การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทย

An Investigation on Temperature Variation for the River Basins in Northern and Central Thailand

เอกนรินทร์ สุขเกษม[1] และนุชนารถ ศรีวงศิตานนท์[2]

[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (eknarin-s@hotmail.com)
[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (fengnns@ku.ac.th)

บทคัดย่อ

การศึกษาด้านเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสามารถดำเนินการได้โดยการใช้เทคนิคการดาวน์สเกล โดยการนำตัวแปรภูมิอากาศที่เป็นผลจากการประเมินโดยแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่มีการดำเนินงานในสเกลที่หยาบมาใช้เพื่อประเมินผลลัพธ์ให้อยู่ในสเกลที่เล็กลงของพื้นที่ลุ่มน้ำ สำหรับในการศึกษานี้ ได้นำวิธีการดาวน์สเกลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์การถดถอย มาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตของลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย ลุ่มน้ำปิง วัง ยม น่าน เจ้าพระยา ป่าสัก สะแกกรัง และ ท่าจีน โดยได้คัดเลือกสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำเหล่านี้ จำนวน 13 สถานี มาทำการศึกษา โดยการนำข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศโลกประเภทรีอนาไลซีส (reanalysis) รายวันจากหน่วยงาน NCEP/NCAR ที่มีขนาดกริดข้อมูล 2.5°×2.5° มาใช้เพื่อหาสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยที่สถานีตรวจอากาศ โดยข้อมูลระหว่างปี **ค.ศ.**1960-1989 และ ระหว่างปี ค.ศ.1991-2005 นำมาใช้เพื่อการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์ความสัมพันธ์ ตามลำดับ จากนั้นจึงนำข้อมูลภูมิอากาศในอนาคตจากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ของประเทศเยอรมัน **(**ขนาดกริดข้อมูล 1.875°×1.875°**)** สำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP6.5 มาประกอบการประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตจนถึงปี ค.ศ. 2100 ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของสถานีเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสถานีที่ศึกษา ทั้งนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของทั้งลุ่มน้ำในระหว่างปี ค.ศ. 1960-2005 มีค่าประมาณ 27.3°C และสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.0°C, 29.0°C และ 29.6°C ตามลำดับ โดยลุ่มน้ำทางตอนเหนือ (บริเวณตอนบนของลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน) จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิที่ลดลง ในขณะที่ทางตอนกลางและตอนล่างมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณลุ่มน้ำสะแกกรังและเจ้าพระยาตอนบน

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, เทคนิคการดาวน์สเกลทางสถิติ, การวิเคราะห์การถดถอย, แบบจำลองภูมิอากาศโลก, อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน, ภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทย

Abstract

The study on climate change can be carried out using downscaling technique. The atmospheric variables estimated by the General Circulation Models (GMCs) operated on a course scale will be used to evaluate the output in a comparatively smaller river basin scale. In this study, statistical downscaling technique using regression analysis was used to predict future average temperature within the river basins in Northern and Central Thailand comprising Ping, Wang, Yom, Nan, Chao Phraya and Thachin River Basins. Thirteen meteorological stations belonged to Thailand Meteorological Department were selected for the study. Daily reanalysis climate data based on 2.5° ×2.5° grid obtained from NCEP/NCAR were used to create the relationships with the daily average temperature at the study stations. The data sets between 1960-1989 and 1991-2005 were used for model calibration and verification, respectively. Future atmospheric variables obtained from MPI-ESM-LR model belonged to Germany (1.875° ×1.875° grid size) under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were then applied to evaluate future average temperature until 2105. The results show that the average temperature at these study stations tend to increase compared to the historical values. The basin average temperature between 1960 and 2005 is approximately 27.3°C and will increase to be 28.0° C, 29.0° C and 29.6° C for each scenario, respectively. The temperature of the northern parts of the study basin (upper parts of Ping, Wang, Yom, and Nan Basins) will reduce while the middle and the

southern parts will increase, especially for the Sakaekrang and the Upper Chao Phraya Basins.

Keywords: Climate Change, Statistical Downscaling Technique, Regression Analysis, General Circulation Models, Average Daily Temperature, Northern and Central Thailand.

1. คำนำ

ในปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาภัยพิบัติทางธรรมชาติต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ปัญหาภัยแล้ง อุทกภัย วาตภัย และคลื่นความร้อน เป็นต้น ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้นับวันจะทวีความรุนแรงและมีความถี่ในการเกิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนหนึ่งของปัญหาเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) อันมีสาเหตุสำคัญจากการกระทำของมนุษย์ ในความพยายามที่จะปรับปรุงสภาพชีวิตความเป็นอยู่ให้ดีขึ้น โดยเน้นที่การเพิ่มผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (gross domestic product, GDP) เป็นดัชนีชี้วัด เป็นผลให้เกิดการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมอย่างก้าวกระโดด และเกิดการแข่งขันกันอย่างรุนแรงในทุกภูมิภาคทั่วโลก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากพื้นที่ป่าไม้ไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และจากพื้นที่เกษตรกรรมไปเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมและพาณิชยกรรม ผลที่ตามมาคือการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas, GHG) เป็นเหตุให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งเป็นภาวะที่ชั้นบรรยากาศของโลกกระทำตัวเสมือนเป็นกระจกที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นผ่านลงมายังผิวโลก แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวในช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเอาไว้ ทำให้พลังงานความร้อนเกิดการสะสมและกระจายภายในชั้นบรรยากาศ ทำให้พื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลกรวมทั้งสภาพความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิต ด้วยสาเหตุดังกล่าว นักวิชาการทั่วโลกจึงพยายามศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อนำไปสู่การปรับตัวหรือลดปัญหาที่เกิดขึ้น [1], [2]

จนได้มีการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก (Global Climate Models, GCMs) อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากแบบจำลอง GCMs จะแสดงผลเป็นพื้นที่ที่มีความหยาบมากทำให้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่ที่สนใจได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคที่เรียกว่า เทคนิคการดาวน์สเกล (downscaling) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้านภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นหรือระดับภูมิภาค [3], [4], [5], [6] โดยหลักการของการดาวน์สเกลคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างชุดตัวแปรภูมิอากาศที่มีสเกลขนาดใหญ่ (ตัวแปรคาดการณ์, predictors) ที่ได้จากการรีอนาไลซีส (reanalysis) และจากแบบจำลอง GCMs กับตัวแปรด้านอุตุนิยมวิทยาหรืออุทกวิทยา (ตัวแปรที่ถูกคาดการณ์, predictands) ที่สถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน เพื่อให้ได้ฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่า (transfer function) จากนั้นจึงนำฟังก์ชั่นการเปลี่ยนค่ามาประยุกต์ใช้กับผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภูมิอากาศตามสถานการณ์ต่าง ๆ (scenarios) ในอนาคต ก็จะได้ตัวแปรด้านอุตุนิยมวิทยาหรืออุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการใช้เทคนิคการดาวน์สเกลที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การใช้แบบจำลองข้อมูลจาก GCMs ที่แตกต่างกัน และการใช้สถานการณ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตที่แตกต่างกันนั้น จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตด้วย เทคนิคการดาวน์สเกลสามารถแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ เทคนิคการดาวน์สเกลทางพลศาสตร์ (dynamical downscaling) และเทคนิคการดาวน์สเกลทางสถิติ (statistical downscaling) [7]

สำหรับวิธีการดาวน์สเกลทางพลศาสตร์นั้น จะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศในระดับภูมิภาคที่มีความละเอียดสูง (High Resolution Regional Climate Models, RCMs) ซึ่งจะใช้ผลลัพธ์ของตัวแปรภูมิอากาศที่มีความละเอียดในระดับต่ำ (courser resolution) จาก GCMs มาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และเงื่อนไขขอบเขตด้านข้าง (lateral boundary condition) โดยจะได้เป็นผลลัพธ์ของตัวแปรด้านภูมิอากาศที่มีความละเอียดมากขึ้น (higher resolution) อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้วิธีการนี้มีข้อด้อยที่สำคัญ คือ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่สูงและผลที่ได้รับขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแบบจำลอง GCMs รวมทั้งมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภูมิอากาศตามสถานการณ์ต่าง ๆ ในอนาคต [8], [9]

สำหรับในส่วนของเทคนิคการดาวน์สเกลทางสถิตินั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทคือ (1) การเลียนแบบสภาพอากาศ (weather typing schemes) (2) การสร้างสภาพอากาศ (weather generators) และ (3) แบบจำลองถดถอย (regression models) โดยทุกวิธีจะมีหลักการพื้นฐานเดียวกันคือ สภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาคจะเป็นฟังก์ชั่นกับสถานะของสภาพภูมิอากาศที่มีสเกลที่หยาบ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคาดการณ์ในชั้นบรรยากาศที่มีสเกลหยาบและตัวแปรที่ถูกคาดการณ์ของสภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาคหรือระดับท้องถิ่นที่มีสเกลละเอียดขึ้น ทั้งนี้ การดาวน์สเกลทางสถิติมีความเด่นคือใช้ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการดาวน์สเกลทางพลศาสตร์มากและให้ผลการคำนวณที่มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับได้ ทั้งยังสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCMs มาใช้คำนวณเพื่อสร้างผลของข้อมูลตัวแปรด้านภูมิอากาศในลักษณะที่เป็นจุดในพื้นที่ศึกษาได้ รวมทั้งเป็นวิธีการที่ตั้งอยู่บนมาตรฐานและกระบวนการทางสถิติที่เป็นที่ยอมรับและสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมาใช้ในกระบวนการดำเนินงาน [10], [11] สำหรับรายละเอียดของข้อดีข้อเสียของเทคนิคการดาวน์สเกลทั้งสองวิธีศึกษาได้จาก [12]

ดังนั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิง วัง ยม น่าน เจ้าพระยา ป่าสัก สะแกกรัง และท่าจีน จำนวน 13 สถานี ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ โดยข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศโลกแบบรายวันที่นำมาใช้คือตัวแปรภูมิอากาศโลกที่ได้จากการรีอนาไลซีสและที่ได้จากแบบจำลอง GCM ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง MPI-ESM-LR ที่ได้รับการพัฒนาโดย Max Planck Institute for Meteorology

(MPI-M) ของประเทศเยอรมัน ส่วนการดาวน์สเกลทางสถิตินั้น จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยที่ได้มีการแนะนำไว้โดย [13] จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันสำหรับทั้งเหตุการณ์ในอดีตและในอนาคต เพื่อประเมินผลการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ต่อไป

2. พื้นที่ศึกษา การรวบรวมข้อมูล และขั้นตอนการดำเนินการ

2.1 พื้นที่ศึกษา

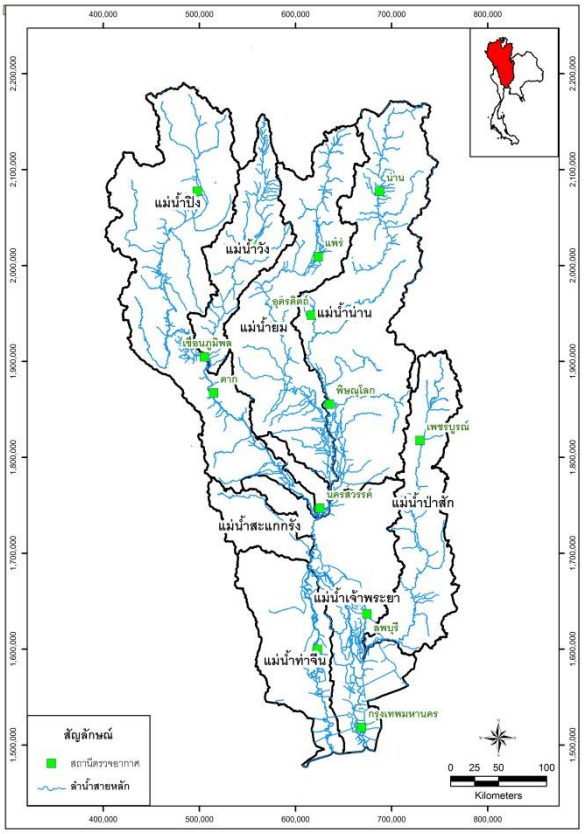
ลุ่มน้ำที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 8 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำปิง วัง ยม น่าน เจ้าพระยา ป่าสัก สะแกกรัง และท่าจีน โดย ตั้งอยู่ระหว่างละติจูด 13°27′ ถึง 19° 49′ และลองจิจูด 98° 5′ 30″ ถึง 101° 33′ และมีพื้นที่รับน้ำฝนประมาณ 157,925 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 31 % ของพื้นที่ประเทศไทย โดยพื้นที่ศึกษาครอบคลุมพื้นที่ใน 29 จังหวัด สำหรับตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษาแสดงดังในรูปที่ 1 สภาพภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำเหล่านี้มีลักษณะคือ บริเวณภาคเหนือจะเป็นที่ลาดบริเวณหุบเขา ส่วนบริเวณภาคกลางจะเป็นที่ราบและที่ราบลุ่ม สำหรับในส่วนของสภาพภูมิอากาศ พบว่า อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ รวมทั้งพายุจรในช่วงฤดูฝน ทำให้เกิดปริมาณฝนมากในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคมและเดือนตุลาคม โดยมีปริมาณฝนเฉลี่ยทั่วพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 1,160 มิลลิเมตร สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีมีค่าระหว่าง 23.3 °C ถึง 28.4°C สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 36.9 °C และ 17.46 °C ตามลำดับ ซึ่งบันทึกค่าไว้โดยสถานีตรวจวัดจากกรมอุตุนิยมวิทยา (โดยทำการเฉลี่ยจากลุ่มน้ำหลักทั้ง 8 ลุ่มน้ำ ในช่วงปี ค.ศ. 1960-2005)

2.2 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่นำมาใช้เพื่อประกอบการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทยนั้น ประกอบด้วย (1) ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ (2) ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากการรีอนาไลซีส และ (3) ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (Global Circulation Model, GCM) สำหรับรายละเอียดของข้อมูลในแต่ละส่วนแสดงได้ดังนี้

(1) ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ

ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่ใช้ในการศึกษานั้น รวบรวมจากสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งอยู่ในแต่ละจังหวัดในลุ่มน้ำทั้ง 8 ลุ่มน้ำที่พิจารณา ทั้งนี้มีจำนวนสถานีตรวจอากาศทั้งสิ้น 30 สถานี อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ได้พิจารณาเลือกสถานีที่มีความครบถ้วนของข้อมูลในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1960-2005 ซึ่งพบว่า มีจำนวนสถานีทั้งสิ้น 13 สถานี โดยได้แสดงชื่อสถานี รหัสสถานี รวมทั้งตำแหน่งที่ตั้งของสถานีเหล่านี้ในตารางที่ 1 (ดูรูปที่ 1 ประกอบ)



รูปที่ 1 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษา

ตารางที่ 1 ชื่อสถานี รหัสสถานี และตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	ชื่อสถานี	รหัสสถานี	ลุ่มน้ำ	ตำแหน่งที่ตั้ง
1	เชียงใหม่	327501	ปิง	N19.3 / E97.83
2	ลำปาง	328201	วัง	N18.28 / E99.52
3	แพร่	330201	ยม	N18.17 / E100.17
4	น่าน	331291	น่าน	N18.78 / E100.78
5	อุตรดิตถ์	351201	น่าน	N17.62 / E101.1
6	ตาก	376201	ปิง	N16.89 / E99.14
7	เขื่อนภูมิพล	376203	ปิง	N17.23 / E99.05
8	พิษณุโลก	378201	น่าน	N16.78 / E100.27
9	เพชรบูรณ์	379201	ป่าสัก	N16.43 / E101.15
10	นครสวรรค์	400201	เจ้าพระยา	N15.8 / E100.17
11	สุพรรณบุรี	425201	ท่าจีน	N14.47 / E100.14
12	ลพบุรี	426201	เจ้าพระยา	N14.8 / E100.62
13	กรุงเทพมหานคร	455201	เจ้าพระยา	N13.73 / E100.56

(2) ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากการรีอนาไลซีส

ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่ที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากการรีอนาไลซีสที่เลือกใช้สำหรับการศึกษานี้คือข้อมูลภูมิอากาศโลกแบบรายวัน ในระหว่างปี ค.ศ. 1960-2005 ของหน่วยงาน NCEP/NCAR (National Center of Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยข้อมูลดังกล่าวมีขนาดกริดข้อมูล 2.5°×2.5° ทั้งนี้จำนวนกริดข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้ง 8 ลุ่มน้ำ มีทั้งหมด 8 กริด ในระหว่างละติจูด N12.5° ถึง N20° และลองจิจูด E97.5°

ถึง E102.5 ° โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html

(3) ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่เลือกใช้สำหรับการศึกษานี้คือ ข้อมูลภูมิอากาศโลกแบบรายวันซึ่งเป็นผลลัพธ์จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ของ Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) ประเทศเยอรมัน ซึ่งมีขนาดกริดข้อมูล 1.875°×1.875° ทั้งนี้ ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่เลือกใช้เป็นผลลัพธ์แบบรายวันซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ในอดีตระหว่างปี ค.ศ. 1960-2005) และ 2) ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ในอนาคตระหว่างปี ค.ศ. 2006-2100 ทั้งนี้ผลลัพธ์ในส่วนนี้เป็นผลจากการวิเคราะห์โดยใช้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศภายใต้โครงการ CMIP5 โดยได้เลือกใช้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่ใช้ชื่อว่า Representation Concentration Pathways (RCPs) จำนวน 3 สถานการณ์ ซึ่งเป็นชุดของเส้นทางที่นำไปสู่ระดับแรงขับเคลื่อนของการแผ่รังสี (radiative forcing levels) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโอโซนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.6, 4.5 และ 8.5 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อสิ้นศตวรรษที่ 21 หรือ ค.ศ. 2100 ซึ่งเรียกว่า RCP2.6 (ความเข้มข้นของ CO_2 ประมาณ 490 ส่วนในล้านส่วน), RCP4.5 (ความเข้มข้นของ CO_2 ประมาณ 650 ส่วนในล้านส่วน) และ RCP8.5 (ความเข้มข้นของ CO_2 ประมาณ 1370 ส่วนในล้านส่วน) ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ [2] ทั้งนี้จำนวนกริดข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้ง 8 ลุ่มน้ำ มีทั้งหมด 15 กริด ในระหว่างละติจูด N12.12° ถึง N19.59° และลองจิจูด E97.5° ถึง E101.3 °

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทยนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานหลัก ๆ 5 ขั้นตอนคือ (1) การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกคาดการณ์ที่มีสเกลขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นตัวแปรคาดการณ์ในการดาวน์สเกล (2) การปรับกริดของตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่มายังตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศ (3) การดาวน์สเกลข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากการรีอนาไลซีสเพื่อประเมินข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ (4) การดาวน์สเกลข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากแบบจำลอง GCM เพื่อประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอดีตที่สถานีตรวจอากาศ และ (5) การประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่สถานีตรวจอากาศ สำหรับรายละเอียดการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนสรุปได้ดังนี้

(1) การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นตัวแปรคาดการณ์ในการดาวน์สเกล

ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่จะนำมาใช้ในการดาวน์สเกลนั้นจะต้องเป็นตัวแปรที่มีอยู่ทั้งในชุดข้อมูลที่ได้จากการรีอนาไลซีสและที่ได้จากแบบจำลอง GCM ที่เลือกใช้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศโลกในชุดข้อมูลที่ได้จากการรีอนาไลซีส จะมีจำนวนตัวแปรที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนตัวแปรของข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากแบบจำลอง GCM ดังนั้น ในการคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศคาดการณ์เพื่อใช้ในการดาวน์สเกลนั้นจะเลือกจากตัวแปรที่มีอยู่ในชุดของแบบจำลอง GCM ที่เป็นผลลัพธ์จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR โดยตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกที่ตรงกันระหว่างชุดตัวแปรทั้งสองชุดมีจำนวนทั้งสิ้น 72 ตัวแปร โดยแยกเป็นตัวแปรภูมิอากาศโลกแบบ 3 มิติ ที่ความดันบรรยากาศในระดับต่าง ๆและตัวแปรภูมิอากาศโลกแบบ 2 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 2

(2) การปรับกริดของตัวแปรภูมิอากาศโลกที่มีสเกลขนาดใหญ่มายังตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศ

เนื่องจากตัวแปรภูมิอากาศโลกที่ได้จากการรีอนาไลซีส และที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก จะถูกแสดงค่าในลักษณะของกริดที่มีขนาดแตกต่างกันครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ดังนั้น ก่อนที่จะประยุกย์ใช้เทคนิคการดาวน์สเกลเพื่อการประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยที่สถานีตรวจวัดอากาศทั้ง 13 สถานี จำเป็นต้องทำการปรับกริดของตัวแปรภูมิอากาศมายังตำแหน่งของสถานีเหล่านี้ ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้วิธี Inverse Distance Square (IDS) ดังแสดงการคำนวณในสมการที่ (1) เพื่อคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละกริดของตัวแปรภูมิอากาศ โดยจะเห็นได้ว่ากริดที่อยู่ใกล้กับสถานีตรวจอากาศที่พิจารณาจะมีค่าถ่วงน้ำหนักมากกว่ากริดที่อยู่ไกลออกไป และเมื่อได้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละกริดแล้วก็สามารถคำนวณค่าของตัวแปรภูมิอากาศที่สถานีตรวจอากาศได้โดยใช้สมการที่ (2) โดยในรูปที่ 2 ได้แสดงตัวอย่างกริดของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสจำนวน 4 กริด ที่นำมาใช้เพื่อการประเมินค่าตัวแปรภูมิอากาศมายังสถานีตรวจอากาศจังหวัดเชียงใหม่ [2]

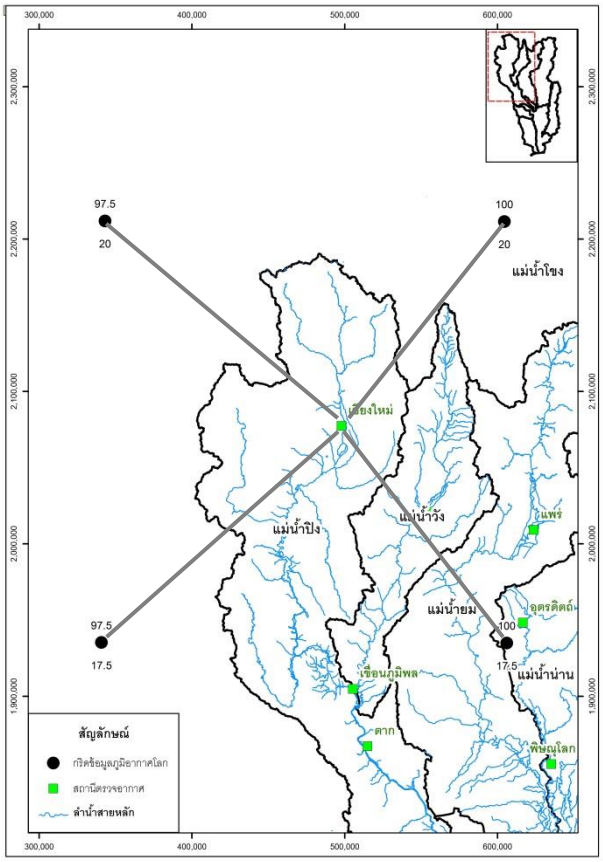
$$W_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

$$P = \sum_{i=1}^{n} p_i W_i \quad (2)$$

โดยที่ W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกริดที่ตำแหน่ง i, d_i คือ ระยะระหว่างกริดของตัวแปรภูมิอากาศที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ตำแหน่ง i ถึงตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศภาคพื้น, p_i คือ ค่าของตัวแปรภูมิอากาศที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ตำแหน่ง i, P คือ ค่าของตัวแปรภูมิอากาศที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศภาคพื้น, n คือ จำนวนกริดของข้อมูลภูมิอากาศที่มีสเกลขนาดใหญ่ที่นำมาใช้ประเมินค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งสถานตรวจอากาศภาคพื้น

ตารางที่ 2 ตัวแปรภูมิอากาศโลกที่เลือกใช้เพื่อการดาวน์สเกลจำนวน 72 ตัวแปร [2]

ตัวแปรภูมิอากาศโลก	ตัวย่อ		ระดับความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)
	NCEP	MPI-ESM-LR	
ตัวแปรภูมิอากาศโลกแบบ 3 มิติ			
อุณหภูมิอากาศ (air temperature)	air	ta	1,000, 850, 700, 500, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 10
ความสูงของศักย์ทางภูมิศาสตร์ (geopotential height)	hgt	zg	1,000, 850, 700, 500, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 10
ความเร็วในแนวดิ่ง (vertical velocity)	omega	wap	1,000, 850, 700, 500, 250, 150, 100
ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)	rhum	hur	1,000, 850, 700, 500
ความชื้นจำเพาะ (specific humidity)	shum	hus	1,000, 850, 700, 500
ความเร็วลมด้านทิศตะวันออก (eastward wind)	uwnd	ua	1,000, 850, 700, 500, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 10
ความเร็วลมด้านทิศเหนือ (northward wind)	vwnd	va	1,000, 850, 700, 500, 250, 150, 100, 70, 50, 30, 10
ตัวแปรภูมิอากาศโลกแบบ 2 มิติ			
ความดันที่ระดับน้ำทะเล (sea level pressure)	slp	psl	-
อุณหภูมิอากาศใกล้พื้นผิว (near surface air temperature)	tas	tas	-
อุณหภูมิอากาศใกล้พื้นผิวสูงสุด (maximum temperature)	tmax	tasmax	-
อุณหภูมิอากาศใกล้พื้นผิวต่ำสุด (minimum temperature)	tmin	tasmin	-
ความเร็วลมใกล้พื้นผิวด้านทิศตะวันออก (eastward near surface wind)	uwnds	uas	-
ความเร็วลมใกล้พื้นผิวด้านทิศเหนือ (northward near surface wind)	vwnds	vas	-
สัดส่วนเมฆทั้งหมด (total cloud fraction)	tcdc	clt	-
ความร้อนแฝงด้านบนของพื้นผิวต่อพื้นที่ (surface upward latent heat flux)	lhtfl	hfls	-
ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศด้านบนของพื้นผิวต่อพื้นที่ (surface upward sensible heat flux)	shtfl	hfss	-
หยาดน้ำฟ้า (precipitation rate)	prate	pr	-
หยาดน้ำฟ้าแบบคอนเว็คทีฟ (convective precipitation)	cprat	prc	-
การแผ่รังสีคลื่นยาวด้านลงสู่พื้นผิว (surface downwelling longwave radiation)	dlwrf	rlds	-
การแผ่รังสีคลื่นยาวด้านขึ้นสู่พื้นผิว (surface upwelling longwave radiation)	ulwrf	rlus	-



รูปที่ 2 กริดของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสที่ใช้ประเมินค่าตัวแปรภูมิอากาศมายังสถานีตรวจวัดอากาศจังหวัดเชียงใหม่

(3) การดาวน์สเกลข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากการรีอนาไลซีสเพื่อประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ

การดาวน์สเกลข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากการรีอนาไลซีสเพื่อประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศสำหรับการศึกษานี้ จะใช้การดาวสเกลน์ทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ซึ่งเป็นการสร้างสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้รับการคัดเลือกในหัวข้อย่อย (1) ในหัวข้อ 2.3 ในเรื่องขั้นตอนการดำเนินงาน กับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศภาคพื้นทั้ง 13 สถานี ทั้งนี้ตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสต้องผ่านการปรับกริดมายังตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศที่พิจารณา สำหรับรูปแบบของสมการแสดงดังในสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการที่เสนอแนะไว้โดย [13]

$$T_i = A_1 + A_2 \times B_1 + A_3 \times B_2 + \ldots + A_{n+1} \times B_n + \zeta_i \quad (3)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศที่พิจารณา (°C), A_nคือ ค่าคงที่ซึ่งประเมินจากวิธี linear least square regression แบบ stepwise, B_nคือ ตัวแปรภูมิอากาศโลกคาดการณ์ (predictors) ที่ได้รับการคัดเลือก ซึ่งหมายรวมถึงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของวันก่อนหน้านี้ที่สถานีตรวจอากาศที่พิจารณา (T_{i-1}) เนื่องจากมีความสัมพันธ์ที่ดีกับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ณ วันที่พิจารณาที่สถานีตรวจอากาศเดียวกัน, ζ_i คือ ค่าความผิดพลาดของความสัมพันธ์หรือค่าตัวเลขสุ่ม (random

number) ที่มีการกระจายตัวแบบปกติ โยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับค่าผิดพลาดมาตรฐาน (standard error)

สำหรับ การคัดเลือกตัวแปรภูมิอากาศโลกคาดการณ์ที่ได้จากการรีอนาไลซีสนั้นได้ดำเนินการด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งจะทำให้ได้ตัวแปรภูมิอากาศคาดการณ์ที่ได้จากการรีอนาไลซีสเพื่อใช้ประเมินค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานี ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้ได้พิจารณาใช้ข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 1960-1989 เพื่อการสอบเทียบความสัมพันธ์และเมื่อได้ความสัมพันธ์แล้วจะต้องทำการตรวจพิสูจน์ความเชื่อถือได้ของสมการที่ได้มาโดยใช้ข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 1990-2005 เพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์จะตรวจสอบโดยใช้ตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r), ค่าดัชนีประสิทธิภาพ (efficiency index, EI) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองสัมพัทธ์ (relative root mean square error, Rel. RMSE) โดยในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดแล้วตัวแปรดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 1, 100% และ 0% ตามลำดับ (ศึกษารายละเอียดได้จาก [1])

(4) การดาวน์สเกลข้อมูลภูมิอากาศโลกที่ได้จากแบบจำลอง GCM เพื่อประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในอดีตที่สถานีตรวจอากาศ

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานีแล้ว จากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับผลลัพธ์ของตัวแปรภูมิอากาศโลกที่ได้จากแบบจำลอง GCM (แบบจำลอง MPI-ESM-LR) ที่เลือกใช้ กล่าวคือจะต้องนำผลลัพธ์ของตัวแปรภูมิอากาศโลกที่ได้จากแบบจำลอง GCM แบบรายวัน (ที่ผ่านการปรับกริดให้ตรงกับสถานีตรวจอากาศแล้ว) ไปแทนค่าแทนตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ (3)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีส และที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR นั้น มีค่าแตกต่างกันณ ตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศที่พิจารณา ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ในอดีต (ระหว่างปี ค.ศ. 1960-2005) ให้เข้ากันได้กับตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีส โดยได้เลือกใช้การปรับแก้ด้วยวิธี Nested Bias Correction (NBC) ที่ได้มีการเสนอแนะไว้โดย [14] ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่าตัวปรับแก้ทางสถิติที่จะนำไปปรับแก้ตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR เพื่อการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตสำหรับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ ต่อไป ทั้งนี้ สมการของการปรับแก้โดยวิธีการ NBC แสดงดังในสมการที่ (4) ถึง (7) จากสมการดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าปรับแก้ทางสถิติ $\hat{x}$ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นค่าปรับแก้ทางสถิติให้กับตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ต่อไป

$$x_i' = \frac{x_i - \mu_{mod,i}}{\sigma_{mod,i}} \quad (4)$$

$$x_i'' = \rho_{obs,i} \times x_{i-1}''' + \sqrt{1+\rho_{obs,i}^2}\left(\frac{x_i' - \rho_{mod,i} x_{i-1}'}{\sqrt{1-\rho_{mod,i}^2}}\right) \quad (5)$$

$$x_i''' = x_i'' \times \rho_{obs,i} + \mu_{obs,i} \quad (6)$$

$$\hat{x} = \left(\frac{y_m'''}{y_m}\right)\left(\frac{z_n'''}{z_n}\right) x_t''' \quad (7)$$

โดยที่ x_i คือ ตัวแปรภูมิอากาศรายวันจากแบบจำลอง MPI-ESM-LR, $\mu_{mod,i}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายวันของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR, $\sigma_{mod,i}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรายวันของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR, $\rho_{mod,i}$ คือ ค่า lag one auto correlation ของตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR, $\mu_{obs,i}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายวันของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซิส, $\sigma_{obs,i}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรายวันของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซิส, $\rho_{obs,i}$ คือ ค่า lag one auto correlation ของตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ได้จากการรีอนาไลซิส, x_i' คือ ตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ที่มีการนำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมารฐานรายวันออกไป, x_i'' คือ ตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ที่มีการนำค่า lag one auto correlation ออกไป และนำค่า lag one auto correlation ของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซิสมาแทนที่, x_i''' คือ ตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ผ่านการปรับแก้แล้วและนำค่าเฉลี่ยรายวันและค่า lag one auto correlation ของตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซิสมาแทนที่, $\hat{x}$ คือ ค่าการปรับแก้ตัวแปรภูมิอากาศรายวันที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ทั้งนี้ค่า y_m''' และ z_n''' คำนวณได้ในทำนองเดียวกับสมการที่ (4) ถึง (6) แต่ต่างกันที่ แทนที่จะเป็นค่ารายวันจะเปลี่ยนเป็นค่ารายเดือนและรายปี ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า lag one auto correlation ก็จะเป็นของรายเดือนและรายปี ตามลำดับ

(5) การประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่สถานีตรวจอากาศ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้รับการคัดเลือกในหัวข้อย่อย (1) ในหัวข้อ 2.3 ในเรื่องขั้นตอนการดำเนินงาน กับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศภาคพื้นทั้ง 13 สถานี จะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR เพื่อการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในอนาคตสำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตไปประยุกต์ใช้ต้องทำการปรับแก้ตัวแปรเหล่านั้นด้วยตัวปรับแก้ทางสถิติ $\hat{x}$ ที่ได้จากในขั้นตอนที่ (4) ดังกล่าวข้างต้น เมื่อได้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในอนาคตระหว่างปี ค.ศ. 2006-2100 แล้ว จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิในอดีต

ระหว่าง ปี ค.ศ. 1990-2005 เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงในแต่ละสถานีตรวจวัด นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ ดังนั้น ในการศึกษานี้จะทำการเฉลี่ยเชิงพื้นที่โดยใช้ข้อมูลที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานี ทั้งในกรณีอดีตและอนาคตมาใช้เฉลี่ยเชิงพื้นที่โดยการประยุกต์ใช้วิธี Kriging ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีประสิทธิภาพในการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่ให้ผลที่มีความถูกต้องสูง [1]

3. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทยนั้น ได้แบ่งการแสดงผลการศึกษาเป็น 2 ข้อหลัก คือ (1) ผลการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ และ (2) ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สถานีตรวจวัด สำหรับรายละเอียดในแต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้

(1) ผลการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ

ผลการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานี แสดงดังในตารางที่ 3 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า จากจำนวนตัวแปรภูมิอากาศทั้ง 72 ตัวแปร พบว่า มีจำนวนตัวแปรที่เลือกใช้ทั้งสิ้น 19 ตัวแปร ทั้งนี้ ตัวแปรที่มีถูกคัดเลือกมากที่สุดคือ T_{i-1} (อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศที่พิจารณาของวันก่อนหน้า) โดยถูกเลือกสำหรับ 13 สถานี รองลงมาคือ omega500 (ความเร็วในแนวดิ่งที่ระดับความดันบรรยากาศ 500 มิลลิบาร์) และ tmax (อุณหภูมิอากาศใกล้พื้นผิวสูงสุด) ซึ่งถูกเลือกสำหรับ 8 และ 7 สถานี ตามลำดับ

สำหรับความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังในตารางที่ 4 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า r, EI และ Rel.RMSE สำหรับแต่ละสถานีตรวจวัดทั้งในขั้นตอนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่า r, EI และ Rel.RMSE สำหรับในขั้นตอนการสอบเทียบมีค่าเฉลี่ยสำหรับทุกสถานีตรวจวัดเท่ากับ 0.920, 83.59% และ 3.81% ตามลำดับ และสำหรับในขั้นตอนการตรวจพิสูจน์มีค่าเฉลี่ยสำหรับทุกสถานีตรวจวัดเท่ากับ 0.910, 81.99% และ 4.12% ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เพื่อการประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอนาคตสำหรับแต่ละสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ต่อไป

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศ 13 สถานี

No.	ชื่อสถานี	สมการ
1	เชียงใหม่	$2.085+0.918T_{i-1}+0.187tmax-0.132omega250+0.166prate$
2	ลำปาง	$1.76+0.932T_{i-1}+0.16tmax-0.115uwnd500-0.106omega500$
3	แพร่	$2.568+0.904T_{i-1}+0.251tmax+0.195shum500-0.146omega500$
4	น่าน	$2.59+0.899T_{i-1}+0.252tmax+0.231shum500-0.163omega500$
5	อุตรดิตถ์	$2.91+0.894T_{i-1}-0.131uwnds+0.160air700-0.142omega500$
6	ตาก	$3.59+0.869T_{i-1}+0.386tmax+0.239hgt150-0.117vwnd850$
7	เขื่อนภูมิพล	$2.19+0.921T_{i-1}-0.187omega500-0.142vwnd850+0.089lhtfl$
8	พิษณุโลก	$3.221+0.883T_{i-1}-0.152uwnd1000-0.17omega500+0.147air150$
9	เพชรบูรณ์	$4.682+0.833T_{i-1}+0.309tmax-0.212uwnds+0.198rhum700$
10	นครสวรรค์	$4.733+0.833T_{i-1}+0.391tmax+0.151hgt250+0.146rhum700$
11	สุพรรณบุรี	$3.199+0.891T_{i-1}-0.182uwnds-0.125omega500+0.13lhtfl$
12	ลพบุรี	$3.563+0.873T_{i-1}-0.141omega500+0.123hgt250+0.059uwnd250$
13	กรุงเทพมหานคร	$4.227+0.848T_{i-1}+0.155air700-0.148omega250+0.139shum850$

2) ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สถานีตรวจวัด

ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สถานีตรวจวัดทั้ง 13 สถานี ที่ใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษานั้นแสดงดังในตารางที่ 5 โดยในตารางดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือน ตลอดจนค่าเฉลี่ยรายปี สำหรับในกรณีของข้อมูลในอดีต (ค.ศ.1990-2005) และในอนาคต (ค.ศ.2006-2100) สำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 27.9°C, 28.9°C และ 29.6°C ในขณะที่ในอดีตเท่ากับ 27.2°C หรือมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.6%, 6.2% และ 9.0% สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนสำหรับในอดีตมีค่าระหว่าง 23.4°C -30.6°C สำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนระหว่าง 27.0°C (15.3%) ถึง 29.2°C (-4.6%), 28.2°C (19.5%) ถึง 30.2°C (-1.2%) และ 28.9°C (3.2%) ถึง 31.2°C (1.9%) ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้ว เมื่อพิจารณาจากแผนที่การเฉลี่ยเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Kriging ดังแสดงในรูปที่ 3 รวมทั้งการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีในแต่ละลุ่มน้ำสำหรับเหตุการณ์ในอดีตเปรียบเทียบกับในอนาคตสำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของแต่ละลุ่มน้ำในอดีตมีค่าระหว่าง 26.1°C-28.2°C และสำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 27.3°C- 28.6°C, 28.0°C-30.0°C และ 28.6°C-30.5°C ตามลำดับ ทั้งนี้ จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า บริเวณตอนเหนือของลุ่มน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณตอนกลางและตอนล่างของลุ่มน้ำซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับเหตุการณ์ในอนาคตระหว่างปี ค.ศ. 2006-2100 สำหรับทั้ง 3 สถานการณ์ กล่าวคือ ในบริเวณตอนเหนือของลุ่มน้ำโดยรวมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าตอนกลางและตอนล่างของลุ่มน้ำรวมโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณลุ่มน้ำสะแกกรังและเจ้าพระยาตอนบน ทั้งนี้

อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของทั้งลุ่มน้ำในอดีตมีค่าประมาณ 27.3˚C และสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.0˚C, 29.0˚C และ 29.6˚C ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่าทางสถิติของสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้งในกรณีการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์

ชื่อสถานี	สอบเทียบ			ตรวจพิสูจน์		
	r	EI (%)	Rel.RMSE (%)	r	EI (%)	Rel.RMSE (%)
เชียงใหม่	0.931	86.32	3.96	0.926	85.59	4.18
ลำปาง	0.945	86.15	3.88	0.938	84.93	4.12
แพร่	0.938	87.84	4.00	0.933	86.96	4.25
น่าน	0.940	88.32	4.27	0.932	86.80	4.68
อุตรดิตถ์	0.923	85.11	3.72	0.909	82.66	4.21
ตาก	0.930	86.44	4.06	0.928	86.18	4.36
เชื่อนภูมิพล	0.929	86.06	4.23	0.912	83.18	4.72
พิษณุโลก	0.909	82.59	3.75	0.903	81.32	3.86
เพชรบูรณ์	0.903	81.21	3.92	0.899	80.61	4.32
นครสวรรค์	0.906	81.86	3.76	0.899	80.75	4.18
สุพรรณบุรี	0.901	80.90	3.40	0.892	79.21	3.83
ลพบุรี	0.878	77.09	3.33	0.869	75.45	3.64
กรุงเทพมหานคร	0.882	76.79	3.23	0.86	72.26	3.27
ค่าเฉลี่ย	0.920	83.59	3.81	0.91	81.99	4.12

4. สรุปผลการศึกษา

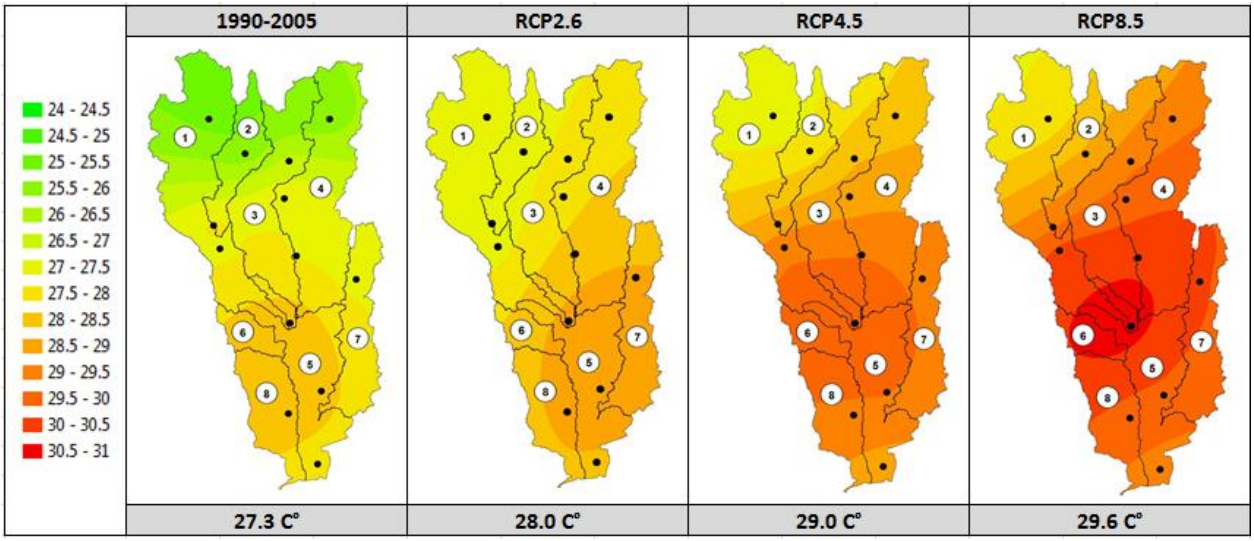
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับลุ่มน้ำในภาคเหนือและภาคกลางของประเทศไทย โดยได้คัดเลือกสถานีตรวจอากาศจำนวน 13 สถานี ที่มีข้อมูลครบถ้วนหรือเกือบครบถ้วนในช่วงเวลาระหว่าง ค.ศ.1990-2005 มาใช้เป็นตัวแทนสำหรับพื้นที่ศึกษา โดยเริ่มด้วยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากการรีอนาไลซีสกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานี ผลการศึกษาพบว่า สมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความถูกต้องในระดับสูงโดยประเมินจากค่าทางสถิติที่อยู่ในระดับที่ดีมาก ทำให้สมการความสัมพันธ์เหล่านั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันสำหรับสถานีตรวจวัดทั้ง 13 สถานี ต่อไป ทั้งนี้ ตัวแปรคาดการณ์ที่นำมาประยุกต์มากที่สุดคือ T_{i-1} (อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศที่พิจารณาวันก่อนหน้า) และรองลงมาคือ omega500 (ความเร็วในแนวดิ่งที่ระดับความดันบรรยากาศ 500 มิลลิบาร์) โดยได้ถูกนำมาใช้กับสถานีจำนวน 13 และ 8 สถานี ตามลำดับ จากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้กับตัวแปรภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลอง MPI-ESM-LR ในส่วนของข้อมูลในอดีตระหว่าง ปี ค.ศ. 1990-2005 เพื่อการหาค่าตัวปรับแก้เชิงสถิติเพื่อนำไปใช้ปรับแก้ข้อมูลในอนาคต ทั้งนี้ได้เลือกใช้การปรับแก้โดยวิธี Nested Bias Correction (NBC) จากนั้น จึงนำค่าการปรับแก้ทางสถิติที่ได้ไปใช้ปรับแก้ตัวแปรภูมิอากาศในอนาคตในระหว่างปี ค.ศ. 2006-2100 สำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 จากผลการประเมินอุณหภูมิในอนาคตสำหรับทั้ง 3 สถานการณ์ ดังกล่าว พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น คือ ผลการประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่สถานีตรวจอากาศทั้ง 13 สถานี ในอนาคตภายใต้สถานการณ์ RCP8.5 จะมีการเพิ่มของอุณหภูมิมากที่สุด ตามด้วยสถานการณ์ RCP4.5 และ RCP2.6 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีของทั้งลุ่มน้ำในอดีตมีค่าประมาณ 27.3˚C และสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.0˚C, 29.0˚C และ 29.6˚C ตามลำดับ โดยลุ่มน้ำทางตอนเหนือ (บริเวณตอนบนของลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่านตอนบน) มีแนวโน้มของอุณหภูมิที่ลดลง ในขณะที่ทางตอนกลางและตอนล่างมีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับในทุกสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นในบริเวณลุ่มน้ำสะแกกรังและเจ้าพระยาตอนบน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ “การเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคดาวน์สเกลเพื่อการประเมินตัวแปรด้านภูมิอากาศสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” และขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยาสำหรับข้อมูลอุณหภูมิรายวันซึ่งนำมาใช้ประกอบการศึกษานี้

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของสถานีตรวจอากาศจำนวน 13 สถานี ในแต่ละเดือน ตลอดจนค่ารายปี สำหรับในกรณีของข้อมูลในอดีตกับในอนาคตสำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5

	สถานีตรวจวัด	เฉลี่ยรายเดือน												เฉลี่ยรายปี
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
ผลอุณหภูมิรายวันเฉลี่ยทั้ง 13 สถานี	ค่าเฉลี่ย	23.6	26.1	28.8	30.6	29.5	28.4	28.0	27.6	27.4	27.0	25.5	23.4	27.2
	ค่าสูงสุด	29.2	30.9	33.4	35.3	35.1	33.3	32.5	31.2	31.1	30.1	29.9	29	31.8
	ค่าต่ำสุด	15.9	19.9	19.3	23.5	23.6	24.7	23.6	23.8	23.2	21.5	17.9	15.1	21.0
	RCP 2.6													
	ค่าเฉลี่ย	27.1 (15.0%)	27.9 (7.0%)	29.0 (0.8%)	29.2 (-4.6%)	28.5 (-3.4%)	28.1 (-0.9%)	27.8 (-0.7%)	27.6 (0%)	27.7 (1%)	27.6 (2.1%)	27.3 (7.0%)	27.0 (15.3%)	27.9 (2.6)
	ค่าสูงสุด	30.3	31.8	33.4	32.9	31.0	30.1	29.7	29.7	30.1	29.6	29.6	29.7	30.6
	ค่าต่ำสุด	22.8	24.2	25.1	27.1	27.3	25.2	24.7	24.2	24.0	22.9	21.5	21.6	24.5
	RCP 4.5													
	ค่าเฉลี่ย	28.2 (19.5%)	29.0 (10.9%)	30.1 (4.6%)	30.2 (-1.2%)	29.3 (-0.7%)	28.8 (1.3%)	28.5 (1.7%)	28.5 (3.2%)	28.5 (4.1%)	28.6 (5.8%)	28.7 (12.4%)	28.4 (21.5%)	28.9 (6.2%)
	ค่าสูงสุด	31.3	32.9	34.2	34.8	32.4	30.9	30.5	30.6	21.0	30.6	30.5	30.5	31.5
	ค่าต่ำสุด	24.6	26.7	28.0	27.7	27.4	25.4	24.9	24.6	24.4	24.7	25.6	24.9	26.3
	RCP 8.5													
	ค่าเฉลี่ย	29.0 (23.0%)	29.8 (14.3%)	31.1 (8.1%)	31.2 (1.9%)	29.9 (1.2%)	29.2 (2.9%)	28.9 (3.2%)	29.1 (5.3%)	29.2 (6.5%)	29.3 (8.5%)	29.6 (15.9%)	29.4 (25.7%)	29.6 (9.0%)
	ค่าสูงสุด	32.8	34.6	36.3	37.4	34/4	32.4	31.9	31.9	32.3	31.8	32.4	32.6	33.2
	ค่าต่ำสุด	24.7	26.7	28.4	28.0	27.7	25.7	25.2	25.0	24.9	25.1	26.1	25.5	26.9



รูปที่ 3 แผนที่แสดงการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีสำหรับเหตุการณ์ในอดีตเปรียบเทียบกับในอนาคตสำหรับ สถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5

ตารางที่ 6 อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีในแต่ละลุ่มน้ำสำหรับในกรณีของข้อมูลในอดีตกับในอนาคตสำหรับสถานการณ์ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5

ลุ่มน้ำ	ค่าตรวจวัด	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ปิง	26.3	27.3	28.0	28.6
วัง	26.1	27.3	27.8	28.6
ยม	26.9	27.7	28.7	29.6
น่าน	26.9	28.1	28.9	29.8
เจ้าพระยา	28.1	28.6	29.6	30.0
ป่าสัก	28.2	28.3	30.0	30.5
ท่าจีน	27.6	28.6	29.4	29.9
สะแกกรัง	28.2	28.5	29.5	30.0
ค่าเฉลี่ย	27.3	28.0	29.0	29.6
ค่าสูงสุด	28.2	28.6	30.0	30.5
ค่าต่ำสุด	26.1	27.3	27.8	28.6

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Goovaert. “Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation into the Spatial Interpolation of Rainfall”. *Journal of Hydrology,* pp. 113-129, 2000.

[2] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, อุทกวิทยาขั้นสูง”, วีรวรรณ พริ้นท์ติ้ง แอนด์ แพ็คเก็จจิ้ง, พ.ศ. 2556, 651 หน้า.

[3] Hewitson, B.C. and Crane, R.G. “Climate Downscaling: techniques and applications”. *Climate Research*, 7: 85–95, 1996.

[4] Wilby, R.L., and Wigley, T.M.L. “Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations”. *Progress in Physical Geography*, 21, 530–548, 1997.

[5] Zorita, E. and von Storch, H. “A survey of statistical downscaling techniques”. *GKSS 97/E/20*, 1997.

[6] Xu, C.-Y. “From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches”. *Progress in Physical Geography,* 23(2), 229–249, 1999.

[7] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ และคณะ. “การเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคดาวน์สเกลลิงเพื่อการประเมินตัวแปรด้านภูมิอากาศสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ”. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กทม, พ.ศ. 2555.

[8] Fowler, H.J., Ekstrom, M ., Kilsby, C.G. , and Jones P.D. “New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Assessment of control climate”. *Journal of Hydrology*, 300, 212–233, 2005.

[9] Rowell DP. “A demonstration of the uncertainty in projection of UK climate change resulting from regional model formulation”. *Climate Change,* 79(3-4), 243-257, 2006.

[10] Widman M, Bretherton CS. “ Validation of mesoscale precipitation in the NCEP Reanalysis using a new gridcell dataset for the Northwestern United State” . *Journal of Climate,* 13, 1936–1950, 2000.

[11] Salathe EP. “ Downscaling simulation of future global climate with application to hydrologic modelling”. *International Journal of Climatology,* 25, 419-436, 2005.

[12] Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M. “ SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts” . *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145–157, 2002.

[13] Wilby, R.L., L.E. Hayc and G.H. Leavesleyc. “A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado” *J. of Hydrology*, 225, 67–91, 1999.

[14] Johnson,F.M. and A. Sharma. *Assessing future droughts in Australia – a nesting model to correct for long-term persistence in general circulation model precipitation simulations*. 18th World IMACS/MODSIM Congress. Cairns, Australia, 13-17 Jul, 2009, pp.3935-3941.