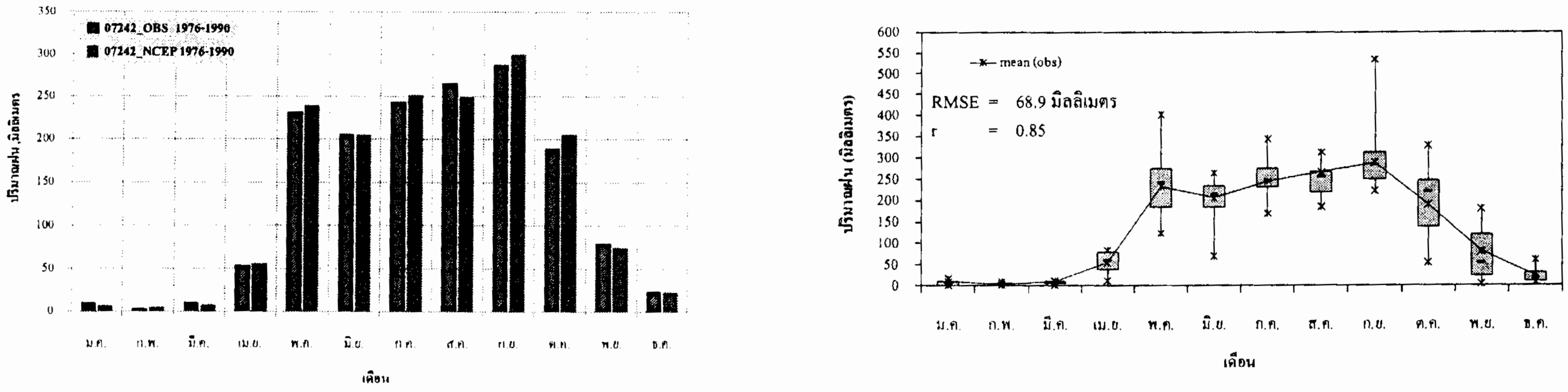
ภาพผนวกที่ ค15 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17192



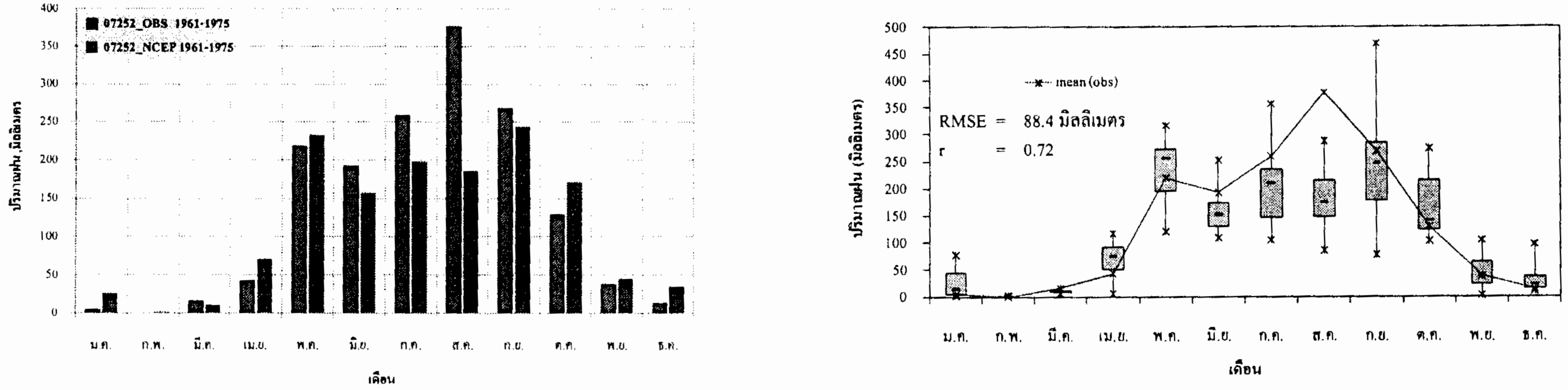
ภาพผนวกที่ ค16 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17192



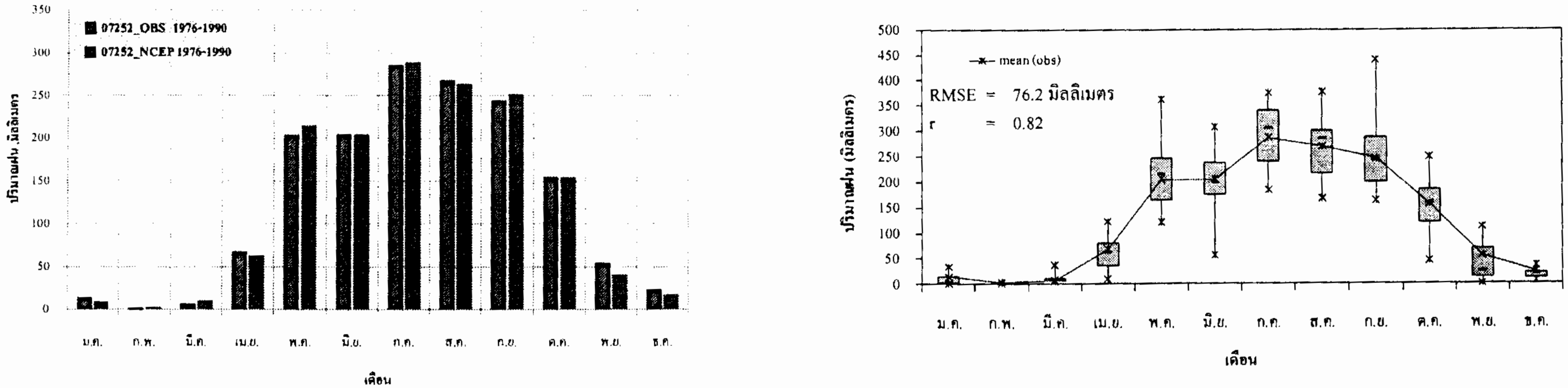
ภาพผนวกที่ ค17 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07242



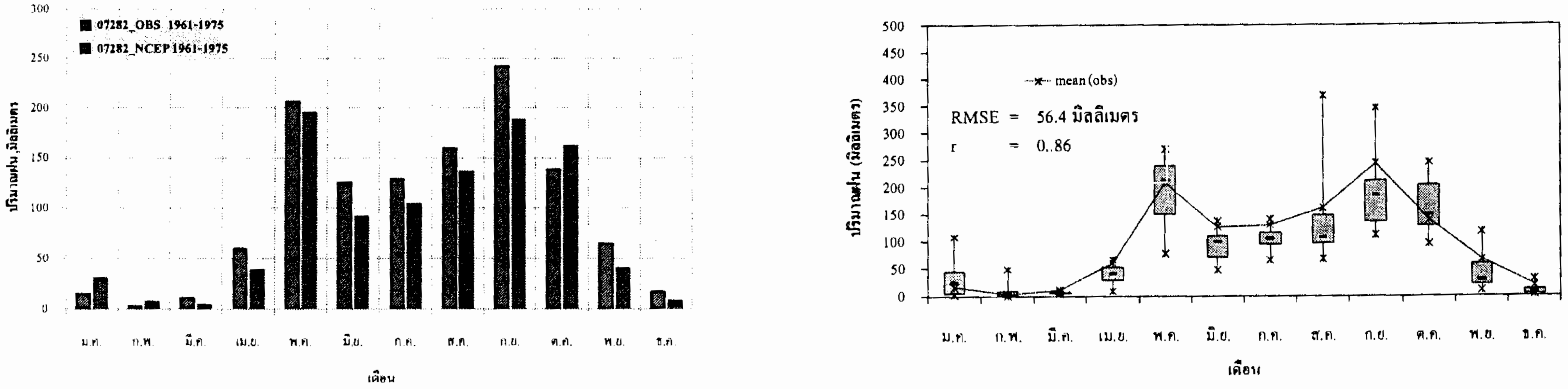
ภาพผนวกที่ ค18 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07242



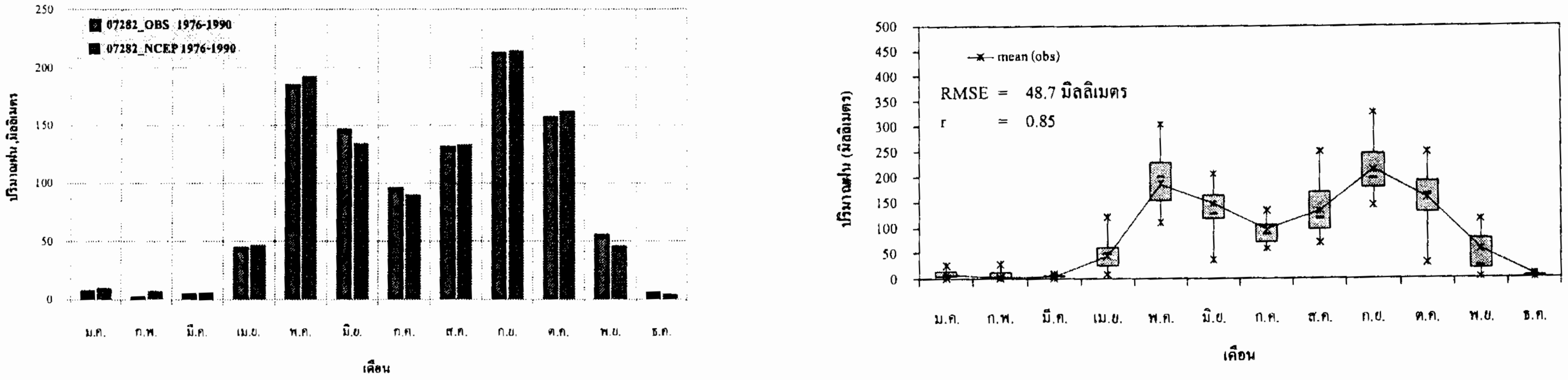
ภาพผนวกที่ ค19 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07252



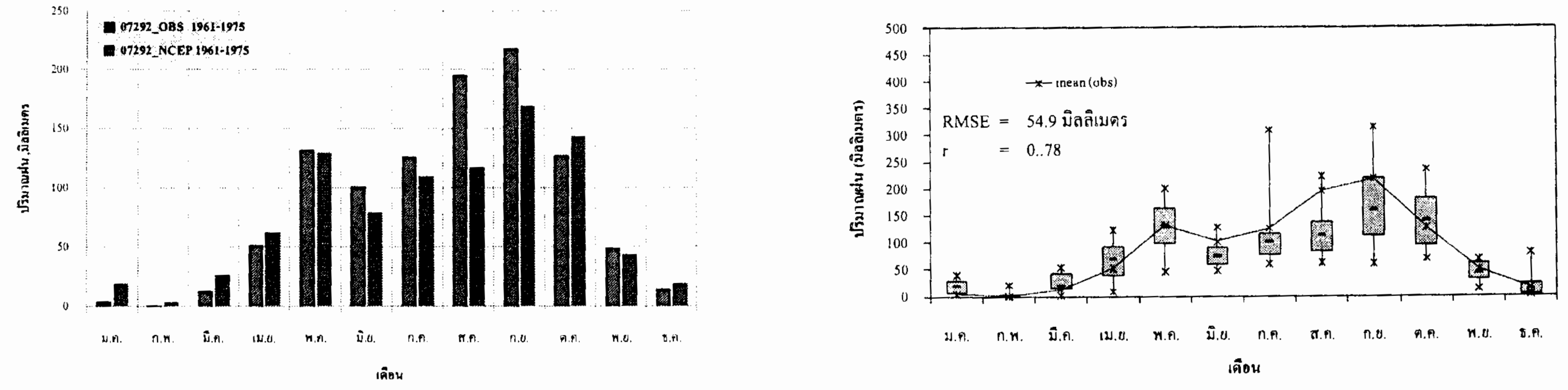
ภาพผนวกที่ ค20 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07252



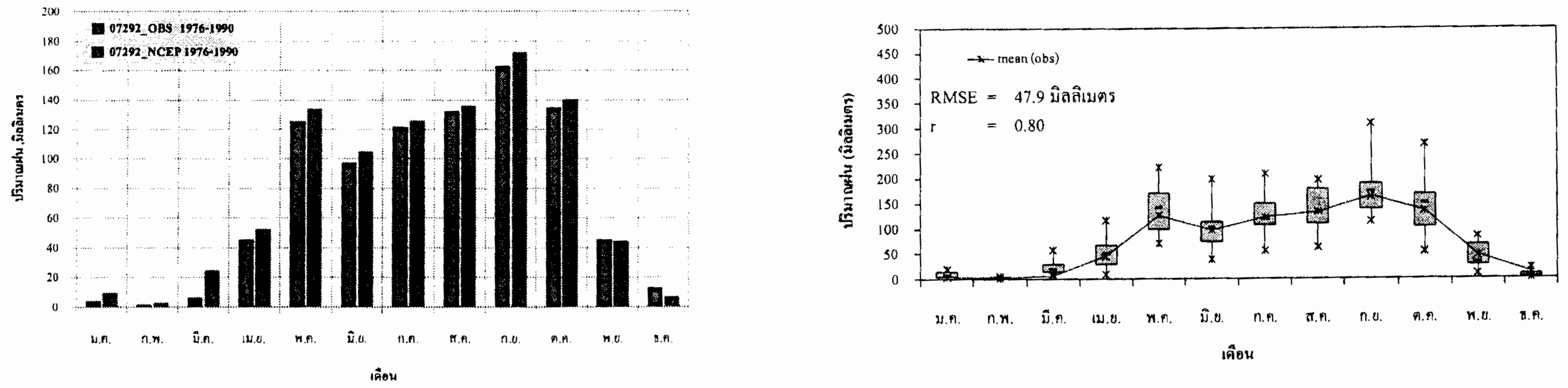
ภาพผนวกที่ ค21 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07282



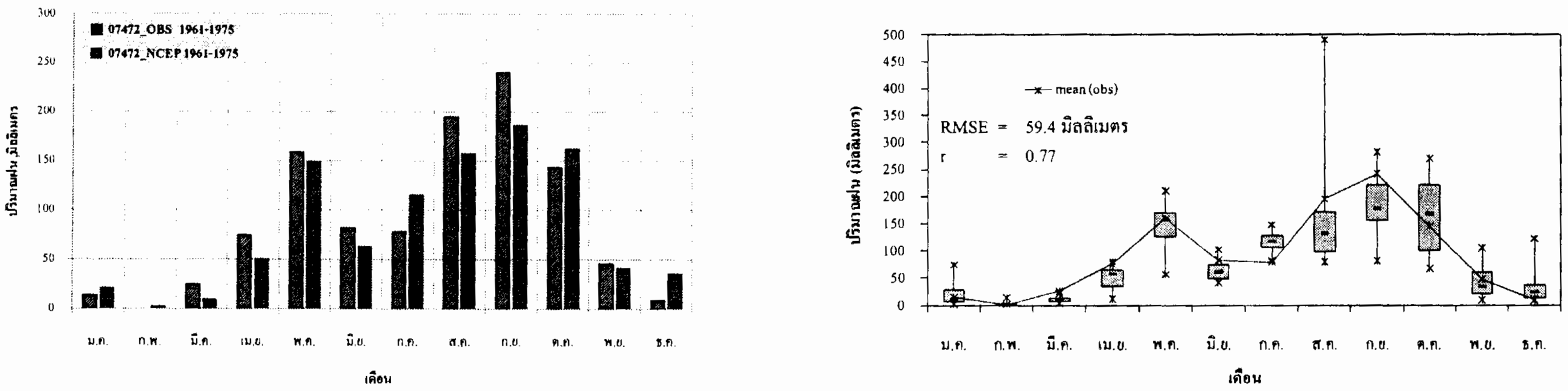
ภาพผนวกที่ ค22 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07282



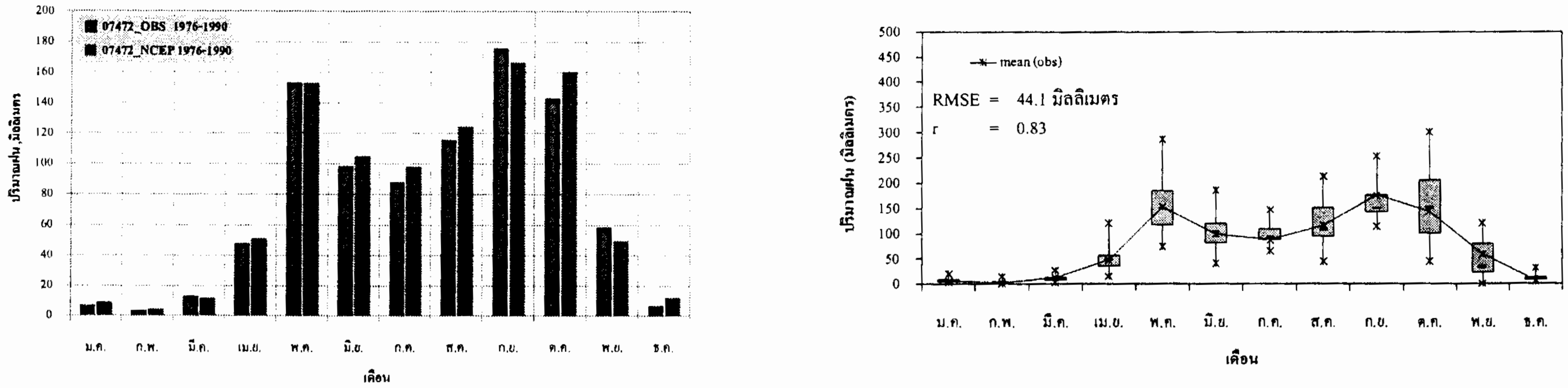
ภาพผนวกที่ ค23 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07292



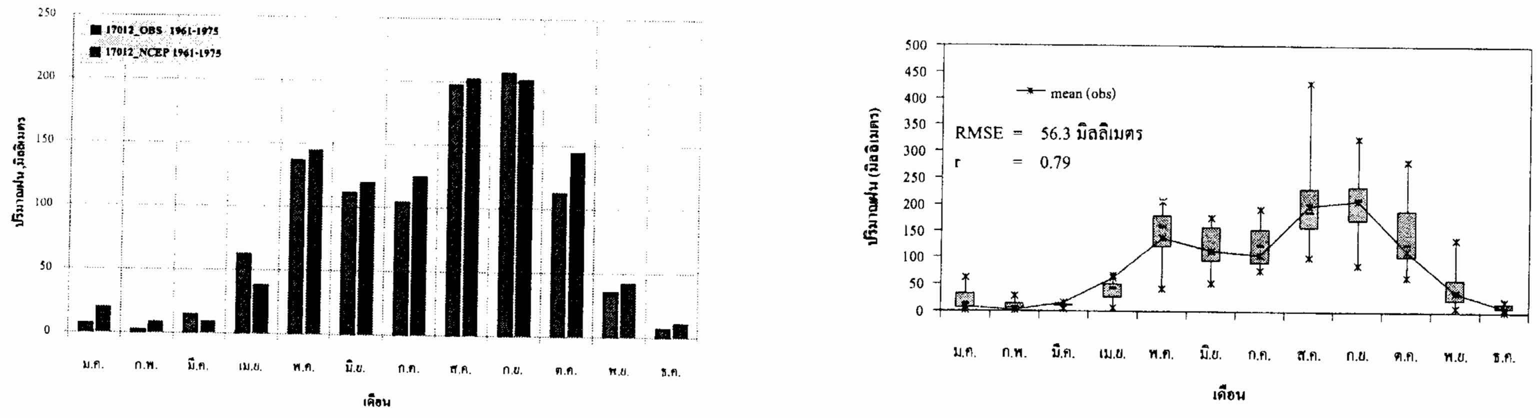
ภาพผนวกที่ ค24 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07292



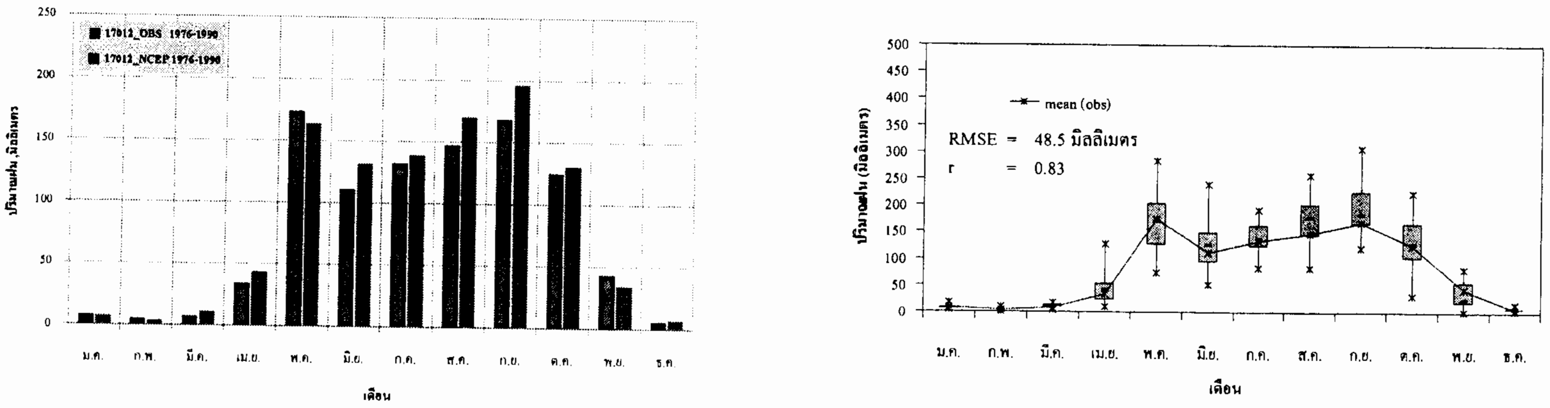
ภาพผนวกที่ ค25 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 07472



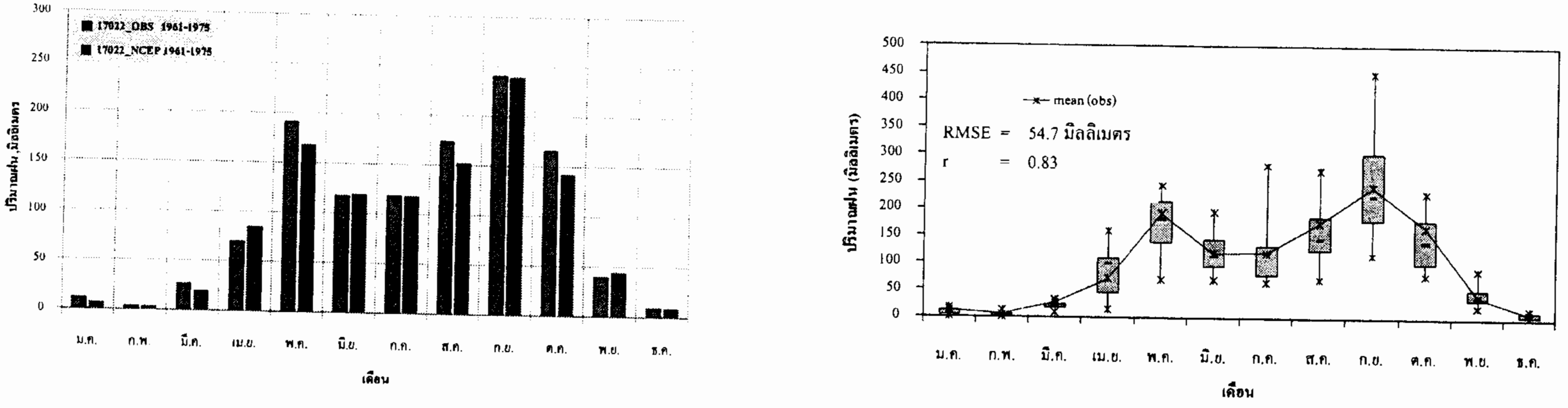
ภาพผนวกที่ ค26 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 07472



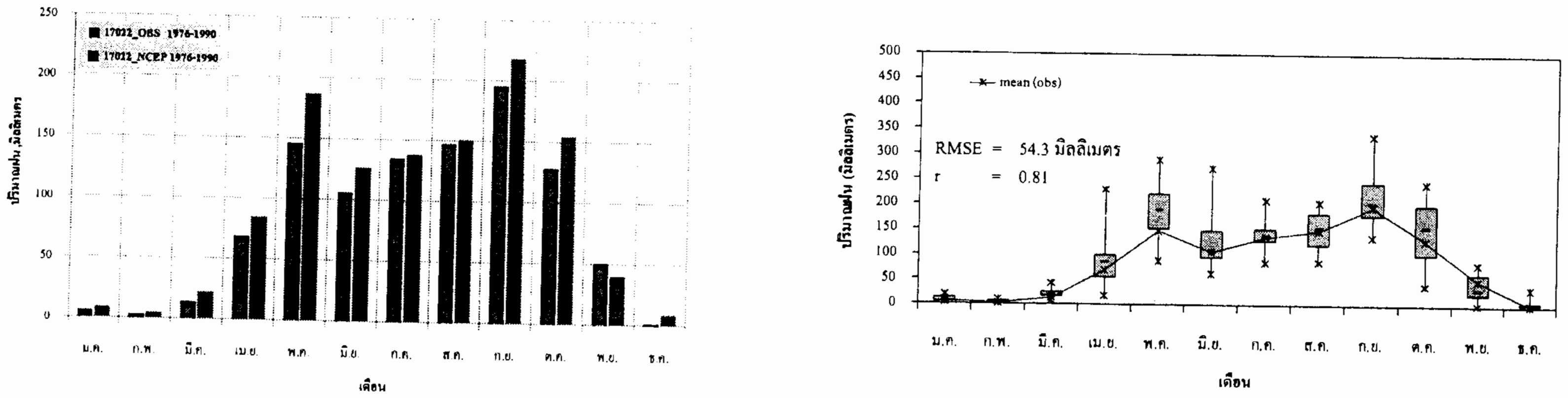
ภาพผนวกที่ ค27 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17012



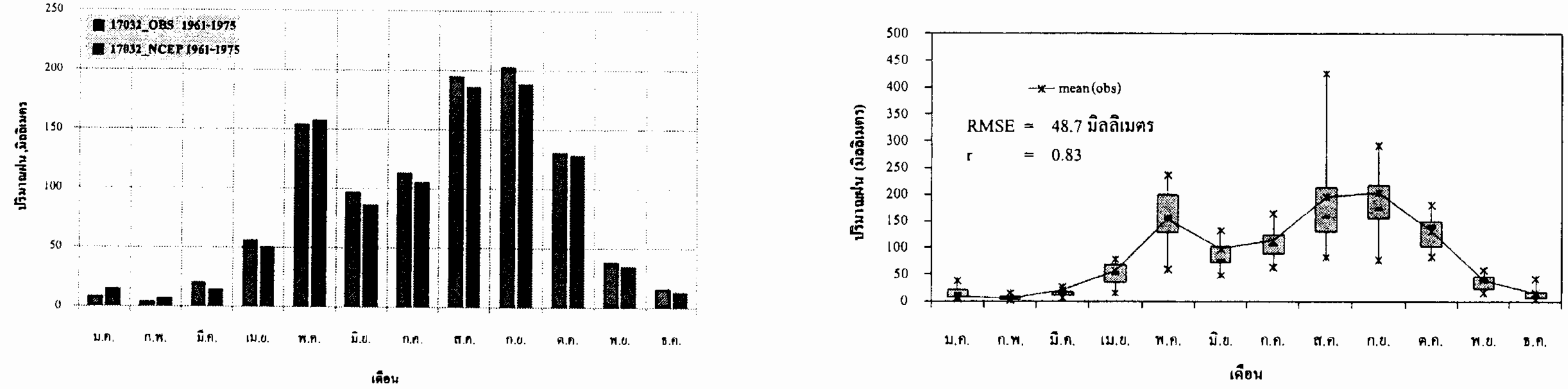
ภาพผนวกที่ ค28 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17012



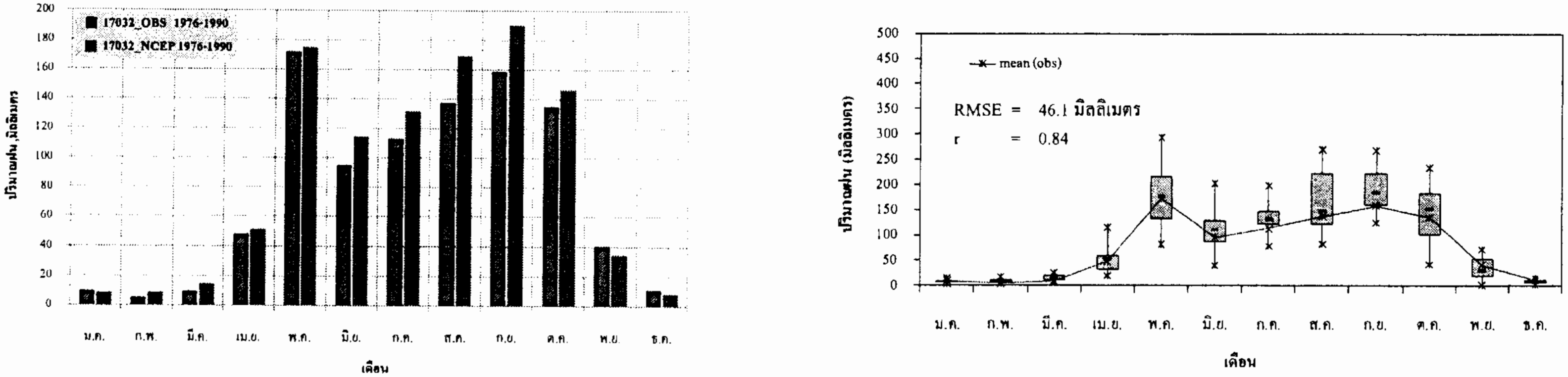
ภาพผนวกที่ ค29 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17022



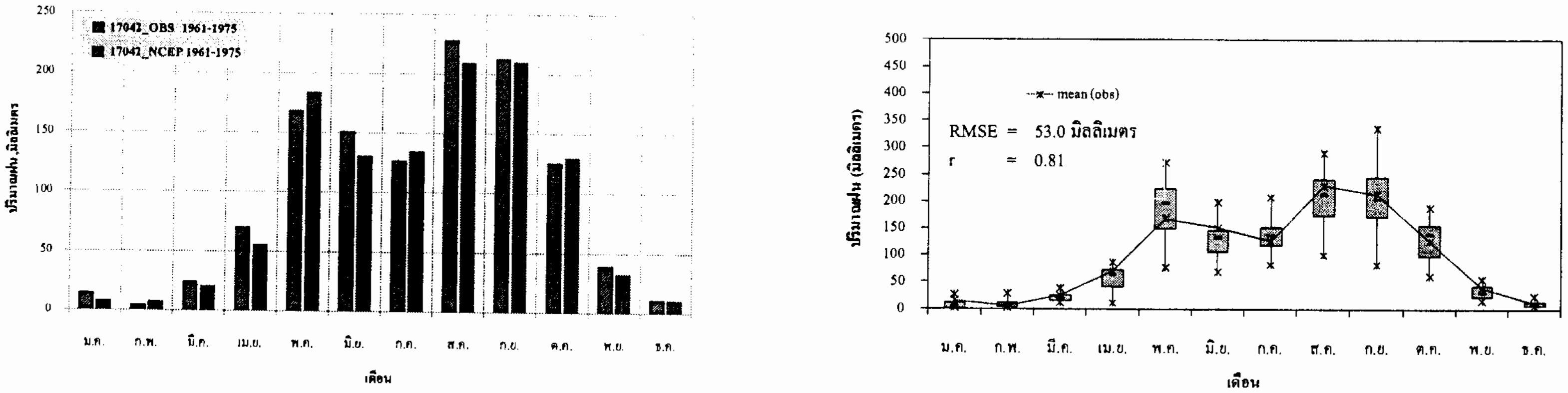
ภาพผนวกที่ ค30 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17022



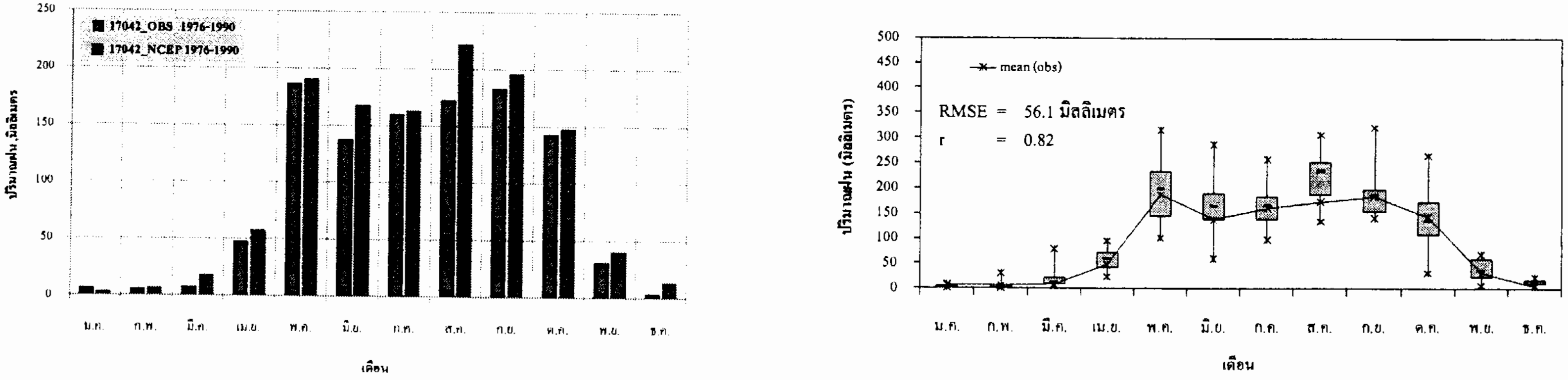
ภาพผนวกที่ ค31 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17032



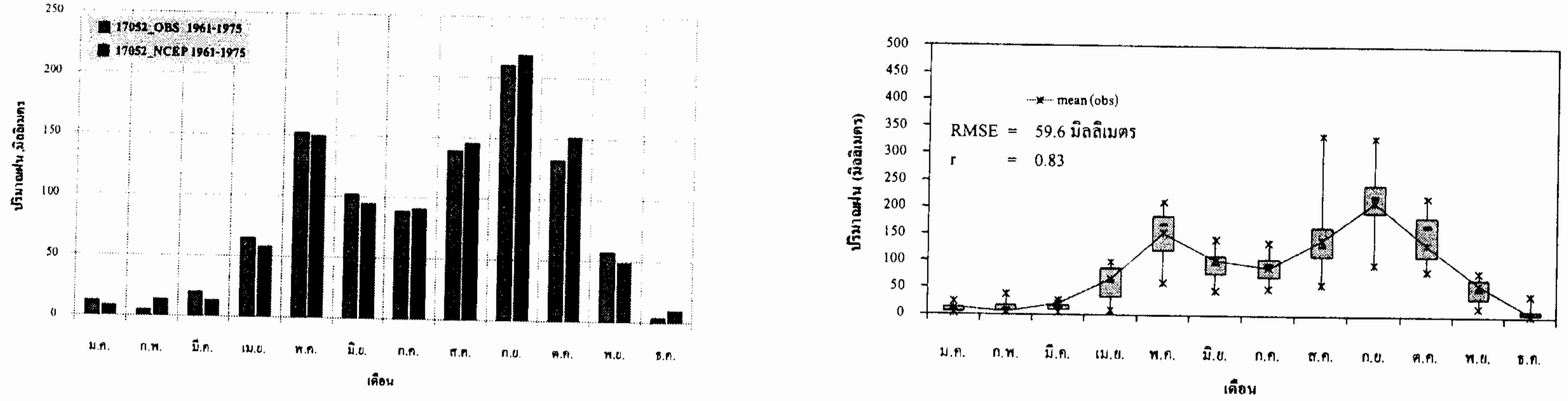
ภาพผนวกที่ ค32 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17032



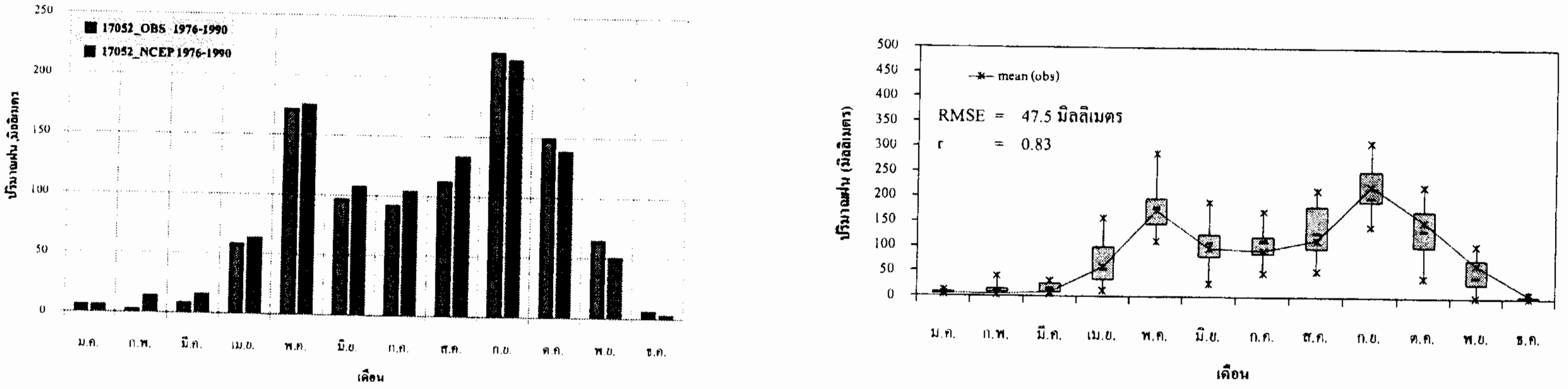
ภาพผนวกที่ ค33 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17042



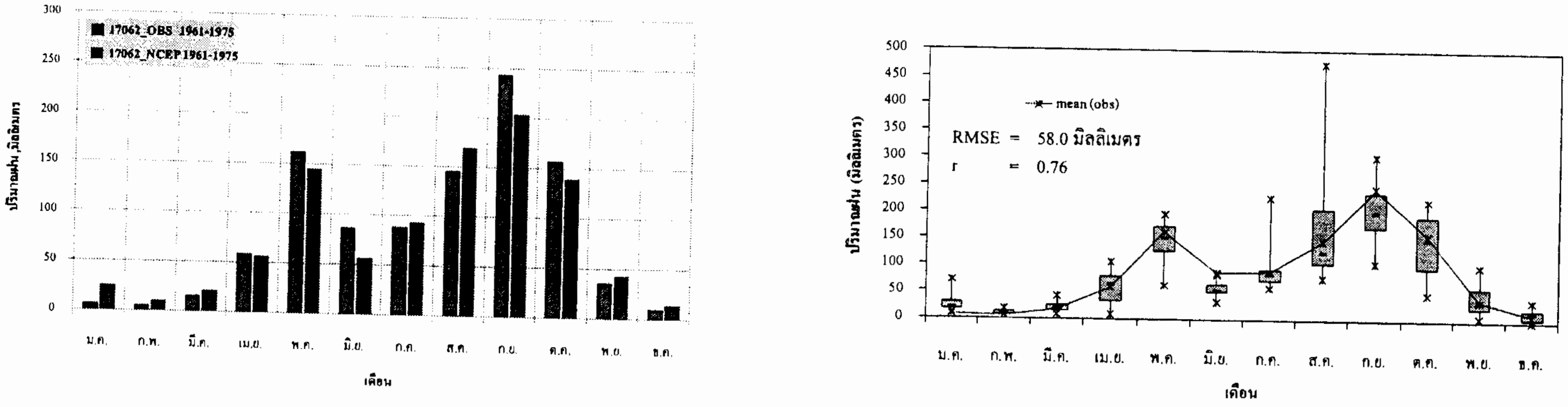
ภาพผนวกที่ ค34 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17042



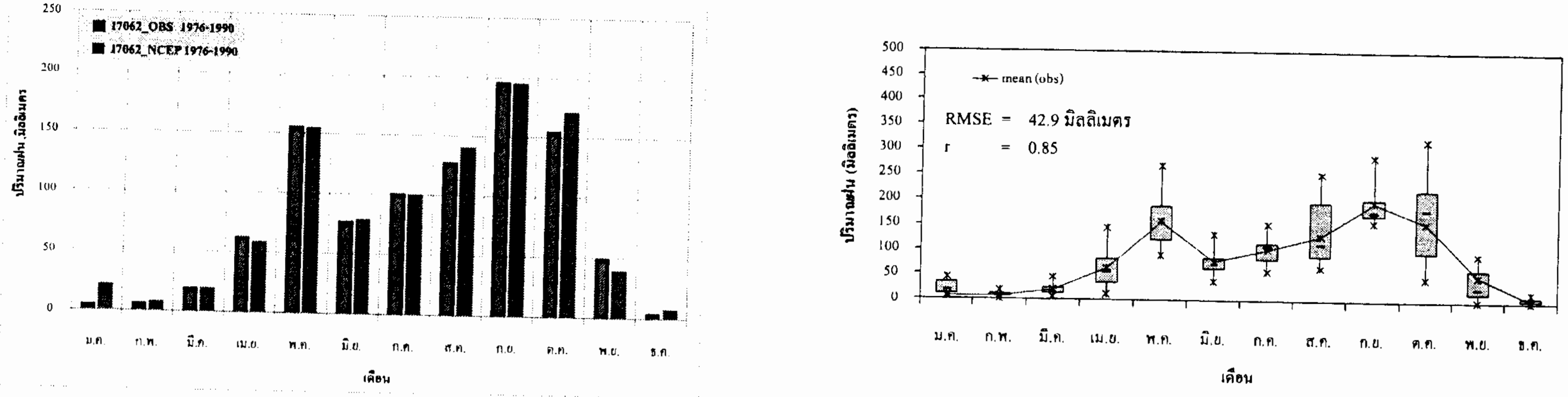
ภาพผนวกที่ ค35 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17052



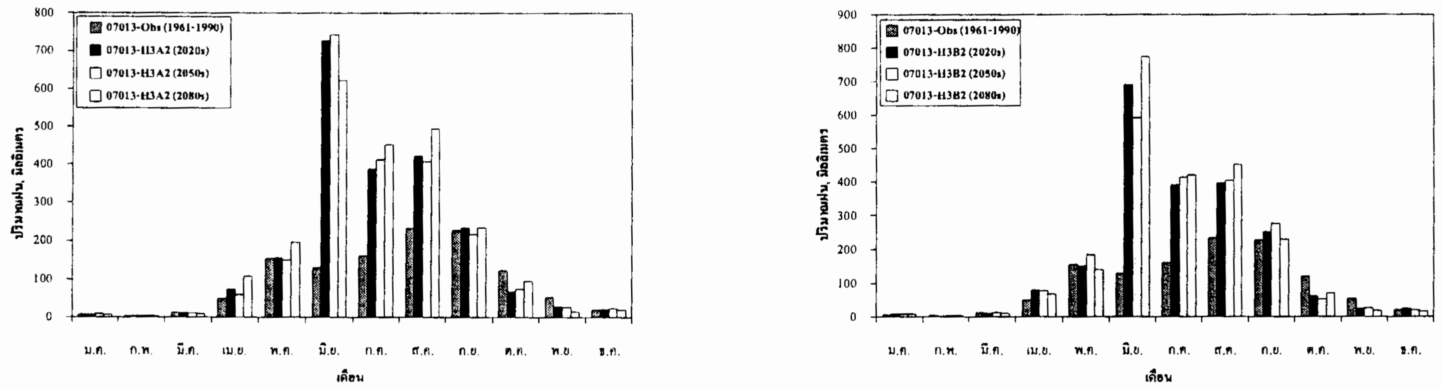
ภาพผนวกที่ ค36 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17052



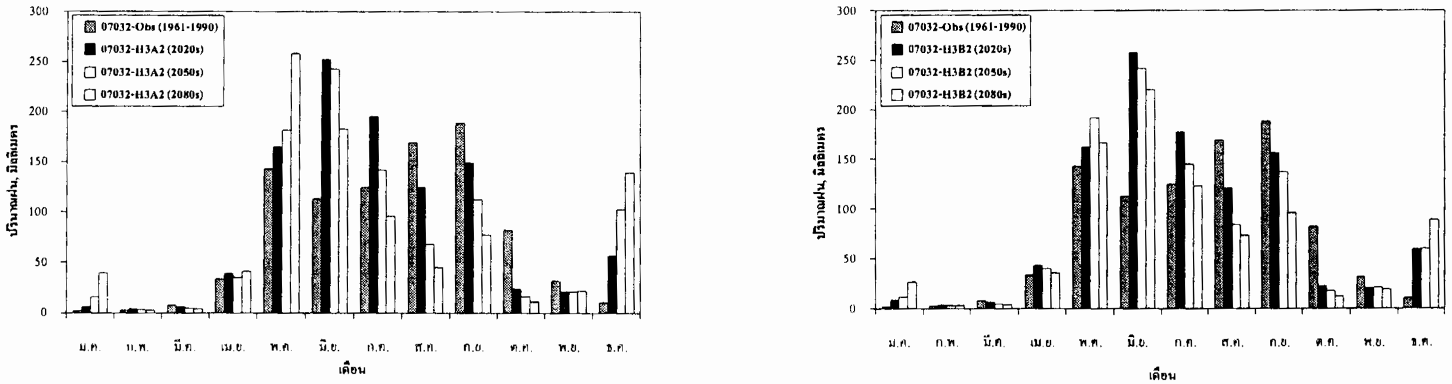
ภาพผนวกที่ ค37 ผลการสอบเทียบ (calibration) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1961-1975 ของสถานีวัด 17062



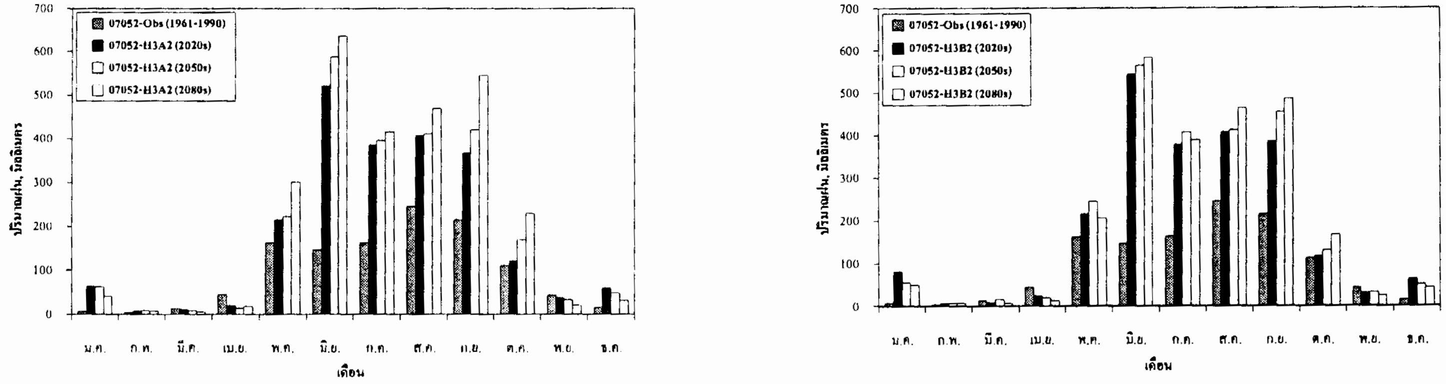
ภาพผนวกที่ ค38 ผลการตรวจพิสูจน์ (validation) แบบจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยช่วงปี ค.ศ.1976-1990 ของสถานีวัด 17062



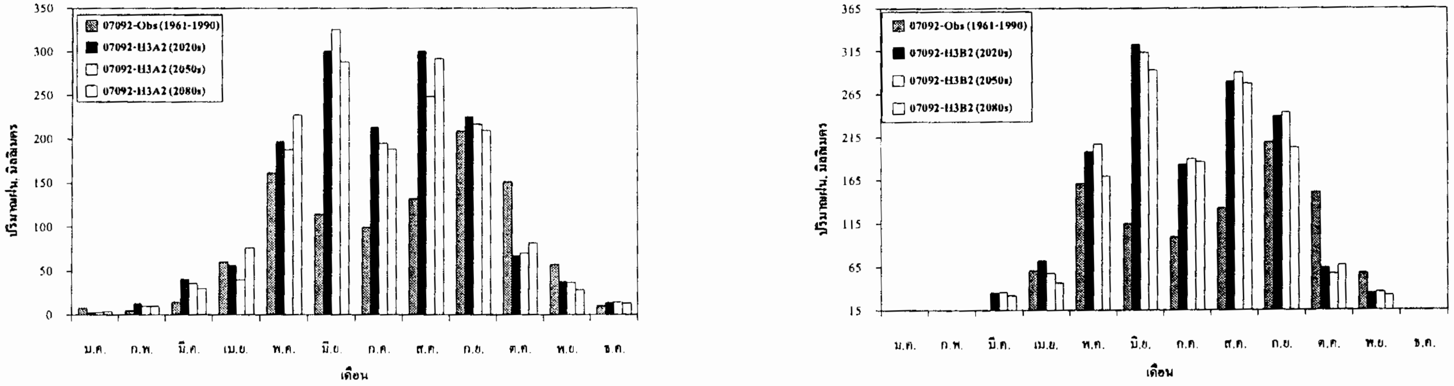
ภาพผนวกที่ ค39 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07013 แบบ A2 และ B2



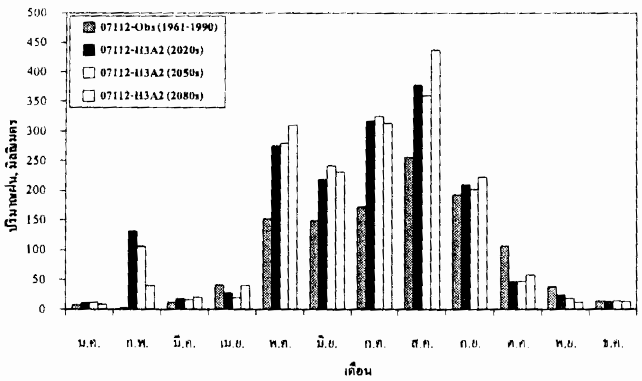
ภาพผนวกที่ ค40 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07032 แบบ A2 และ B2

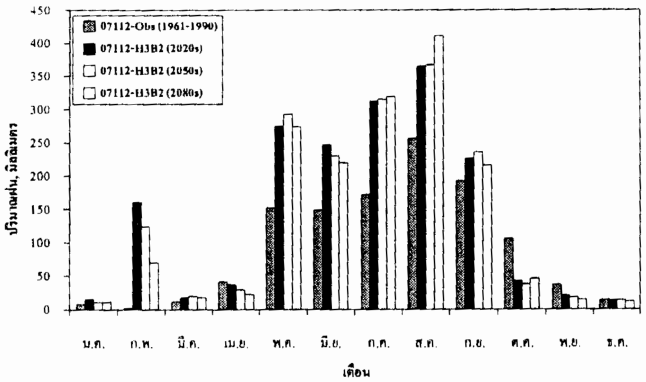


ภาพผนวกที่ ค41 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07052 แบบ A2 และ B2

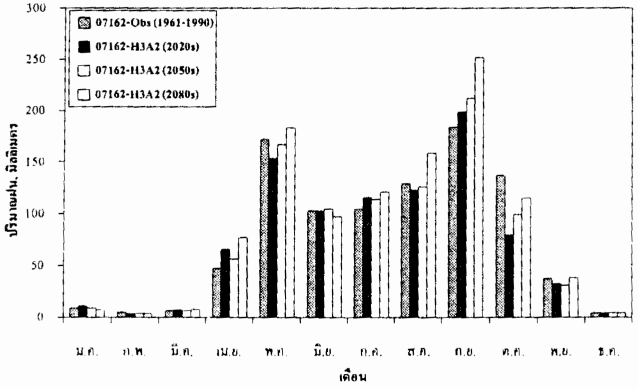


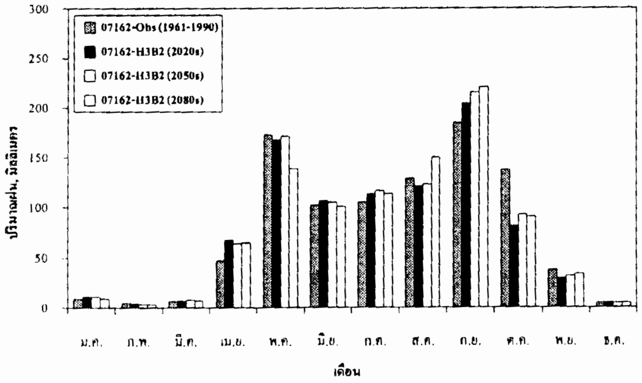
ภาพผนวกที่ ค42 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07092 แบบ A2 และ B2



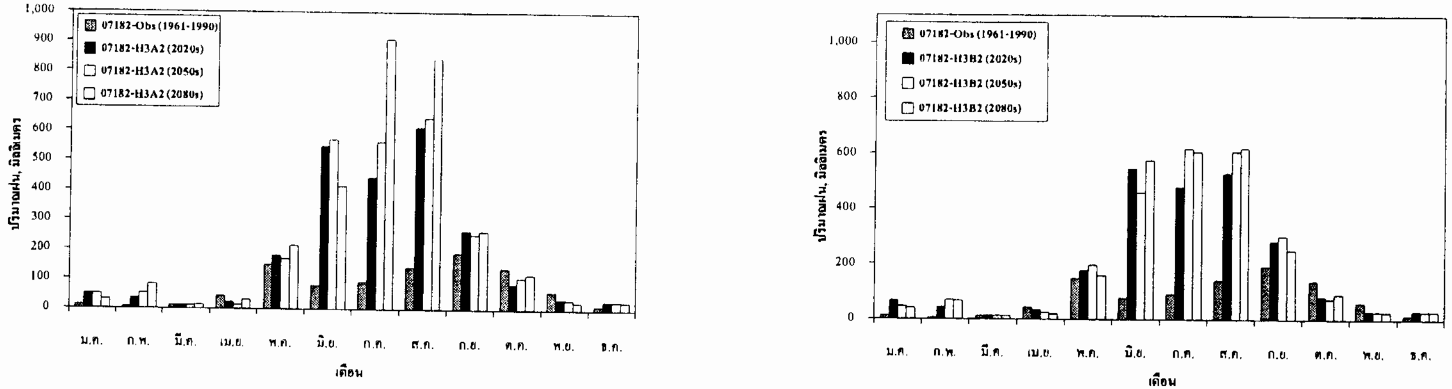


ภาพผนวกที่ ค43 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07112 แบบ A2 และ B2

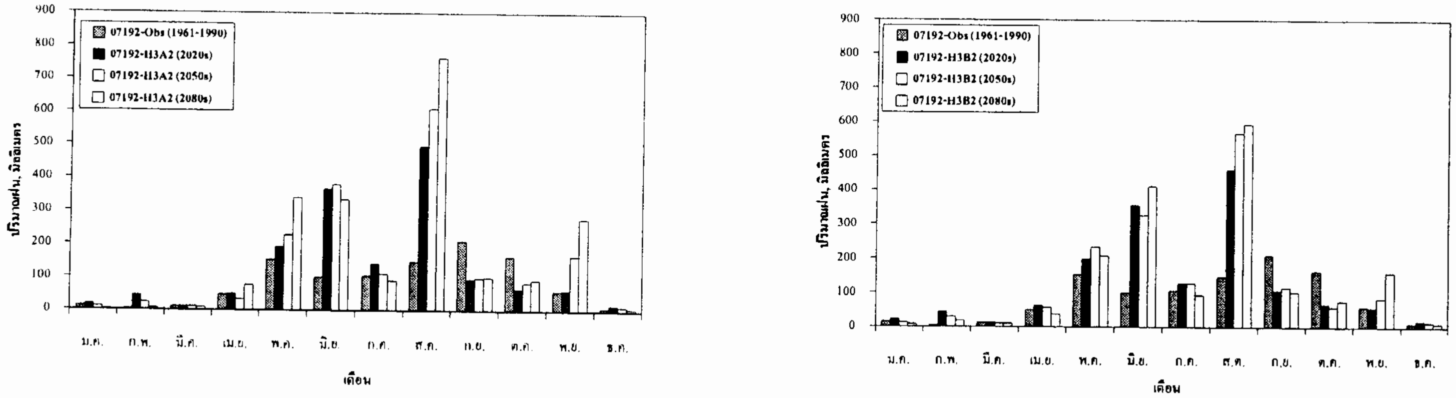




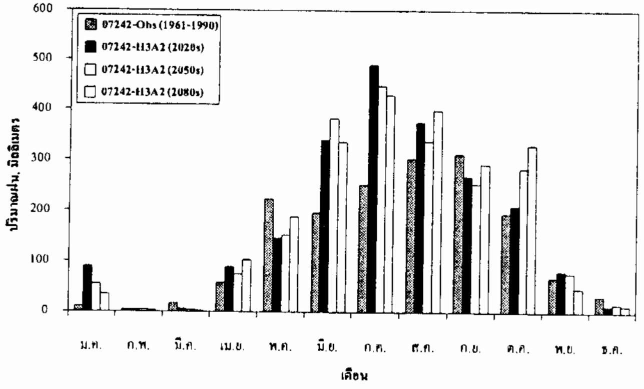
ภาพผนวกที่ ค44 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07162 แบบ A2 และ B2

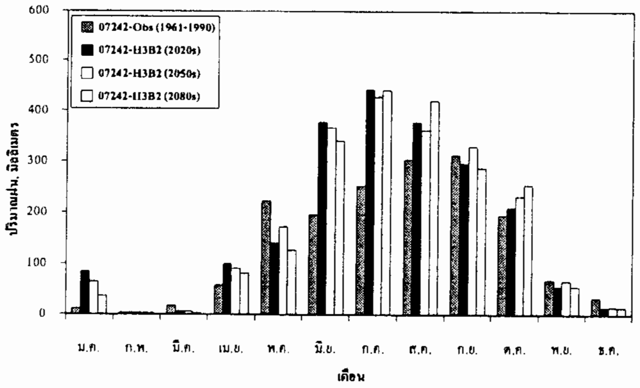


ภาพผนวกที่ ค45 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07182 แบบ A2 และ B2

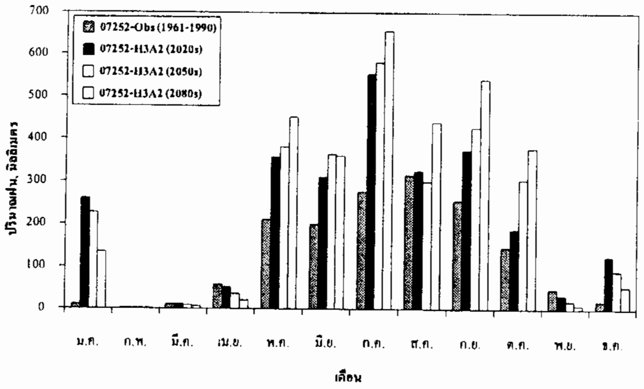


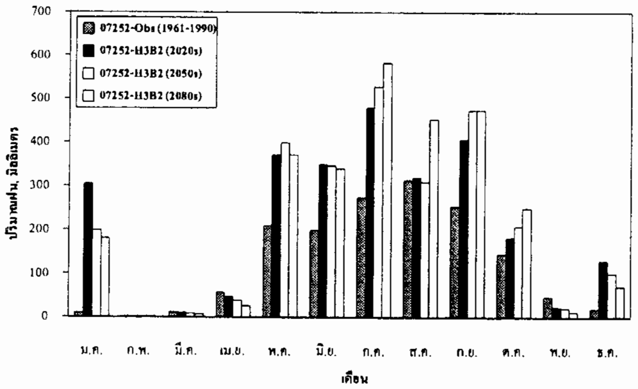
ภาพผนวกที่ ค46 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07192 แบบ A2 และ B2



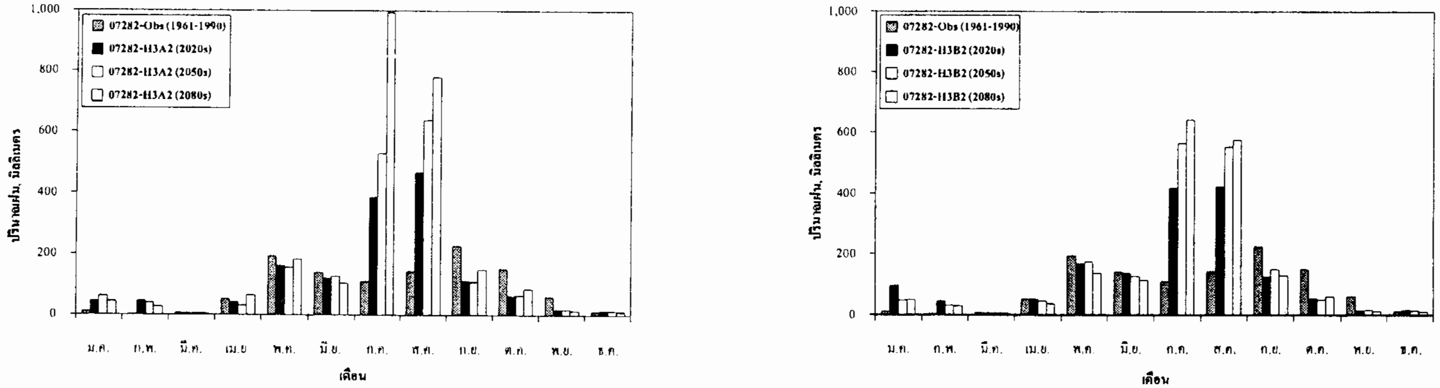


ภาพผนวกที่ ค47 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07242 แบบ A2 และ B2

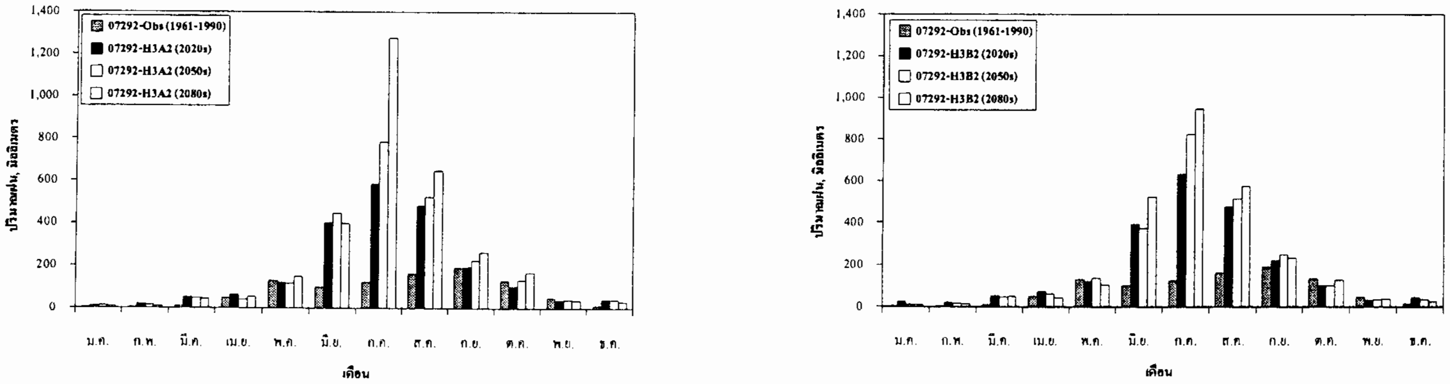




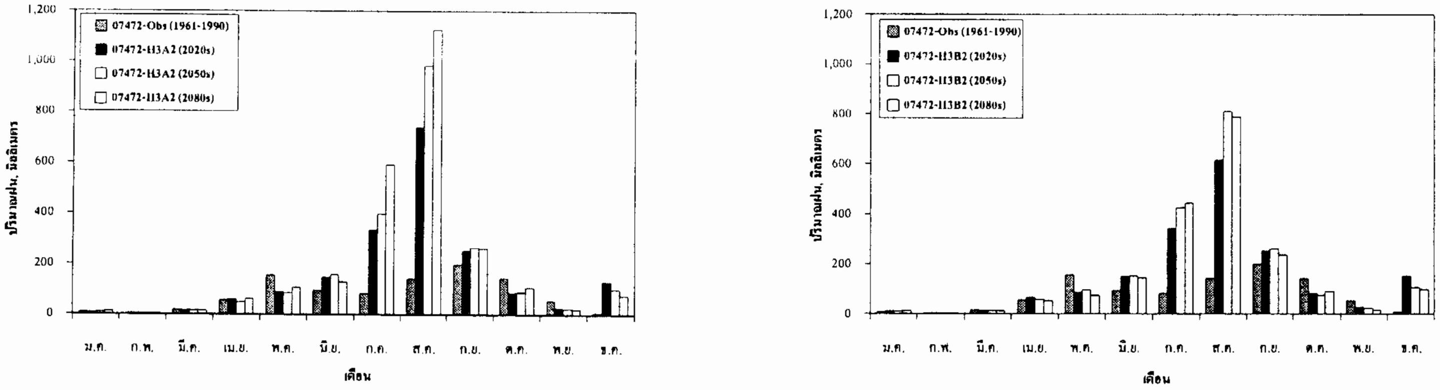
ภาพผนวกที่ ค48 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07252 แบบ A2 และ B2



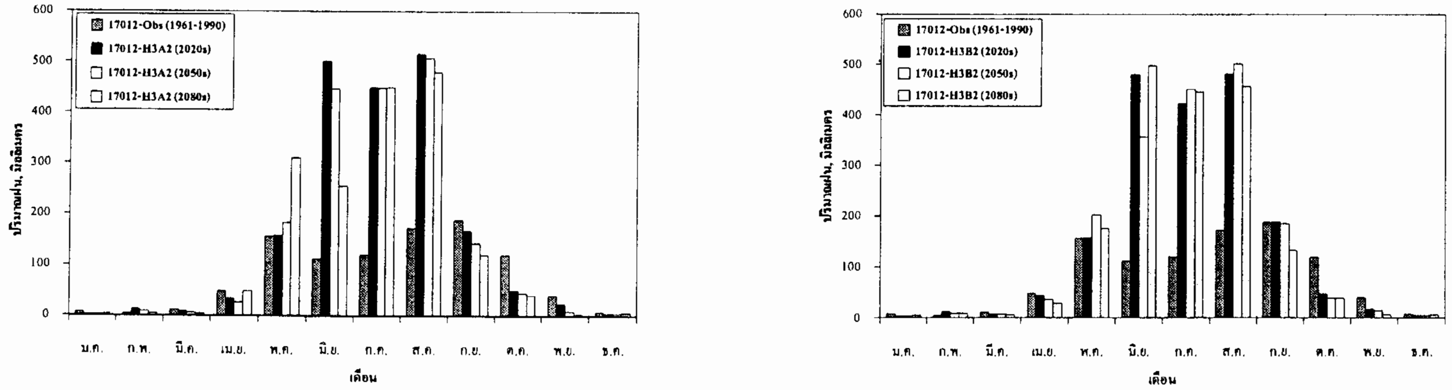
ภาพผนวกที่ ค49 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07282 แบบ A2 และ B2



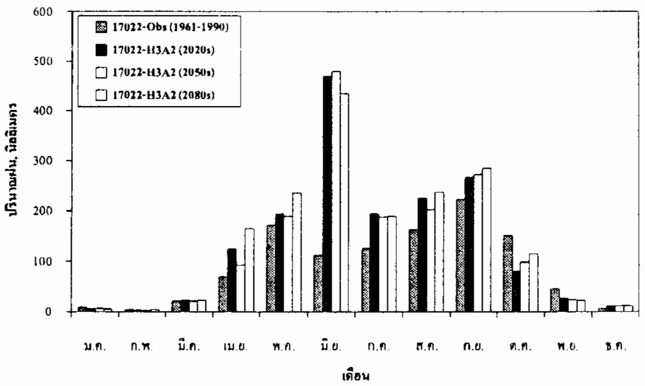
ภาพผนวกที่ ค50 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07292 แบบ A2 และ B2

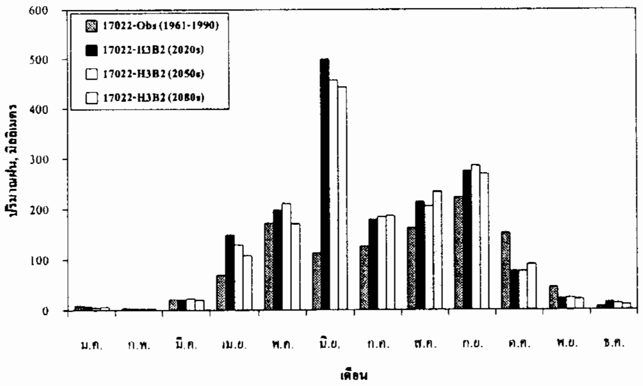


ภาพผนวกที่ ค51 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 07472 แบบ A2 และ B2

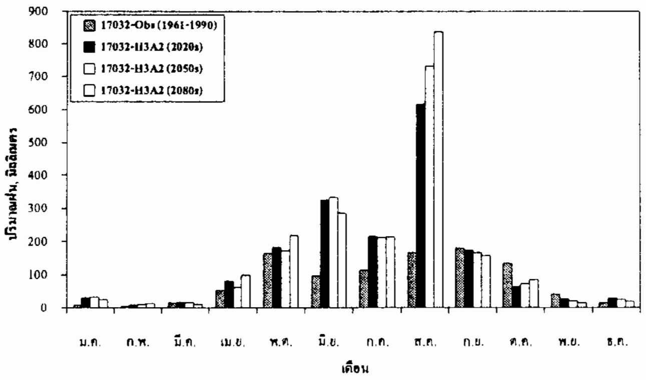


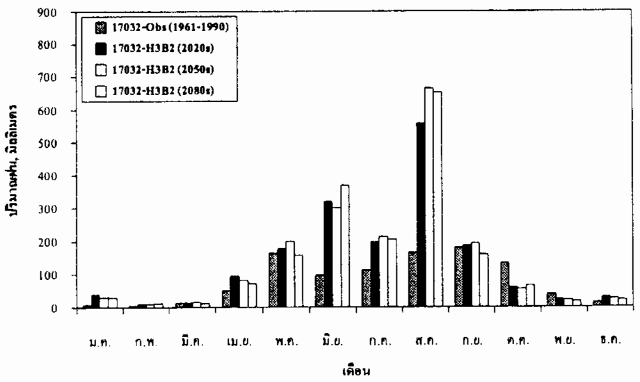
ภาพผนวกที่ ค52 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17012 แบบ A2 และ B2



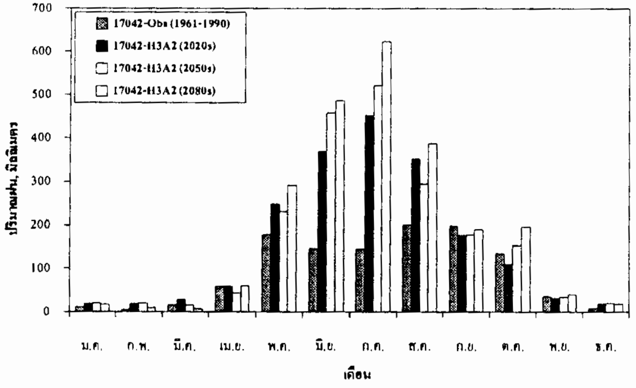


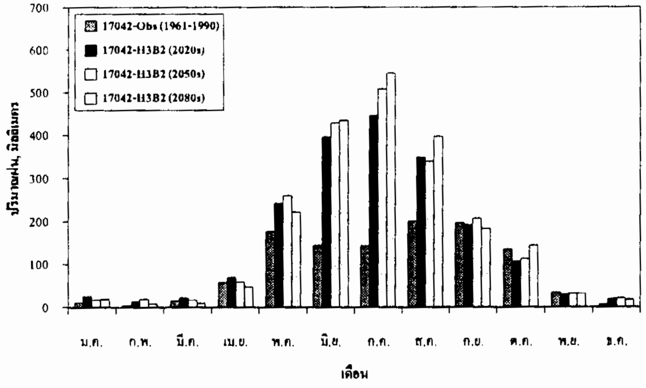
ภาพผนวกที่ ค53 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17022 แบบ A2 และ B2



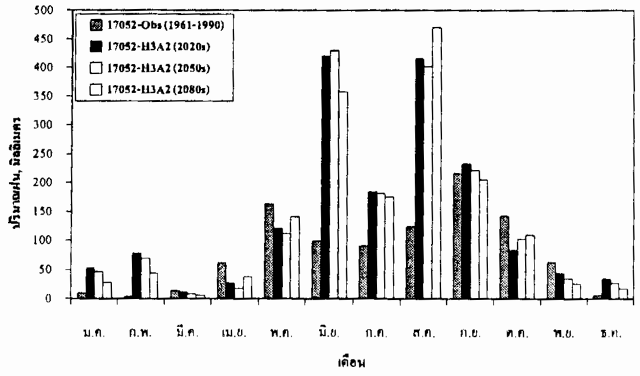


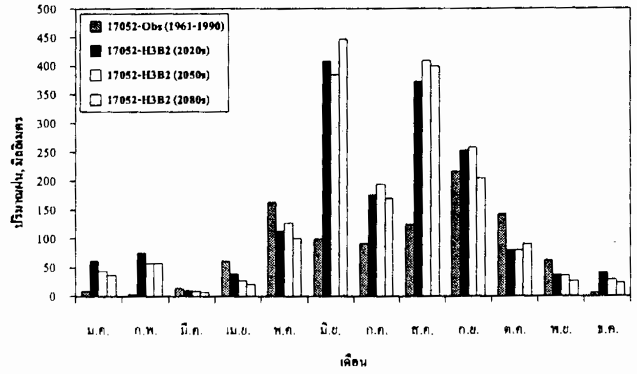
ภาพผนวกที่ ค54 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17032 แบบ A2 และ B2



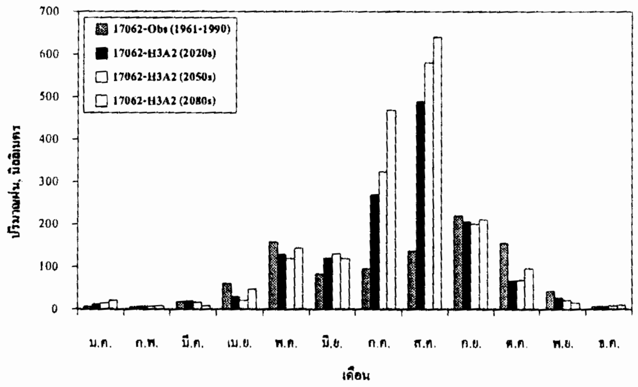


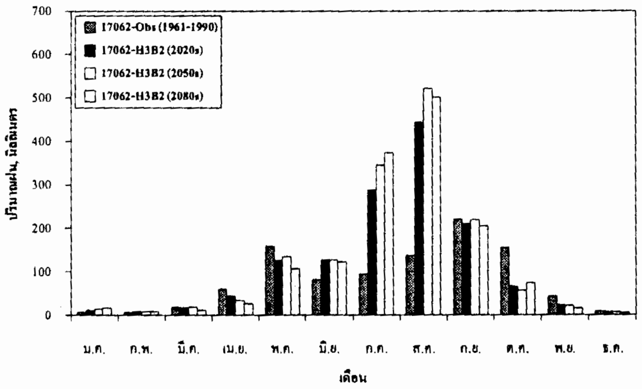
ภาพผนวกที่ ค55 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17042 แบบ A2 และ B2



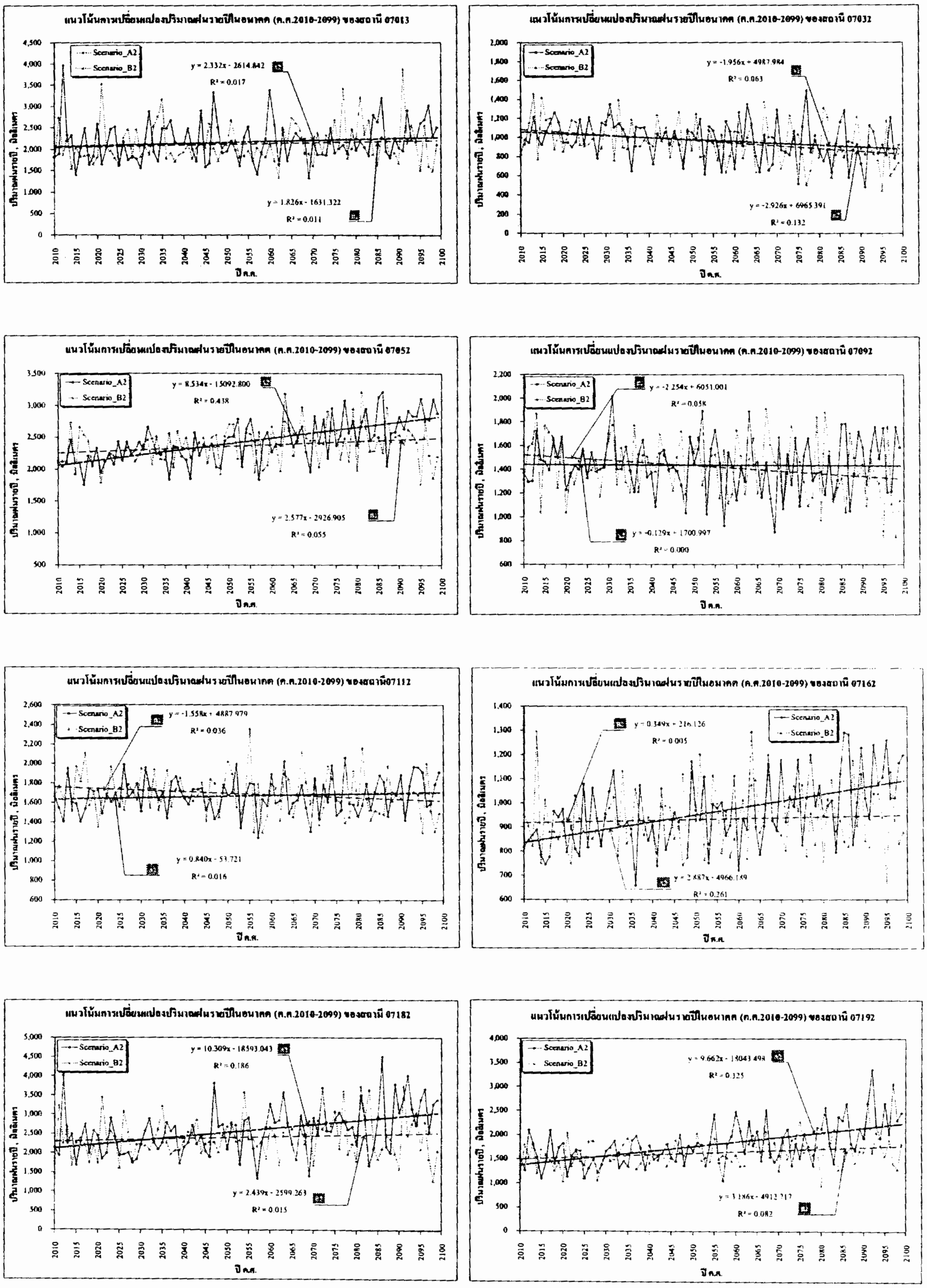


ภาพผนวกที่ ค56 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17052 แบบ A2 และ B2

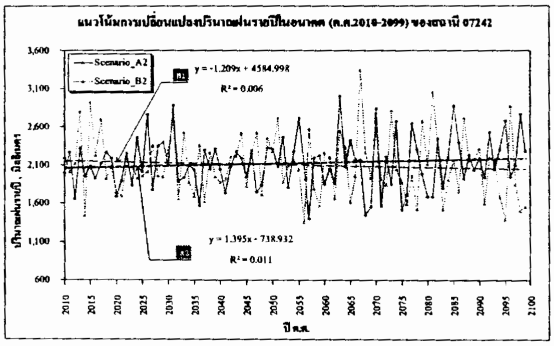


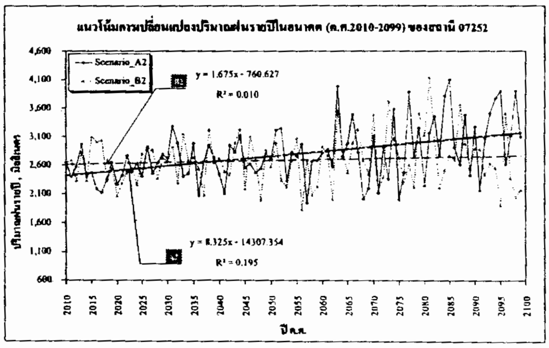


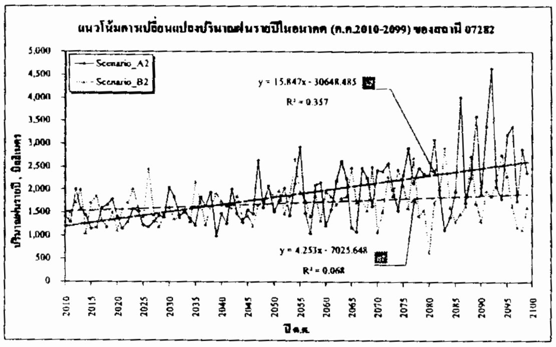
ภาพผนวกที่ ค57 การเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยในทศวรรษต่าง ๆ ของสถานีวัด 17062 แบบ A2 และ B2

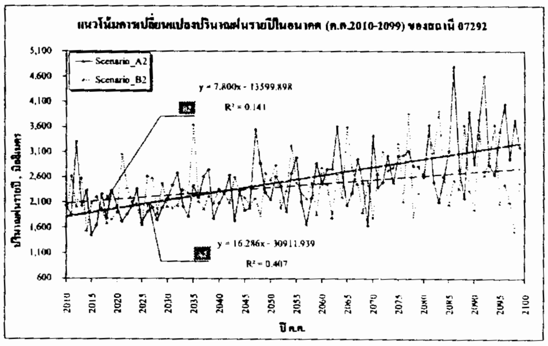


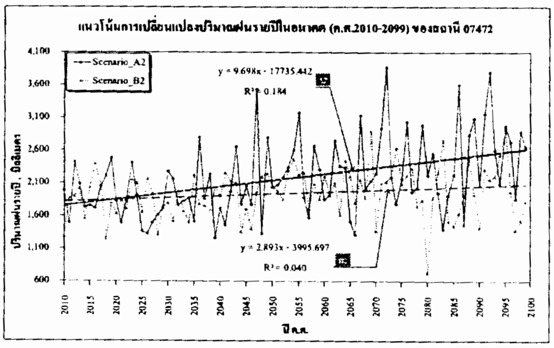
ภาพผนวกที่ ค58 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนรายปีในอนาคต (ปี ค.ศ.2010-2099) ของสถานีต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

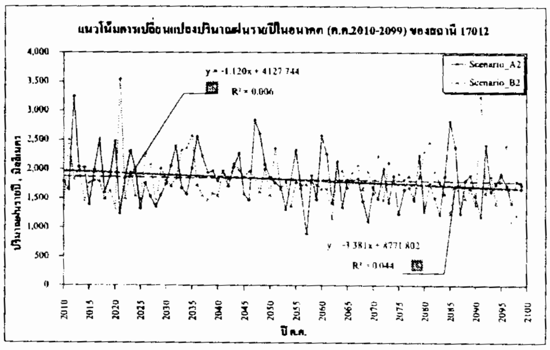


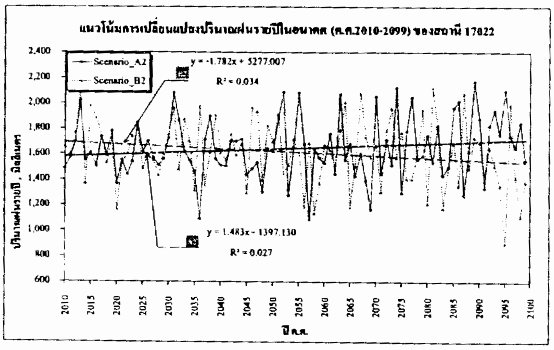


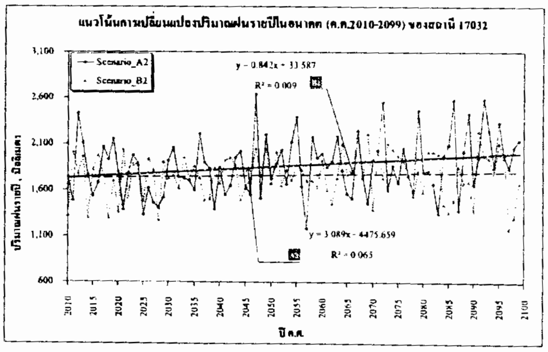




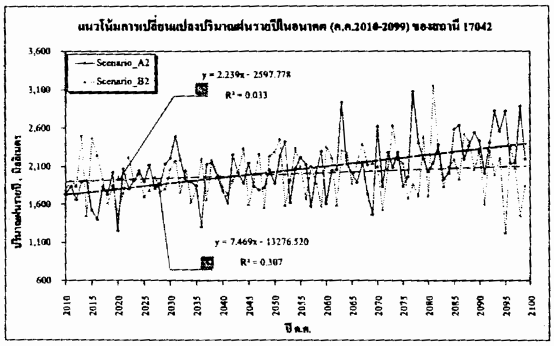


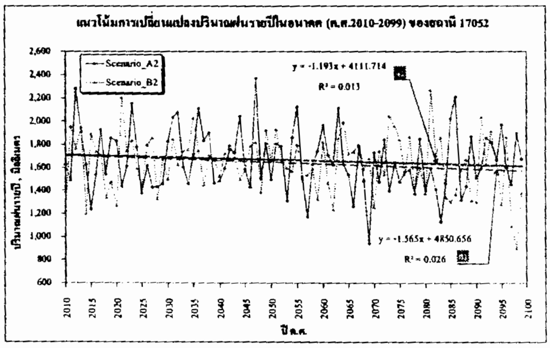


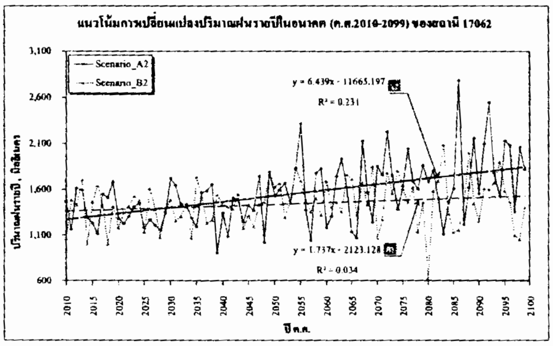




ภาพผนวกที่ ค58 (ต่อ)







ภาพผนวกที่ ค58 (ต่อ)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายเทวิน พริกมาก
เกิดวันที่	5 กันยายน 2521
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรแหล่งน้ำ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท จัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก จำกัด (มหาชน)

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -