



การศึกษาเบื้องต้นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย



โดย

นางสาวจินดารัตน์ ปรีโยธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาเบื้องต้นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

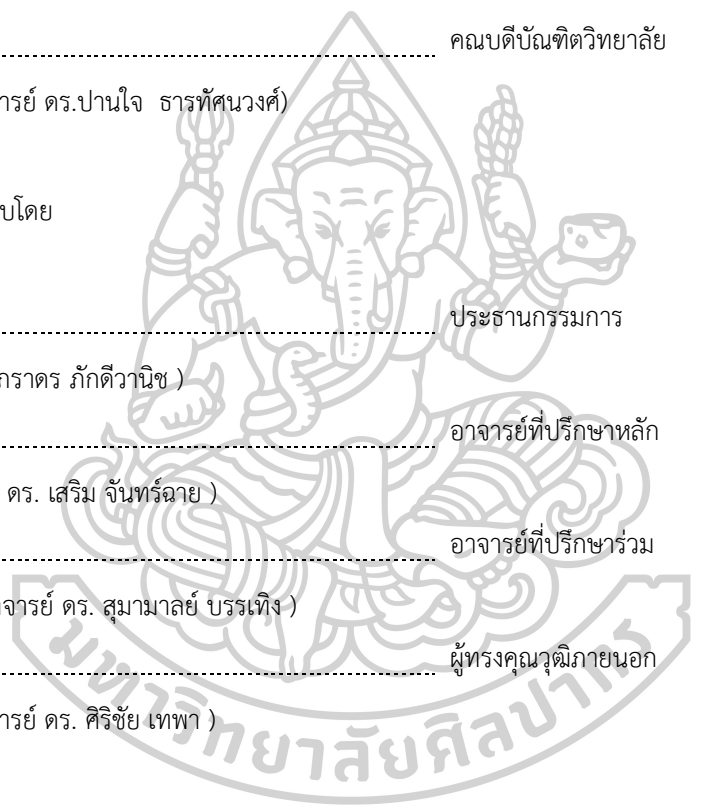
A PRELIMINARY STUDY OF ATMOSPHERIC WATER VAPOUR IN THAILAND



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (PHYSICS)
Science Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาเบื้องต้นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย
โดย	จินดารัตน์ ปรีโยธร
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต



.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
.....	ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ภราดร ภัคดีวานิช)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลย์ บรรเทียง)	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)	

57306206 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ไอน้ำในบรรยากาศ, ตรวจอากาศชั้นบน, mixing ratio

นางสาว จินดารัตน์ ปรีโยธร: การศึกษาเบื้องต้นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาเบื้องต้นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย โดยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ และทำการศึกษาการแปรค่าตามความสูงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในการพัฒนาแบบจำลองผู้วิจัยใช้ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ได้จากสถานีวัดภาคพื้นดิน และข้อมูลปริมาณไอน้ำจากการตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา 4 แห่ง ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีกรุงเทพมหานคร และสถานีสงขลา จากนั้นผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศผิวพื้น มาหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลปริมาณไอน้ำที่ได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน แล้วทำการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2000 – 2009 และทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลในปี ค.ศ. 2010 – 2014 จากการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากเครื่อง sunphotometer พบว่ามีค่าสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่างในรูปของ root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) เท่ากับ 14.32% และ -9.23% ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำตามแนวตั้งในรูปของ mixing ratio ผู้วิจัยใช้ข้อมูลการตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา 5 แห่ง และข้อมูลของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร 5 แห่ง ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย จากผลที่ได้พบว่า mixing ratio มีค่าสูงสุดที่พื้นผิวและลดลงตามความสูง จนกระทั่งถึงความสูงประมาณ 8 km จะไม่พบปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ส่วนการแปรค่าปริมาณไอน้ำตามฤดูกาลพบว่า ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง มีค่า mixing ratio สูงสุดในช่วงฤดูฝน เนื่องจากช่วงฤดูฝนพื้นที่ประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนในฤดูหนาว mixing ratio มีค่าต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างต่ำไอน้ำจึงเกิดการควบแน่นได้ง่าย ส่งผลให้ไอน้ำในบรรยากาศมีปริมาณลดลง ในส่วนของภาคใต้จะมีค่า mixing ratio ที่ค่อนข้างสูงและค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งปี

57306206 : Major (PHYSICS)

Keyword : water vapour, mixing ratio, radiosonde

MISS Jindarat PARIYOTHON : A Preliminary Study of Atmospheric Water Vapour in Thailand Thesis advisor : Professor Serm Janjai, Ph.D.

In this work, a preliminary study of atmospheric water vapour in Thailand was carried out. The work consists of two parts. The first part was the development of a model for estimating precipitable water and the second part was a study of the vertical profile of water vapour. For the first part, relative humidity, air temperature and saturated vapour pressure from ground-based measurements and precipitable water obtained from radiosonde at 4 meteorological stations, namely Chiang Mai, Ubon Ratchathani, Bangkok and Songkhla during a 10-year period (2000-2009) were correlated to form the model. For the validation, the model was used to calculate precipitable water during 2010-2014. The comparison result shows that the precipitable water estimated from the model is in reasonable agreement with those measured from sunphotometers with root mean square difference (RMSD) and mean bias difference (MBD) of 14.32% and -9.23%, respectively.

For the study of the vertical profile, water vapour mixing ratio was calculated from the upper air data from 5 stations of the Meteorological Department and 5 stations of the Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation. The result shows that the mixing ratio is highest at the surface and decreases with increasing altitude till 8 km. For seasonal variations, mixing ratio profiles in the North, Northeast and Central regions are highest during the rainy season due to the influence of the northeast monsoon. The mixing ratio is lowest in winter because the air temperature in this period is relatively low. Thus condensation occurs easily. For the southern region, the mixing ratio is relatively high and trends to be high throughout the year.

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิตนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลการตรวจอากาศผิวพื้นและการตรวจอากาศชั้นบนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูลสำหรับใช้ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณหัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนด้านงานบริหารต่าง ๆ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ภราดร ภักดีวานิช และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ. ดร. สุมาลย์ บรรเทียง ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ และอาจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย ที่ให้คำแนะนำด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศเขตร้อน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัว รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

จินดารัตน์ ปรีโยธร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 หลักการทางวิชาการ.....	3
2.1 บรรยากาศของโลก.....	3
2.2 ไอน้ำในบรรยากาศ.....	5
2.2.1 การเปลี่ยนเฟส.....	5
2.2.2 การระเหย การควบแน่น และการอิมิตัวของไอน้ำ.....	6
2.2.3 การบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	8
2.3 บทบาทของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	11
2.3.1 วัฏจักรน้ำ.....	11
2.3.2 ก๊าซเรือนกระจก.....	12
2.3.3 Positive feedback.....	12
2.3.4 เสถียรภาพของอากาศ.....	13
2.4 วิธีการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	14

2.5 การแปรค่าของปริมาณไอน้ำ.....	28
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	32
3.1 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับหาปริมาณไอน้ำจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น.....	32
3.1.1 เครื่องมือวัดและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น.....	32
3.1.1.1 เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ.....	32
3.1.1.2 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	33
3.1.1.3 เครื่องวัดความดันอากาศ.....	35
3.1.1.4 ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น.....	36
3.1.2 เครื่องมือวัดและข้อมูลจากการตรวจอากาศชั้นบน.....	42
3.1.2.1 เครื่องตรวจอากาศชั้นบน.....	42
3.1.2.2 ข้อมูลจากการตรวจอากาศชั้นบน.....	43
3.1.2.3 การคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน.....	48
3.1.3 แบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณไอน้ำ.....	52
3.1.3.1 การสร้างแบบจำลอง.....	52
3.1.3.2 การทดสอบแบบจำลอง.....	54
3.1.4 การคำนวณหาปริมาณไอน้ำในคอลัมน์ของบรรยากาศทั่วประเทศ.....	55
3.2 การหาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	60
3.2.1 ข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน.....	60
3.2.1.1 เครื่องมือวัดและข้อมูลของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร.....	60
3.2.1.2 เครื่องมือวัดและข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา.....	67
3.2.2 การคำนวณหาปริมาณไอน้ำตามแนวตั้ง.....	72
3.2.3 การศึกษาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำจากข้อมูลการวัดของกรมฝนหลวง และการบินเกษตรและกรมอุตุนิยมวิทยา.....	74

3.2.3.1 การแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำรายเดือน.....	74
3.2.3.2 การแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำตามฤดูกาล.....	106
บทที่ 4 สรุป.....	118
รายการอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	123
ภาคผนวกที่ 1 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยา 81 แห่ง ทั่วประเทศไทย	124
ภาคผนวกที่ 2 การแปรค่า mixing ratio ของไอน้ำตามแนวตั้งเฉลี่ยรายเดือนของ 10 สถานีวัดใน ประเทศไทย.....	166
ประวัติผู้เขียน.....	197



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ช่วงเวลาของข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศผิวพื้นที่ใช้ในงานวิจัย	37
ตารางที่ 3.2 ช่วงเวลาของข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศจากการตรวจอากาศชั้นบนที่ใช้ในงานวิจัย	43
ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศจำนวน 81 แห่ง	55
ตารางที่ 3.4 ช่วงเวลาของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ได้จาก radiosonde ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	64
ตารางที่ 3.5 ช่วงเวลาของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ได้จาก radiosonde ของกรมอุตุนิยมวิทยา	69



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างบรรยากาศโดยแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง ดัดแปลงจาก (Wallace & Hobbs, 2006).....	4
รูปที่ 2.2 โมเลกุลของน้ำ (Ahrens, 2012)	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน (Ahrens, 2012)	6
รูปที่ 2.4 พลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนและที่ถูกคายออกเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ (Ahrens, 2012)6	
รูปที่ 2.5 ลักษณะอากาศ (a) ไม่อึมตัว และ (b) อึมตัวด้วยไอน้ำ โดยลูกศรแสดงอัตราการระเหย (\uparrow) และอัตราการควบแน่น (\downarrow) (T คืออุณหภูมิ e คือความดันไอน้ำ และ e_s คือความดันไอน้ำ อึมตัว) (Wallace & Hobbs, 2006).....	7
รูปที่ 2.6 การแปรค่าของความดันไอน้ำอึมตัวเหนือพื้นน้ำกับอุณหภูมิ (Wallace & Hobbs, 2006). 8	
รูปที่ 2.7 ปริมาตรอากาศที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ (Ahrens, 2012)	9
รูปที่ 2.8 การบอกปริมาณ precipitable water โดยคอลัมน์อากาศทางซ้ายมือประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ส่วนคอลัมน์ทางขวามือประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำที่ถูกควบแน่นลงมาเป็นน้ำที่พื้นผิวโลก (ดาวน์โหลดจาก http://www.eumetrain.org/).....	10
รูปที่ 2.9 วัฏจักรของน้ำ (Ahrens, 2012)	11
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดง water vapour feedback ดัดแปลงจาก (Basha, 2013.).....	13
รูปที่ 2.11 การตรวจวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ (AGU, 1995).....	14
รูปที่ 2.12 ลักษณะของ radiosonde ที่ติดไปกับบอลลูน (Shankar, 2002)	15
รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง radiosonde ที่ใช้ในการตรวจวัดอากาศชั้นบน (Shankar, 2002)	16
รูปที่ 2.14 การส่งสัญญาณวิทยุจากเครื่อง radiosonde มายังเครื่องรับภาคพื้นดิน (Shankar, 2002)	16
รูปที่ 2.15 เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิที่ติดตั้งไปกับเครื่องบิน (Kämpfer, 2013)	18
รูปที่ 2.16 เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (a) สถานที่ติดตั้ง (b) ลักษณะตัวเครื่อง (Guiraud, Howard, & Hogg, 1979)	19
รูปที่ 2.17 ปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ที่เมือง Denver, Colorado จำนวน 15 วัน เดือนสิงหาคม ค.ศ. 1978 (Guiraud et al., 1979).....	19
รูปที่ 2.18 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Lidar (Kämpfer, 2013)	20

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างผลการตรวจวัดความหนาแน่นของไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้เครื่อง Lidar และ radiosonde (Kämpfer, 2013)	21
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างผลการตรวจวัดความชื้นสัมบูรณ์ของบรรยากาศโดยใช้เครื่อง Lidar และ radiosonde (Cooney, 1980.).....	21
รูปที่ 2.21 จานรับสัญญาณดาวเทียม GPS ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	22
รูปที่ 2.22 ตัวอย่างปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่อง GPS ที่สถานีใน (a) ชีกโลกเหนือ (b) แอฟริกา ตะวันตก และ (c) เขตศูนย์สูตรและชีกโลกใต้ (Bock et al., 2007).....	23
รูปที่ 2.23 การวัดแบบ nadir และ limb (http://www.iup.uni-bremen.de/)	24
รูปที่ 2.24 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (Kämpfer, 2013)	24
รูปที่ 2.25 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดการแผ่รังสี ในช่วงอินฟราเรด (Kämpfer, 2013)	25
รูปที่ 2.26 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดการแผ่รังสี ในช่วงไมโครเวฟ (Kämpfer, 2013).....	26
รูปที่ 2.27 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดรังสีในช่วง อินฟราเรดใกล้ (Kämpfer, 2013)	27
รูปที่ 2.28 การแปรค่าของปริมาณไอน้ำและอุณหภูมิตามความสูง (AGU, 1995).....	28
รูปที่ 3.1 เรือนเทอร์โมมิเตอร์ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ.....	33
รูปที่ 3.2 เครื่องไฮโครมิเตอร์กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ	34
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบกราฟ ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ	35
รูปที่ 3.4 เครื่องบาโรมิเตอร์สำหรับวัดความดันบรรยากาศ.....	35
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศผิวพื้น.....	36
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	38
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยา ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	38
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี	39

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	39
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	40
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	40
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	41
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	41
รูปที่ 3.14 การปล่อยบอลลูนที่ติดตั้งเครื่อง radiosonde ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	42
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 7 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	44
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	45
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร.....	46
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจึงและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 3 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	47
รูปที่ 3.19 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ปี ค.ศ. 2009	50
รูปที่ 3.20 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี ปี ค.ศ. 2009.....	50
รูปที่ 3.21 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	51
รูปที่ 3.22 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา ปี ค.ศ. 2006.....	51
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน (w) และข้อมูลผิวพื้น (เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว และ T คือ อุณหภูมิของอากาศ).....	53

รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากเครื่อง sunphotometer	54
รูปที่ 3.25 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานี อุตุนิยมวิทยาเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย	58
รูปที่ 3.26 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ ...	58
รูปที่ 3.27 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ ...	59
รูปที่ 3.28 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ ...	59
รูปที่ 3.29 อุปกรณ์ตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	61
รูปที่ 3.30 การตรวจอากาศชั้นบนและการรับสัญญาณของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	61
รูปที่ 3.31 ตัวอย่างข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ได้รับการตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝน หลวงและการบินเกษตร	62
รูปที่ 3.32 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	63
รูปที่ 3.33 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 12 สิงหาคม ค.ศ. 2016 สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลยางเปียง อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่	65
รูปที่ 3.34 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 28 ตุลาคม ค.ศ. 2016 สถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี	66
รูปที่ 3.35 อุปกรณ์ตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา	67
รูปที่ 3.36 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา	68
รูปที่ 3.37 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิอากาศตามความดันระดับต่าง ๆ ของกรมอุตุนิยมวิทยา	69
รูปที่ 3.38 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 7 มกราคม ค.ศ. 2009 ณ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่	70
รูปที่ 3.39 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 3 มกราคม ค.ศ. 2009 ณ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา	71
รูปที่ 3.40 แผนภูมิแสดงการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ความดันต่าง ๆ เฉลี่ยรายเดือน	73
รูปที่ 3.41 แผนภูมิแสดงการคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศที่ความดันต่าง ๆ เฉลี่ยรายเดือน	73
รูปที่ 3.42 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี เชียงใหม่ (อมก๋อย)	75
รูปที่ 3.43 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี นครสวรรค์ (ตาคลี)	76

รูปที่ 3.44 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี นครราชสีมา (พิมาย)	77
รูปที่ 3.45 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี ชลบุรี (สัตหีบ)	78
รูปที่ 3.46 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2016 ของสถานี สุราษฎร์ธานี (พนม)	79
รูปที่ 3.47 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี เชียงใหม่ (เมือง)	80
รูปที่ 3.48 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)	81
รูปที่ 3.49 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)	82
รูปที่ 3.50 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของ สถานี สงขลา (เมือง)	83
รูปที่ 3.51 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี ภูเก็ต (กลาง)	84
รูปที่ 3.52 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 - 2016) ของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	85
รูปที่ 3.53 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 - 2016) ของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	86
รูปที่ 3.54 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 - 2016) ของสถานีนครราชสีมา (พิมาย) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)	87
รูปที่ 3.55 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 - 2016) ของสถานีชลบุรี (สัตหีบ) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	88
รูปที่ 3.56 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2016) ของ สถานี สุราษฎร์ธานี (พนม) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)	89
รูปที่ 3.57 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 - 2015) ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	90
รูปที่ 3.58 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 - 2015) ของสถานีอุบลราชธานี (เมือง) (I-●-I คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	91

รูปที่ 3.59 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015) ของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา) (H-H คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	92
รูปที่ 3.60 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015) ของสถานีสงขลา (เมือง) (H-H คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	93
รูปที่ 3.61 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015) ของสถานีภูเก็ต (กลาง) (H-H คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล).....	94
รูปที่ 3.62 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย).....	96
รูปที่ 3.63 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ).....	97
รูปที่ 3.64 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีนครราชสีมา (พิมาย).....	98
รูปที่ 3.65 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีชลบุรี (สัตหีบ).....	99
รูปที่ 3.66 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม).....	100
รูปที่ 3.67 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีเชียงใหม่ (เมือง).....	101
รูปที่ 3.68 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี (เมือง).....	102
รูปที่ 3.69 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา).....	103
รูปที่ 3.70 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีสงขลา (เมือง).....	104
รูปที่ 3.71 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	105
รูปที่ 3.72 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย).....	107
รูปที่ 3.73 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย).....	107
รูปที่ 3.74 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ).....	108
รูปที่ 3.75 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ).....	108
รูปที่ 3.76 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีนครราชสีมา (พิมาย)....	109
รูปที่ 3.77 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีนครราชสีมา (พิมาย).....	109
รูปที่ 3.78 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีชลบุรี (สัตหีบ).....	110
รูปที่ 3.79 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีชลบุรี (สัต หีบ).....	110
รูปที่ 3.80 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม).....	111

รูปที่ 3.81 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม).....	111
รูปที่ 3.82 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)	112
รูปที่ 3.83 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง).....	112
รูปที่ 3.84 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีอุบลราชธานี (เมือง).....	113
รูปที่ 3.85 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีอุบลราชธานี (เมือง).....	113
รูปที่ 3.86 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา)	114
รูปที่ 3.87 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา).....	114
รูปที่ 3.88 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีสงขลา (เมือง).....	115
รูปที่ 3.89 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีสงขลา (เมือง).....	115
รูปที่ 3.90 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีภูเก็ต (กลาง)	116
รูปที่ 3.91 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีภูเก็ต (กลาง)	116
รูปที่ A1.1 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่ฮ่องสอน อำเภอเมือง จังหวัดแม่ฮ่องสอน.....	125
รูปที่ A1.2 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่สะเรียง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน.....	125
รูปที่ A1.3 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย.....	126
รูปที่ A1.4 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอากาศเกษตรเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย	126
รูปที่ A1.5 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา.....	127
รูปที่ A1.6 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาดอยอ่างขาง อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่.....	127

รูปที่ A1.7 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง	128
รูปที่ A1.8 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาลำพูน อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน	128
รูปที่ A1.9 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่	129
รูปที่ A1.10 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน	129
รูปที่ A1.11 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์	130
รูปที่ A1.12 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาหนองคาย อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย	130
รูปที่ A1.13 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเลย อำเภอเมือง จังหวัดเลย	131
รูปที่ A1.14 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี	131
รูปที่ A1.15 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร	132
รูปที่ A1.16 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม	132
รูปที่ A1.17 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสุโขทัย อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย	133
รูปที่ A1.18 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาดาก อำเภอเมือง จังหวัดดาก	133
รูปที่ A1.19 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่สอด อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก	134
รูปที่ A1.20 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเขื่อนภูมิพล อำเภอสามเงา จังหวัดตาก	134
รูปที่ A1.21 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผาง อำเภออุ้มผาง จังหวัดตาก	135

รูปที่ A1.22 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์	135
รูปที่ A1.23 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาหล่มสัก อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์	136
รูปที่ A1.24 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาวิเชียรบุรี อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์	136
รูปที่ A1.25 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยากำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร	137
รูปที่ A1.26 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น	137
รูปที่ A1.27 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยามุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร	138
รูปที่ A1.28 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์	138
รูปที่ A1.29 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาตากฟ้า อำเภอตากฟ้า จังหวัดนครสวรรค์	139
รูปที่ A1.30 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยนาท อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท	139
รูปที่ A1.31 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอากาศเกษตรพิจิตร อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร	140
รูปที่ A1.32 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยามหาสารคาม อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม	140
รูปที่ A1.33 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยากาฬสินธุ์ อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์	141
รูปที่ A1.34 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ	141
รูปที่ A1.35 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด	142
รูปที่ A1.36 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอากาศเกษตรร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด	142

รูปที่ A1.37 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีระวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี.....	143
รูปที่ A1.38 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ	143
รูปที่ A1.39 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาพระนครศรีอยุธยา อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	144
รูปที่ A1.40 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาปทุมธานี อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี	144
รูปที่ A1.41 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา	145
รูปที่ A1.42 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสุพรรณบุรี อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี.....	145
รูปที่ A1.43 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอู่ทอง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี.....	146
รูปที่ A1.44 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี.....	146
รูปที่ A1.45 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี	147
รูปที่ A1.46 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานำร่อง อำเภอนำร่อง จังหวัดสมุทรปราการ.....	147
รูปที่ A1.47 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสนามบินสุวรรณภูมิ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ.....	148
รูปที่ A1.48 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาปราจีนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี.....	148
รูปที่ A1.49 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา.....	149
รูปที่ A1.50 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา.....	149
รูปที่ A1.51 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาโชคชัย อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา.....	150

รูปที่ A1.52 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสุรินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์	150
รูปที่ A1.53 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาท่าตูม อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์	151
รูปที่ A1.54 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอากาศเกษตรสุรินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์.....	151
รูปที่ A1.55 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยามุขบุรี อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์.....	152
รูปที่ A1.56 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานางรอง อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์	152
รูปที่ A1.57 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาอรัญประเทศ อำเภออรัญประเทศ จังหวัดสระแก้ว	153
รูปที่ A1.58 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสระแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสระแก้ว	153
รูปที่ A1.59 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร.....	154
รูปที่ A1.60 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาทองผาภูมิ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	154
รูปที่ A1.61 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยากาญจนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี.....	155
รูปที่ A1.62 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาชลบุรี อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี.....	155
รูปที่ A1.63 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเกาะสีชัง อำเภอเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี.....	156
รูปที่ A1.64 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาพัททยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี	156
รูปที่ A1.65 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี	157
รูปที่ A1.66 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี.....	157

รูปที่ A1.67 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาระยอง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง	158
รูปที่ A1.68 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาห้วยโป่ง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง	158
รูปที่ A1.69 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาจันทบุรี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี	159
รูปที่ A1.70 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอากาศเกษตรจันทบุรี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี.....	159
รูปที่ A1.71 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาประจวบคีรีขันธ์ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.....	160
รูปที่ A1.72 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาหัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.....	160
รูปที่ A1.73 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาหนองพลับ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.....	161
รูปที่ A1.74 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาตราด อำเภอคลองใหญ่ จังหวัดตราด.....	161
รูปที่ A1.75 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาชุมพร อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร	162
รูปที่ A1.76 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสวี อำเภอสวี จังหวัดชุมพร	162
รูปที่ A1.77 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง.....	163
รูปที่ A1.78 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสุราษฎร์ธานี อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี.....	163
รูปที่ A1.79 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยานครศรีธรรมราช อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช.....	164
รูปที่ A1.80 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา.....	164
รูปที่ A1.81 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาภูเก็ต อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต.....	165

รูปที่ A2.16 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)	182
รูปที่ A2.17 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)	183
รูปที่ A2.18 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)	184
รูปที่ A2.19 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	185
รูปที่ A2.20 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	186
รูปที่ A2.21 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	187
รูปที่ A2.22 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	188
รูปที่ A2.23 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	189
รูปที่ A2.24 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานีสงขลา (เมือง).....	190
รูปที่ A2.25 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	191
รูปที่ A2.26 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	192
รูปที่ A2.27 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	193
รูปที่ A2.28 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	194
รูปที่ A2.29 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	195
รูปที่ A2.30 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานีภูเก็ต (กลาง).....	196

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ไอน้ำในบรรยากาศเป็นตัวแปรที่สำคัญของบรรยากาศและมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีของบรรยากาศทั้งที่ระดับพื้นผิวและบรรยากาศชั้นบน กล่าวคือในชั้นโทรโพสเฟียร์ ไอน้ำจะมีอิทธิพลต่อขนาดและองค์ประกอบของฝุ่นละอองซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง ทักษณวิสัยของบรรยากาศ การรับและแผ่รังสีของบรรยากาศ และมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดเมฆและฝน ส่วนในบรรยากาศชั้นบนซึ่งหมายถึงชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนและชั้นสตราโตสเฟียร์ตอนล่าง ถึงแม้จะมีปริมาณไอน้ำอยู่น้อยแต่ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของบรรยากาศทั้งหมด นอกจากนี้ไอน้ำยังเป็นก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ซึ่งส่งผลเรือนกระจกต่อโลกถึง 60% ของผลเรือนกระจกจากองค์ประกอบทั้งหมดของบรรยากาศ ทั้งนี้เพราะไอน้ำในบรรยากาศยอมให้รังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านมายังพื้นผิวโลก แต่จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แผ่จากพื้นผิวโลกและบรรยากาศ ดังนั้นในการศึกษาความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกและสมดุลของพลังงานของบรรยากาศโลก ตลอดจนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะของบรรยากาศจึงจำเป็นต้องรู้ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

เนื่องจากปริมาณไอน้ำขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำ พื้นผิวดิน กิจกรรมทางการเกษตร ป่าไม้ และสภาพภูมิศาสตร์ ดังนั้น ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจึงเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่และฤดูกาล อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงของไอน้ำในประเทศไทยยังมีค่อนข้างจำกัดจึงจำเป็นต้องทำการวิจัยเพื่อให้ได้องค์ความรู้ดังกล่าว

โดยทั่วไปปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามความสูง ดังนั้นในการคำนวณสถานะของบรรยากาศด้วยแบบจำลองต่าง ๆ นอกจากจะต้องการข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามพื้นที่ต่าง ๆ แล้ว ยังต้องการข้อมูลการแปรค่าตามความสูง (vertical profile) ของปริมาณไอน้ำด้วย อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวในประเทศไทยยังมีจำกัด จึงจำเป็นต้องทำการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลและองค์ความรู้ด้านการแปรค่าตามความสูงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย

ถึงแม้ว่าไอน้ำในบรรยากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณ boundary layer ซึ่งอยู่สูงจากพื้นผิวโลกประมาณ 2 km แต่ในบรรยากาศที่สูงกว่าระดับดังกล่าวก็ยังมีไอน้ำอยู่ โดยไอน้ำในระดับนี้จะมีผลต่ออุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศในบรรยากาศชั้นบน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นบนนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Kämpfer, 2013) อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้เกี่ยวกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นบนสำหรับพื้นที่บริเวณเขตศูนย์สูตรยังมีอยู่จำกัดจึงจำเป็นต้องศึกษาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นบนด้วย

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยเกี่ยวกับไอน้ำในบรรยากาศส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในพื้นที่ทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ สำหรับการศึกษาในเขตศูนย์สูตรรวมถึงในพื้นที่ประเทศไทยมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะทำการศึกษาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเบื้องต้นในประเทศไทยทั้งการพัฒนาแบบจำลองเอ็มไพริคัลและการแปรค่าตามแนวตั้ง

ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลองค์ความรู้เกี่ยวกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของประเทศและนำไปใช้ในงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเบื้องต้นในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะดังนี้

- 1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น
- 2) เพื่อหาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของอัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้ง (mixing ratio)



บทที่ 2

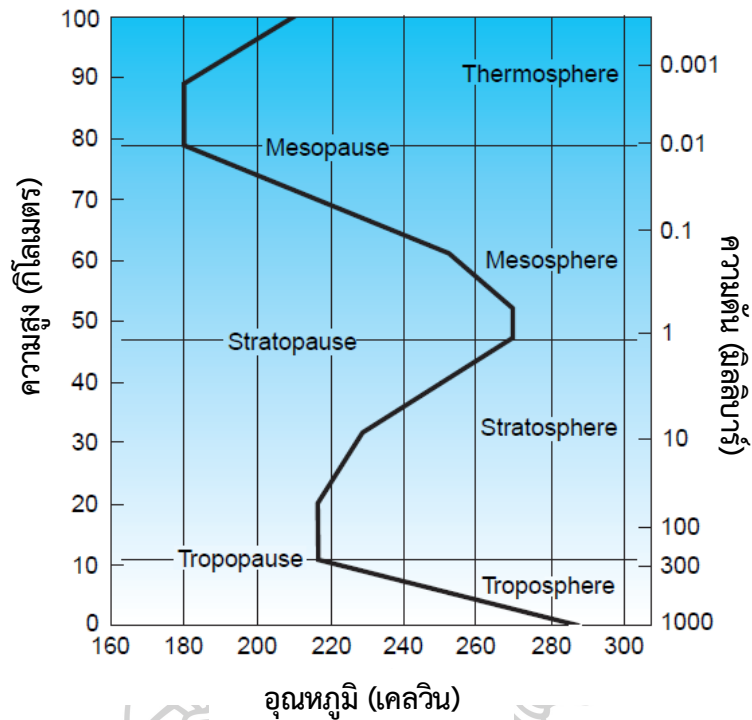
หลักการทางวิชาการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไอน้ำในบรรยากาศ การบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ผลกระทบของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ วิธีการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 บรรยากาศของโลก

บรรยากาศของโลกประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ ได้แก่ ไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 20% อาร์กอน 0.9% และยังมีก๊าซอื่น ๆ (trace gases) ที่มีปริมาณเปลี่ยนแปลงได้ตามพื้นที่และฤดูกาล เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และโอโซน เป็นต้น โดย 99% ของก๊าซเหล่านี้จะอยู่ที่ความสูงต่ำกว่า 30 km หรือในชั้นโทรโพสเฟียร์นั่นเอง ถึงแม้ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีเพียงส่วนน้อยแต่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ในบรรยากาศ อีกทั้งไอน้ำในบรรยากาศชั้นล่างจะมีปริมาณสูงกว่าไอน้ำในบรรยากาศชั้นบน

เมื่อรังสีอาทิตย์จากนอกบรรยากาศโลกเคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศของโลก บรรยากาศจะดูดกลืนและกระเจิงรังสีอาทิตย์ไว้ ส่วนที่เหลือจะส่งผ่านมายังพื้นผิวโลก พื้นผิวโลกจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ไว้บางส่วน ส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมายังบรรยากาศทำให้เกิดการดูดกลืนและกระเจิงก่อนออกสู่นอกบรรยากาศ นอกจากนี้พื้นผิวโลกและบรรยากาศของโลกยังสามารถแผ่รังสีกลับออกมาสู่นอกบรรยากาศได้ด้วย ทำให้เกิดสมดุลพลังงานระหว่างรังสีที่เข้ามายังบรรยากาศของโลก (incoming radiation) และรังสีที่ออกไปสู่นอกบรรยากาศโลก (outgoing radiation) โดยบรรยากาศของโลกตามความสูงสามารถแบ่งได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังนี้ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างบรรยากาศโดยแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง ตัดแปลงจาก (Wallace & Hobbs, 2006)

- โทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นบรรยากาศที่พื้นผิวโลกขึ้นไปจนถึงความสูงประมาณ 8 km ในบริเวณขั้วโลก และประมาณ 17 km บริเวณศูนย์สูตร บรรยากาศชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศค่อนข้างสูง อุณหภูมิของอากาศในชั้นมีค่าลดลงตามความสูง โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิมีค่าประมาณ 6.5 K/km สำหรับระดับสูงสุดของบรรยากาศชั้นนี้เรียกว่า โทรโปพอส (Tropopause) จะมีอุณหภูมิประมาณ 190 K ที่ศูนย์สูตร และ 230 K ที่ขั้วโลก โดยที่พลังงานในบรรยากาศชั้นนี้ส่วนใหญ่จะได้รับมาจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของพื้นผิวโลกและการปลดปล่อยความร้อนแฝงออกสู่บรรยากาศ สำหรับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นนี้ถือว่ามีค่าสูงมากคิดเป็นประมาณ 99.9% ของไอน้ำในบรรยากาศทั้งหมด และไอน้ำที่อยู่ในบรรยากาศชั้นล่างของโทรโพสเฟียร์เป็นต้นกำเนิดให้เกิดเมฆด้วย

- สตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่เหนือโทรโปพอสไปจนถึงความสูงประมาณ 50 km ซึ่งเรียกว่า สตราโตพอส (Stratopause) อุณหภูมิอากาศในชั้นนี้จะเพิ่มขึ้นตามความสูง เนื่องจากบรรยากาศชั้นนี้มีปริมาณโอโซนอยู่ค่อนข้างสูงทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี

- เมโซสเฟียร์ (Mesosphere) เป็นชั้นบรรยากาศเหนือจากสตราโตพอสขึ้นไปจนถึงประมาณ 88-100 km ซึ่งเรียกว่า เมโซพอส (Mesopause) อุณหภูมิของอากาศในชั้นนี้ลดลงตามความสูงด้วยอัตรา 3 K/km และถือว่าเป็นชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือประมาณ 130 K ของช่วงฤดูร้อนที่บริเวณขั้วโลก

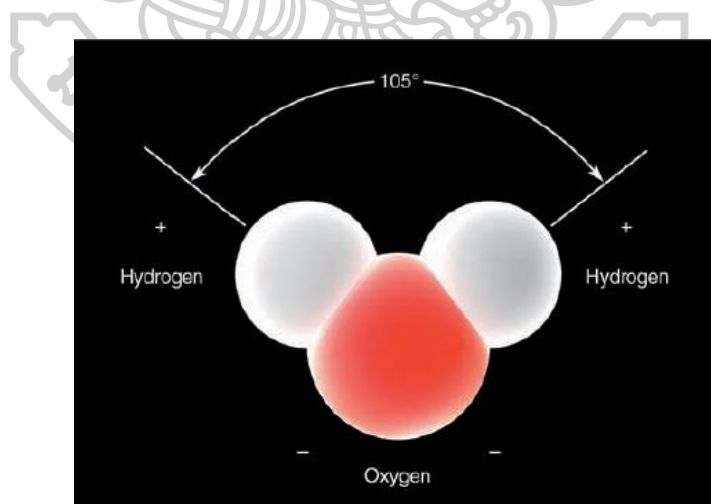
- เทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) เป็นบรรยากาศชั้นที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสูงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 1500 K ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนรังสีความยาวคลื่นสั้นกว่า 200 nm

2.2 ไอ้ในบรรยากาศ

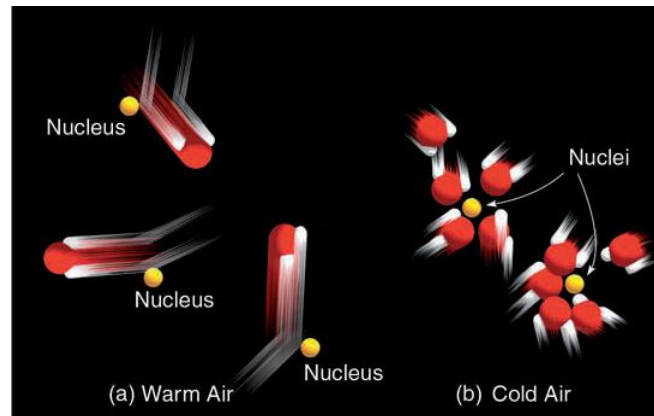
2.2.1 การเปลี่ยนเฟส

น้ำประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอม (รูปที่ 2.2) ซึ่งน้ำในบรรยากาศมีได้ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็งหรือน้ำแข็งหรือหิมะ ของเหลวหรือน้ำ และก๊าซหรือไอน้ำ เมื่อน้ำอยู่ในสถานะก๊าซจะไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ (invisible) สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และสามารถรวมกับโมเลกุลของก๊าซข้างเคียงได้ง่าย โดยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของไอน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมด้วย ถ้าอุณหภูมิอากาศสูงโมเลกุลของไอน้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็ว (รูปที่ 2.3)

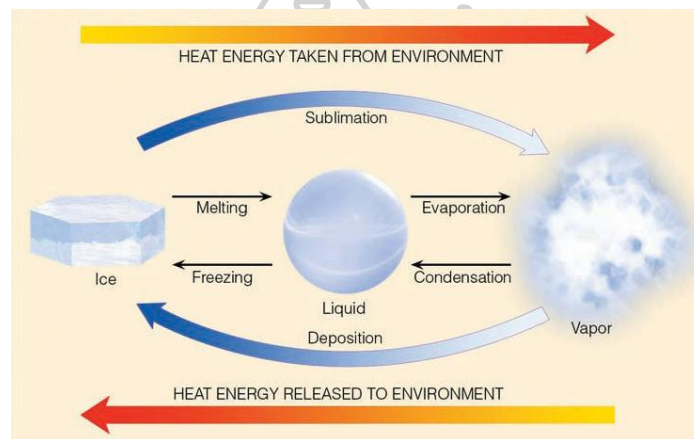
เมื่อน้ำได้รับพลังงานความร้อนเพียงพอ (2.45 MJ/kg) จากรังสีอาทิตย์จะเกิดการระเหยเป็นไอน้ำและลอยขึ้นสู่บรรยากาศ ซึ่งความร้อนที่รับเข้ามาในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำที่ เรียกว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ ไอน้ำจะเกิดการควบแน่นและคายพลังงานความร้อนออกมา โดยความร้อนที่คายออกมาเพื่อเปลี่ยนน้ำในสถานะก๊าซเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำที่ เรียกว่า ความร้อนแฝงของการควบแน่น ซึ่งทำให้อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสถานะระหว่างไอน้ำและน้ำในบรรยากาศมีผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างอากาศกับอากาศแวดล้อม ซึ่งการที่อากาศมีอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่จะนำไปสู่การไหลเวียนของอากาศ ซึ่งมีผลต่อสภาพภูมิอากาศและสภาพลมฟ้าอากาศด้วย



รูปที่ 2.2 โมเลกุลของน้ำ (Ahrens, 2012)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน (Ahrens, 2012)

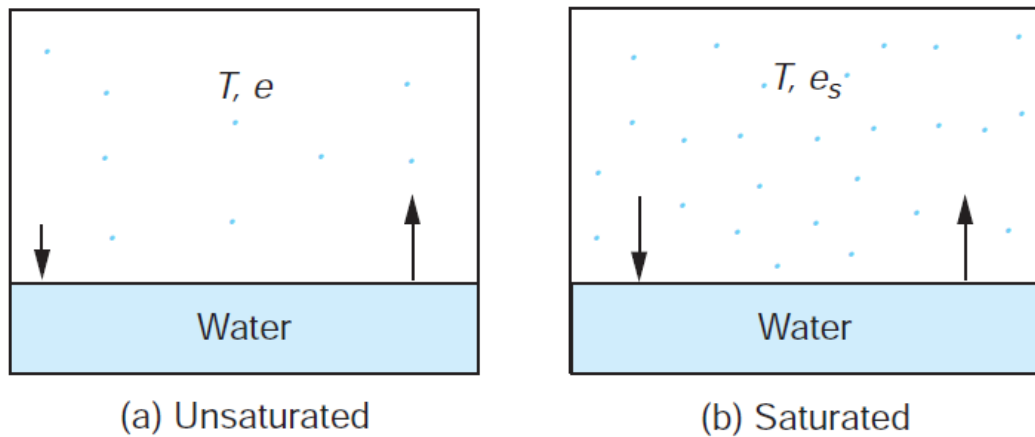


รูปที่ 2.4 พลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนและที่ถูกคายออกเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ (Ahrens, 2012)

2.2.2 การระเหย การควบแน่น และการอิมิตัวของไอน้ำ

ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง น้ำจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำ และไอน้ำจะควบแน่นเป็นน้ำทำให้ความดันของไอน้ำ (vapour pressure, e) เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม โดยความดันของไอน้ำที่วัดโดยบารอมิเตอร์แบบปรอท มีค่า 4.58 mm ที่ 0°C และมีค่า 760 mm ที่ 100°C หรือ 1 ความดันบรรยากาศ

หากพิจารณาภาชนะปิดซึ่งบรรจุน้ำอุณหภูมิ T ไว้ภายใน และอากาศภายในเหนือผิวน้ำเป็นอากาศแห้งมีความดันไอน้ำ e น้ำจะเริ่มระเหยสู่อากาศด้านบนทำให้ความดันของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไอน้ำสามารถควบแน่นกลับมาเป็นน้ำแล้วตกลงสู่ด้านล่างได้อีก ถ้าอัตราการระเหยเท่ากับอัตราการควบแน่น จะเรียกว่าเกิดการอิมิตัวของไอน้ำเหนือผิวน้ำที่อุณหภูมิ T และเรียกความดันขณะนี้ว่า ความดันไอน้ำอิมิตัวเหนือผิวน้ำ (saturated vapour pressure, e_s) ที่อุณหภูมิ T และเรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะอิมิตัว (saturation) หรือ equilibrium



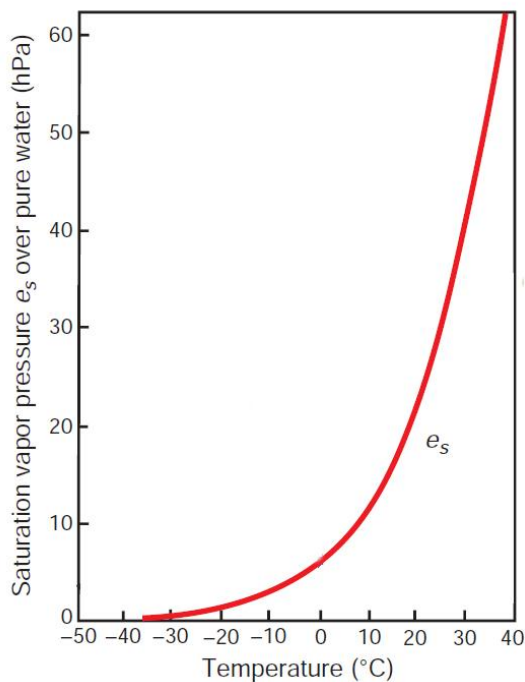
รูปที่ 2.5 ลักษณะอากาศ (a) ไม่อิ่มตัว และ (b) อิ่มตัวด้วยไอน้ำ โดยลูกศรแสดงอัตราการระเหย (\uparrow) และอัตราการควบแน่น (\downarrow) (T คืออุณหภูมิ e คือความดันไอน้ำ และ e_s คือความดันไอน้ำอิ่มตัว) (Wallace & Hobbs, 2006)

อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะสามารถกักเก็บไอน้ำได้มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวและอุณหภูมิอากาศ จะเป็นไปตามสมการ Clausius-Clapeyron ดังนี้

$$\ln \frac{e_s}{e_{s0}} = \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ T_0 คือ 273 K
 e_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว [hPa]
 e_{s0} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_0 [6.11 hPa]
 L_v คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ [2.453×10^6 J/kg]
 R_v คือ ค่าคงที่ของไอน้ำ [461 J/kg K]

โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.6



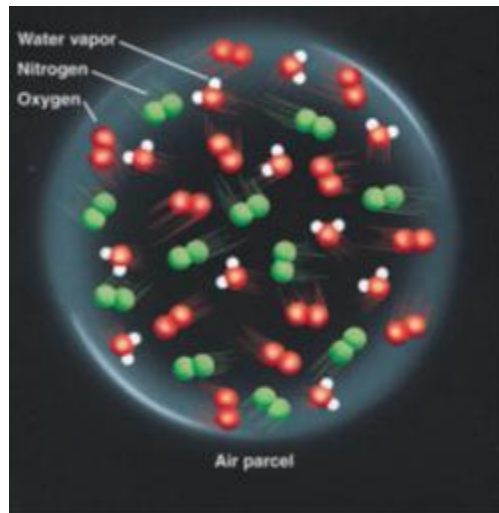
รูปที่ 2.6 การแปรค่าของความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือพื้นน้ำกับอุณหภูมิ (Wallace & Hobbs, 2006)

ในทำนองเดียวกัน หากน้ำแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ และอัตราการระเหยของน้ำแข็งเท่ากับอัตราการควบแน่นของไอน้ำ จะเรียกความดันขณะนี้ว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำแข็ง (e_s) ที่อุณหภูมิ T โดยที่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำแข็งจะมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำเหนือผิวน้ำ

2.2.3 การบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ในการบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถบอกได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

- ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) หรือความหนาแน่นของไอน้ำ (water vapour density) คือ การบอกมวลของไอน้ำเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของอากาศที่สนใจ มีหน่วยเป็น g/m^3 โดยภายในปริมาตรของอากาศที่สนใจจะประกอบด้วยอากาศแห้ง (dry air) ซึ่งเป็นอากาศที่ไม่มีไอน้ำอยู่ และโมเลกุลของไอน้ำ และจะเรียกอากาศแห้งที่มีไอน้ำอยู่ว่า อากาศชื้น (moist air)



รูปที่ 2.7 ปริมาตรอากาศที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ (Ahrens, 2012)

- ความชื้นจำเพาะ (specific humidity, q) คือ การบอกมวลของไอน้ำเทียบกับมวลของอากาศทั้งหมดในปริมาตรที่สนใจ โดยทั่วไปจะบอกหน่วยเป็น g/kg หรือเขียนได้ดังสมการ

$$q = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (2.2)$$

เมื่อ q คือ ความชื้นจำเพาะ [g/kg]
 m_v คือ มวลของไอน้ำ [g]
 m_d คือ มวลของอากาศแห้ง [kg]

- อัตราส่วนผสม (mixing ratio, M) คือ การบอกมวลของไอน้ำในปริมาตรอากาศที่สนใจ เทียบกับมวลของอากาศแห้งในปริมาตรนั้น มีหน่วยเป็น g/kg หรือเขียนได้ดังสมการ

$$M = \frac{m_v}{m_d} \quad (2.3)$$

เมื่อ M คือ อัตราส่วนผสม [g/kg]
 m_v คือ มวลของไอน้ำ [g]
 m_d คือ มวลของอากาศแห้ง [kg]

โดยทั่วไปอัตราส่วนผสมของไอน้ำมีค่าประมาณ 3 g/kg สำหรับบริเวณละติจูดกลาง และจะมีค่าสูงประมาณ 20 g/kg สำหรับบริเวณเขตร้อน

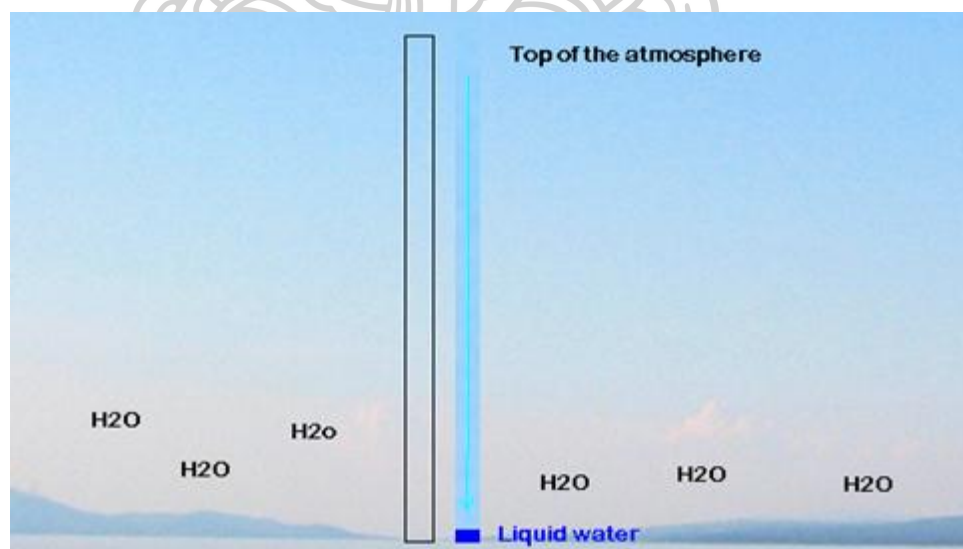
- ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ดังสมการ

$$RH = 100 \frac{e}{e_s} \quad (2.4)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]
 e คือ ความดันไอน้ำ [hPa]
 e_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว [hPa]

- ปริมาณไอน้ำรวมในคอลัมน์อากาศ

การบอกปริมาณไอน้ำในคอลัมน์อากาศนิยมบอกในรูปของ precipitable water มีหน่วยเป็น cm ซึ่งเป็นความสูงของไอน้ำในคอลัมน์ของอากาศ เมื่อสมมติว่าให้ไอน้ำทั้งหมดในคอลัมน์อากาศที่ตั้งฉากกับพื้นผิวโลกซึ่งมีพื้นที่ฐาน 1 หน่วย มีการควบแน่นกลายเป็นน้ำที่พื้นผิวโลก ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ อาจบอกได้ในรูปของ water vapour path ซึ่งเป็นการรวมความหนาแน่นของไอน้ำจากพื้นผิวโลกขึ้นไปถึง top of the atmosphere มีหน่วยเป็น kg/m²



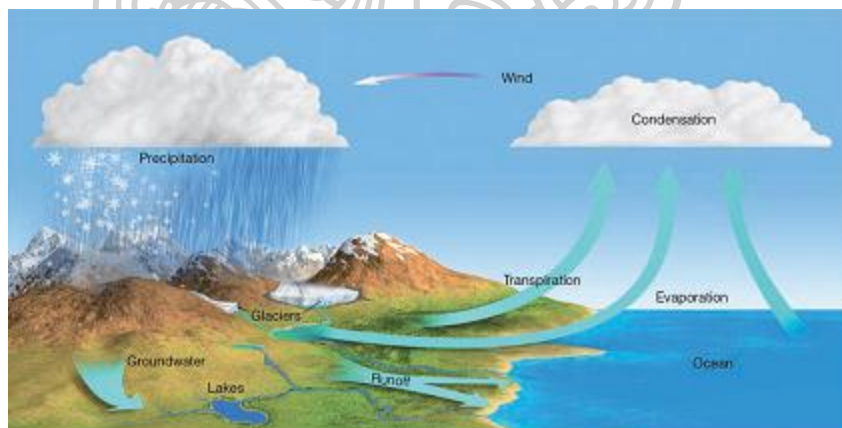
รูปที่ 2.8 การบอกปริมาณ precipitable water โดยคอลัมน์อากาศทางซ้ายมือประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ส่วนคอลัมน์ทางขวามือประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำที่ถูกควบแน่นลงมาเป็นน้ำที่พื้นผิวโลก (ดาวน์โหลดจาก <http://www.eumetrain.org/>)

2.3 บทบาทของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ถึงแม้ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซอื่น ๆ ในบรรยากาศ แต่ไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเชิงพื้นที่และเวลาค่อนข้างสูง และมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการต่าง ๆ ในบรรยากาศของโลก เช่น ไอน้ำมีผลต่อปรากฏการณ์เรือนกระจก มีผลต่อการเกิดเมฆและฝน และการกระจายตัวของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีผลต่อเสถียรภาพของบรรยากาศในแนวตั้งซึ่งส่งผลต่อการเกิดพายุได้ นอกจากนี้ไอน้ำยังมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีในบรรยากาศด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 วัฏจักรน้ำ

โลกประกอบด้วยพื้นมหาสมุทรคิดเป็น 70% ของพื้นที่ผิวโลกทั้งหมด เมื่อน้ำในมหาสมุทรได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เพียงพอจะทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำลอยสู่บรรยากาศซึ่งกักเก็บพลังงานไว้ ลมที่พัดผ่านบริเวณนั้นจะพัดพาเอาไอน้ำหรือพลังงานบางส่วนไปยังพื้นที่อื่น ๆ ไอน้ำเหล่านี้อาจเกิดการควบแน่นกลายเป็นเมฆและตกลงมาสู่พื้นผิวโลกอีกครั้งในรูปของฝนหรือหิมะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานสู่บรรยากาศอีกครั้ง น้ำเหล่านี้อาจถูกกักเก็บไว้ที่ผิวดิน เช่น ไหลลงสู่หนอง คลอง และบึง เป็นต้น และบางส่วนจะไหลกลับสู่มหาสมุทรดั้งเดิม สำหรับการซึมของน้ำใต้ผิวดินจะทำให้พื้นดินมีความชื้นเพิ่มขึ้น โดยน้ำในดินหรือในมหาสมุทรจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำและทำให้เกิดเมฆและฝน หมุนเวียนเป็นวัฏจักรของน้ำ (hydrological cycle) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วัฏจักรของน้ำ (Ahrens, 2012)

ไอน้ำในบรรยากาศอาจเกิดจากการระเหยของน้ำเหนือพื้นดิน แม่น้ำ ลำธาร หรือเกิดจากการคายน้ำของพืช โดยไอน้ำที่เกิดจากกระบวนการเหล่านี้คิดเป็นเพียง 15% ของไอน้ำทั้งหมดในบรรยากาศต่อปี (ประมาณ 1,500 พันล้านแกลลอน) ส่วนอีก 85% เกิดจากการระเหยของน้ำเหนือมหาสมุทร โดยถ้าไอน้ำในบรรยากาศเกิดการควบแน่นกลายเป็นน้ำตกลงสู่พื้นผิวโลกจะถือว่าความสูงเฉลี่ยทั่วโลกของระดับน้ำที่ถูกควบแน่นหรือที่เรียกว่า precipitable water มีค่าประมาณ 2.5 cm อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ไอน้ำในแต่ละพื้นที่มีค่าไม่เท่ากันโดยมีค่าสูงบริเวณศูนย์สูตรและมีค่าต่ำที่

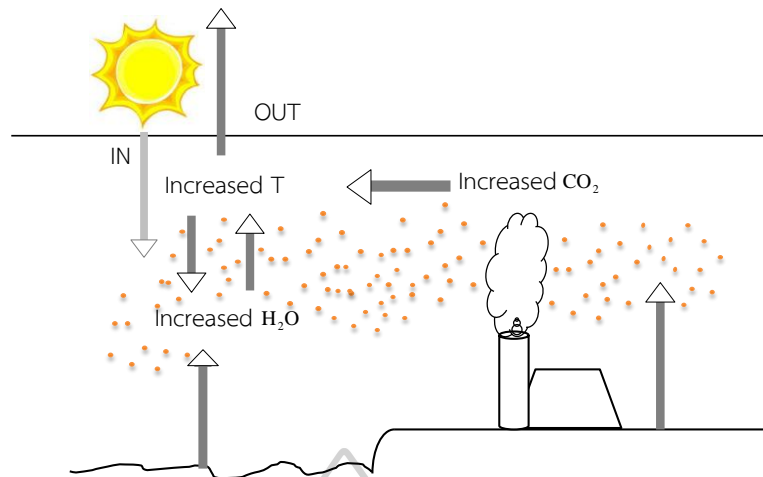
บริเวณขั้วโลก ซึ่งถือได้ว่าที่บริเวณศูนย์สูตรมีค่า precipitable water สูงถึง 5.0 cm ในขณะที่บริเวณขั้วโลกมีค่าน้อยกว่าเพียง 1/10 เท่า สาเหตุที่ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศบริเวณศูนย์สูตรมีค่าสูงกว่าบริเวณขั้วโลกเป็นผลมาจากบริเวณศูนย์สูตรได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากกว่าทำให้มีอุณหภูมิอากาศสูงกว่า ดังนั้นบรรยากาศจึงสามารถกักเก็บไอน้ำได้มากกว่าบริเวณขั้วโลกซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยพบว่า ความเข้มข้นไอน้ำอิ่มตัวมีค่า 2.06 ส่วนในพันส่วนของปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิ 260 K (-13°C) และความดัน 1000 hPa และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6.14 และ 35.9 ส่วนในพันส่วนของปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิ 273 K (0°C) และ 300 K (27°C) ตามลำดับ

2.3.2 ก๊าซเรือนกระจก

ไอน้ำถือเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญมากซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในกรณีของโลกมีอุณหภูมิ 300 K และไม่มีบรรยากาศห่อหุ้ม จะมีการแผ่พลังงานออกมาประมาณ 459 W/m^2 ในขณะที่ถ้ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวในบรรยากาศ (300 ส่วนในล้านส่วนปริมาตรของอากาศ) จะแผ่รังสีออกมา 409 W/m^2 อย่างไรก็ตาม ถ้าในบรรยากาศนี้มีไอน้ำด้วย (RH = 40%) พลังงานที่ถูกแผ่ออกมาจะลดลงเหลือเพียง 309 W/m^2 และจะยิ่งลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ 303 W/m^2 เมื่อ RH เท่ากับ 50% และ 297 W/m^2 เมื่อ RH เท่ากับ 60% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเพียงเล็กน้อยจะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศด้วย (climate sensitivity)

2.3.3 Positive feedback

การเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นทำให้รังสีคลื่นยาว (outgoing longwave radiation) ผ่านออกสู่นอกบรรยากาศโลกได้น้อยลง และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์ เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้น้ำในบรรยากาศเกิดการระเหยและมีปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น และยิ่งอุณหภูมิของอากาศยิ่งสูงก็จะสามารถกักเก็บไอน้ำได้มากขึ้นด้วย โดยไอน้ำเองถือเป็นก๊าซเรือนกระจกเช่นกัน ดังนั้น จึงยิ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดง water vapour feedback ตัดแปลงจาก (Basha, 2013.)

นอกจากนี้ ผลที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศพบว่า ประมาณ 35% ของ water vapour feedback เกิดจากไอน้ำในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนในเขตศูนย์สูตร

2.3.4 เสถียรภาพของอากาศ

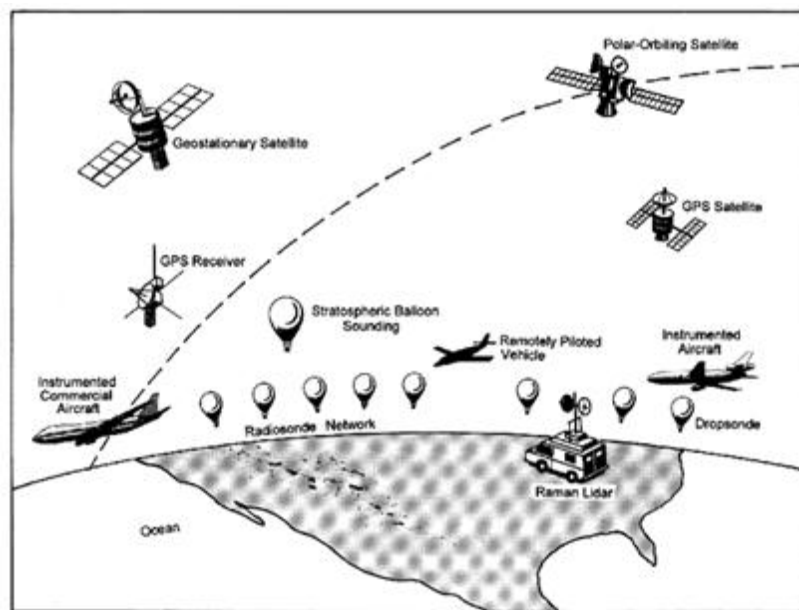
เสถียรภาพของอากาศเป็นตัวบ่งบอกถึงแนวโน้มของการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวตั้ง ซึ่งสามารถบอกได้โดยอาศัยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศต่อความสูงของบรรยากาศ (environment lapse rate, Γ_e) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศแห้งต่อความสูงของบรรยากาศ (dry adiabatic lapse rate, Γ_d) โดยตัวแปรทั้งสองนี้จะสามารถแบ่งเสถียรภาพของอากาศได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

- อากาศมีเสถียรภาพ (stable) ถ้า $\Gamma_e < \Gamma_d$
- อากาศเป็นกลาง (neutral) ถ้า $\Gamma_e = \Gamma_d$
- อากาศไม่มีเสถียรภาพ (unstable) ถ้า $\Gamma_e > \Gamma_d$

เมื่อน้ำที่พื้นผิวโลกระเหยกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำเหล่านี้จะลอยตัวขึ้นและจะเกิดการควบแน่นเมื่ออุณหภูมิจนของบรรยากาศลดลงและให้พลังงานความร้อนออกมา การควบแน่นนี้ก่อให้เกิดเมฆ โดยระดับความสูงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำจะเรียกว่า lifting condensation level (LCL) หรือเป็นระดับฐานเมฆ ดังนั้นการเกิดเมฆจึงขึ้นกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วย โดยถ้ามีปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมากก็มีโอกาสทำให้เกิดเมฆและก่อตัวเป็นพายุได้มากขึ้น ทำให้สภาพอากาศมีความแปรปรวนมากขึ้น

2.4 วิธีการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

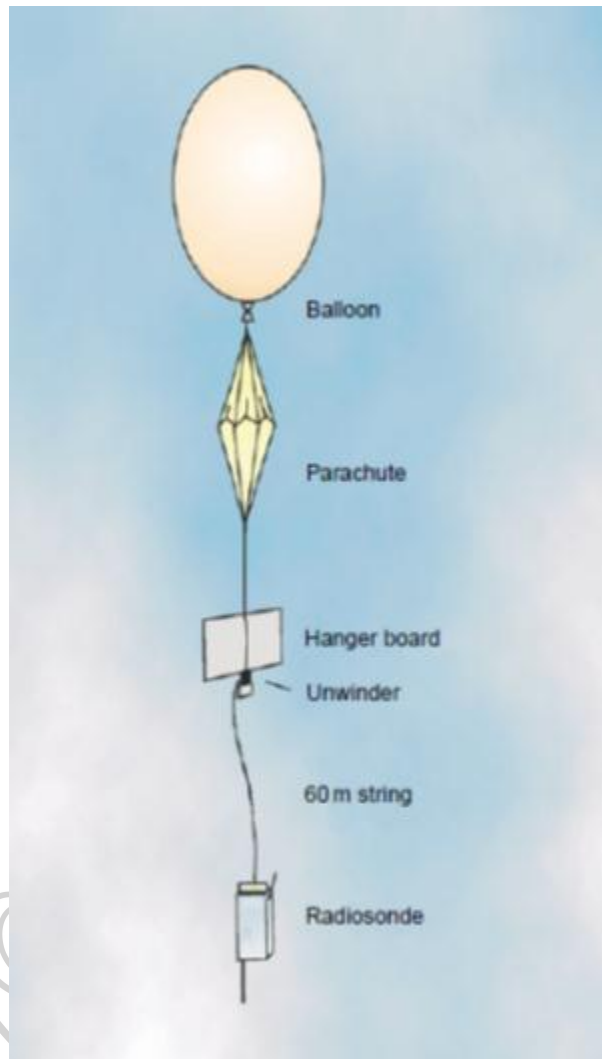
เนื่องจากปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีความสำคัญต่อสภาพภูมิอากาศและสภาพลมฟ้าอากาศ อีกทั้งการทราบปริมาณไอน้ำในบรรยากาศยังช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับเมฆ หยาดน้ำฟ้า ระบบน้ำ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากขึ้น ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงให้ความสำคัญในการตรวจวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยเครื่องมือวัดภาคพื้นดิน การตรวจอากาศชั้นบนโดยใช้ radiosonde การใช้เครื่องบิน และการใช้ดาวเทียม (รูปที่ 2.11) โดยรายละเอียดของแต่ละวิธีการมีดังนี้



รูปที่ 2.11 การตรวจวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ (AGU, 1995)

- การหาปริมาณไอน้ำจากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน

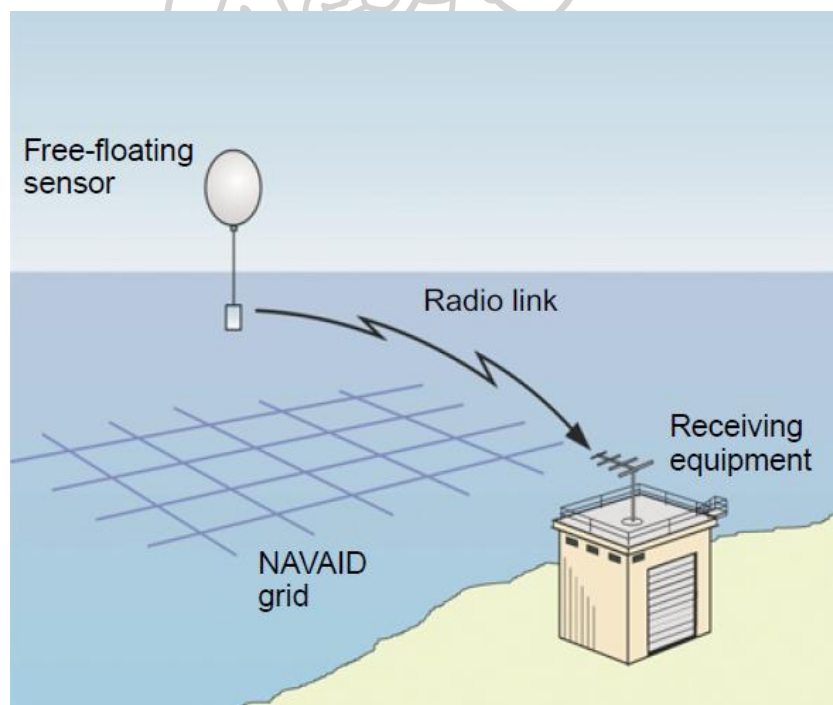
เมื่อ 80 ปีที่ผ่านมา เริ่มมีการใช้ radiosonde (รูปที่ 2.12) ในการตรวจวัดสภาวะอากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ โดยการติดตั้ง radiosonde ไปกับบอลลูนที่ปล่อยจากพื้นผิวโลกขึ้นไปถึงส่วนบนของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (รูปที่ 2.13) อุปกรณ์ที่สำคัญของ radiosonde ประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิ ความดัน ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วและทิศทางของลม ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งกลับมายังสถานีรับภาคพื้นดินด้วยคลื่นวิทยุ (รูปที่ 2.14) จากข้อมูลการตรวจอากาศด้วย radiosonde สามารถนำมาหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ radiosonde ที่ติดไปกับบอลลูน (Shankar, 2002)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง radiosonde ที่ใช้ในการตรวจวัดอากาศชั้นบน (Shankar, 2002)



รูปที่ 2.14 การส่งสัญญาณวิทยุจากเครื่อง radiosonde มายังเครื่องรับภาคพื้นดิน (Shankar, 2002)

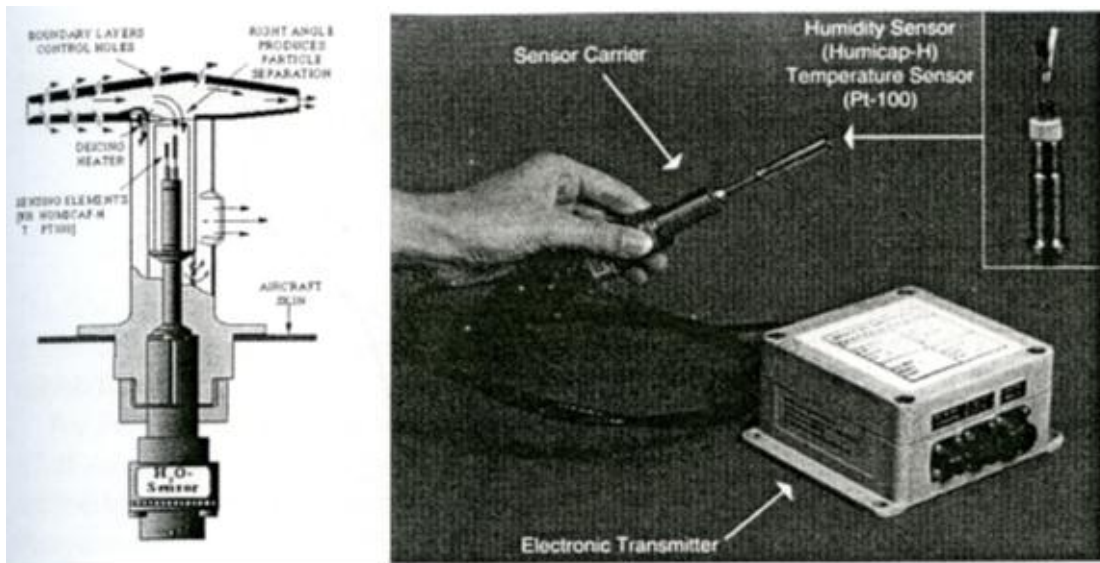
- การวัดปริมาณไอน้ำโดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

การใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ในการวัดปริมาณน้ำในบรรยากาศเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อน้ำในบรรยากาศได้รับพลังงานจากรังสีที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 137 nm จะเกิดการแตกตัวเป็นไฮดรอกซิล (OH) ในสถานะกระตุ้น (excited state) จากนั้นไฮดรอกซิลจะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) โดยการปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ ดังนั้น ถ้าเราทราบความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมาก็จะสามารถทราบปริมาณไอน้ำได้ (Kämpfer, 2013)

- การใช้เครื่องบินที่ติดตั้งเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิอากาศ

ในระหว่างปี ค.ศ. 1994 - 2014 สหภาพยุโรปได้ดำเนินโครงการวัดปริมาณไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ โดยการใช้เครื่องบิน Airbus A340 จำนวน 5 ลำ ที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นไว้ หรือเรียกโครงการนี้ว่า Measurements of ozone and water vapour by Airbus in-service aircraft (MOZAIC) ซึ่งได้ทำการบินตรวจวัดทั้งในบริเวณซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ทำให้ได้ข้อมูลการแปรค่าของไอน้ำตามแนวตั้งในขณะที่เครื่องบินบินขึ้นและลง และขณะที่บินอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 9-12 km ต่อมาในปี ค.ศ. 2011 จนถึงปัจจุบัน โครงการดังกล่าวได้ดำเนินการต่อในชื่อโครงการ In-service Aircraft for a Global Observing System (IAGOS) ซึ่งมีการติดตั้งเซนเซอร์เพิ่มบนเครื่องบินถึง 20 ลำ

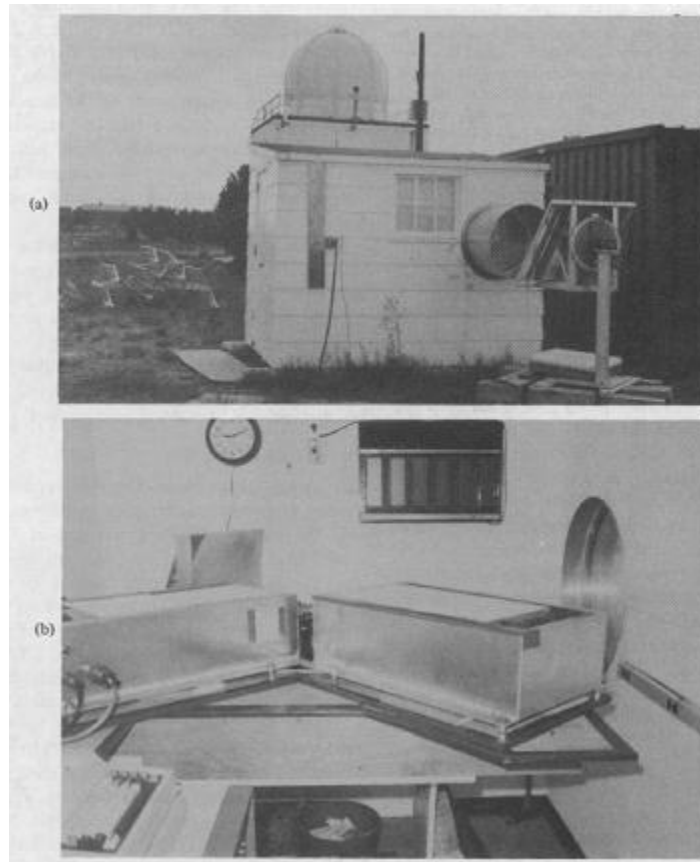
สำหรับเซนเซอร์ที่ใช้วัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศเป็นเครื่อง AD-FS2 (Aerodata, Braunschweig, Germany) ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิด hydroactive polymer film ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนี้จะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ สำหรับการวัดอุณหภูมิจะใช้เซนเซอร์แบบค่าความต้านทาน (PT100) โดยข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิจะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณไอน้ำได้ ตัวอย่างของเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิที่ติดตั้งไปกับเครื่องบินแสดงดังรูปที่ 2.15



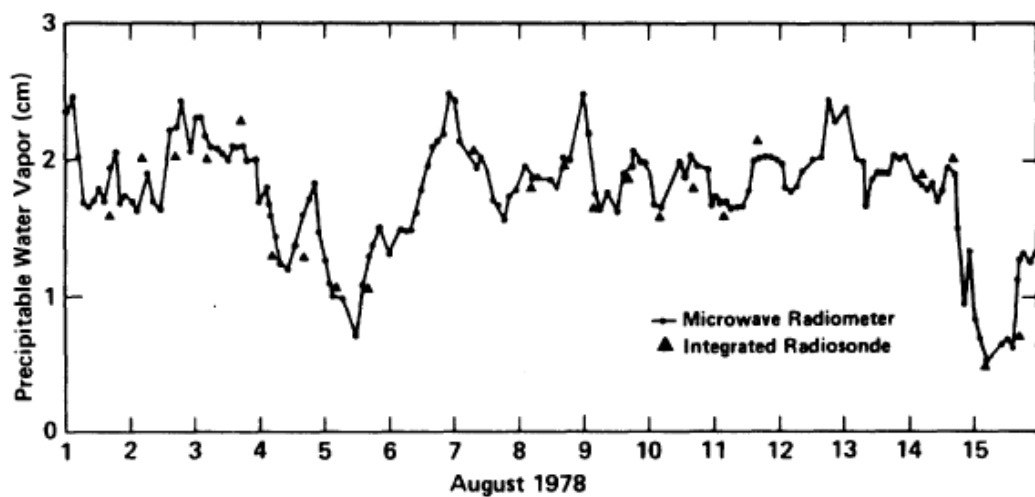
รูปที่ 2.15 เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิที่ติดตั้งไปกับเครื่องบิน (Kämpfer, 2013)

- การหาปริมาณไอน้ำด้วยเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer)

การแปรค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามแนวตั้งสามารถวัดได้โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมของรังสีที่วัดโดยเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ เครื่องมือนี้จะวัดสเปกตรัมการแผ่รังสีของไอน้ำที่ความถี่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ เช่น 22.235 GHz 183.310 GHz 448.001 GHz และ 556.936 GHz เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากที่ความถี่สูง ๆ เครื่องวัดจะไม่สามารถรับสัญญาณได้แม่นยำ ดังนั้นส่วนใหญ่มักนิยมใช้ที่ความถี่ 22.235 GHz จากค่าความเข้มของคลื่นไมโครเวฟที่วัดได้ เราสามารถคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้



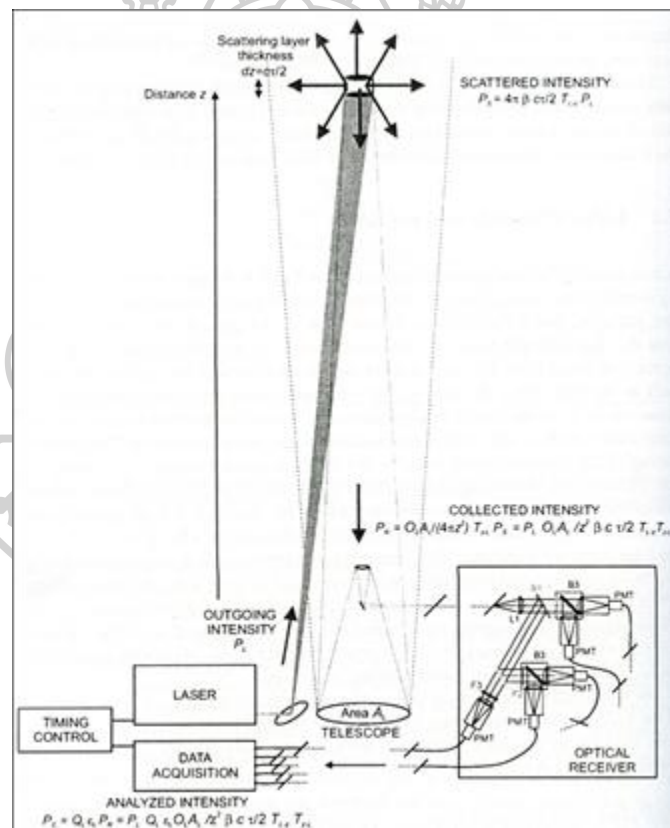
รูปที่ 2.16 เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (a) สถานที่ติดตั้ง (b) ลักษณะตัวเครื่อง (Guiraud, Howard, & Hogg, 1979)



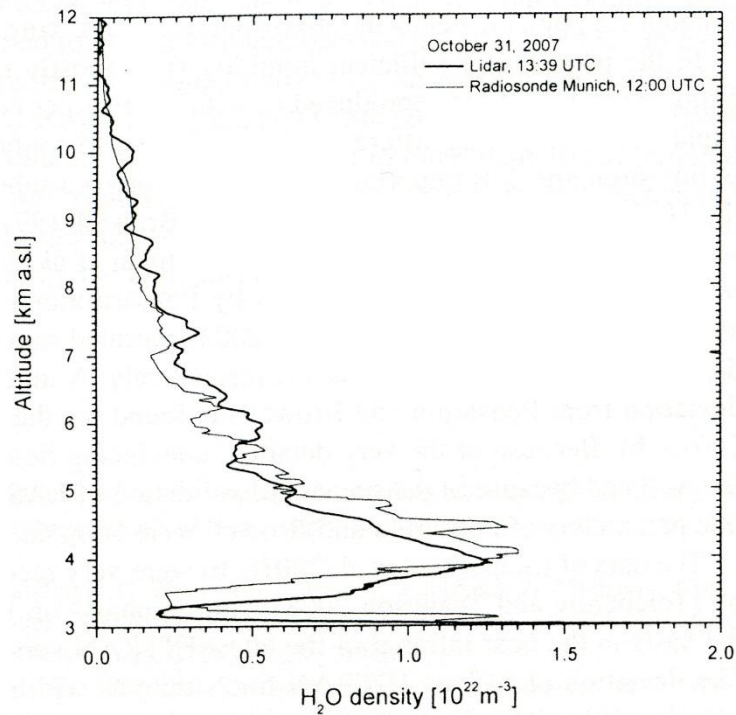
รูปที่ 2.17 ปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ที่เมือง Denver, Colorado จำนวน 15 วัน เดือนสิงหาคม ค.ศ. 1978 (Guiraud et al., 1979)

- การวัดปริมาณไอน้ำโดยใช้เครื่องไลดาร์

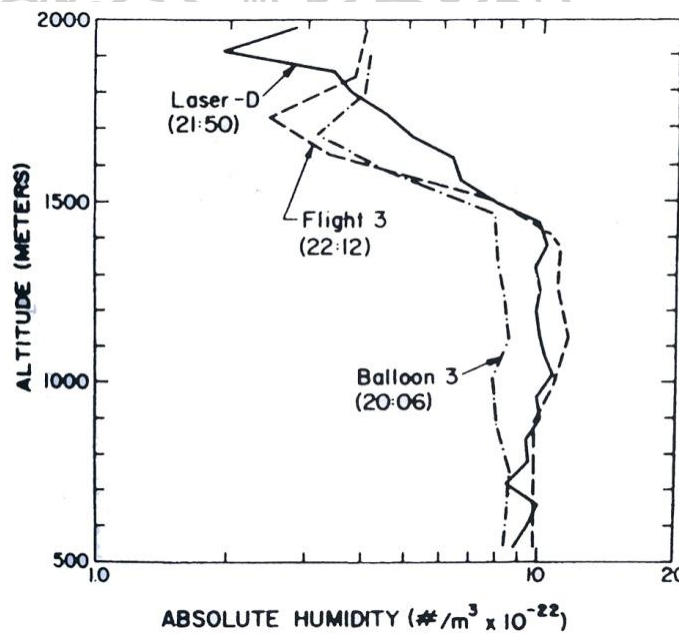
การวัดปริมาณไอน้ำโดยใช้เครื่องไลดาร์ (Light detection and ranging, Lidar) ใช้หลักการกระเจิงและการส่งผ่านแสงของตัวกลางที่เป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง ซึ่งสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของบรรยากาศได้ เช่น ความหนาแน่นของอากาศ ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิอากาศ ความเข้มข้นของโอโซน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ นอกจากนี้ ยังใช้ในการศึกษาขนาดและรูปร่างของฝุ่นละออง ผลึกของแข็ง และหยดน้ำได้ด้วย เครื่องมือดังกล่าวจะฉายแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นหนึ่งขึ้นไปในบรรยากาศ แสงเลเซอร์จะถูกกระเจิงโดยโมเลกุลต่าง ๆ ในบรรยากาศ และบางส่วนจะกระเจิงกลับมาเข้าตัวรับสัญญาณ (รูปที่ 2.18) จากค่าการลดทอนของสัญญาณที่กระเจิงกลับมาจะทำให้เราสามารถคำนวณปริมาณขององค์ประกอบของบรรยากาศได้ โดยทั่วไป Lidar สามารถวัดองค์ประกอบของบรรยากาศได้ถึงความสูงประมาณ 12 km ตัวอย่างปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่อง Lidar เปรียบเทียบกับเครื่อง radiosonde สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.18 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Lidar (Kämpfer, 2013)



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างผลการตรวจวัดความหนาแน่นของไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้เครื่อง Lidar และ radiosonde (Kämpfer, 2013)



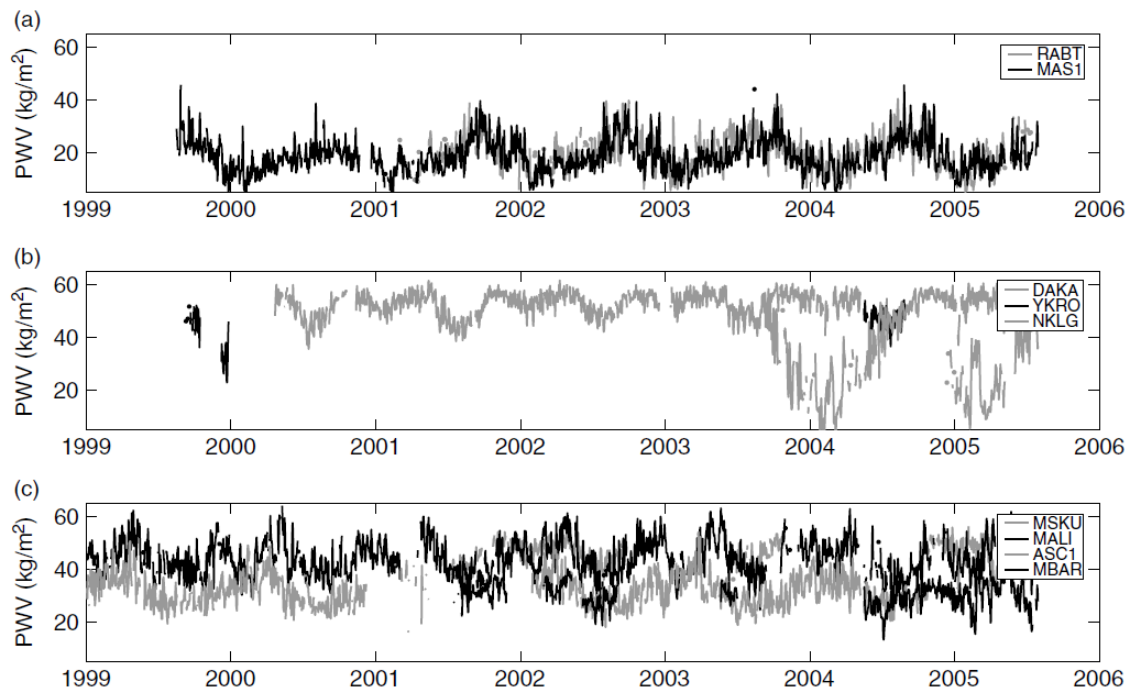
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างผลการตรวจวัดความชื้นสัมบูรณ์ของบรรยากาศโดยใช้เครื่อง Lidar และ radiosonde (Cooney, 1980.)

- การใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งบนโลกหาปริมาณไอน้ำ

เครื่องกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System, GPS) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาตำแหน่งบนโลกที่แม่นยำ โดยอาศัยการส่งสัญญาณไมโครเวฟจากดาวเทียม 24 ดวงที่โคจรรอบโลก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณผ่านบรรยากาศซึ่งมีโมเลกุลต่าง ๆ รวมถึงไอน้ำ ทำให้สัญญาณมีความล่าช้า โดยความล่าช้าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งไอน้ำ ดังนั้นเราสามารถนำข้อมูลสัญญาณที่ได้รับจากเครื่อง GPS มาคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้



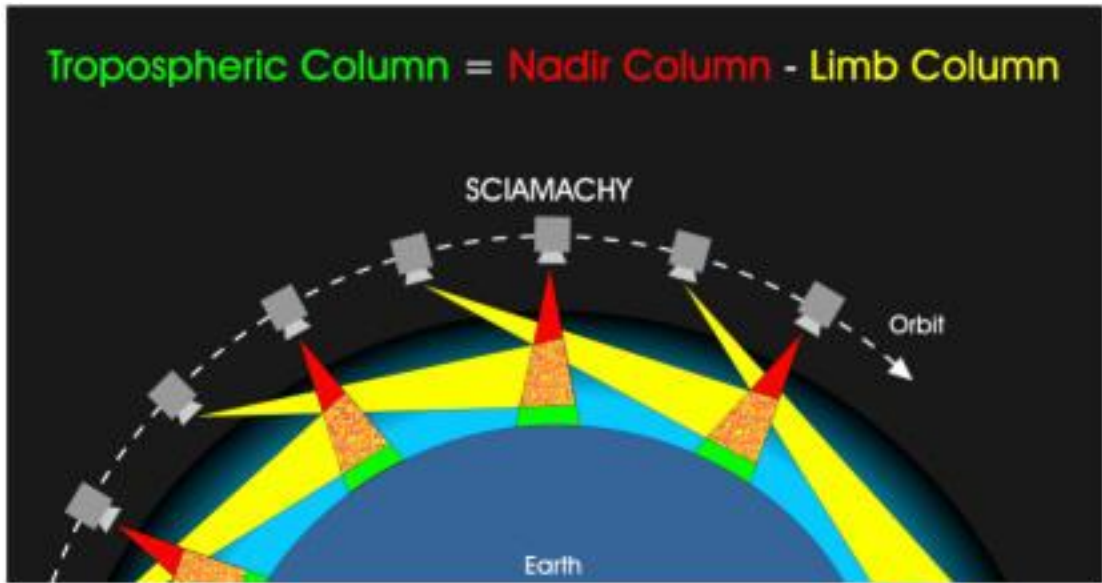
รูปที่ 2.21 จานรับสัญญาณดาวเทียม GPS ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



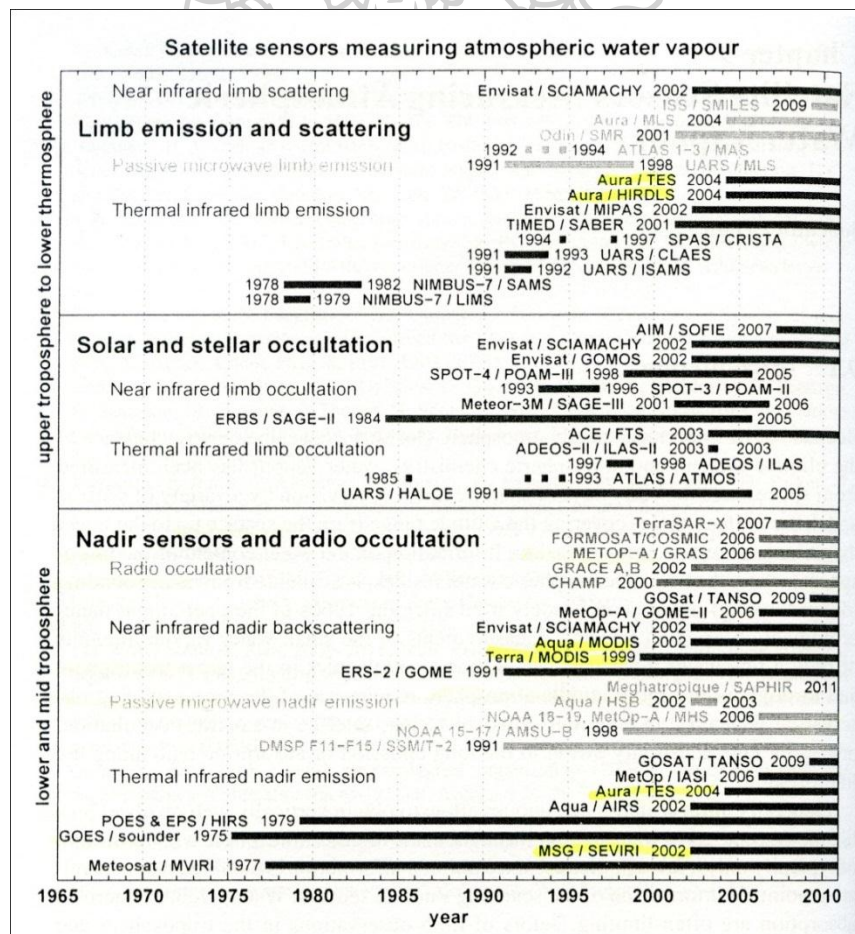
รูปที่ 2.22 ตัวอย่างปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่อง GPS ที่สถานีใน (a) ซีคโลกเหนือ (b) แอฟริกา ตะวันตก และ (c) เขตศูนย์สูตรและซีคโลกใต้ (Bock et al., 2007)

- การหาปริมาณไอน้ำโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม

ตั้งแต่ทศวรรษ 1960 มีการใช้ดาวเทียมในการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยการวัดจะมี 2 ลักษณะ คือ การวัดแบบ nadir sounding และการวัดแบบ limb sounding (รูปที่ 2.23) การวัดแบบ nadir sounding ส่วนใหญ่จะใช้กับดาวเทียมแบบ geostationary ซึ่งอยู่หนึ่งกับที่เทียบกับพื้นผิวโลกที่ความสูงประมาณ 36,000 km จะสามารถวัดไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ได้ ส่วนการวัดแบบ limb sounding จะใช้กับดาวเทียมแบบ low earth orbit ซึ่งอยู่เหนือพื้นผิวโลกประมาณ 1,000 km และโคจรรอบโลกตามแนวขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ โดยจะให้ข้อมูลโปรไฟล์ของไอน้ำในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนขึ้นไปถึงบรรยากาศชั้นกลาง ความละเอียดของข้อมูลที่วัดได้ประมาณ 2-3 km ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีเครื่องมือและดาวเทียมหลายดวงที่ใช้ในการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 การวัดแบบ nadir และ limb (<http://www.iup.uni-bremen.de/>)



รูปที่ 2.24 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (Kämpfer, 2013)

สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการปริมาณไอน้ำด้วยดาวเทียมสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้

- การวัดการแผ่รังสีในช่วงอินฟราเรด (thermal infrared)

ในต้นทศวรรษ 1960 องค์การนาซ่าได้ทำการวัดปริมาณไอน้ำโดยใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า Television and InfraRed Observation Satellite (TIROS) บนดาวเทียม LEO ซึ่งเป็นดาวเทียมแบบ low Earth orbit โดยวัดรังสีในช่วงความยาวคลื่น 6.0-6.5 μm ต่อมามีการปล่อยดาวเทียม NIMBUS-7 ซึ่งติดตั้งเครื่อง High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) ที่วัดรังสีในช่วงความยาวคลื่น 6.5-8.2 μm ดาวเทียมดังกล่าวสามารถให้ข้อมูลโปรไฟล์ของไอน้ำตั้งแต่ตอนกลางถึงตอนบนของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ช่วงประมาณ 10-20 km^2

จากนั้น (Liou, 2002) ได้มีการปล่อยดาวเทียม Earth Observing System (EOS) ซึ่งติดตั้งเครื่อง Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) โดยใช้รังสีที่ความยาวคลื่นระหว่าง 3.74-15.4 μm สำหรับหาโปรไฟล์ของไอน้ำในบรรยากาศจากพื้นผิวโลกขึ้นไปถึงระดับความดันประมาณ 200 hPa โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ 13.5 km^2

นอกจากนี้ ยังมีดาวเทียมอีกหลายดวงที่สามารถวัดโปรไฟล์ของไอน้ำในบรรยากาศได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.25

Measuring technique	Thermal infrared nadir emission sounding
Observation geometry	Nadir
Platform	Operational meteorological LEO and GEO satellites, LEO research satellites
	Meteosat/MVIRI GEO 1977
	MSG/SEVIRI GEO 2002
	GOES imager/sounder GEO 1975
	NOAA/HIRS LEO 1979
	Aqua/AIRS LEO 2002
	Aura/TES LEO 2004
	MetOp/IASI LEO 2007
Spectral range	Thermal infrared (between 3 and 16 μm)
Vertical resolution	Several kilometres
Horizontal resolution	Depending on orbit, typically 10–20 km for LEO
Vertical range	Troposphere below 10 km (300 hPa)
Horizontal range	Depending on orbit
Daytime/nighttime	Both (thermal emission)
Bottlenecks, limitations	Strong sensitivity to clouds, cloud screening leads to dry bias
Additional products	Various trace gases, temperature, cloud heights

รูปที่ 2.25 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดการแผ่รังสีในช่วงอินฟราเรด (Kämpfer, 2013)

- การวัดการแผ่รังสีในช่วงไมโครเวฟ

การวัดปริมาณไอน้ำโดยใช้รังสีในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดมีข้อเสียคือจะวัดได้เฉพาะกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆเท่านั้น เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีการตอบสนองต่อเมฆค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยรังสีในช่วงไมโครเวฟซึ่งตอบสนองต่อเมฆต่ำกว่า โดยเทคนิคนี้ได้เริ่มใช้ตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1990 โดยเครื่อง Special Sensor Microwave (SSM/T-2) บนดาวเทียม Defence Meteorological Satellite Program (DMSP) เครื่อง Advance Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) บนดาวเทียม NOAA-15-17 และเครื่อง Microwave Humidity Sounder (MHS) บนดาวเทียม NOAA-18 MetOp-A และ NOAA-19 โดยเครื่องมือเหล่านี้จะวัดรังสีในช่วงไมโครเวฟที่ 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 90 GHz 183 GHz และ 150 หรือ 157 GHz ข้อมูลไอน้ำที่ได้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ 10 km สำหรับรายละเอียดของเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่ 2.26

Measuring technique	Microwave nadir emission sounding					
Observation geometry	Nadir					
Platform	Mainly on operational meteorological LEO satellites					
	DMSP F11-F15	SSM/T-2	1991			
	NOAA 15-17	AMSU-B	1998			
	NOAA 18-19, MetOp-A	MHS	2006			
	Aqua	HSB	2002–2003			
	Megatropique	SAPHIR	2011			
Spectral range	89–190 GHz (channels around 183 GHz line, window channels)					
Channel characteristics of microwave humidity sounder						
AMSU-B and SSM/T-2			MHS		SSMIS	
channel	ν_0 [GHz]	width [GHz]	channel	ν_0 [GHz]	channel	ν_0 [GHz]
16	89.00 \pm 0.9	1.0	H1	89.000	17,18	91.655
17	150.00 \pm 0.9	1.0	H2	157.000	8	150.000
18	183.31 \pm 1.0	0.5	H3	183.311 \pm 1.0	9	183.310 \pm 1.0
19	183.31 \pm 3.0	1.0	H4	183.311 \pm 3.0	10	183.310 \pm 3.0
20	183.31 \pm 7.0	2.0	H5	190.311	11	183.310 \pm 6.6
Vertical resolution	Several kilometres					
Horizontal resolution	10–15 km at nadir (MHS)					
Vertical range	Troposphere (below 10 km)					
Horizontal range	Near global (mostly on polar orbits)					
Daytime/nighttime	Both (thermal emission)					
Bottlenecks, limitations	Limited altitude information from pressure broadening, only sensitive to region with largest water abundance (troposphere), sensitivity to tropospheric clouds (large ice particles or water drops)					

รูปที่ 2.26 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดการแผ่รังสีในช่วงไมโครเวฟ (Kämpfer, 2013)

- การวัดการแผ่รังสีในช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared)

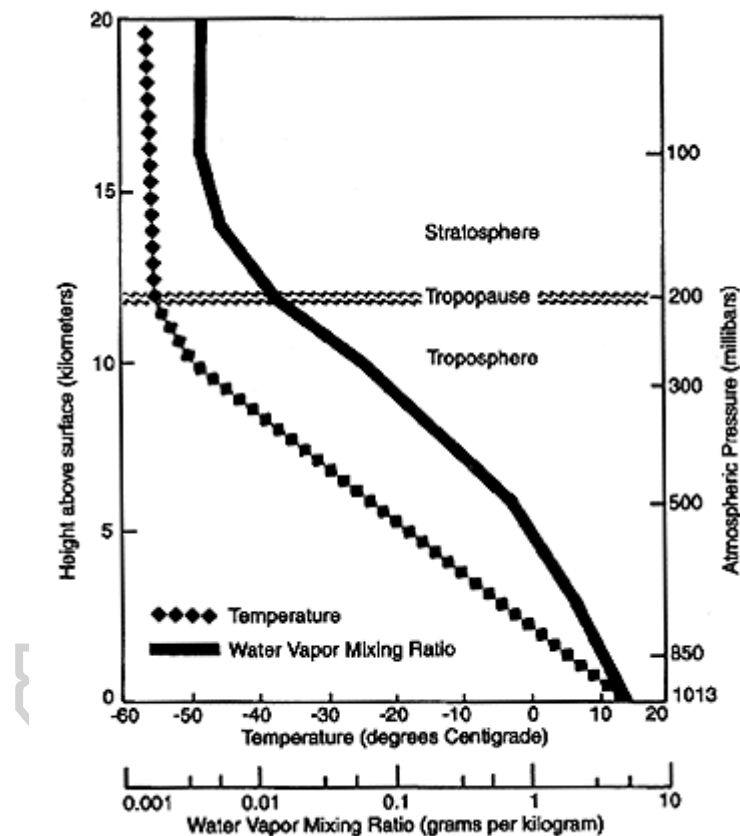
ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศสามารถหาได้จากรังสีที่ถูกกระเจิงกลับและแผ่โดยบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดใกล้ที่ดาวเทียมสามารถวัดได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถหาปริมาณไอน้ำได้เฉพาะในช่วงกลางวันและในกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆเท่านั้น ตัวอย่างการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศด้วยวิธีการนี้ ได้แก่ เครื่อง Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) ติดตั้งบนดาวเทียม ERS-2 ซึ่งทำการวัดรังสีที่กระเจิงกลับที่ความยาวคลื่น 700 nm แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศทั่วโลก โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ $40 \text{ km} \times 320 \text{ km}$ ส่วนเครื่อง Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) บนดาวเทียม Terra และ Aqua จะวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ 36 ความยาวคลื่น ในช่วง $0.405 - 14.385 \mu\text{m}$ ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ประมาณ $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ สำหรับเครื่องมือและดาวเทียมอื่น ๆ ที่ใช้วิธีการนี้สรุปได้ดังรูปที่ 2.27

Measuring technique	Near infrared nadir solar back-scatter technique	
Observation geometry	Nadir sounding	
Platform	ERS-2/GOME	1991
	Terra/MODIS	1999
	Aqua/MODIS	2002
	Envisat/SCIAMACHY	2002
	MetOp-A/GOME-II	2006
Units	Total precipitable water vapour	
Spectral range	UV-VIS to near-infrared	
Vertical resolution	Total column (precipitable) water	
Horizontal resolution	Between $1 \times 1 \text{ km}$ (MODIS) and $40 \times 320 \text{ km}$ (GOME)	
Vertical range	Troposphere, mainly boundary layer	
Horizontal range	Depending on orbit	
Daytime/nighttime	Daytime only (solar back-scattering)	
Bottlenecks, limitations	Strong sensitivity to clouds, only cloud free pixels.	
Additional products	Various trace gases	
Future potential	Sounding of chemical minor species with improved horizontal resolution using sensitive array detectors, also from GEO orbits	

รูปที่ 2.27 ดาวเทียมและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยการวัดรังสีในช่วงอินฟราเรดใกล้ (Kämpfer, 2013)

2.5 การแปรค่าของปริมาณไอน้ำ

ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการแปรค่าทั้งตามความสูงและตามการกระจายตัวตามพื้นที่ในแนวราบ สำหรับการแปรค่าตามความสูง พบว่าปริมาณไอน้ำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความสูงจากพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น โดยอาจคิดเป็น 1-2% ที่ระดับพื้นผิวโลก และลดลงเหลือเพียงหนึ่งในล้านส่วนที่บรรยากาศชั้นล่างของบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ โดย 50% ของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะอยู่ที่ระดับความสูง 1.5 km จากพื้นผิวโลก และ 5% จะอยู่ที่ชั้นบนของบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ (ประมาณ 5 km) ในส่วนที่น้อยกว่า 1% อยู่ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์



รูปที่ 2.28 การแปรค่าของปริมาณไอน้ำและอุณหภูมิตามความสูง (AGU, 1995)

สำหรับการกระจายตัวของปริมาณไอน้ำตามพื้นที่ โดยทั่วไปจะมีค่าสูงบริเวณศูนย์สูตรซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิอากาศสูง และปริมาณไอน้ำจะลดลงบริเวณขั้วโลกซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิลดลง ตัวอย่างเช่น ค่าความชื้นจำเพาะของไอน้ำบริเวณศูนย์สูตรมีค่าประมาณ 18-19 g/kg ในขณะที่บริเวณขั้วโลกมีค่าประมาณ 1 g/kg ถึงแม้ว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ แต่ก็มีข้อยกเว้นในบางพื้นที่ เช่น บริเวณทะเลทรายซึ่งมีอุณหภูมิสูงแต่มีปริมาณไอน้ำน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวอากาศมีการจมตัวลงตามการไหลเวียนของอากาศระดับโลก (global circulation)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยในประเทศต่าง ๆ ได้ทำการศึกษาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้วิธีการต่าง ๆ โดยงานที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

(Reitan, 1960) ได้ทำการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยคำนวณปริมาณไอน้ำจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตามสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศ จากนั้นได้แสดงค่าปริมาณไอน้ำในรูปของแผนที่คอนทัวร์ (contour) ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ แผนที่ดังกล่าวแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำตามพื้นที่และตามฤดูกาลทั่วประเทศสหรัฐอเมริกา

(Hay, 1971) ใช้วิธีการคล้ายกับของ (Reitan, 1960) เพื่อทำการหาการกระจายตามพื้นที่ของปริมาณไอน้ำในประเทศแคนาดา โดยการคำนวณปริมาณไอน้ำที่สถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศแคนาดา จำนวน 165 สถานี จากนั้นได้ทำการ interpolation และลากเส้นคอนทัวร์ของปริมาณไอน้ำครอบคลุมประเทศแคนาดา

(Revuelta, Rodriguez, Mateos, & Garmendia, 1985) ได้สร้างแบบจำลองทางสถิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำกับอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความดันไอน้ำในบรรยากาศ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่เมือง Salamanca ประเทศสเปน โดยแบ่งข้อมูลเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงฤดูหนาว (ตุลาคม – มีนาคม) ช่วงฤดูร้อน (เมษายน – กันยายน) และตลอดปี (มกราคม – ธันวาคม) จากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่อง radiosonde ซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกันดี

งานวิจัยบางส่วนทำการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยการรับสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งมาจากดาวเทียม โดยอุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณคือเครื่องกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System, GPS) ตัวอย่างงานวิจัยที่สำคัญมีดังนี้

(Coster et al., 1996) ได้ทำการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล GPS ที่ Westford ประเทศสหรัฐอเมริกา ระหว่างวันที่ 15 ถึง 30 สิงหาคม ค.ศ. 1995 นอกจากนี้ยังคำนวณหาปริมาณไอน้ำด้วยวิธีอื่น ๆ ได้แก่การใช้เครื่อง radiosonde และเครื่อง water vapour radiometer โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากวิธีการทั้งสามพบว่ามีความแตกต่างกันในช่วง 0.5-4.0 mm

(Bock et al., 2007) ทำการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยใช้เครื่อง GPS ที่ประเทศต่าง ๆ ในทวีปแอฟริกา จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ radiosonde, sunphotometer, ดาวเทียม SSM/I, ERA-40 และ NCEP2 ระหว่างเดือนมกราคม 1999 ถึงเดือนกรกฎาคม 2005 ผลการเปรียบเทียบพบว่าปริมาณไอน้ำจากแหล่งข้อมูลเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน

(Y. Wang et al., 2009) ศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศทั้งในเชิงพื้นที่และเวลาในบริเวณประเทศจีน โดยอาศัยหลักการรับสัญญาณไมโครเวฟจากดาวเทียม จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่อง radiosonde ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกันดี นอกจากนี้พบว่า การแปรค่าของปริมาณไอน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนในบริเวณดังกล่าวด้วย

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยท่านอื่น ๆ ได้ทำการคำนวณและศึกษาปริมาณไอน้ำโดยวิธีการอื่น ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ (Larsen & Stamnes, 2005) ทำการพัฒนาเทคนิคสำหรับคำนวณปริมาณไอน้ำใน

บรรยากาศในกรณีฟ้าหาลัว โดยใช้ข้อมูลรังสีสะท้อนจากพื้นดินและบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดใกล้ที่สามารถวัดได้ด้วยดาวเทียม

ต่อมา (Campmany, Bech, Rodríguez-Marcos, Sola, & Lorente, 2010) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูล radiosonde เครื่อง sunphotometer และเครื่อง Microtop II ที่เมือง Barcelona ประเทศสเปน โดยค่าปริมาณไอน้ำที่ได้จาก radiosonde ซึ่งคำนวณโดยอาศัยเทคนิคของ (Bruegge et al., 1992) ในช่วงปี ค.ศ. 2001 – 2004 รวมระยะเวลา 3.5 ปี ผลที่ได้พบว่าค่าปริมาณไอน้ำจาก radiosonde ให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคือค่าที่ได้จากเครื่อง sunphotometer และค่าต่ำสุดได้จากเครื่อง Microtop II ทั้งนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำของเครื่องมือแต่ละเครื่อง นอกจากนี้ยังพบว่ามีการแปรค่าปริมาณไอน้ำตามฤดูกาล โดยฤดูหนาวปริมาณไอน้ำมีค่าต่ำสุด ส่วนช่วงฤดูร้อนมีค่าปริมาณไอน้ำสูงสุด

(Malmusi & Boccolari, 2010) ได้ทำการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศชั้นกลางและชั้นบนของโทรโพสเฟียร์ (850 – 300 hPa) บริเวณ $63^{\circ}\text{N} - 63^{\circ}\text{S}$ และลองจิจูด $63^{\circ}\text{W} - 63^{\circ}\text{E}$ โดยใช้ข้อมูลความชื้นที่ได้จากดาวเทียม Meteosat-8 และ 9 ในส่วนของข้อมูลอุณหภูมิอากาศได้จาก NCEP/NCAR จากผลที่ได้พบว่าปริมาณไอน้ำมีการแปรค่าตามฤดูกาล และพบค่าสูงสุดบริเวณเขตศูนย์สูตรโดยมีการเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนตัวของ Intertropical Convergence Zone (ITCZ)

สำหรับกรณีประเทศไทย (Exell, 1978) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำกับความดันไอน้ำที่กรุงเทพฯ ฯ และพบว่าปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น

นอกจากนี้ มีนักวิจัยต่าง ๆ ทำการศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในแนวตั้งโดยใช้เครื่องมือและเทคนิคต่าง ๆ กัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(M. Wang et al., 2015) ได้ทำการศึกษการแปรค่าปริมาณไอน้ำตามเดือนและฤดูกาลในช่วงเวลากลางคืน โดยใช้ข้อมูลไอน้ำที่วัดได้จาก L625 Lidar ระหว่างปี ค.ศ. 2000-2008 ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณไอน้ำที่ได้เปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จาก radiosonde ในรูปของโปรไฟล์ไอน้ำ โดยศึกษาการแปรค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ จากผลที่ได้พบว่าปริมาณไอน้ำมีการแปรค่าตามเดือน โดยจะมีปริมาณไอน้ำสูงสุดช่วงเดือนกรกฎาคมคือ 15.6 g/kg ที่ระดับความสูง 1 km นอกจากนี้ปริมาณไอน้ำมีการแปรค่าตามฤดูกาล ซึ่งในฤดูร้อนจะมีปริมาณไอน้ำสูงสุดถึง 15.0 g/kg ที่ระดับความสูง 1 km และในฤดูหนาวมีปริมาณไอน้ำอยู่ที่ 3.9 g/kg ที่ระดับความสูง 1 km

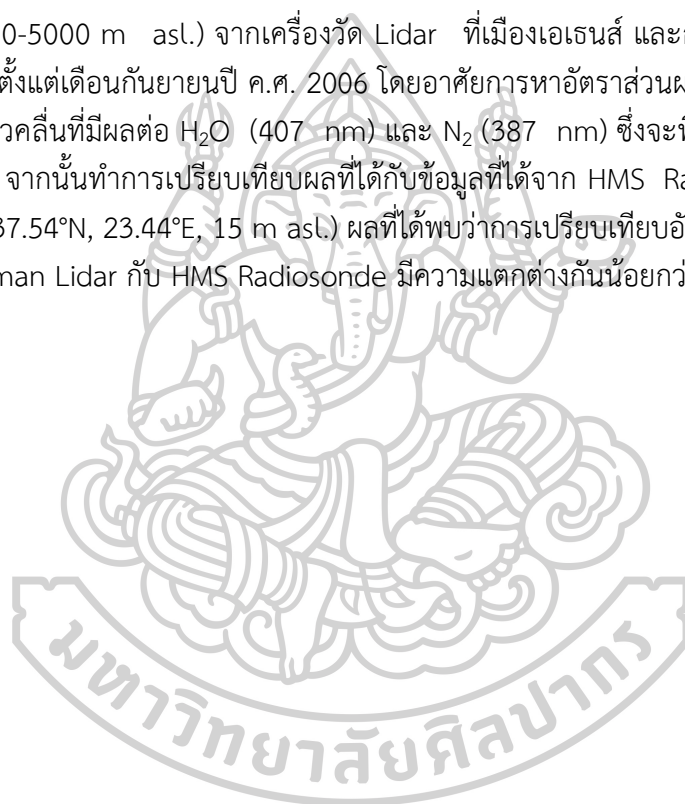
(Foth, Baars, Di Girolamo, & Pospichal, 2015) ทำการหาปริมาณไอน้ำในรูปโปรไฟล์จากเครื่องวัด Raman Lidar แล้วนำมาเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่อง microwave radiometer โดยพิจารณาไอน้ำรวมในคอลัมน์อากาศ (integrated water vapour, IWV) ในช่วงท้องฟ้ามีเมฆ ผลที่ได้พบว่าปริมาณไอน้ำที่ได้จาก Lidar มีความสอดคล้องกับปริมาณไอน้ำที่ได้จาก radiosonde โดยที่การสอบเทียบที่ได้จากวิธี IWV มีความไม่แน่นอนอยู่ 5% อาจเป็นผลมาจากเมฆ

(Navas-Guzmán et al., 2014) ทำการศึกษาปริมาณไอน้ำในรูปแบบโปรไฟล์ที่วัดได้จากเครื่อง Raman Lidar นำมาเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่อง radiosonde โดยใช้ข้อมูลช่วงฤดูร้อนและฤดูใบไม้ร่วงในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งจะใช้ข้อมูลช่วงเวลากลางคืนในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ผลที่ได้พบว่าปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่อง Raman Lidar กับปริมาณไอน้ำที่วัดได้จากเครื่อง radiosonde มีการแปรค่าสอดคล้องกันดี โดยที่มีปริมาณไอน้ำมากสุดในช่วงฤดูร้อน

เท่ากับ 9 g/kg และมีปริมาณไอน้ำน้อยที่สุดในช่วงฤดูหนาวเท่ากับ 2 g/kg นอกจากนี้ยังพบการแปรค่าตามความสูงของปริมาณไอน้ำด้วย

(Wu, Dai, Song, Liu, & Liu, 2016) ทำวิจัยในโครงการทดลองวิทยาศาสตร์ทางบรรยากาศ (TIPEX III) ของประเทศจีนเกี่ยวกับไอน้ำ เมฆ ฝุ่นละออง และลม โดยใช้เครื่องวัด Lidar ในเมือง Naqu ของประเทศจีน (31.48°N, 92.06°E) ซึ่งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 4,500 m ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลช่วงฤดูร้อนของปี ค.ศ. 2014 โดยที่อัตราส่วนผสมของไอน้ำวัดได้จาก radiosonde ผลที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนผสมของไอน้ำที่เมือง Naqu ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคมมีค่าประมาณ 9.4 g/kg และมีการแปรค่าอยู่ระหว่าง 6.0 ถึง 11.7 g/kg

Mamouri และคณะ (2015) ทำการศึกษาโปรไฟล์ของไอน้ำในบรรยากาศชั้นล่างของโทรโพสเฟียร์ (500-5000 m asl.) จากเครื่องวัด Lidar ที่เมืองเอเธนส์ และกรีซ (37.9°N, 23.6°E, 200 m asl.) ตั้งแต่เดือนกันยายนปี ค.ศ. 2006 โดยอาศัยการหาอัตราส่วนผสมของไอน้ำจากการวัดรังสีที่ความยาวคลื่นที่มีผลต่อ H₂O (407 nm) และ N₂ (387 nm) ซึ่งจะพิจารณาการกระเจิงเป็นแบบ Raman จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลที่ได้จาก HMS Radiosonde ที่สนามบิน Hellinikon (37.54°N, 23.44°E, 15 m asl.) ผลที่ได้พบว่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมของไอน้ำที่วัดได้จาก Raman Lidar กับ HMS Radiosonde มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 10% ที่ระดับความสูง 5,000 m



บทที่ 3

การดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเบื้องต้น โดยงานส่วนแรกเป็นการพัฒนาแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับหาปริมาณไอน้ำในคอลัมน์ของบรรยากาศจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้นสำหรับประเทศไทย และงานส่วนที่สองเป็นการศึกษาการแปรค่าตามความสูง (vertical profile) ของปริมาณไอน้ำในประเทศไทย โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

3.1 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับหาปริมาณไอน้ำจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น

โดยทั่วไปปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะบอกในรูปของ precipitable water (cm) หรือไอน้ำที่สมมติว่าถูกควบแน่นเป็นน้ำที่ผิวพื้นในคอลัมน์ของบรรยากาศที่มีพื้นที่ฐาน 1 cm^2 ซึ่งขึ้นอยู่กับไอน้ำที่ลอยอยู่ในบรรยากาศระดับต่าง ๆ แต่การวัดปริมาณไอน้ำในบรรยากาศนั้นทำได้ค่อนข้างยากและต้องใช้เครื่องมือราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ precipitable water โดยอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น ได้แก่ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (standard vapour pressure) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (temperature) และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ของอากาศพื้นผิว ตามรายละเอียดดังนี้

3.1.1 เครื่องมือวัดและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น

กรมอุตุนิยมวิทยาได้ดำเนินการตรวจวัดข้อมูลผิวพื้น ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ซึ่งมีการวัดอยู่ตามสถานีอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ ทั่วประเทศ โดยรายละเอียดของเครื่องมือมีดังนี้

3.1.1.1 เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิอากาศผิวพื้นของกรมอุตุนิยมวิทยาจะอ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้สกรีนบานเกร็ดสองชั้นหรือเรียกว่าเรือนเทอร์โมมิเตอร์ในสนามอุตุนิยมวิทยา โดยด้านหน้าจะหันไปทางทิศเหนือหรือใต้เสมอ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ ตู้ดังกล่าวจะติดตั้งให้อยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 1.25 - 2.00 m เพื่อให้อยู่ในระดับเดียวกับสายตาผู้อ่านค่า โดยที่ตัวอย่างของเรือนเทอร์โมมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เรือนเทอร์โมมิเตอร์ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ

3.1.1.2 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของกรมอุตุนิยมวิทยาจะอ่านค่าได้จากเครื่องไฮโครมิเตอร์ (psychrometer) ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง โดยผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองสามารถนำไปคำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์ได้ เครื่องมือดังกล่าวจะถูกติดตั้งอยู่ในตู้เทอร์โมมิเตอร์เช่นกัน เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกจะเป็นเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดาแต่กระเปาะที่บรรจุปรอทจะถูกหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่มีด้ายดิบผูกโยงไปยังแก้วน้ำ (ประมาณ 3-6 นิ้ว) เพื่อให้น้ำซึมผ่านด้ายและผ้าฝ้ายสลิมนมายังกระเปาะที่บรรจุปรอท ถ้าอากาศยังไม่อิ่มตัวน้ำที่ผ้าฝ้ายจะระเหยออกตลอดเวลา โดยอาศัยความร้อนภายในตัวเทอร์โมมิเตอร์ อัตราการระเหยนี้จะมีผลต่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง ตัวอย่างของไฮโครมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องไฮโครมิเตอร์กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ

นอกจากนี้ ยังมีเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบกราฟ ซึ่งติดตั้งไว้ในเรือนเทอร์โมมิเตอร์เช่นเดียวกัน ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบกราฟ ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ

3.1.1.3 เครื่องวัดความดันอากาศ

ความดันอากาศหรือความกดอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจะวัดจากเครื่องบาโรมิเตอร์ปรอท เครื่องดังกล่าวจะถูกติดตั้งไว้ในอาคารหรือภายในห้องที่มีสภาพอากาศปกติ ตัวอย่างเครื่องบาโรมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องบาโรมิเตอร์สำหรับวัดความดันบรรยากาศ

3.1.1.4 ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น

ในการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลเฉพาะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ ซึ่งได้จากการตรวจวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาในภูมิภาคหลักของประเทศจำนวน 4 แห่ง (รูปที่ 3.5) ดังนี้

- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E)
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี (15.25°N, 104.87°E)
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร (13.67°N, 100.61°E)
- ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (7.2°N, 100.6°E)



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศผิวพื้น

สำหรับข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่รวบรวมมาจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ทั้ง 4 แห่ง เป็นข้อมูลระหว่าง 1 มกราคม 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015 ซึ่งเป็นข้อมูลรายสาม ชั่วโมง ที่เวลา 1.00 น. 4.00 น. 7.00 น. 10.00 น. 13.00 น. 16.00 น. 19.00 น. และ 22.00 น. โดยผู้วิจัยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 (ค.ศ. 2000 - 2009) ใช้สร้างแบบจำลอง และกลุ่มที่ 2 (ค.ศ. 2010 - 2015) สำหรับการทดสอบแบบจำลอง ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ช่วงเวลาของข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศผิวพื้นที่ใช้ในงานวิจัย

สถานี	ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009	1 มกราคม ค.ศ. 2010 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009	1 มกราคม ค.ศ. 2010 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009	1 มกราคม ค.ศ. 2010 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009	1 มกราคม ค.ศ. 2010 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015

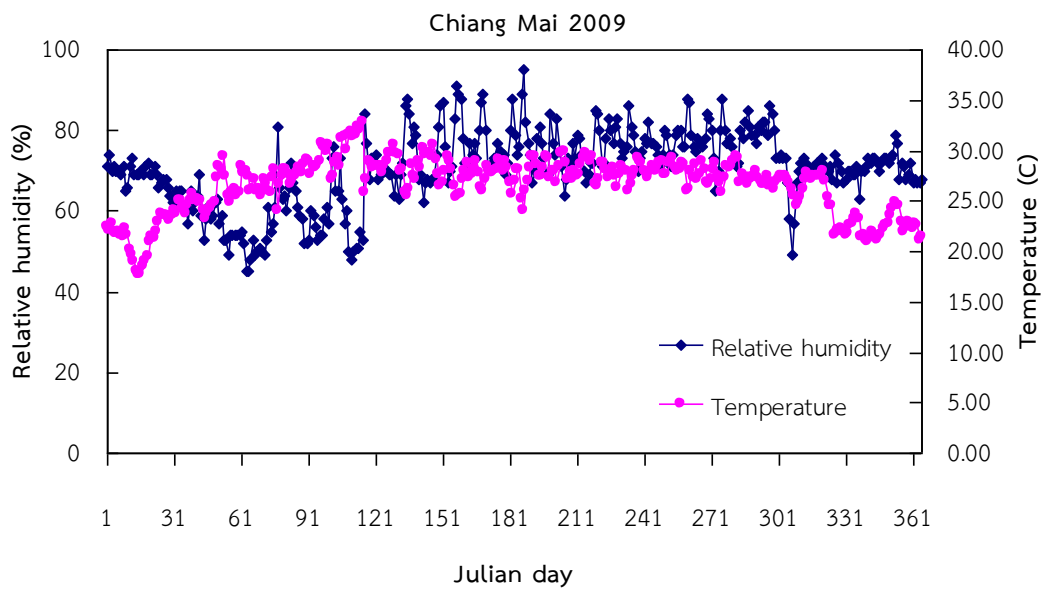
หลังจากที่ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลผิวพื้นมาจากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่งแล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการ process ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์รายสามชั่วโมงให้เป็นค่าเฉลี่ยรายวัน จากนั้นนำข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมาคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัว (Iqbal, 1983) ดังสมการ

$$p_{vs} = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (3.1)$$

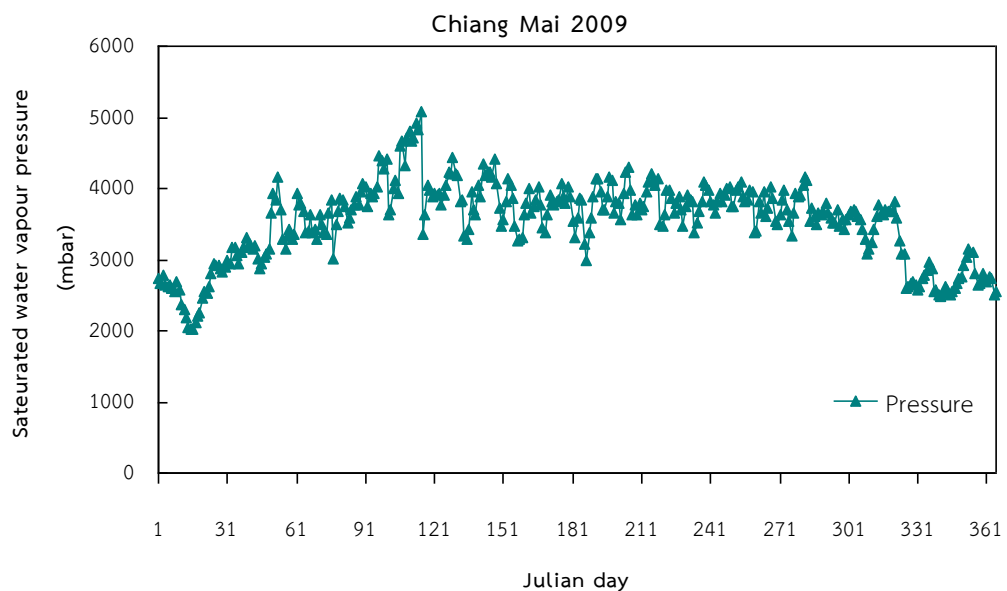
เมื่อ p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว [mbar]

T คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม [K]

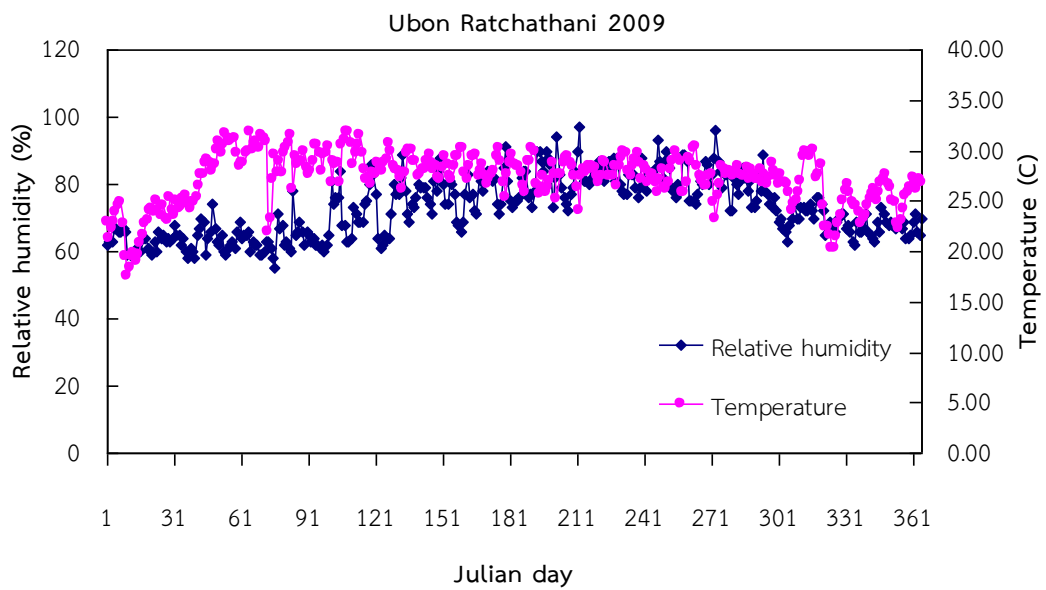
สำหรับข้อมูลผิวพื้นที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลองประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ และข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัว โดยผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าดังกล่าวนี้ให้อยู่ในรูปแบบของค่ารายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยตัวอย่างข้อมูลค่าเฉลี่ยรายวันที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6-3.13



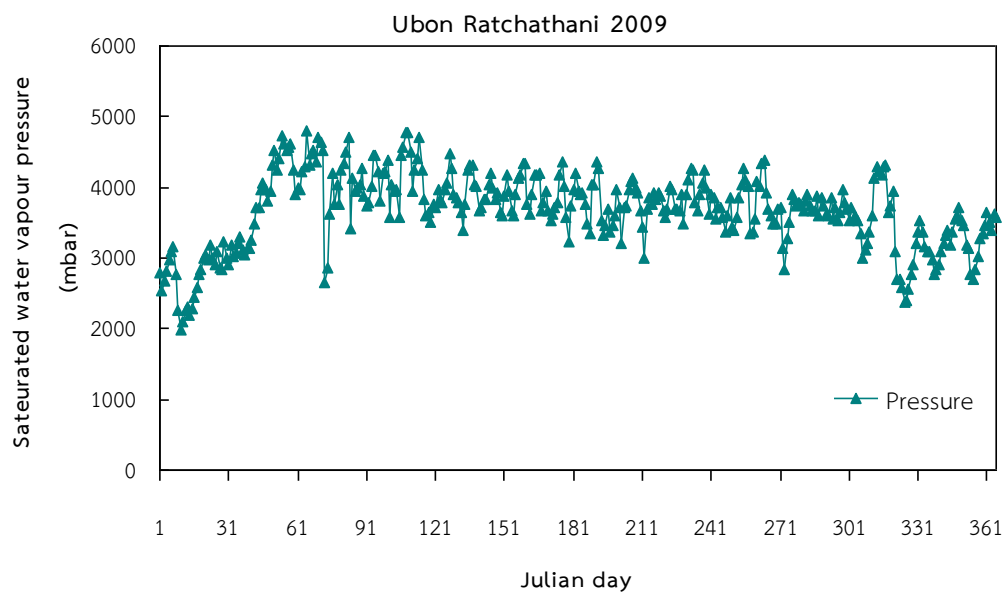
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยานิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



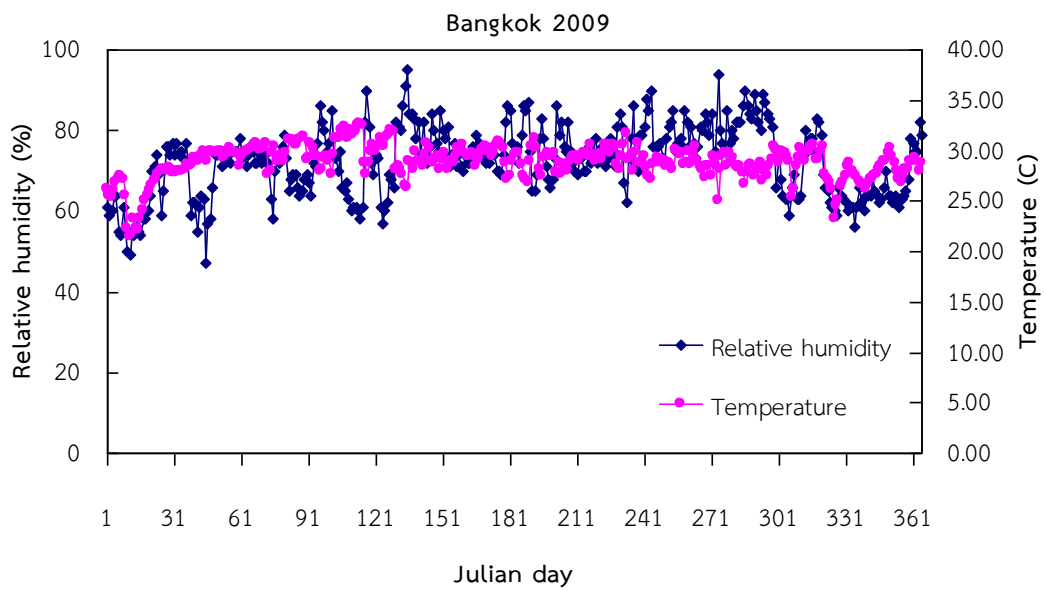
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



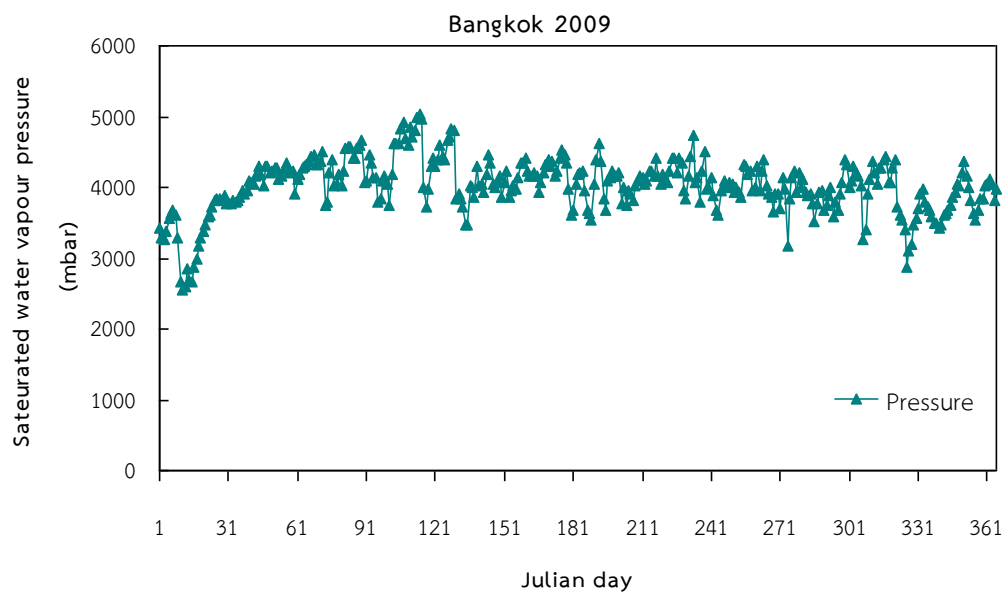
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



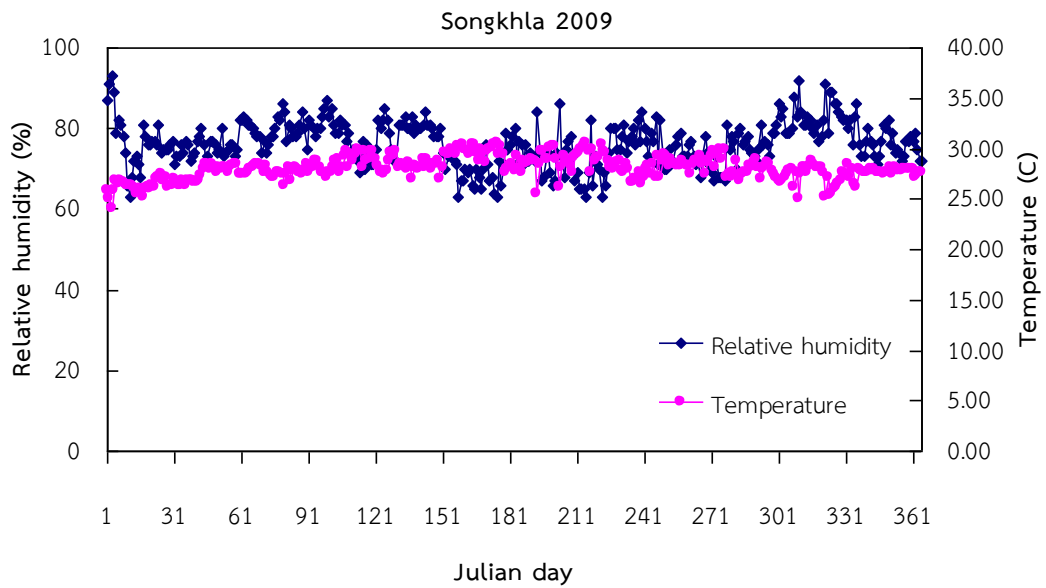
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



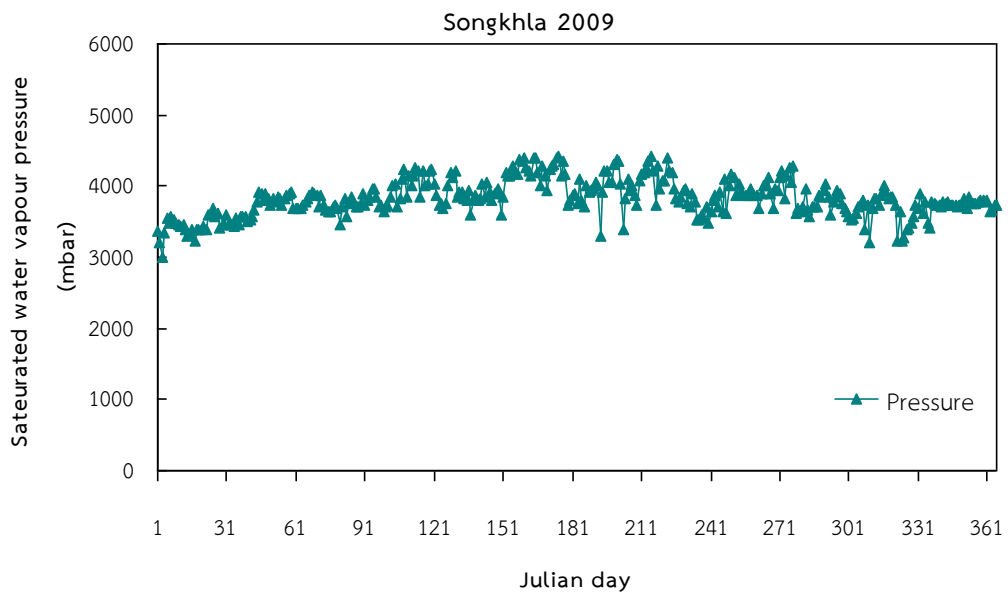
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้นเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างข้อมูลความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยรายวัน ปี ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

3.1.2 เครื่องมือวัดและข้อมูลจากการตรวจอากาศชั้นบน

3.1.2.1 เครื่องตรวจอากาศชั้นบน

การตรวจวัดสภาวะบรรยากาศชั้นบนซึ่งอยู่เหนือจากพื้นผิวโลกขึ้นไป โดยเฉพาะในชั้นโทรโพสเฟียร์ทำได้โดยใช้เครื่องมือตรวจอากาศชั้นบน ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิ ความดันอากาศ ลม และความชื้นอากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ การตรวจวัดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือ 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องวิทยุหึ่งอากาศ (radiosonde) เครื่องเรวิน (Rawinsonde) และเครื่องปล่อยบอลลูน (Pilot balloon) โดยทำการตรวจทุก 6 ชั่วโมง คือ เวลา 7.00 น. 13.00 น. 19.00 น. และ 1.00 น. ตามเวลาในประเทศไทย ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง radiosonde และเนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างแพงและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก กรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทยจึงมีการตรวจวัดที่เวลา 7:00 น.



รูปที่ 3.14 การปล่อยบอลลูนที่ติดตั้งเครื่อง radiosonde ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่

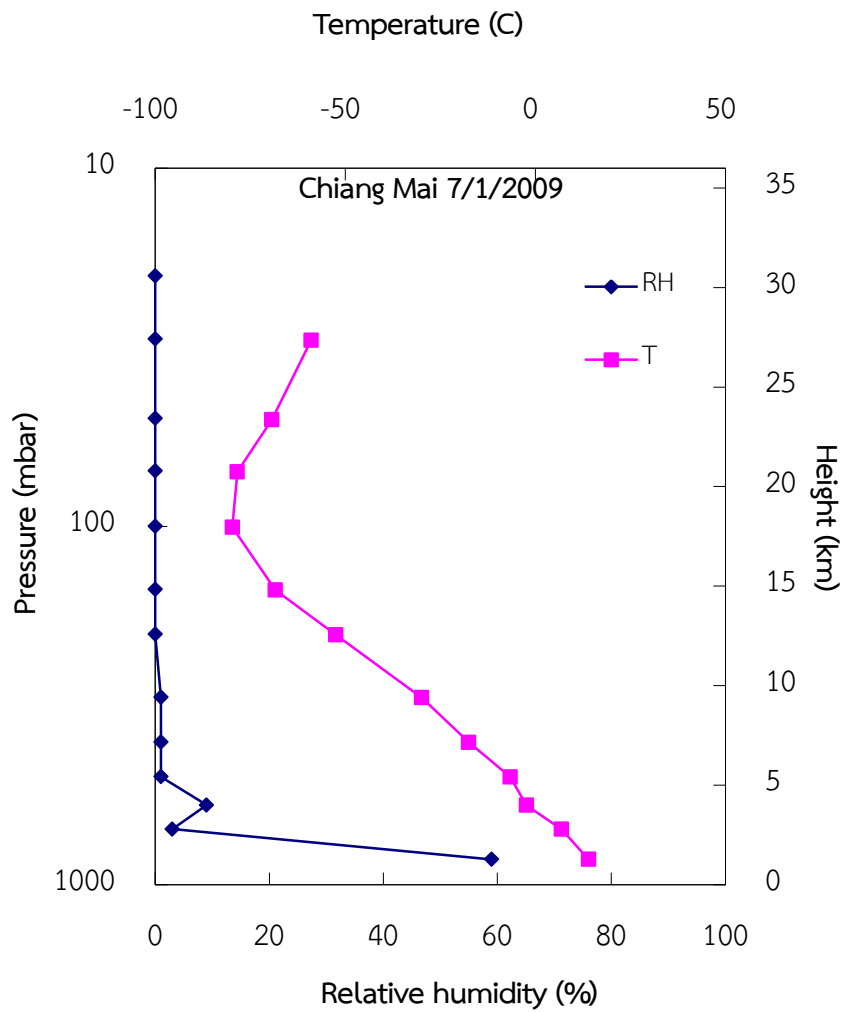
3.1.2.2 ข้อมูลจากการตรวจอากาศชั้นบน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการตรวจอากาศชั้นบนของสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่ง โดยข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ และข้อมูลความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ ได้แก่ 1000 mbar - 10 mbar ช่วงของข้อมูลที่รวบรวมเป็นช่วงเดียวกับข้อมูลการตรวจอากาศผิวพื้น คือระหว่าง 1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009 ดังตารางที่ 3.2

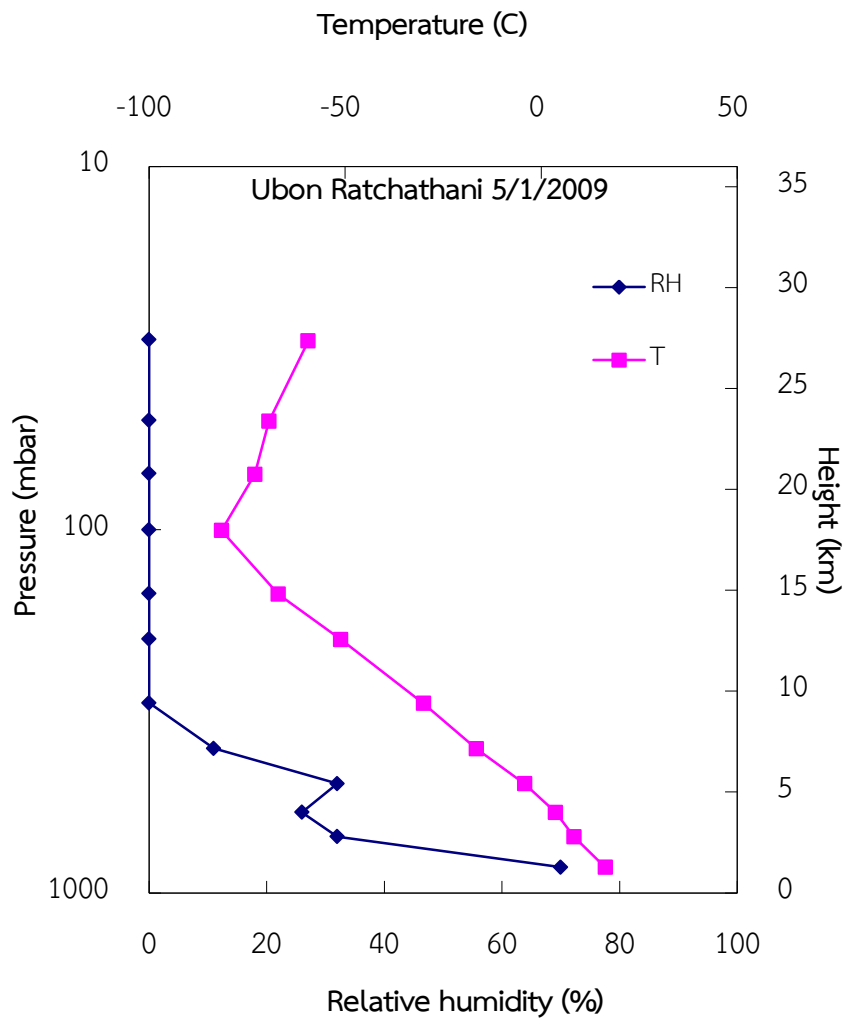
ตารางที่ 3.2 ช่วงเวลาของข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศจากการตรวจอากาศชั้นบนที่ใช้ในงานวิจัย

สถานี	ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009

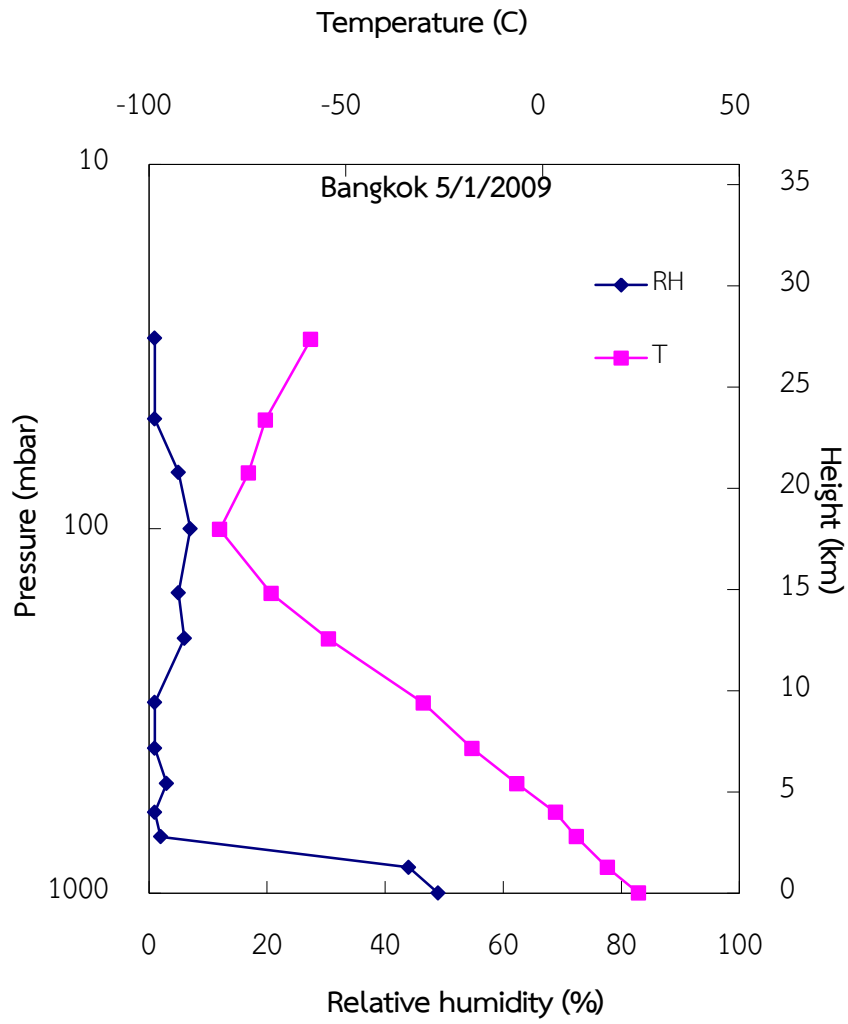
หลังจากที่ได้ข้อมูลการตรวจอากาศชั้นบนแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการ process ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความดันบรรยากาศ ตั้งแต่ 1000 mbar - 10 mbar ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้แสดงดังรูป 3.15-3.18



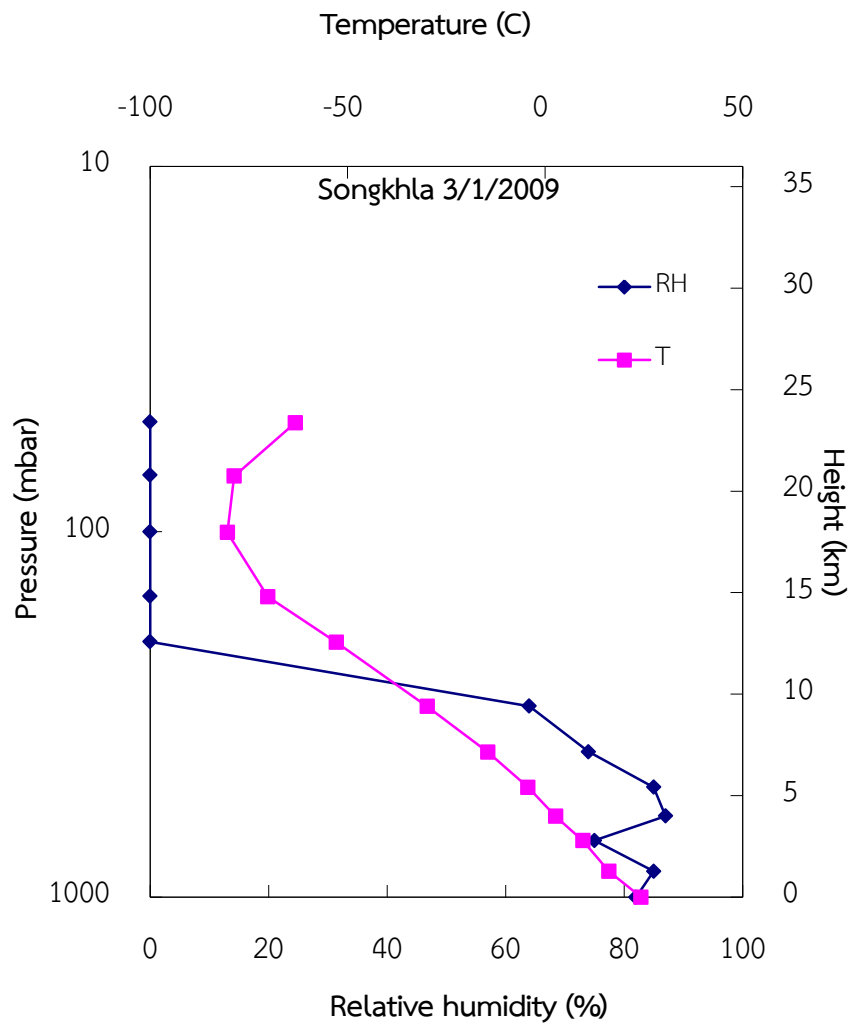
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 7 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 5 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน วันที่ 3 มกราคม ค.ศ. 2009 ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

จากรูปที่ 3.15-3.18 จะเห็นว่า อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง โดยที่อุณหภูมิอากาศจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความสูงในชั้นสตราโตสเฟียร์ ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะมีการแปรค่าตามความสูงเช่นกัน โดยส่วนใหญ่จะเห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลงตามความสูง ซึ่งถ้าอุณหภูมิของอากาศสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูงก็จะส่งผลให้บรรยากาศช่วงดังกล่าวมีปริมาณไอน้ำมาก

3.1.2.3 การคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน

ผู้วิจัยจะใช้วิธีการของ (Pierrehumbert, 1972) เพื่อคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน โดยปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$w = \frac{1}{g} \int_{p_0}^0 \left(\frac{M}{\rho} \right) dp \quad (3.2)$$

เมื่อ	w	คือ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ precipitable water [cm]
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [980 cm/s ²]
	M	คือ อัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้ง (mixing ratio) [-]
	p	คือ ความดันบรรยากาศ [mbar]
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ [g/cm ³]

เนื่องจากการคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยสมการ (3.2) เป็นสมการอินทิกรัล จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มีความต่อเนื่อง แต่ข้อมูลที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบนเป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่อง ไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการแปลงสมการ (3.2) ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ดังนี้

$$w \approx \frac{1}{\rho g} [M_1(p_0 - p_1) + M_2(p_1 - p_2) + \dots + M_n(p_{n-1} - p_n)] \quad (3.3)$$

เมื่อ	w	คือ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ precipitable water [cm]
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ [g/cm ³]
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [980 cm/s ²]
	M _i	คือ อัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้ง (mixing ratio) ที่ระดับความสูง i (i = 1, 2, 3, ..., n) [-]
	p _i	คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูง i (i = 1, 2, 3, ..., n) [mbar]
	p ₀	คือ ความดันบรรยากาศที่พื้นผิวโลก [mbar]
	n	คือ subscript ซึ่งบอกลำดับของข้อมูลที่ระดับความสูงต่าง ๆ [-]

ค่าอัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้งที่ระดับความสูงต่าง ๆ สามารถหาได้จากวิธีการของ (Wallace & Hobbs, 2006) ดังสมการ

$$M_i = 0.622 \frac{p_{vi}}{p_i - p_{vi}} \quad (3.4)$$

เมื่อ M_i คือ อัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้ง (mixing ratio) ที่ระดับความสูง i [-]
 p_{vi} คือ ความดันไอน้ำ (water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]
 p_i คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูง i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) [mbar]

สำหรับความดันไอน้ำที่ระดับความสูงต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของอากาศ ดังสมการ

$$p_{vi} = RH_i \times p_{vsi} \quad (3.5)$$

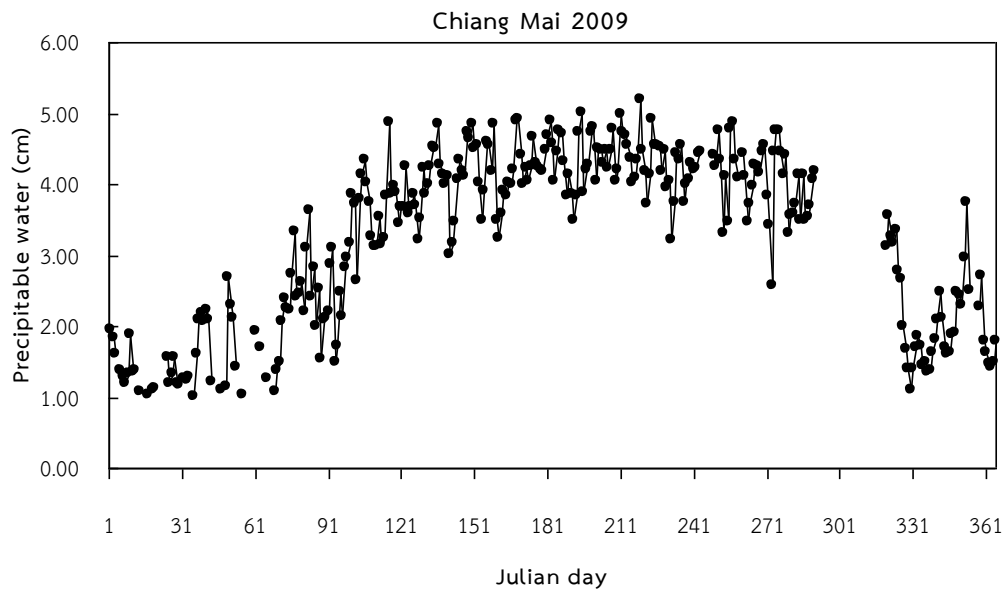
เมื่อ p_{vi} คือ ความดันไอน้ำ (water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]
 RH_i คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ระดับความสูง i [-]
 p_{vsi} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]

เนื่องจากความดันไอน้ำอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจากอุณหภูมิของอากาศ โดยอาศัยสมการของ (Murray, 1967) ดังนี้

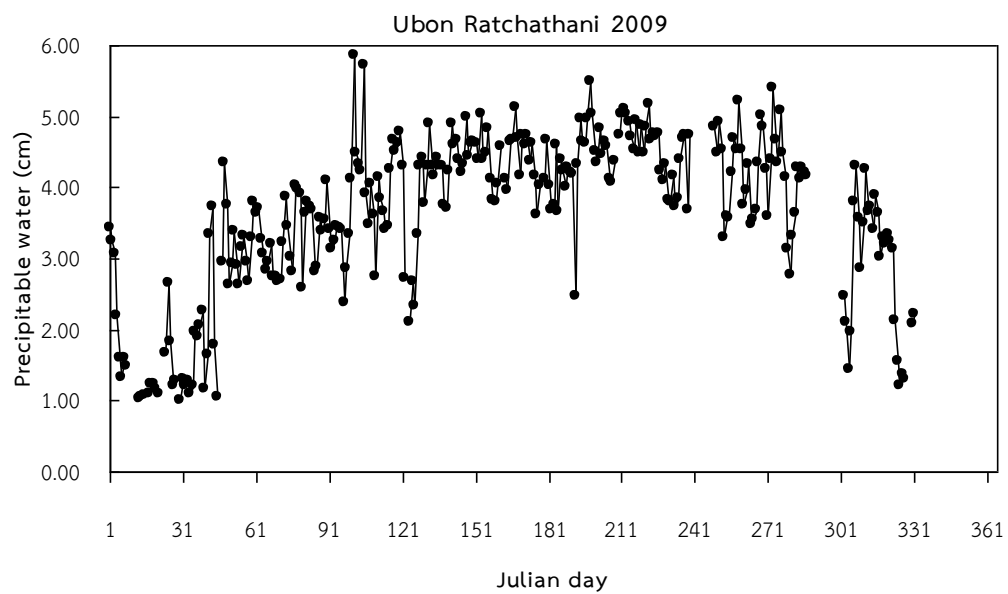
$$p_{vsi} = \begin{cases} 6.106607 \times 10^{(7.5T_i / 237.3 + T_i)}, & T_i > 0 \\ 6.106607 \times 10^{(9.5T_i / 265.5 + T_i)}, & T_i < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

เมื่อ p_{vsi} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]
 T_i คือ อุณหภูมิอากาศที่ระดับความสูง i [$^{\circ}\text{C}$]

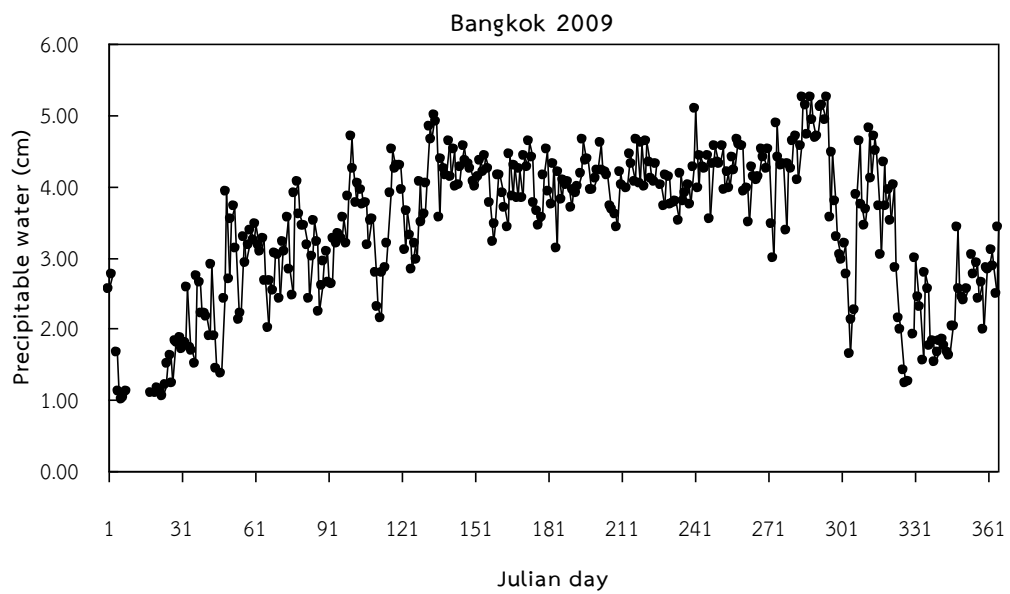
ผู้วิจัยได้นำวิธีการข้างต้นไปทำการคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยใช้ข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนตั้งแต่ 1 มกราคม ค.ศ. 2000 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009 ที่เวลา 7.00 น. ของสถานีวัดจำนวน 4 แห่ง โดยตัวอย่างของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้แสดงดังรูปที่ 3.19-3.22



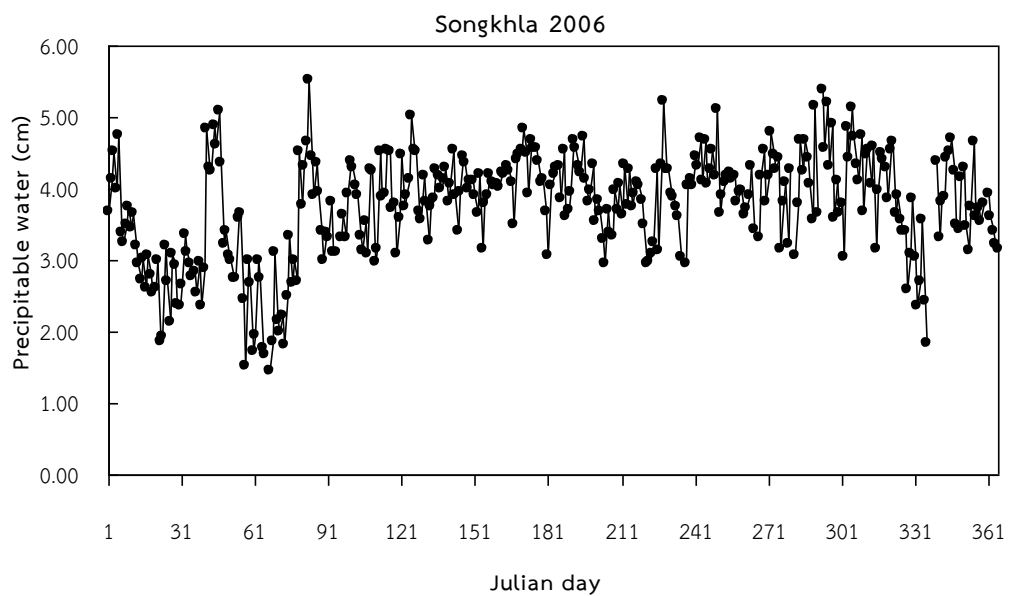
รูปที่ 3.19 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ปี ค.ศ. 2009



รูปที่ 3.20 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี ปี ค.ศ. 2009



รูปที่ 3.21 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร ปี ค.ศ. 2009



รูปที่ 3.22 ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่เวลา 7:00 น. ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา ปี ค.ศ. 2006

จากรูปที่ 3.19-3.22 เห็นได้ว่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบนที่จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี และกรุงเทพมหานคร มีการแปรค่าตามฤดูกาลในลักษณะเดียวกัน คือมีค่าสูงในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม – ตุลาคม) และมีค่าต่ำในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน – เมษายน) สำหรับจังหวัดสงขลาจะมีปริมาณไอน้ำในบรรยากาศค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี

ในขั้นตอนสุดท้าย ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง

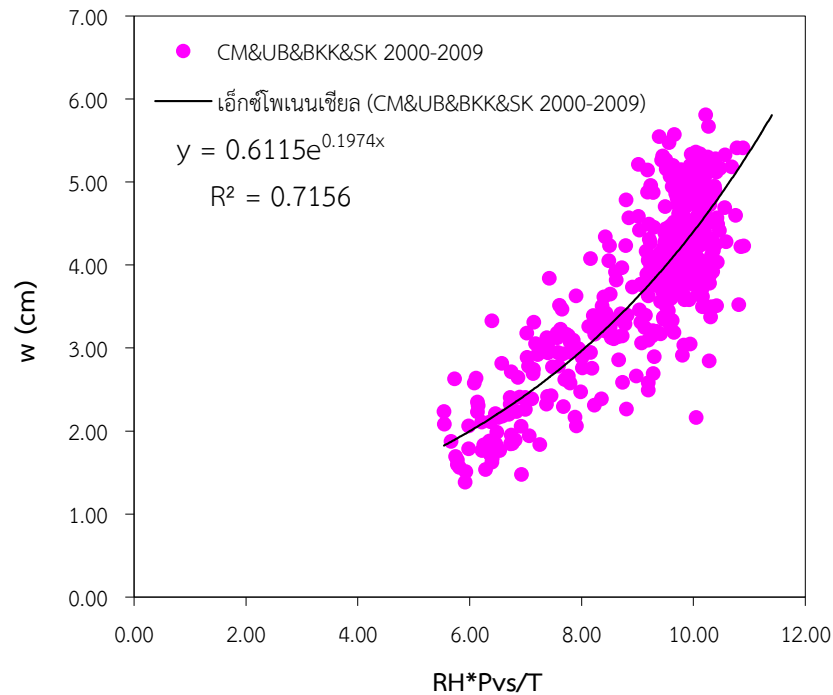
3.1.3 แบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณไอน้ำ

เนื่องจากข้อมูลการตรวจอากาศชั้นบนในประเทศไทยมีจำนวนค่อนข้างจำกัด คือทำการตรวจวัดเฉพาะที่สถานีหลักของแต่ละภูมิภาคเท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลผิวพื้นซึ่งมีการตรวจวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศ ดังนั้น ผู้วิจัยจะนำข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันของอากาศผิวพื้น และข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่คำนวณได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนมาสร้างแบบจำลอง

3.1.3.1 การสร้างแบบจำลอง

ผู้วิจัยนำข้อมูลอุณหภูมิอากาศผิวพื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศผิวพื้น และความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศผิวพื้นรายวันเฉลี่ยต่อเดือน มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่ง ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี กรุงเทพมหานคร และจังหวัดสงขลา ระหว่างวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009 โดยความสัมพันธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.23





รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน (w) และข้อมูลผิวพื้น (เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว และ T คือ อุณหภูมิของอากาศ)

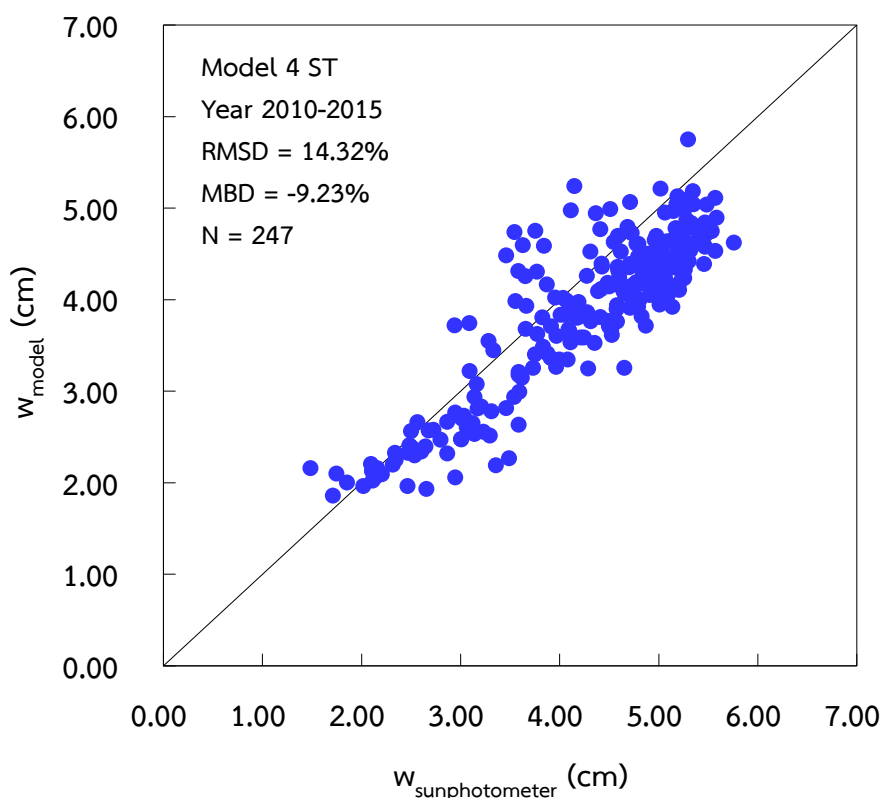
จากรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าค่า w และค่า $RH \cdot p_{vs}/T$ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างดี ผู้วิจัยจึงทำการพิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งผลที่ได้อยู่ในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ 3.7

$$w = 0.6115 \exp[0.1974 \cdot RH \cdot p_{vs}/T] \quad , \quad R^2 = 0.72 \quad (3.7)$$

เมื่อ	w	คือ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ precipitable water [cm]
	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม [-]
	T	คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม [K]
	p_{vs}	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว [mbar]
	R^2	คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [-]

3.1.3.2 การทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา 4 แห่ง ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี และจังหวัดสงขลา และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ในระหว่างวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2010 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015 มาทำการหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยแบบจำลองตามสมการ (3.7) จากนั้นนำปริมาณไอน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sunphotometer ของเครือข่าย AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) ซึ่งเป็นเครื่องวัดปริมาณไอน้ำและติดตั้งไว้ที่สถานีวัดทั้ง 4 สถานี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากเครื่อง sunphotometer

จากผลการทดสอบแบบจำลองพบว่า ปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันดีกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากการวัดจากเครื่อง sunphotometer โดยมีความแตกต่างในรูปของ root mean square difference และ mean bias difference เท่ากับ 14.32% เท่ากับ -9.23% ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่าเป็นความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำได้ โดยอาศัยข้อมูลตรวจอากาศผิวพื้นได้ทั่วประเทศ

3.1.4 การคำนวณหาปริมาณไอน้ำในคอลัมน์ของบรรยากาศทั่วประเทศ

ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศจำนวน 81 แห่ง (ตารางที่ 3.3) ซึ่งมีการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ผิวพื้น โดยข้อมูลที่ใช้อยู่ระหว่างวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2010 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015

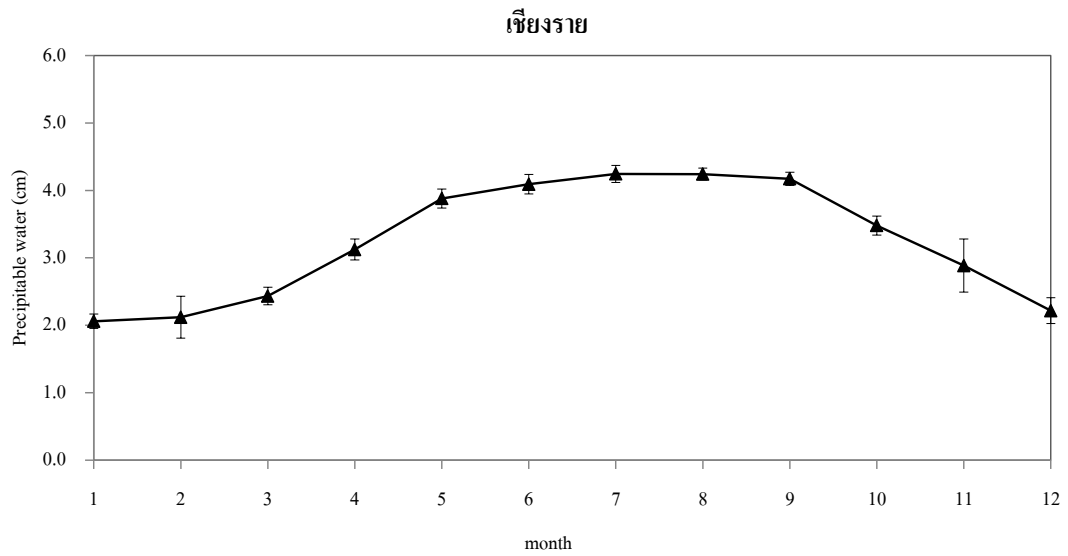
ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศจำนวน 81 แห่ง

ชื่อสถานี	พิกัด	
	ละติจูด (องศาเหนือ)	ลองจิจูด (องศาตะวันออก)
1. แม่ฮ่องสอน	19.300	97.933
2. แม่สะเรียง	18.167	97.933
3. เชียงราย	19.883	99.833
4. เชียงราย (สภช.)	19.873	99.779
5. พะเยา	19.130	99.930
6. ดอยอ่างขาง	18.780	98.980
7. ลำปาง	18.283	99.517
8. ลำพูน	18.570	99.030
9. แพร่	18.167	100.167
10. น่าน	18.767	100.764
11. อุดรดิตถ์	17.617	100.100
12. หนองคาย	17.767	102.717
13. เลย	17.450	101.733
14. อุดรธานี	17.383	102.800
15. สกลนคร	17.150	104.133
16. นครพนม	17.417	104.603
17. สุโขทัย	17.107	99.800
18. ตาก	16.883	99.150
19. แม่สอด	16.667	98.550
20. เขื่อนภูมิพล	17.250	99.017
21. อู่ผึ้ง	16.020	98.860
22. เพชรบูรณ์	16.433	101.150
23. หล่มสัก	16.770	101.250
24. วิเชียรบุรี	15.650	101.120
25. กำแพงเพชร	16.480	99.530
26. ขอนแก่น	16.433	102.833

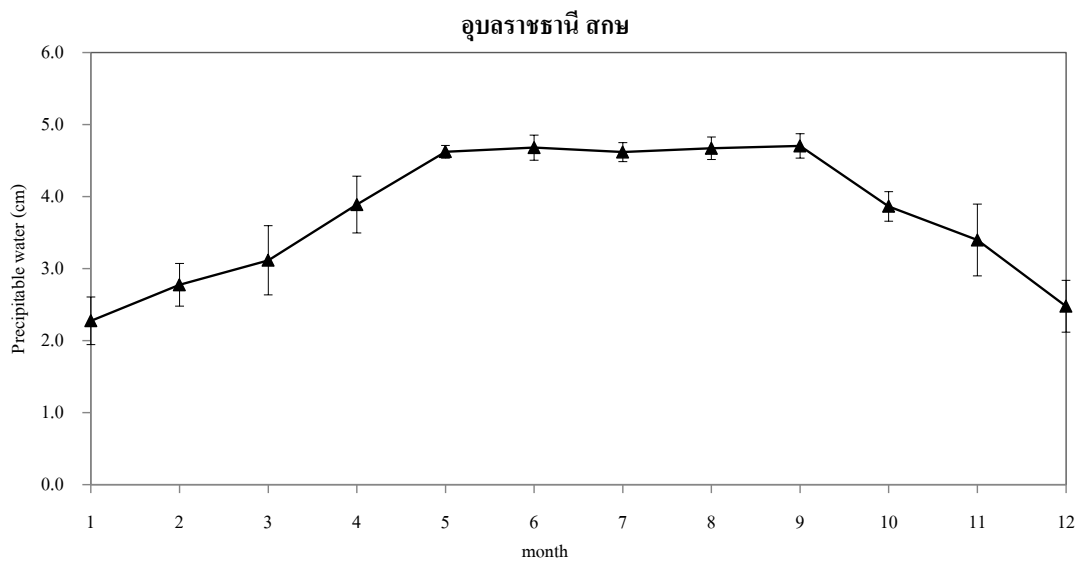
ชื่อสถานี	พิกัด	
	ละติจูด (องศาเหนือ)	ลองจิจูด (องศาตะวันออก)
27. มุกดาหาร	16.533	104.617
28. นครสวรรค์	15.800	100.167
29. ตากฟ้า	15.349	100.530
30. ชัยนาท	15.158	100.192
31. พิจิตร	16.438	100.286
32. มหาสารคาม	16.245	103.070
33. กาฬสินธุ์	16.331	103.591
34. ชัยภูมิ	15.800	102.033
35. ร้อยเอ็ด	16.050	103.683
36. ร้อยเอ็ด (สภษ.)	16.073	103.608
37. อุบลราชธานี (สภษ.)	15.250	104.870
38. ศรีสะเกษ	15.085	104.331
39. อุดรธานี	14.535	100.725
40. ปทุมธานี	14.116	100.621
41. ฉะเชิงเทรา	13.516	101.458
42. สุพรรณบุรี	14.467	100.133
43. อุทัย	14.302	99.859
44. ราชบุรี	13.490	99.792
45. ลพบุรี	14.800	100.617
46. นนทบุรี	13.517	100.762
47. สนามบินสุวรรณภูมิ	13.686	100.768
48. ปราชินบุรี	14.050	101.367
49. นครราชสีมา	14.967	102.083
50. ปากช่อง	14.412	101.422
51. โชคชัย	14.720	102.170
52. สุรินทร์	14.883	103.500
53. ท่าตูม	15.320	103.680
54. สุรินทร์ (สภษ.)	14.891	103.452
55. บุรีรัมย์	15.226	103.248
56. นางรอง	14.620	102.720
57. อรัญประเทศ	13.700	102.583
58. สระแก้ว	13.780	102.030
59. บางนา	13.733	100.567

ชื่อสถานี	พิกัด	
	ละติจูด (องศาเหนือ)	ลองจิจูด (องศาตะวันออก)
60. ทองผาภูมิ	14.750	98.630
61. กาญจนบุรี	14.017	99.533
62. ชลบุรี	13.367	100.983
63. เกาะสีซัง	13.167	100.800
64. พัทยา	12.920	100.870
65. แหลมฉบัง	15.620	102.170
66. เพชรบุรี	13.150	100.060
67. ระยอง	12.630	101.350
68. ห้วยโป่ง	12.733	101.133
69. จันทบุรี	12.600	102.117
70. จันทบุรี (สภษ.)	12.610	102.104
71. ประจวบคีรีขันธ์	11.800	99.800
72. หัวหิน	12.583	99.950
73. หนองพลับ	12.589	99.734
74. ตราด	11.780	102.878
75. ชุมพร	10.483	99.183
76. สวี ชุมพร	10.333	99.100
77. ระนอง	9.983	98.617
78. สุราษฎร์ธานี	9.117	99.350
79. นครศรีธรรมราช	8.467	99.967
80. ตะกั่วป่า	8.850	98.267
81. ภูเก็ต	7.883	98.400

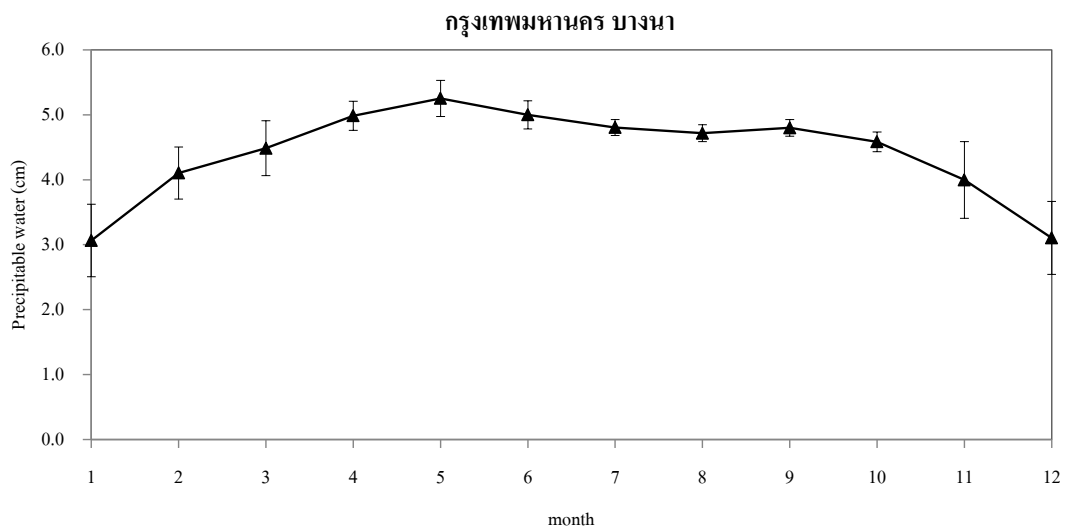
จากนั้นทำการเขียนกราฟการแปรค่าปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวของแต่ละสถานีเพื่อดูการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ตัวอย่างผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.25-3.28 และสำหรับผลของทั้ง 81 สถานี แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1



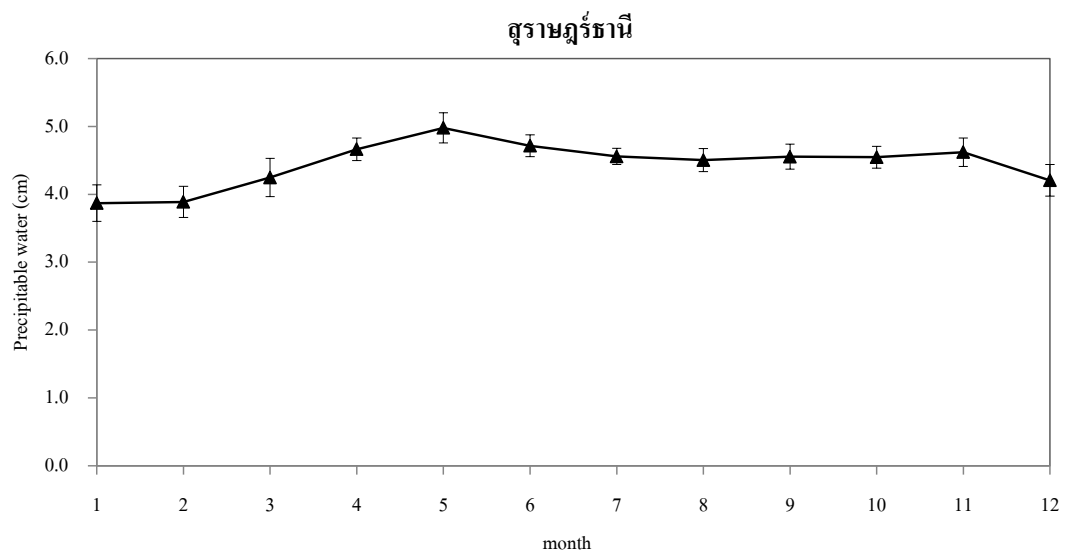
รูปที่ 3.25 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานี
อุตุนิยมวิทยาเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.26 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีระวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.27 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 3.28 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ สถานีอุตุนิยมวิทยาสุราษฎร์ธานี อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่และฤดูกาล กล่าวคือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง จะมีลักษณะการแปรค่าคล้ายคลึงกัน คือมีปริมาณไอน้ำน้อยในช่วงเดือนมกราคมถึง กุมภาพันธ์ และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากในช่วงเดือนมิถุนายนถึงกันยายน จากนั้นจะลดลงจนมีค่าต่ำในช่วงเดือนธันวาคม สำหรับภาคใต้มีการแปรค่าปริมาณไอน้ำต่างไปจากภาคอื่น กล่าวคือ มีการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในรอบปีไม่มากนักและมีค่าค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี ทั้งนี้เนื่องจากภาคใต้มีฝนตกเกือบตลอดทั้งปีทำให้ในบรรยากาศมีปริมาณไอน้ำค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับภาคอื่น ๆ

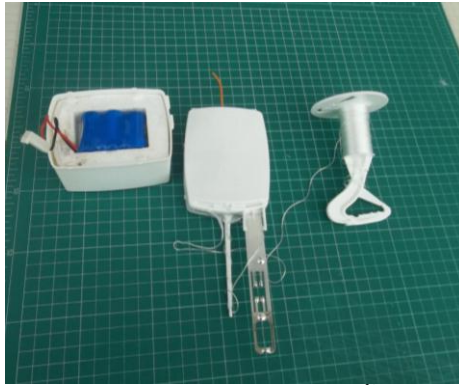
3.2 การหาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ในการหาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำ ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดหาข้อมูลจากกรมตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร และศูนย์อุตุนิยมวิทยา ซึ่งได้ดำเนินการตรวจอากาศชั้นบนในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย โดยข้อมูลที่จะนำมาใช้งาน ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความดันบรรยากาศ จากข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยจะทำการคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลปริมาณไอน้ำที่ได้มาวิเคราะห์การแปรค่าตามความสูงของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในของประเทศไทย

3.2.1 ข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน

3.2.1.1 เครื่องมือวัดและข้อมูลของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

กรมฝนหลวงและการบินเกษตรมีภารกิจหลักคือการทำฝนเทียมซึ่งในการปฏิบัติการจำเป็นต้องทราบถึงสภาพอากาศที่แต่ละระดับความสูงของแต่ละพื้นที่ ดังนั้นกรมฝนหลวงและการบินเกษตรจึงได้ดำเนินการตรวจอากาศชั้นบนในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยโดยการติดตั้งวิทยุหยั่งอากาศ (radiosonde) ซึ่งมีเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกับบัลลูนขนาด 300 g (รูปที่ 3.29) แล้วปล่อยบัลลูนพร้อมอุปกรณ์ไปในบรรยากาศ บัลลูนจะลอยขึ้นสู่บรรยากาศตามความสูง ค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่วัดได้ที่ระดับความสูงต่าง ๆ จะถูกส่งกลับมายังเครื่องรับสัญญาณภาคพื้นดิน ดังรูป 3.30



ก) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 3.29 อุปกรณ์ตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร



ข) บัลลูนขนาด 300 g



รูปที่ 3.30 การตรวจอากาศชั้นบนและการรับสัญญาณของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

โดยทั่วไป กรมฝนหลวงและการบินเกษตรจะดำเนินการตรวจอากาศชั้นบนที่เวลา 7:00 น. ของทุกวัน ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ระดับความดันต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับพื้นขึ้นไปจนกระทั่งบัลลูนแตก ประมาณ 15 km ดังรูป 3.31

```

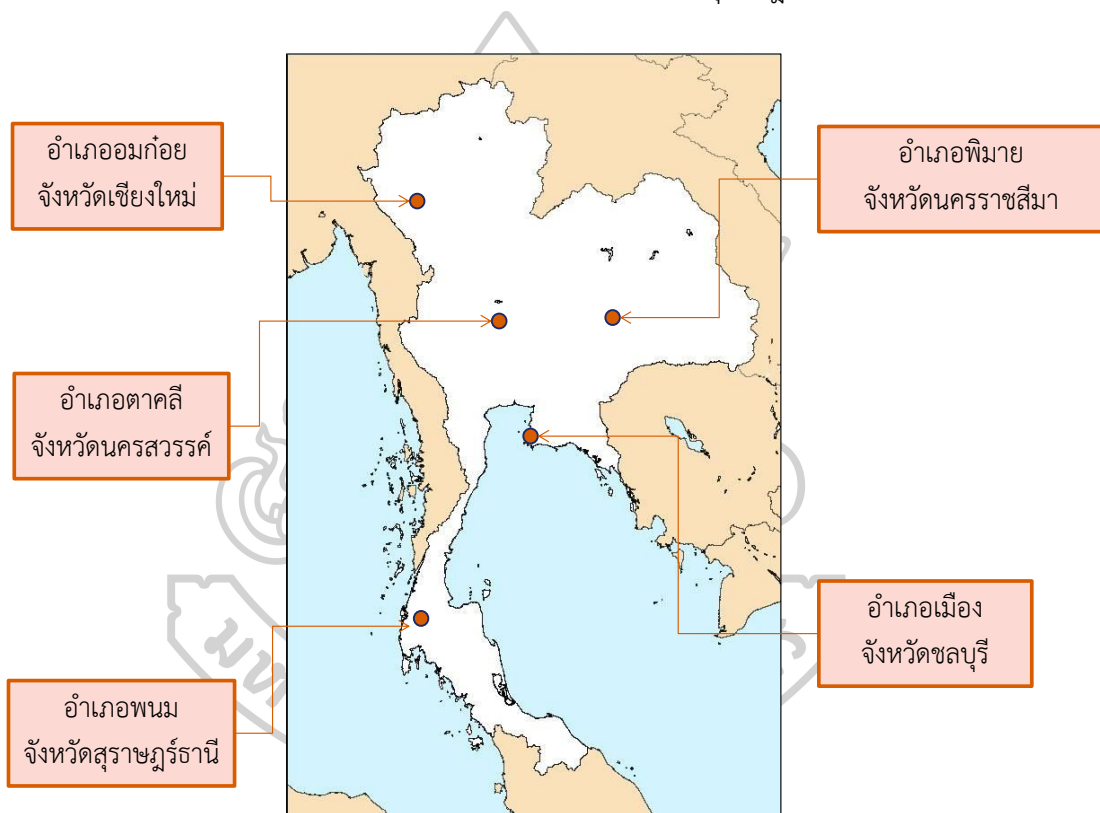
1
2  USBR UPPER AIR ANALYSIS PROGRAM   ANALYZR
3  FILE      OK160108.00W
4  DATE:    1/ 8/16                      TIME:    0 GMT
5
6
7
8  PRES  HGT    TEMP  T-ID  RH  THETA  THETE  TW    TWS  DIR   SPD  SAT  DEF
9  (MBAR) (M)    (C)  (C)  (PCT) (K)   (K)   (K)   (K)  (DEG) (M/S) (G/CU M)
10 100. 16620. -76.9 15.0  8. 379.3 379.3 323.4 303.4 240.  19.0 .0000
11 136. 14800. -63.7 20.0  5. 370.7 370.8 307.7 301.1          .0000
12 150. 14200. -64.5 15.0 11. 359.1 359.1 301.0 298.9 280.  31.4 .0000
13 161. 13766. -62.3 11.0 22. 355.6 355.7 298.4 298.2          .0000
14 169. 13467. -63.3  6.0 44. 349.1 349.1 296.7 296.7          .0000
15 200. 12410. -54.3 11.0 25. 346.9 347.0 296.2 296.3 280.  36.0 .0000
16 250. 10940. -41.7 18.0 12. 344.2 344.4 295.6 295.9 285.  36.6 .0001
17 266. 10520. -38.9 14.0 21. 342.2 342.6 295.2 295.5          .0002
18 270. 10418. -39.9  7.0 47. 339.3 340.1 294.6 294.8          .0001
19 289. 9950.  -36.7  4.7 62. 337.3 338.7 294.2 294.4          .0001
20 300. 9690.  -34.3  5.0 60. 337.1 338.7 294.2 294.5 270.  28.3 .0001
21 350. 8590.  -24.5  9.0 43. 335.8 338.2 294.1 294.9          .0004
22 388. 7828.  -17.7 25.0  9. 335.0 335.8 293.5 295.5          .0012
23 400. 7600.  -16.5 29.0  6. 333.6 334.3 293.1 295.3 260.  20.1 .0013
24 464. 6463.   -9.1 30.0  7. 329.0 999.9 291.9 295.4          .0024
25 500. 5880.   -4.5 30.0  8. 327.6 999.9 291.7 296.0 265.  15.4 .0033
26 516. 5637.   -2.5 30.0  8. 327.1 999.9 291.6 296.4          .0038
27 598. 4455.    3.2 30.0  9. 320.2 999.9 289.8 296.0          .0056
28 664. 3603.    6.0 30.0  9. 313.9 999.9 287.9 294.9          .0067
29 700. 3170.    7.6 30.0 10. 310.9 999.9 287.0 294.5 260.   7.2 .0074
30 731. 2812.    8.8 30.0 10. 308.4 999.9 286.2 294.1          .0080
31 790. 2165.   13.6 30.0 11. 306.8 999.9 286.0 295.5          .0107
32 805. 2007.   11.0  4.7 73. 302.3 324.0 290.4 292.6          .0028
33 850. 1549.   15.4  8.0 59. 302.3 324.3 290.5 294.6 225.   9.3 .0056
34 885. 1204.   17.6  8.0 59. 301.1 325.4 290.8 295.3          .0063
35 890. 1156.   15.2  4.8 73. 298.1 323.4 290.2 292.8 180.   1.5 .0036
36

```

รูปที่ 3.31 ตัวอย่างข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ได้รับการตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ซึ่งทำการวัดที่สถานีเรดาร์ฝนหลวงจำนวน 5 แห่ง ตามภูมิภาคต่าง ๆ (รูปที่ 3.32) ดังนี้

- 1) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลยางเปียง อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่
- 2) สถานีเรดาร์ฝนหลวงตากลี อำเภอตากลี จังหวัดนครสวรรค์
- 3) สถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี
- 4) ศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงเฉลิมพระเกียรติ ตำบลรังกาใหญ่ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา
- 5) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลพนม อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี



รูปที่ 3.32 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

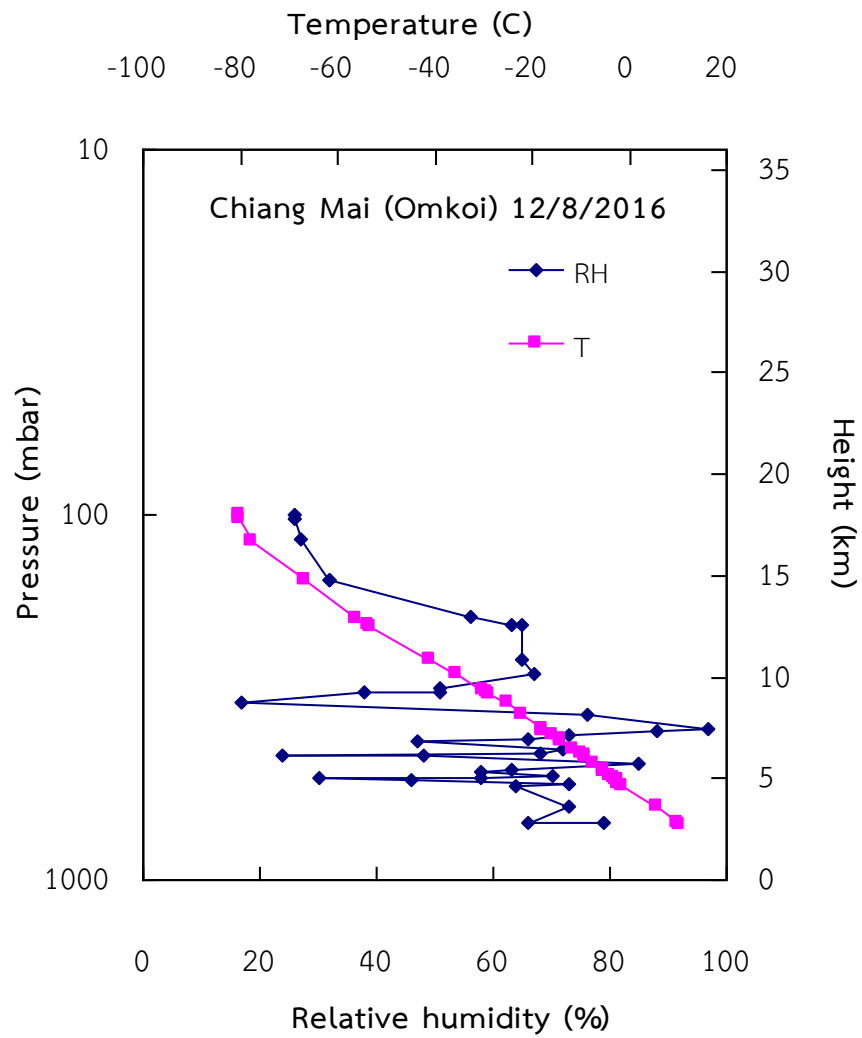
ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่เวลา 7:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่ปล่อยบอลลูนของสถานีวัดทั้ง 5 แห่ง ของแต่ละวัน ข้อมูลที่รวบรวมได้แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ช่วงเวลาของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ได้จาก radiosonde ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

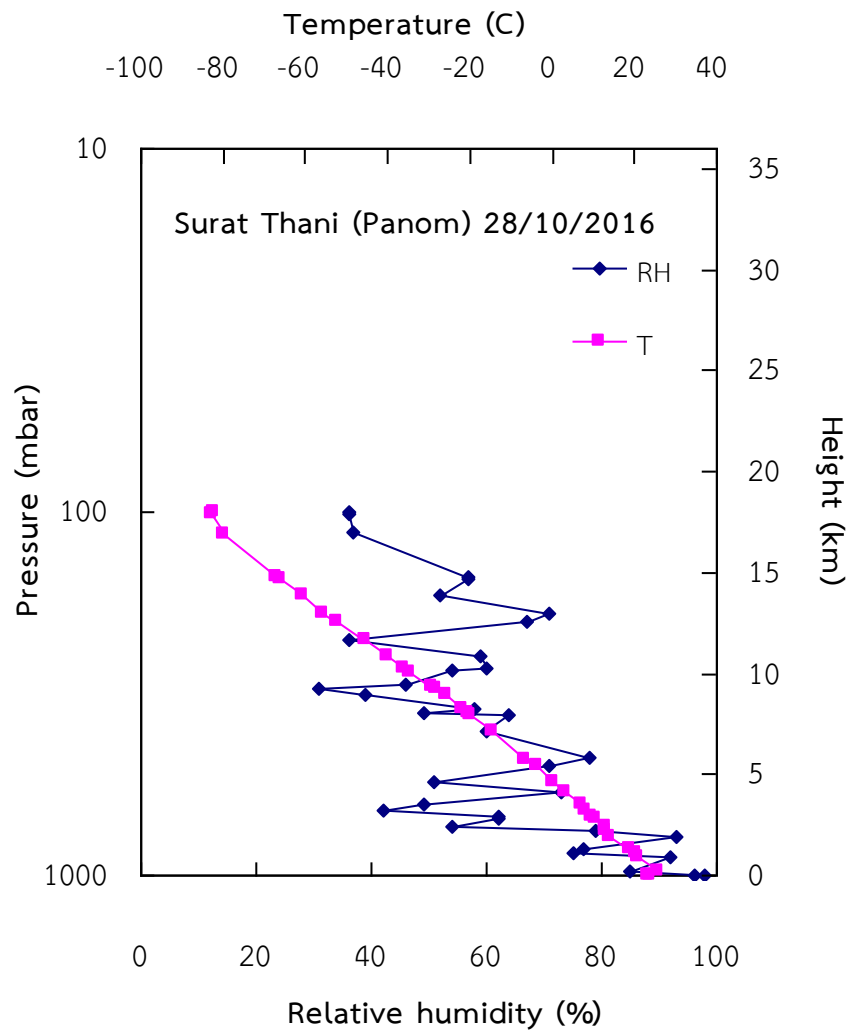
สถานี	ช่วงเวลา
1) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลยางเปียง อำเภอมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่	1 มกราคม ค.ศ. 2015 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016
2) สถานีเรดาร์ฝนหลวงตาคี อำเภอตาคี จังหวัดนครสวรรค์	1 มกราคม ค.ศ. 2015 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016
3) สถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี	1 มกราคม ค.ศ. 2015 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016
4) ศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงเฉลิมพระเกียรติ ตำบลรังกาใหญ่ อำเภอพินมาย จังหวัดนครราชสีมา	1 มกราคม ค.ศ. 2015 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016
5) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลพนม อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี	1 มกราคม ค.ศ. 2016 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016

สำหรับตัวอย่างข้อมูลโปรไฟล์ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์มีการแปรค่าตามแนวตั้ง โดยเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิมักลดลงตามความสูง ส่วนความชื้นสัมพัทธ์มีการแปรค่าตามความสูงค่อนข้างมากและมีค่าสูงสุดที่บริเวณพื้นผิวโลก





รูปที่ 3.33 ข้อมูลโพรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 12 สิงหาคม ค.ศ. 2016
สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลยางเปียง อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.34 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 28 ตุลาคม ค.ศ. 2016
สถานีเรดาร์ฝนหลวง อำเภอนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี

โดยที่ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ ที่ระดับความสูงต่าง ๆ ในการคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศต่อไป

3.2.1.2 เครื่องมือวัดและข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา

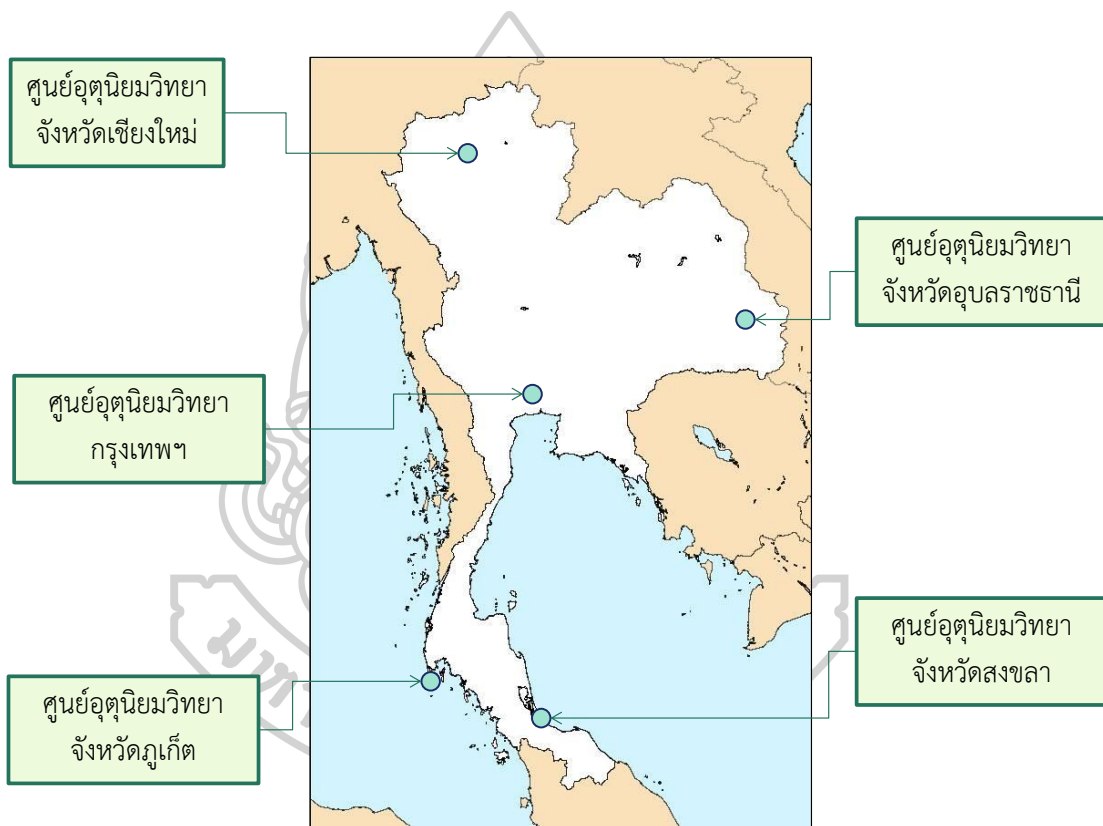
จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1.2 การตรวจอากาศชั้นบนถือเป็นภารกิจหลักของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งได้ดำเนินการตรวจอากาศชั้นบนโดยใช้ radiosonde ติดไปกับบอลลูนและปล่อยไปในบรรยากาศ ที่เวลา 7:00 น. ตัวอย่างอุปกรณ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาแสดงดังรูป 3.35



รูปที่ 3.35 อุปกรณ์ตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา

สำหรับงานในส่วนของการศึกษาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการตรวจอากาศชั้นบนที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย จำนวน 5 แห่ง (รูปที่ 3.36) ได้แก่

- 1) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
- 2) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
- 3) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร
- 4) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา
- 5) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันตก อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต



รูปที่ 3.36 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจอากาศชั้นบนของกรมอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ความดันบรรยากาศต่าง ๆ ได้แก่ 150 200 300 400 500 600 700 850 และ 1000 mbar ดังตัวอย่างต่อไปนี้

RAWINSONDE DATA OBSERVATIONS AT STANDARD PRESSURE LEVELS														
Station (327501) 48327 CHIANG MAI		MONTHLY TEMPERATURE SEPTEMBER 2015 0000 GMT(0700 LST)												
Latitude 18.47 N Longitude 98.59 E		Geopotential of screen 314 m.												
Day	1000 mbs	850 mbs	700 mbs	600 mbs	500 mbs	400 mbs	300 mbs	STANDARD PRESSURE LEVELS 200 mbs	150 mbs	100 mbs	70 mbs	50 mbs	30 mbs	20 mbs
1	19.1	11.5	4.5	-3.1	-13.0	-27.1	-50.8	-66.4	-77.2	-74.6	-63.1			
2	20.2	11.6	5.2	-2.6	-13.1	-27.5	-51.0	-66.7	-77.8	-71.6	-63.5			
3	18.8	11.5	3.2	-3.9	-13.2	-28.0	-51.1	-67.5	-77.6	-71.1	-63.8			
4	19.2	10.7	3.9	-3.5	-12.9	-27.5	-51.5	-67.0	-78.8	-73.7	-65.3			
5	18.8	10.5	3.7	-3.4	-12.7	-28.0	-51.5	-67.0	-78.6	-68.6	-67.2			
6	18.2	10.3	3.7	-4.7	-13.7	-29.6	-50.9	-64.9	-80.4	-70.5	-57.5	-52.4		
7	18.6	11.3	3.8	-3.1	-13.6	-27.4	-50.0	-66.0	-79.1	-67.9	-63.5	-54.8		
8	18.5	10.7	4.1	-3.9	-13.4	-27.8	-50.7	-65.9	-82.0	-72.2				
9	19.2	11.4	5.2	-3.1	-14.1	-27.9	-50.5	-66.4	-79.8	-69.8	-62.7			
10	19.3	10.7	4.9	-3.2	-13.9	-28.4	-50.8	-66.9	-78.1	-69.5	-64.4			
11	19.7	10.4	3.9	-4.2	-13.9	-28.1	-50.9	-67.4	-78.8	-71.3	-61.8			
12	19.3	10.6	4.6	-2.7	-13.3	-29.2	-50.4	-66.0	-79.8	-71.2	-63.6			
13	18.8	11.6	4.4	-3.6	-13.5	-28.4	-52.0	-67.1	-81.4	-71.4	-64.8			
14	18.3	10.0	4.8	-3.8	-14.3	-27.8	-51.0	-66.9	-80.9	-69.3	-64.2			
15	19.6	11.3	4.8	-3.4	-12.4	-26.9	-50.4	-66.7	-82.5	-70.0	-62.8			
16	20.3	10.6	3.6	-4.1	-13.6	-27.7	-50.4	-66.0	-83.2					
17	19.5	10.3	4.0	-2.7	-12.6	-27.1	-50.2	-66.0	-80.8	-72.4	-65.0	-54.3		
18	18.7	11.7	4.8	-2.6	-12.2	-27.4	-50.3	-65.6	-81.6	-70.2	-64.6			
19	18.8	10.2	3.8	-4.0	-13.8	-28.4	-52.4	-65.5	-81.1	-72.5	-61.9			
20	19.5	11.1	3.8	-4.4	-14.3	-29.1	-51.7	-65.3	-79.7	-70.9	-64.0	-57.1		
21	19.7	12.7	5.7	-4.0	-14.0	-28.9	-51.4	-65.9	-80.7	-71.8	-63.4	-55.9		
22	20.0	11.6	4.9	-5.1	-14.9	-28.2	-50.3	-65.6	-81.0	-72.4	-68.1	-54.1		
23	20.9	12.1	5.3	-3.9	-14.4	-27.2	-50.5	-63.8	-80.5	-72.8	-65.2			
24	19.9	10.3	5.6	-3.0	-12.7	-27.9	-50.8	-64.2	-82.3	-75.2	-66.4	-53.8		
25	19.6	11.2	5.5	-3.4	-13.2	-28.2	-49.9	-64.6	-80.5	-74.5	-65.0	-54.1		
26	19.9	10.4	4.7	-3.1	-14.0	-29.0	-49.8	-65.3	-80.8	-73.6	-63.0	-57.1		
27	19.8	10.7	5.0	-3.4	-14.8	-29.6	-50.2	-63.7	-80.8	-73.4	-62.4	-56.7		
28	20.1	11.2	4.2	-4.1	-14.1	-29.0	-49.5	-63.8	-81.0	-76.8	-64.6	-56.7		
29	21.1	11.1	5.6	-3.5	-14.5	-28.5	-50.6	-63.0						
30	21.1	10.5	3.7	-3.8	-13.3	-28.9	-50.9	-65.0	-79.8	-75.9	-64.6	-59.5		
N		30	30	30	30	30	30	29	29	28	27	11		
Mean	19.4	11.0	4.5	-3.6	-13.6	-28.2	-50.7	-65.8	-80.2	-72.0	-63.9			
Max.	21.1	12.7	5.7	-2.6	-12.2	-26.9	-49.5	-63.7	-77.2	-67.9	-57.5	-52.4		
Min.	16.8	10.0	3.2	-5.1	-14.9	-29.6	-52.4	-67.5	-83.2	-76.8	-68.1	-59.5		

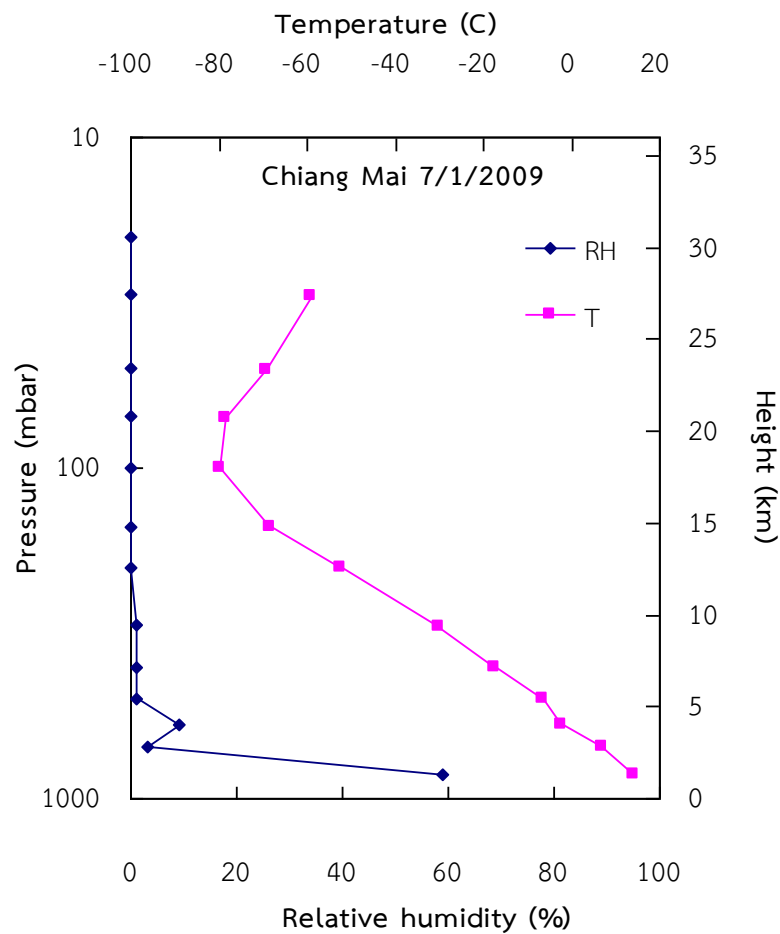
รูปที่ 3.37 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิอากาศตามความดันระดับต่าง ๆ ของกรมอุตุนิยมวิทยา

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากการตรวจอากาศชั้นบน โดยช่วงเวลาของข้อมูลที่รวบรวมได้แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ช่วงเวลาของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ได้จาก radiosonde ของกรมอุตุนิยมวิทยา

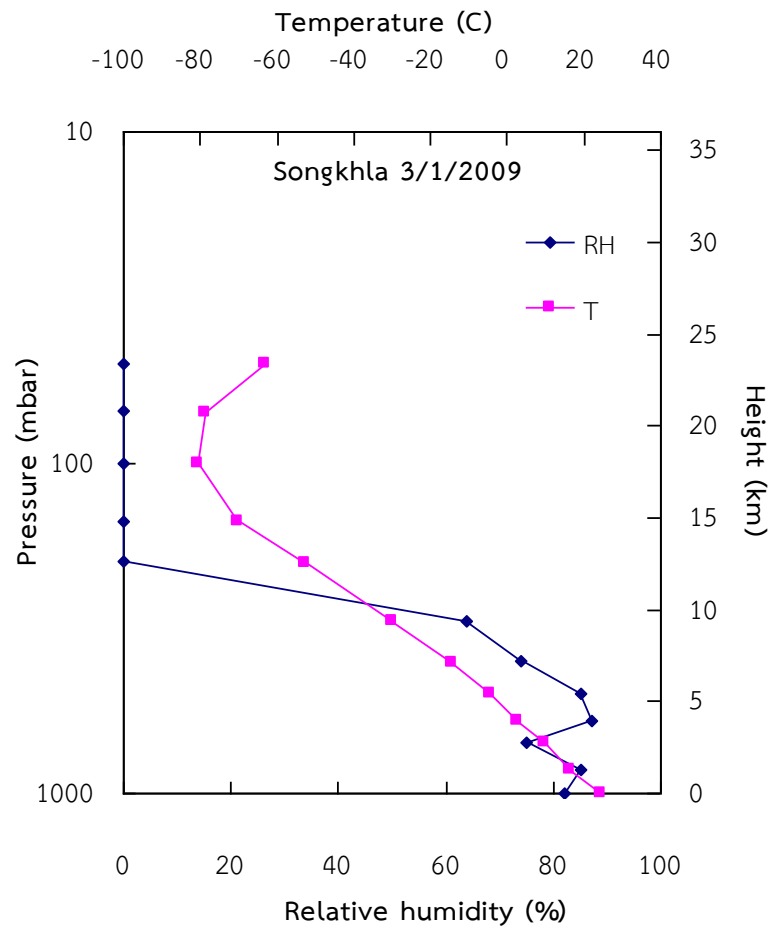
สถานี	ช่วงเวลา
1) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่	1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
2) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
3) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร	1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
4) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา	1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015
5) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันตก อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต	1 มกราคม ค.ศ. 2000 – 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015

ตัวอย่างข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศจะมีลักษณะแบบเดียวกันกับงานส่วนแรก แสดงได้ดังรูปที่ 3.38 และรูปที่ 3.39 ซึ่งจะเห็นว่า การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศตามแนวตั้งมีรูปแบบค่อนข้างชัดเจน คือ อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับความสูงประมาณ 18 km (โทรโพพอส) อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามความสูง ส่วนการแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์พบว่า มีการแปรค่าไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าส่วนใหญ่จะมีค่าสูงที่พื้นผิวโลกและมีค่าลดลงตามความสูง



รูปที่ 3.38 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 7 มกราคม ค.ศ. 2009

ณ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.39 ข้อมูลโปรไฟล์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ วันที่ 3 มกราคม ค.ศ. 2009
ณ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

ผู้วิจัยจะนำข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ ที่รวบรวมได้นี้ ไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่ความสูงต่าง ๆ ตามรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.2 การคำนวณหาปริมาณไอน้ำตามแนวดิ่ง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีความประสงค์จะบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ mixing ratio ที่ความดันบรรยากาศหรือความสูงต่าง ๆ (M_i) โดยค่า mixing ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้ง หรือสามารถหาได้จากความดันของไอน้ำและความดันอากาศรวม มีหน่วยเป็น g/kg (Wallace & Hobbs, 2006) ดังสมการ

$$M_i = 0.622 \frac{p_{vi}}{p_i - p_{vi}} \times 1000 \quad (3.8)$$

เมื่อ M_i คือ อัตราส่วนผสมของไอน้ำกับอากาศแห้ง (mixing ratio) ที่ระดับความสูง i [g/kg]
 p_{vi} คือ ความดันไอน้ำ (water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]
 p_i คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูง i [mbar]

ความดันไอน้ำที่ระดับความสูงต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังสมการต่อไปนี้

$$p_{vi} = RH_i \times p_{vsi} \quad (3.9)$$

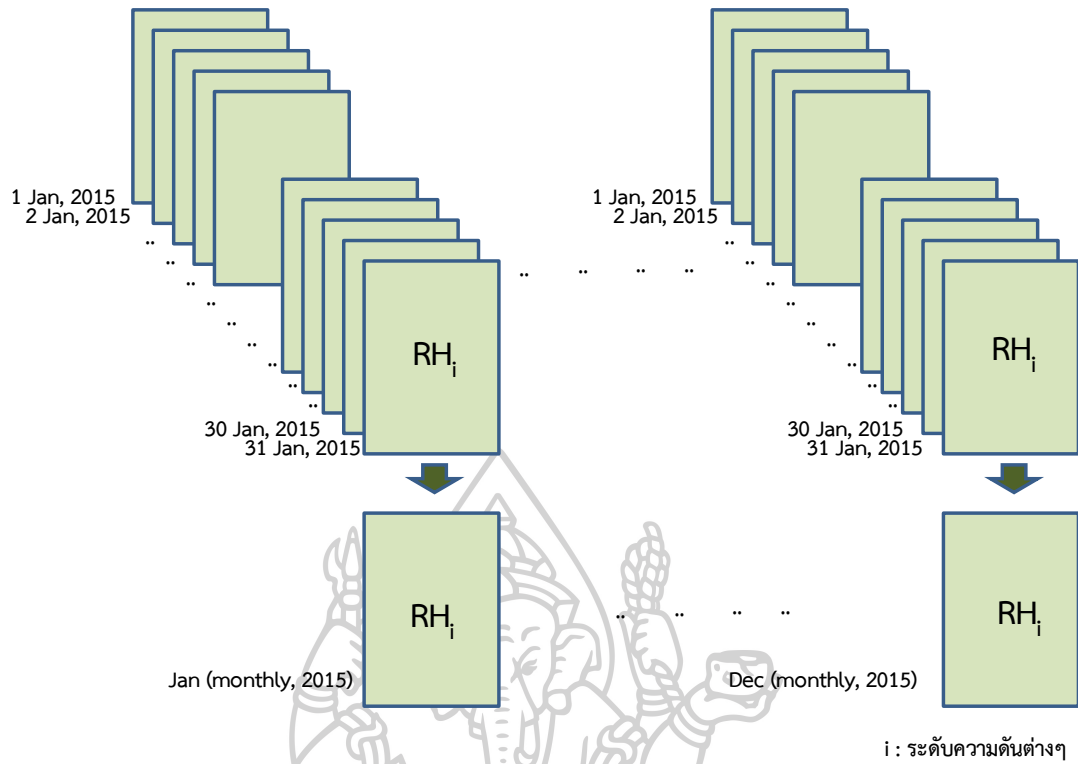
เมื่อ RH_i คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ระดับความสูง i [-]
 p_{vsi} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated water vapour pressure) ที่ระดับความสูง i [mbar]

เนื่องจากความดันไอน้ำอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ผู้วิจัยจึงคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจากอุณหภูมิของอากาศ โดยอาศัยสมการของ (Murray, 1967) ดังนี้

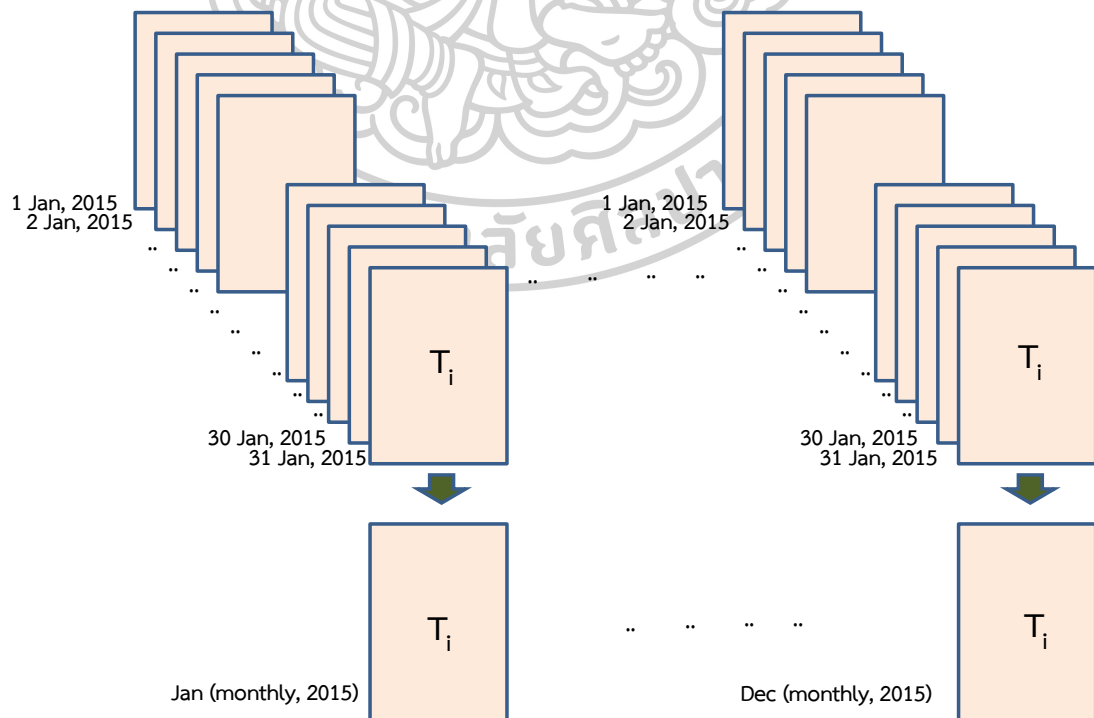
$$p_{vsi} = \begin{cases} 6.106607 \times 10^{(7.5T_i / 237.3 + T_i)}, & T_i > 0 \\ 6.106607 \times 10^{(9.5T_i / 265.5 + T_i)}, & T_i < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิอากาศที่ระดับความสูง i [$^{\circ}\text{C}$]

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่า การคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในรูปของ mixing ratio จำเป็นต้องอาศัยค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศ และความดันบรรยากาศ ที่ระดับความสูงต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลดังกล่าว ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบนของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรและกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งได้ทำการตรวจวัดรายวัน อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำระยะยาว (climatology) ผู้วิจัยจึงทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยรายเดือนของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ความดันต่าง ๆ ของแต่ละปี แสดงดังรูปที่ 3.40-3.41



รูปที่ 3.40 แผนภูมิแสดงการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ความดันต่าง ๆ เฉลี่ยรายเดือน



รูปที่ 3.41 แผนภูมิแสดงการคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศที่ความดันต่าง ๆ เฉลี่ยรายเดือน

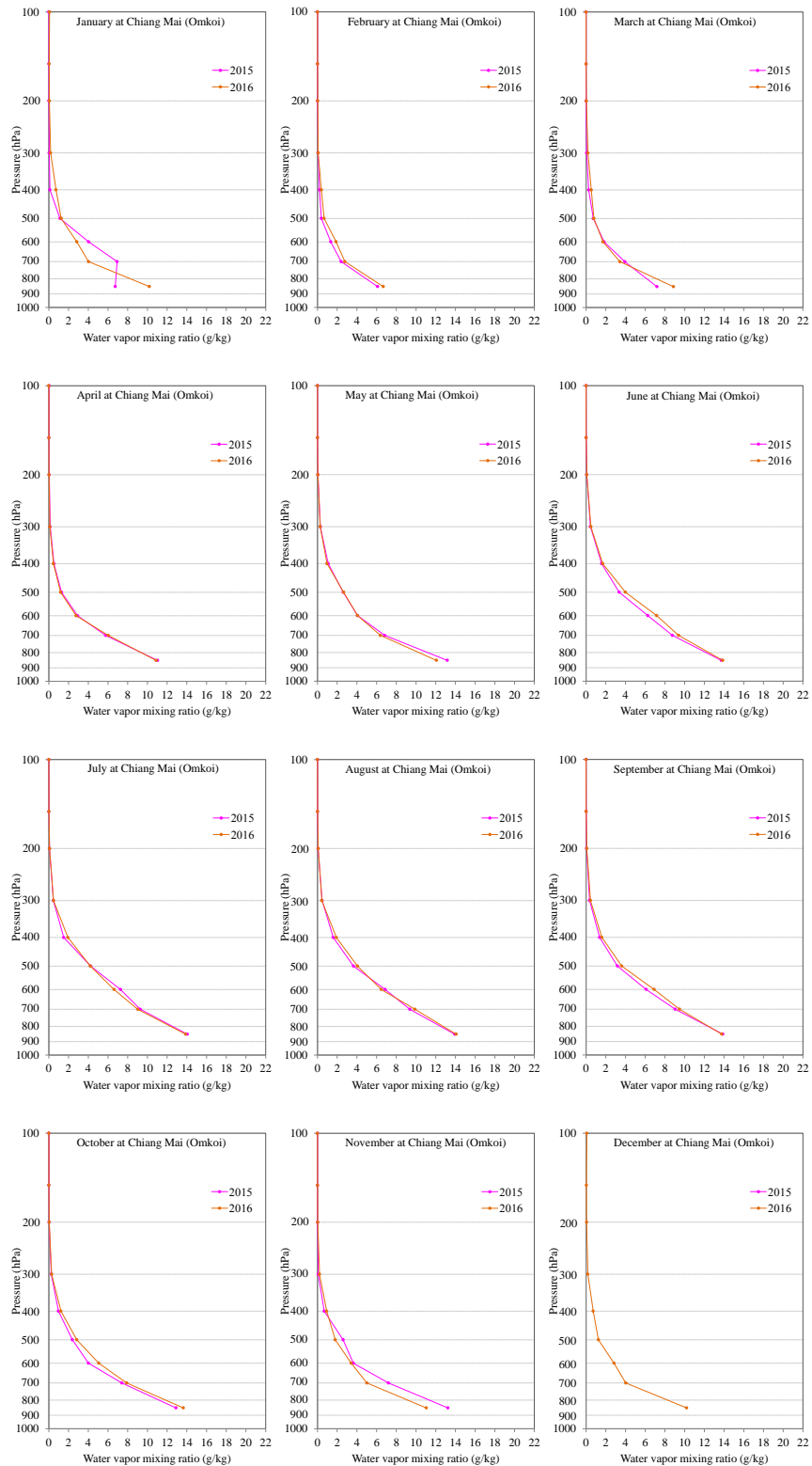
จากนั้นนำค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศตามแนวตั้งเฉลี่ยรายเดือนที่ได้มา คำนวณหา mixing ratio เฉลี่ยรายเดือนที่ความดัน 150 200 300 400 500 600 700 850 และ 1000 mbar ที่สถานีตรวจวัด 5 แห่งของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร และสถานีตรวจวัดอีก 5 แห่งของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งผู้วิจัยจะนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.3 การศึกษาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำจากข้อมูลการวัดของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรและกรมอุตุนิยมวิทยา

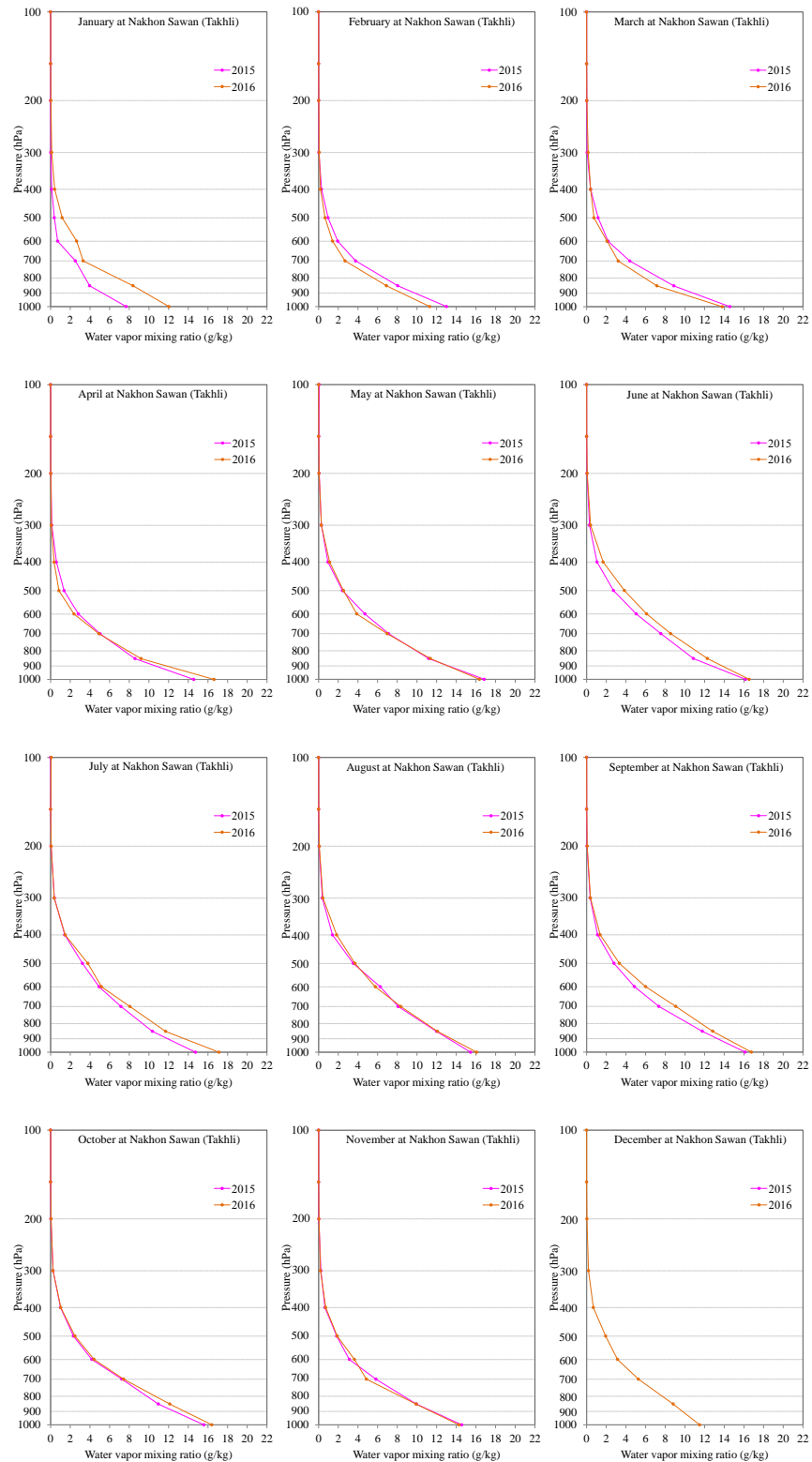
เนื่องจากไอน้ำในบรรยากาศมีการแปรค่าทั้งในเชิงพื้นที่และเวลาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจะเน้นศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามแนวตั้งในรอบปีในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูล mixing ratio ของไอน้ำจากสถานีวัด 5 แห่งของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร และ 5 แห่งของกรมอุตุนิยมวิทยา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.3.1 การแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำรายเดือน

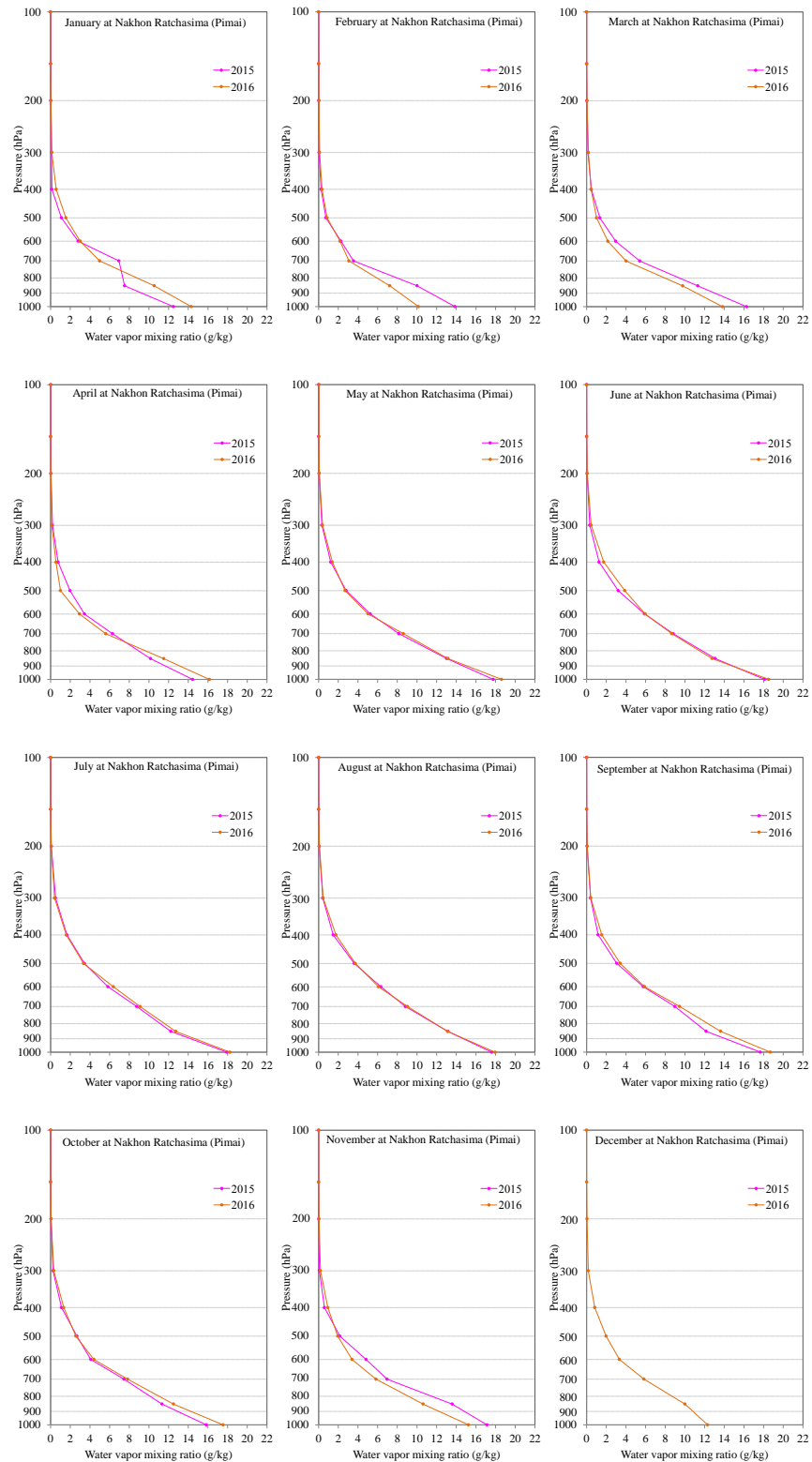
ในการศึกษาการแปรค่าปริมาณไอน้ำตามแนวตั้ง ผู้วิจัยได้ทำการเขียนกราฟระหว่างค่า mixing ratio ของไอน้ำกับค่าความดันบรรยากาศที่ระดับต่าง ๆ หรือที่เรียกว่า โปรไฟล์ของ mixing ratio ของไอน้ำ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละปีในแต่ละสถานี (10 สถานีวัด) ตัวอย่างของโปรไฟล์ของ mixing ratio ของไอน้ำแสดงในภาคผนวกที่ 2 จากนั้นผู้วิจัยนำข้อมูลของเดือนเดียวกันของทุกปีของแต่ละสถานีมาเขียนในกราฟเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในแต่ละปี ดังแสดงในรูปที่ 3.42-3.51 และเพื่อศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำตามแนวตั้งระยะยาว ผู้วิจัยจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของ mixing ratio ที่แต่ละความดันในเดือนเดียวกันของทุกปีของแต่ละสถานี ผลที่ได้แสดงดังรูป 3.52-3.61



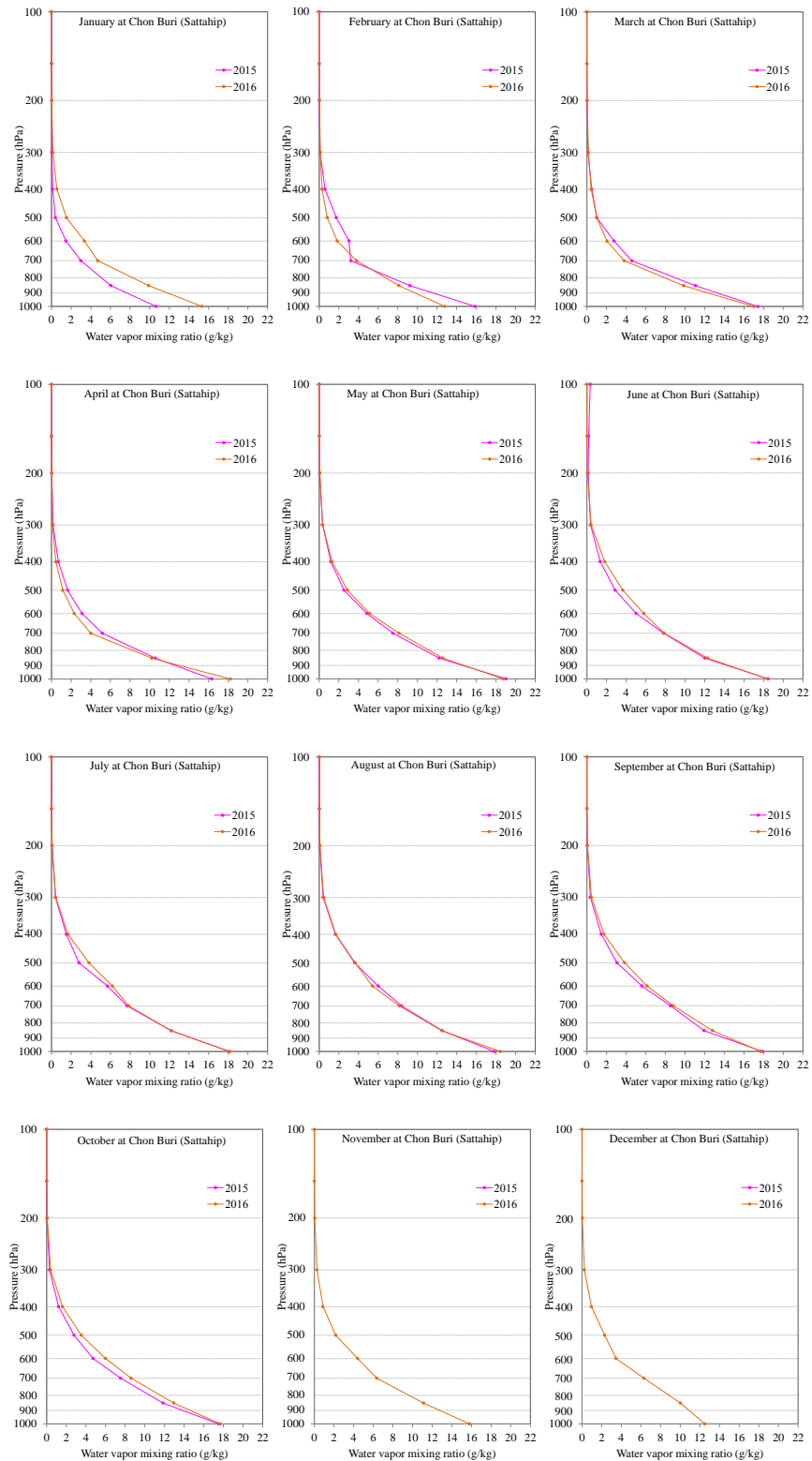
รูปที่ 3.42 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี เชียงใหม่ (อมก๋อย)



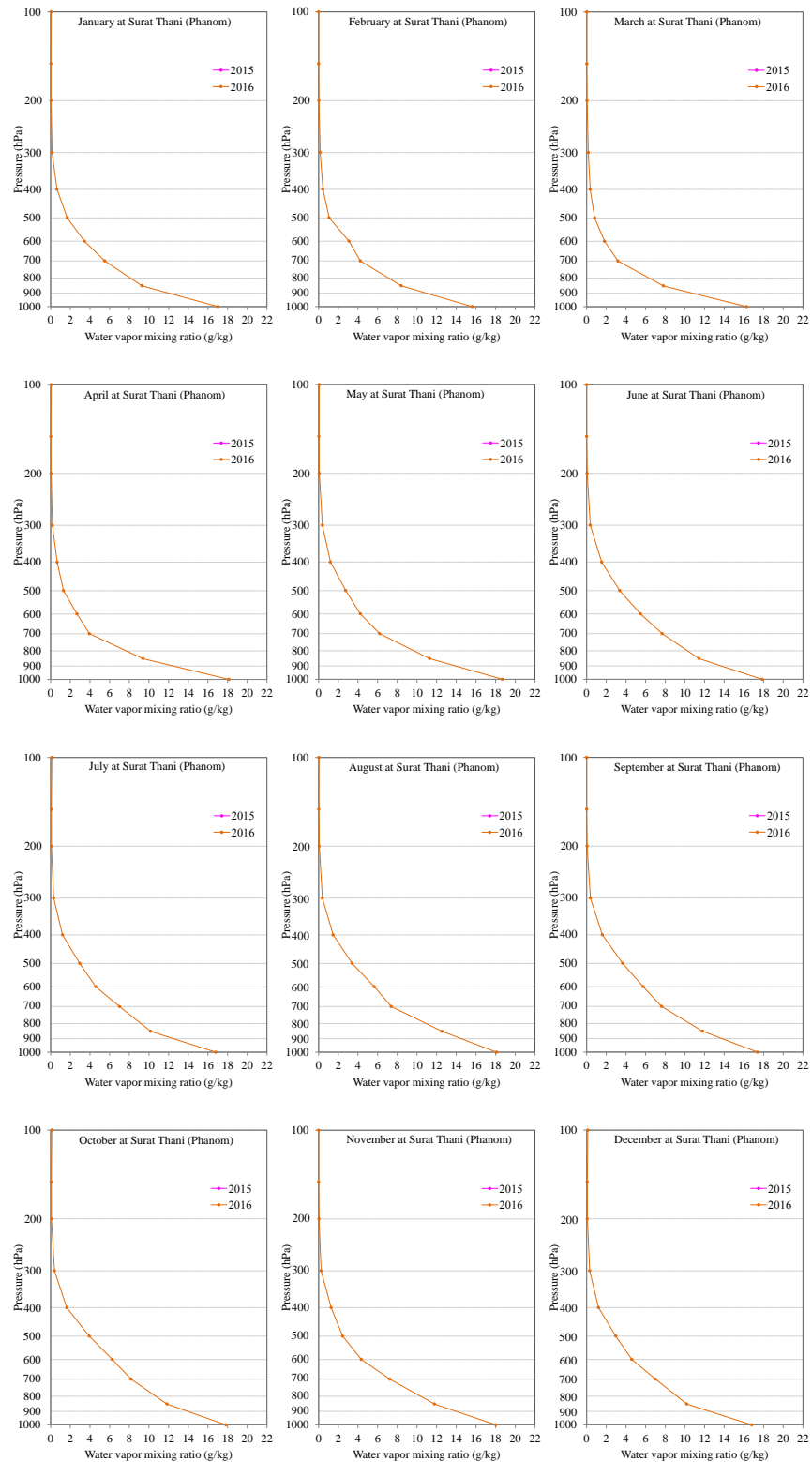
รูปที่ 3.43 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี นครสวรรค์ (ตากลิ)



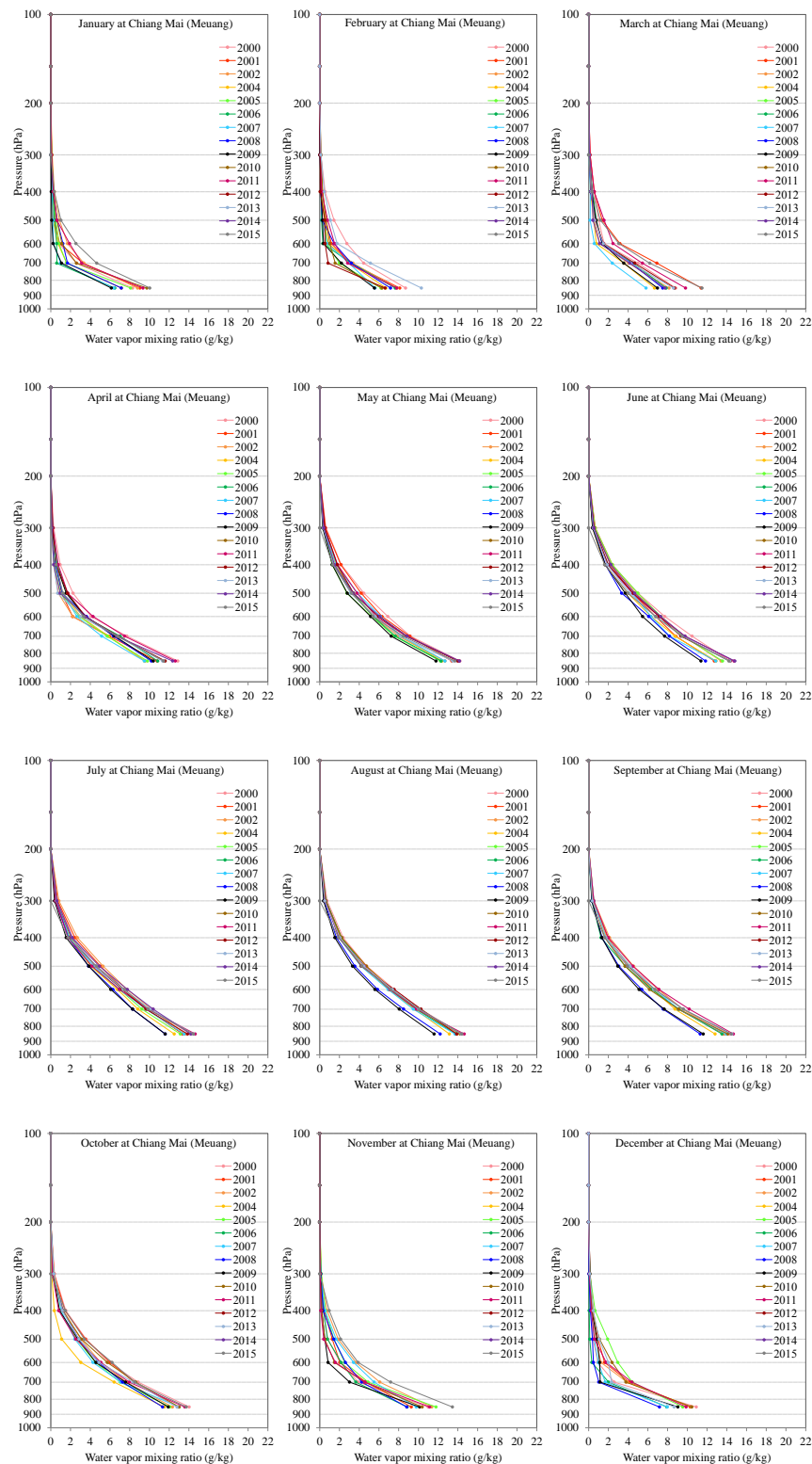
รูปที่ 3.44 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี นครราชสีมา (พิมาย)



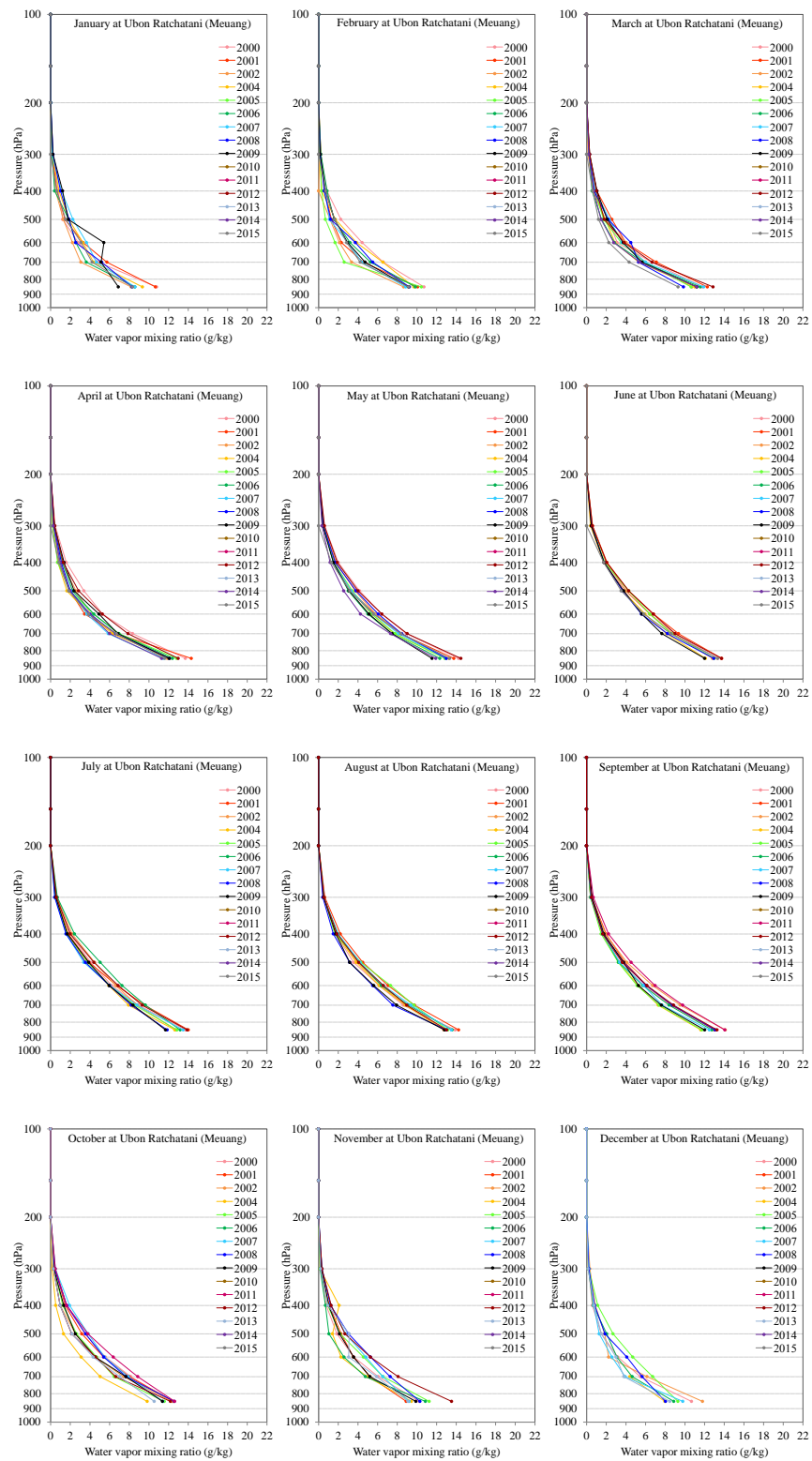
รูปที่ 3.45 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2015 - 2016 ของสถานี
ชลบุรี (สัตหีบ)



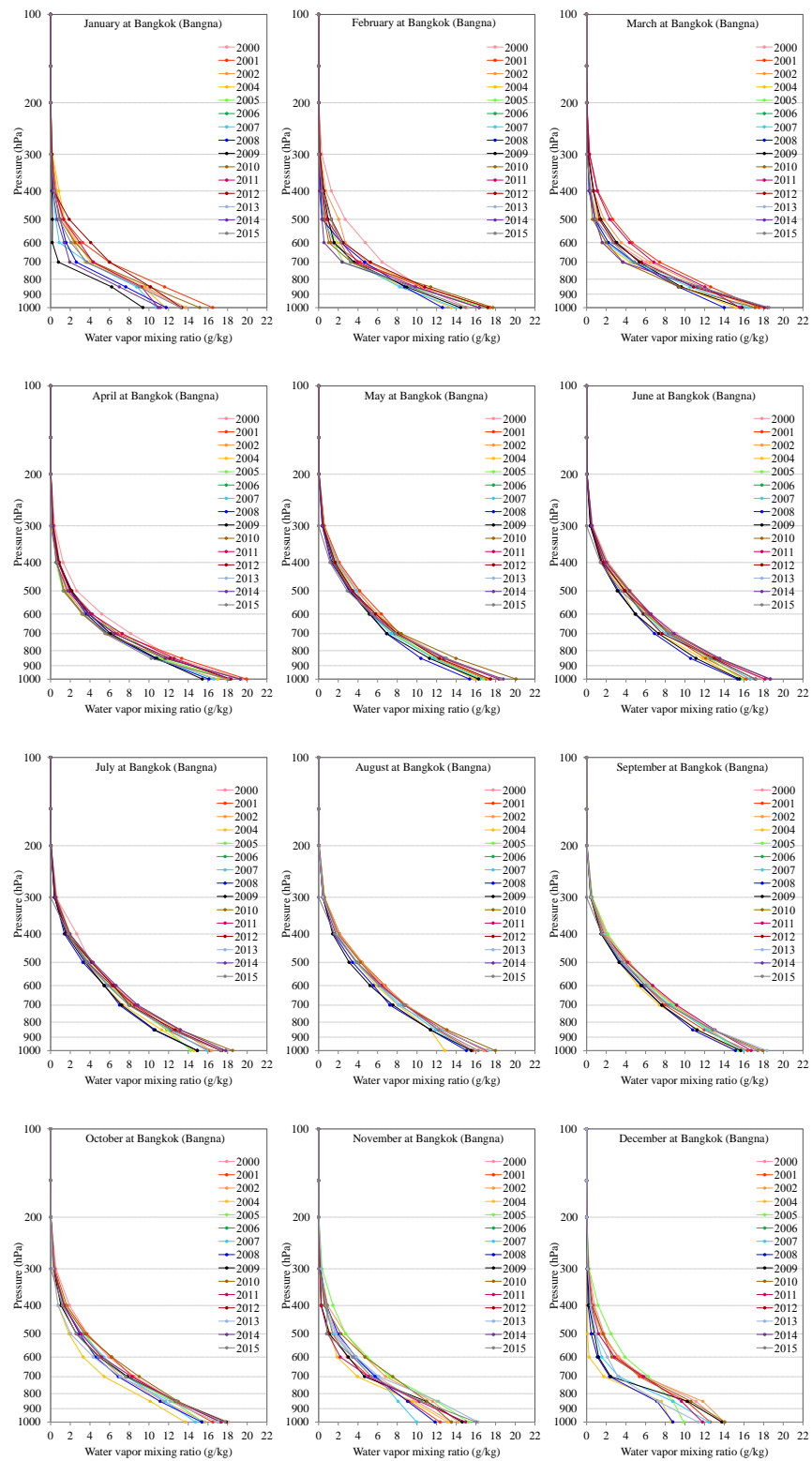
รูปที่ 3.46 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2016 ของสถานี
สุราษฎร์ธานี (พนม)



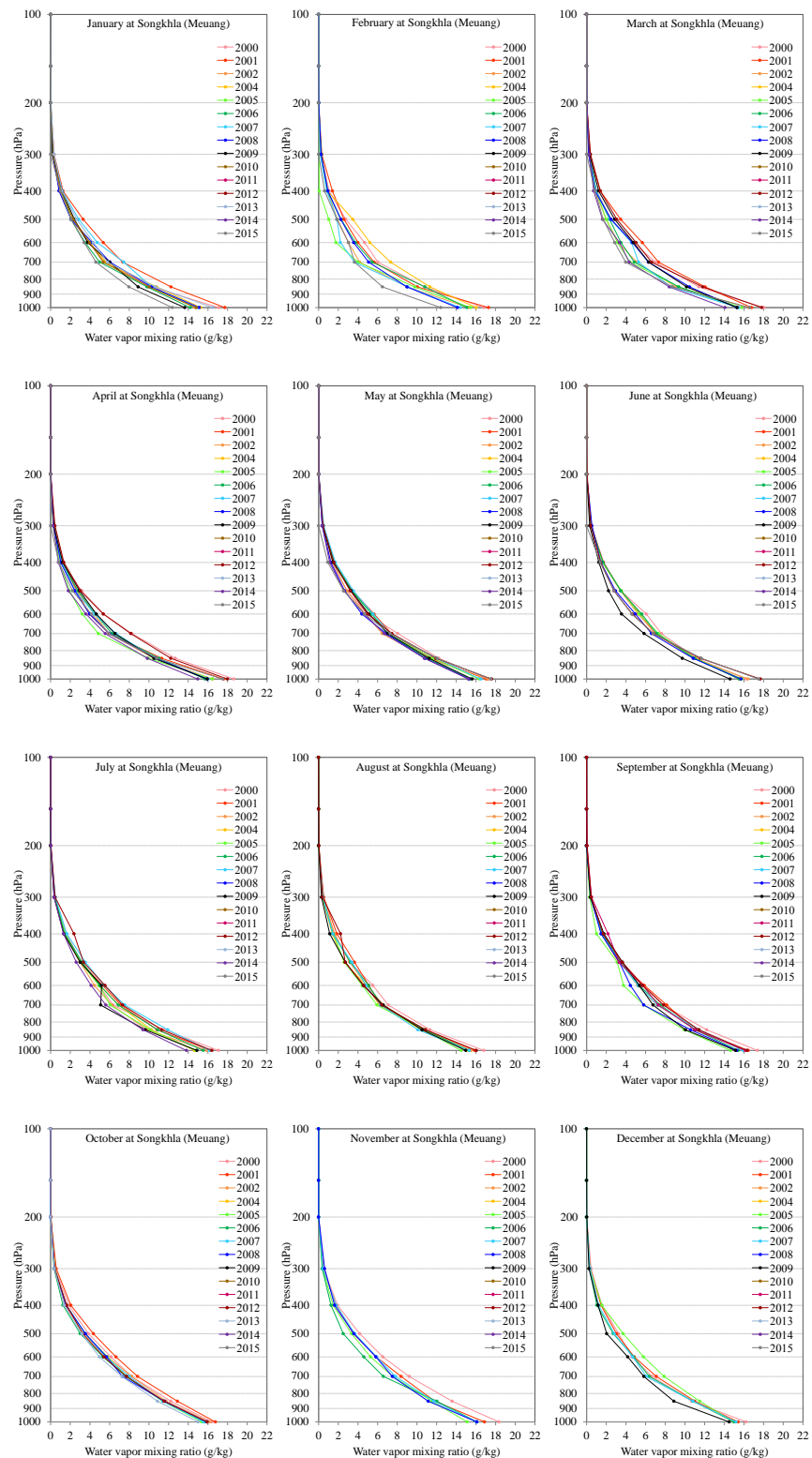
รูปที่ 3.47 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี เชียงใหม่ (เมือง)



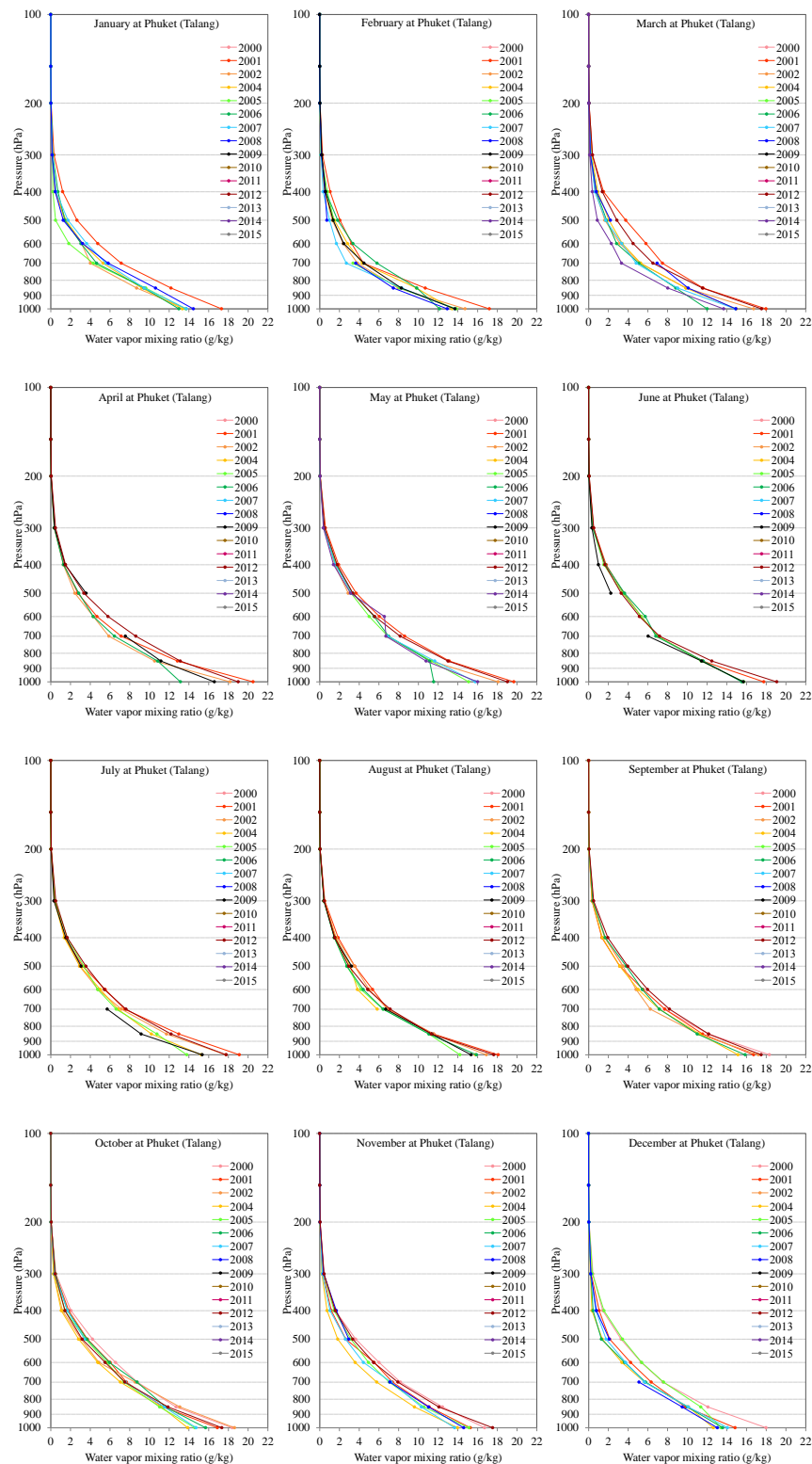
รูปที่ 3.48 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี
อุบลราชธานี (เมือง)



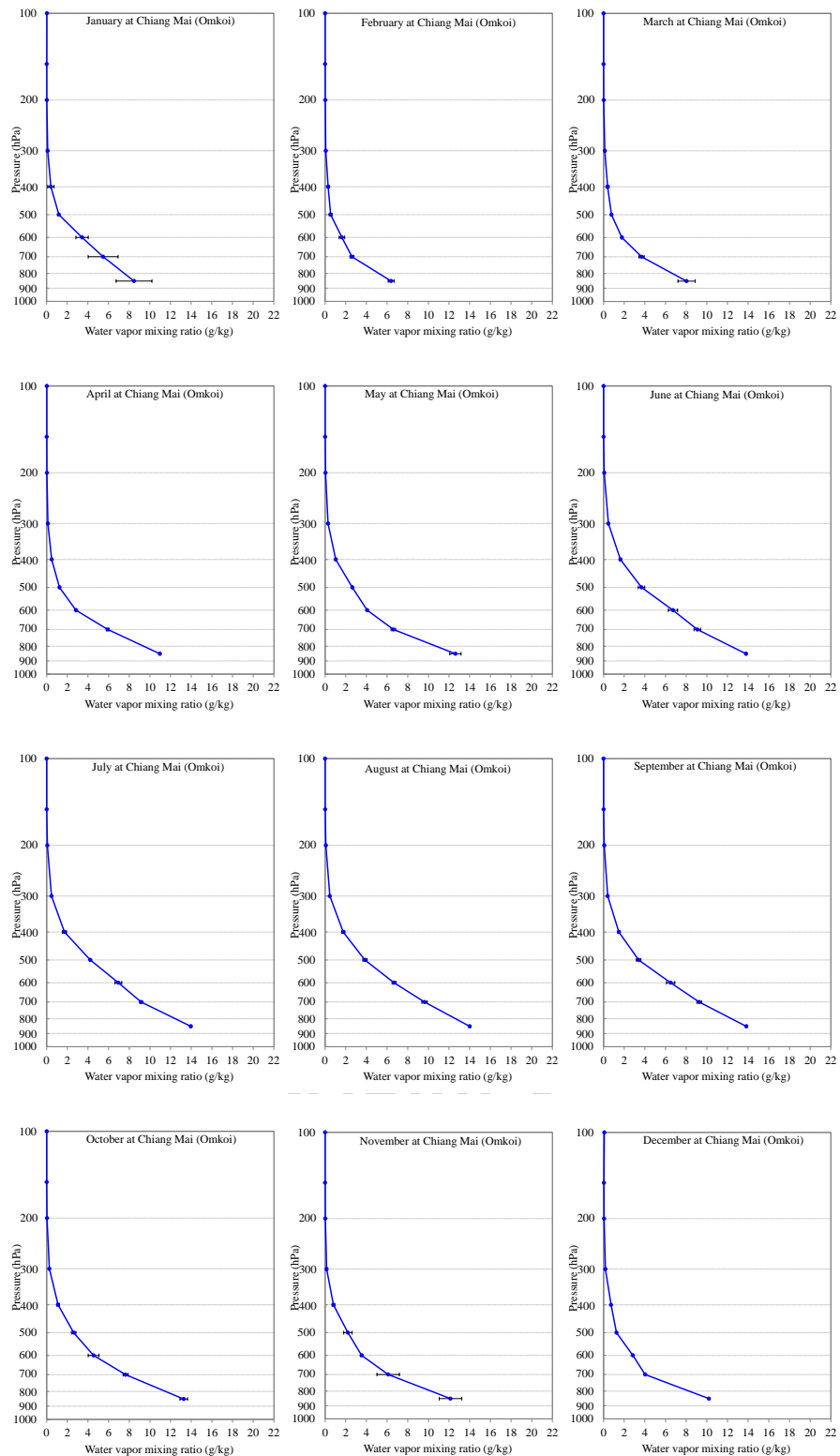
รูปที่ 3.49 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



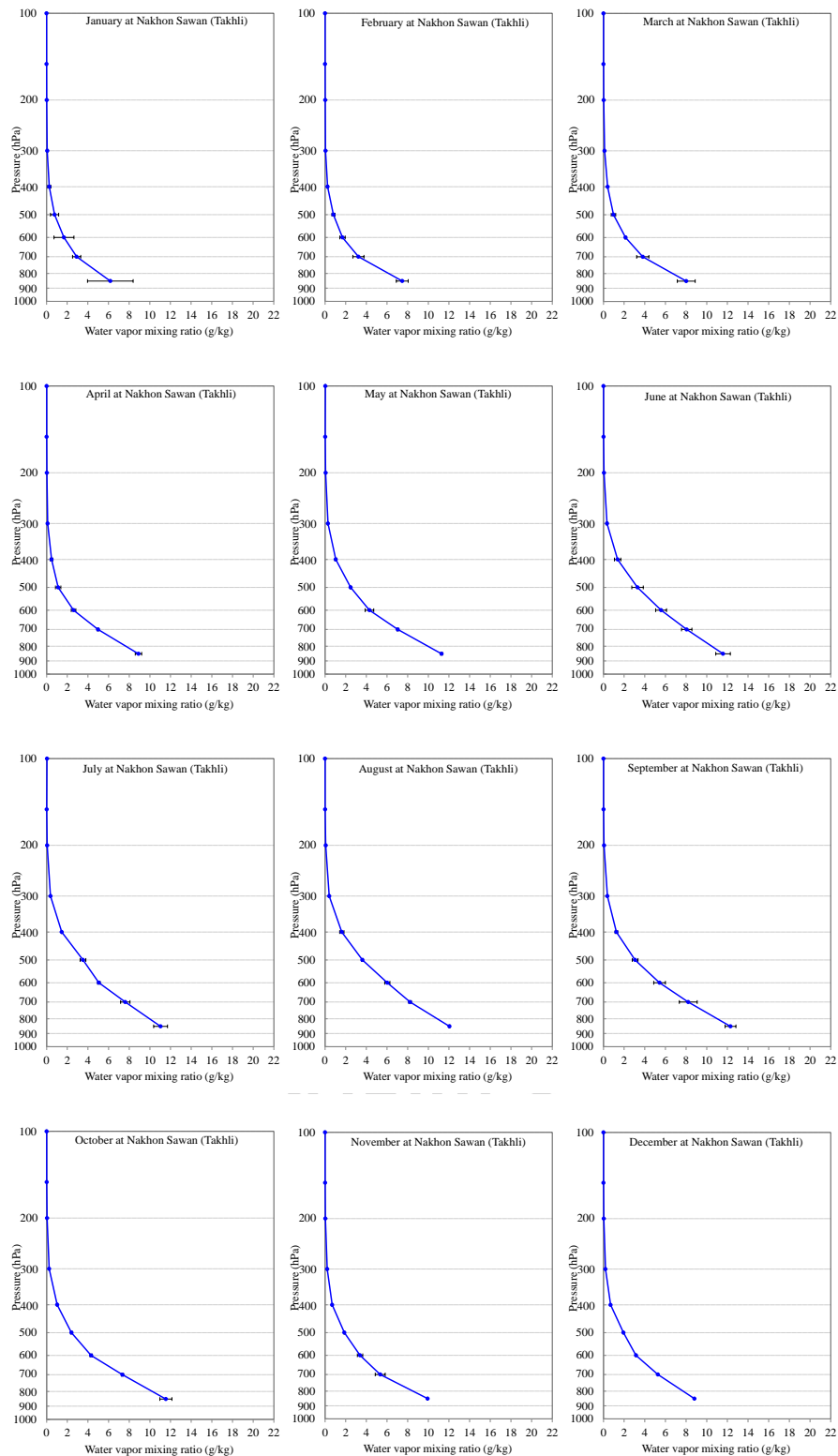
รูปที่ 3.50 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของ สถานี
สงขลา (เมือง)



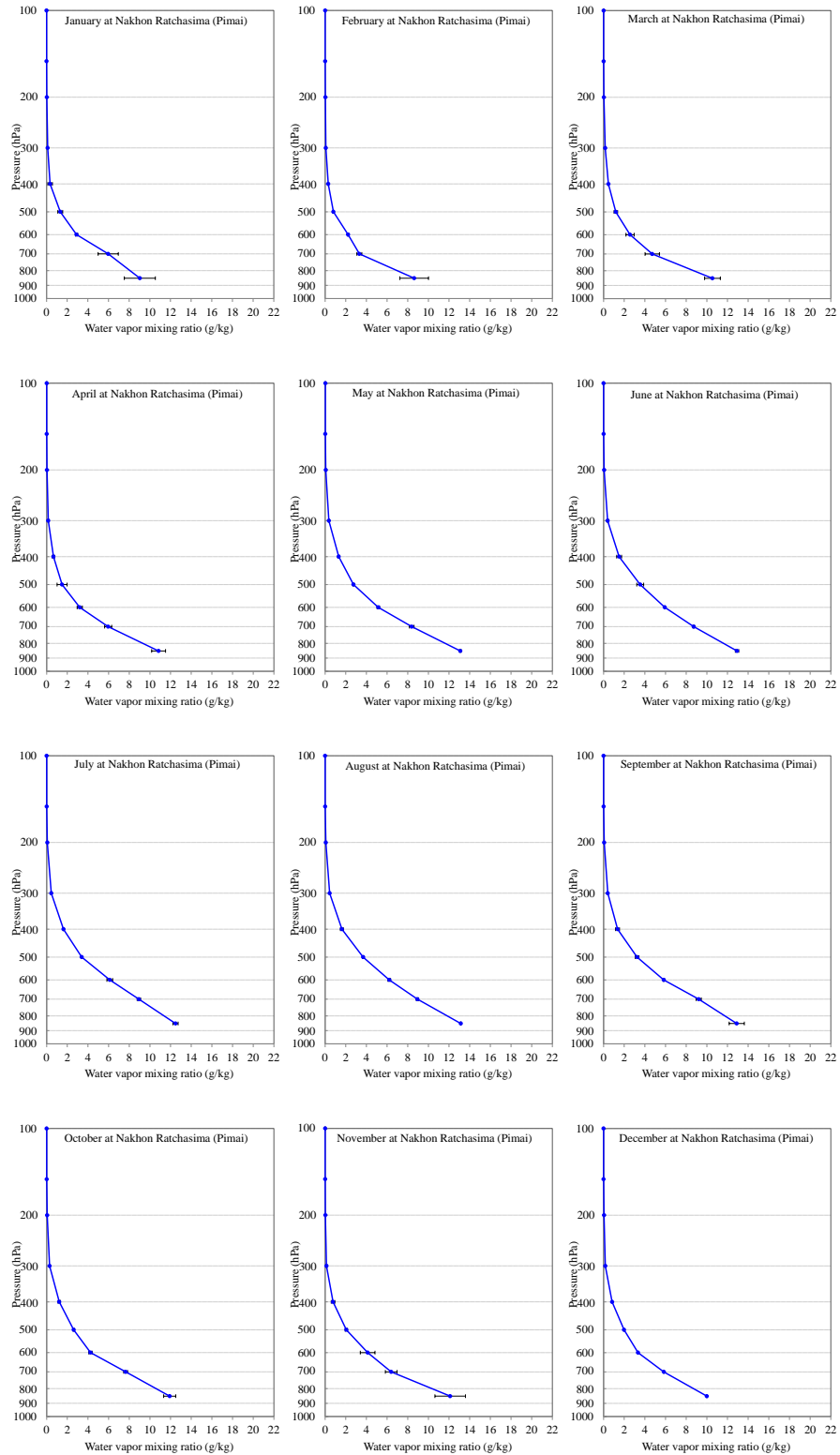
รูปที่ 3.51 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ของสถานี
ภูเก็ท (กลาง)



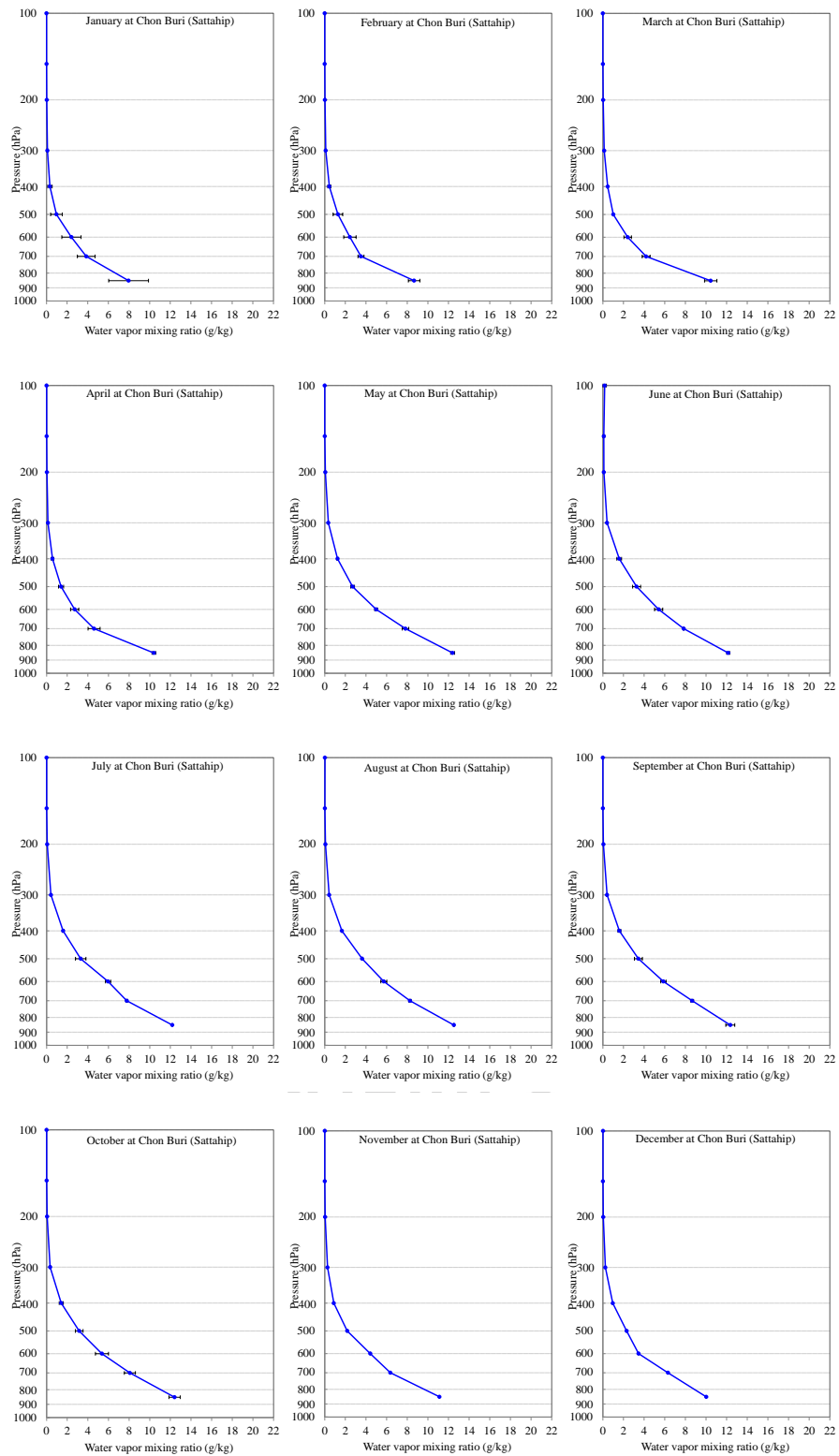
รูปที่ 3.52 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 – 2016) ของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย) (●) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล



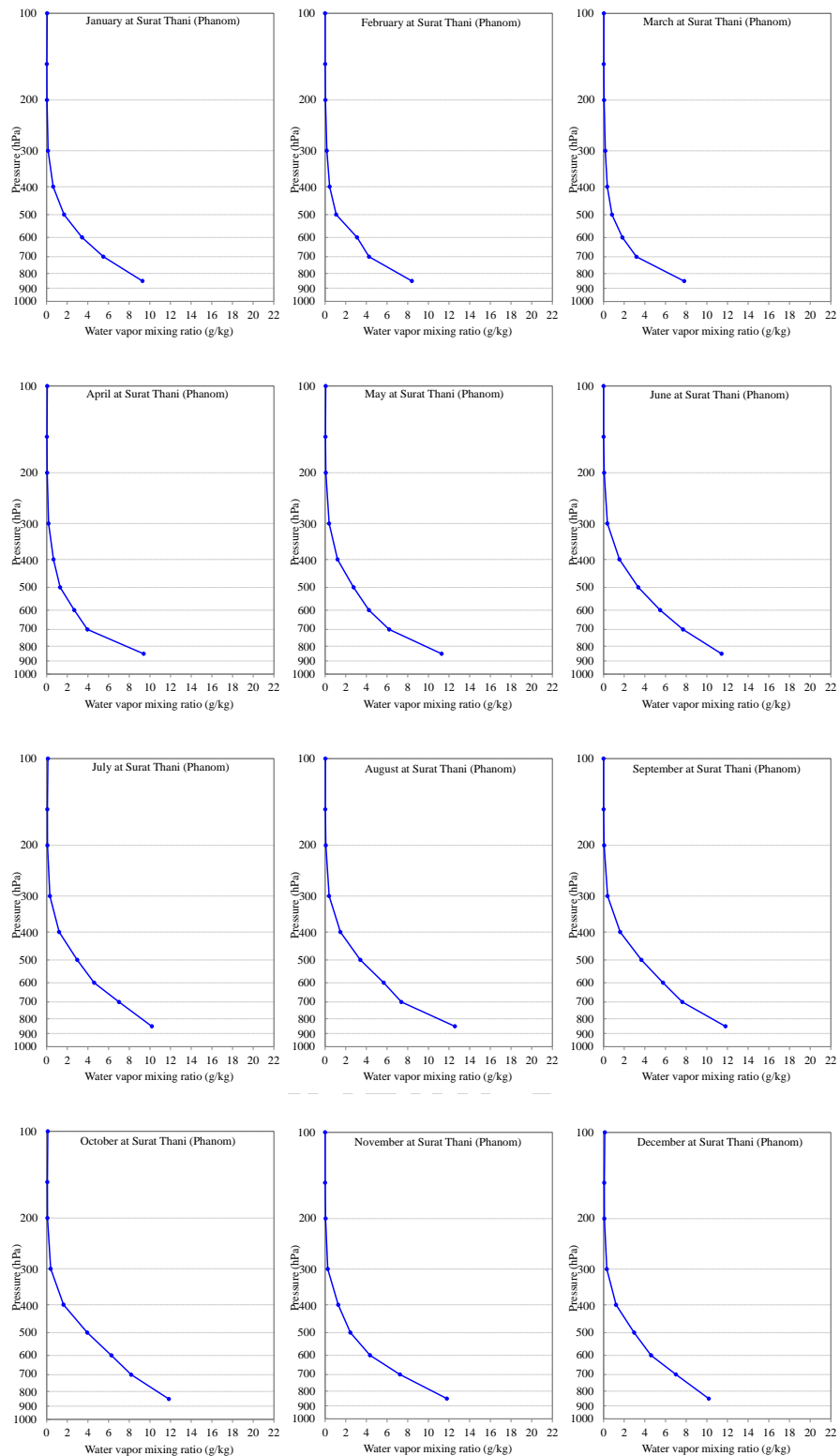
รูปที่ 3.53 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 – 2016) ของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ) (●-● คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)



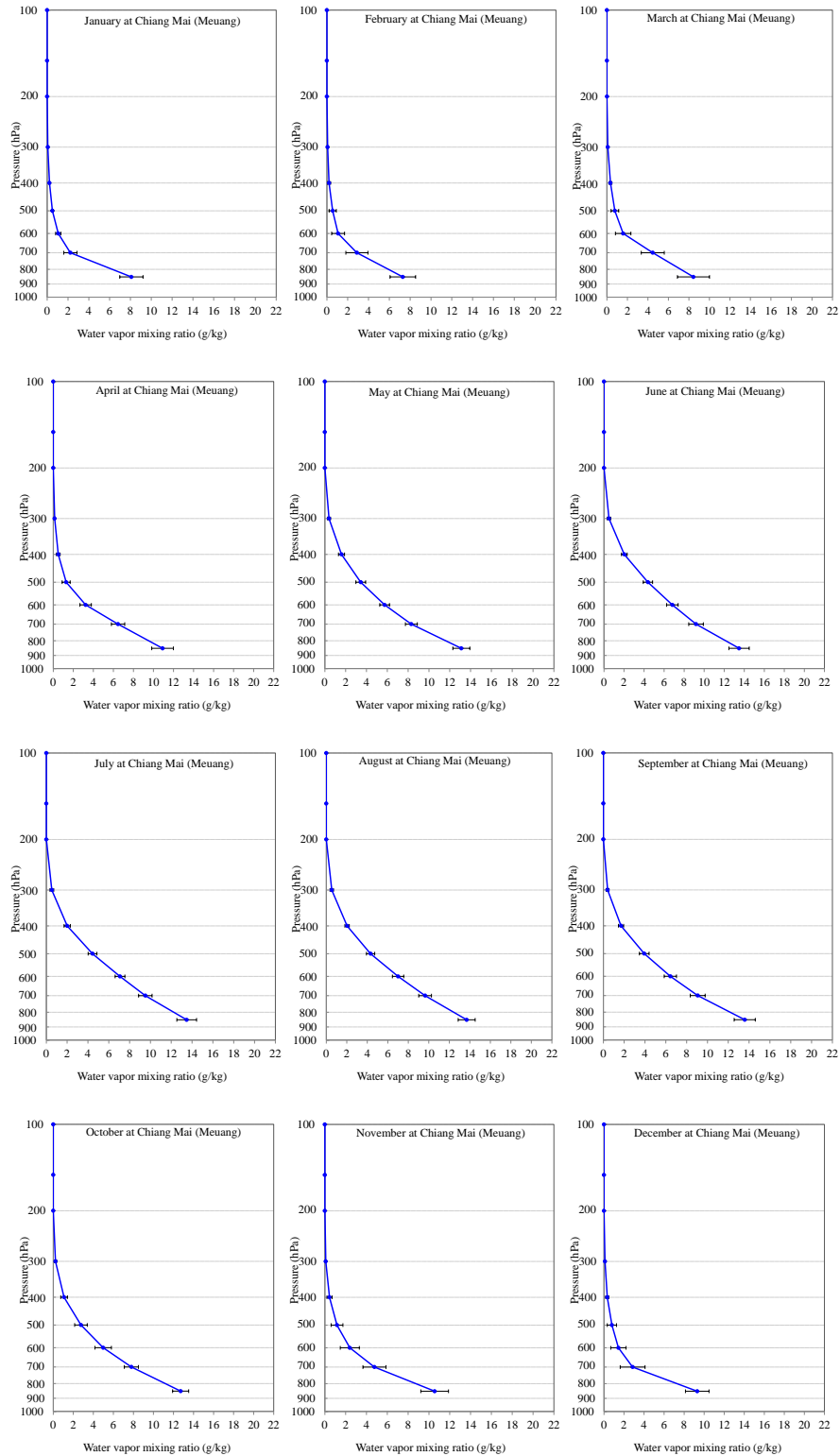
รูปที่ 3.54 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 – 2016) ของสถานีนครราชสีมา (พิมาย) (●-● คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)



รูปที่ 3.55 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2015 – 2016) ของสถานีชลบุรี (สัตหีบ) (●) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

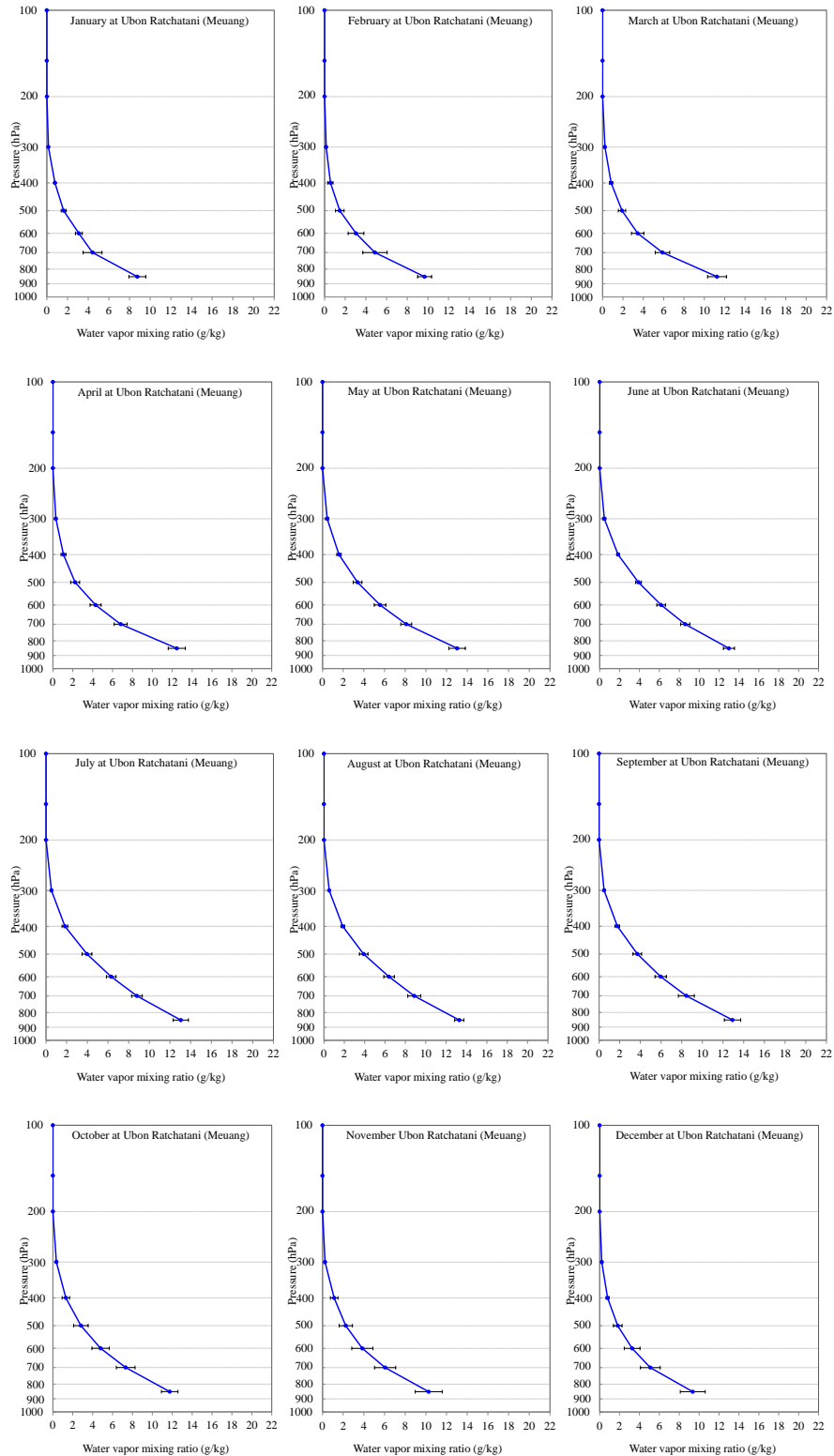


รูปที่ 3.56 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2016) ของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม) (●-● คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)



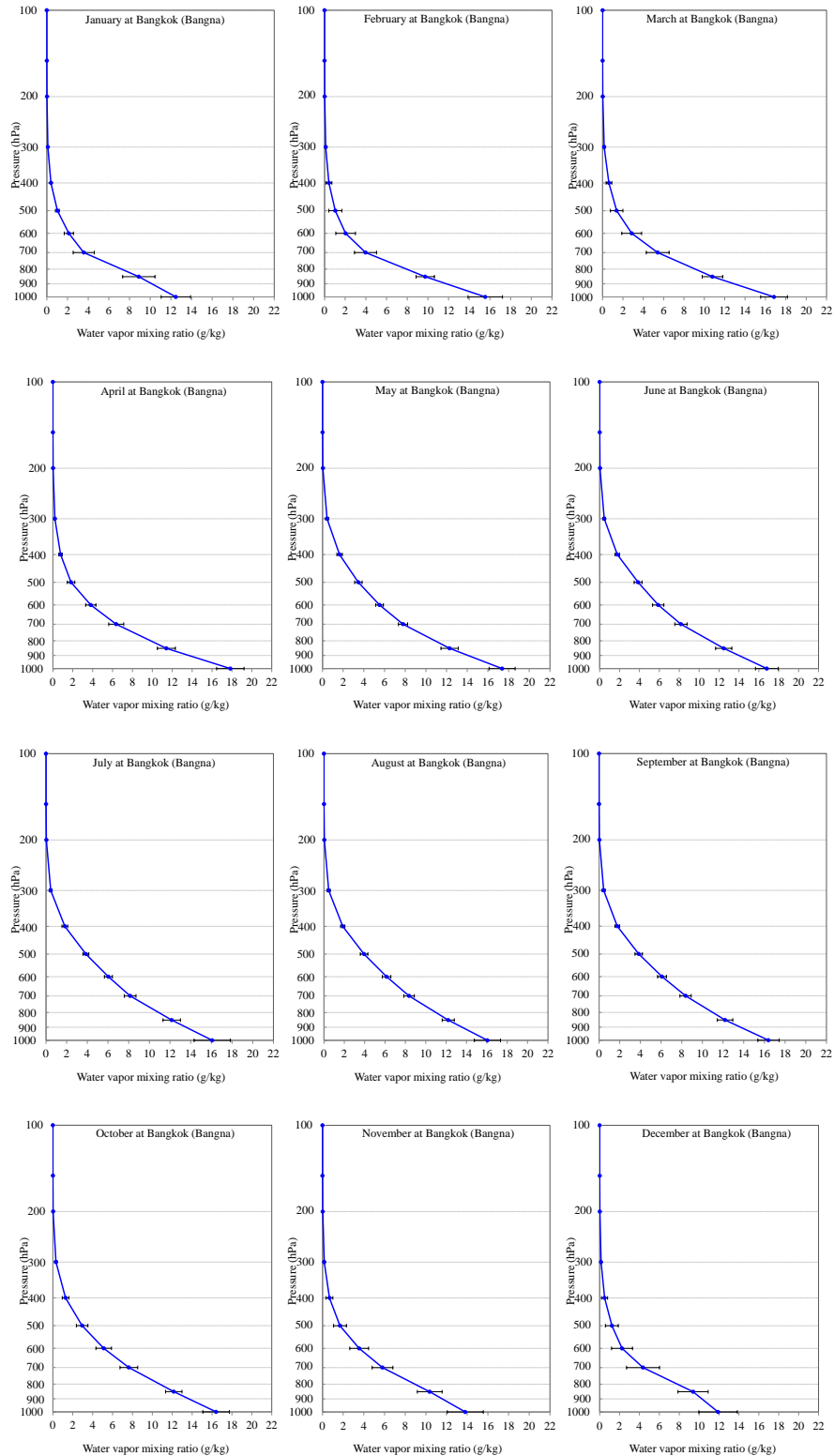
รูปที่ 3.57 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015)

ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง) (●-■ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)



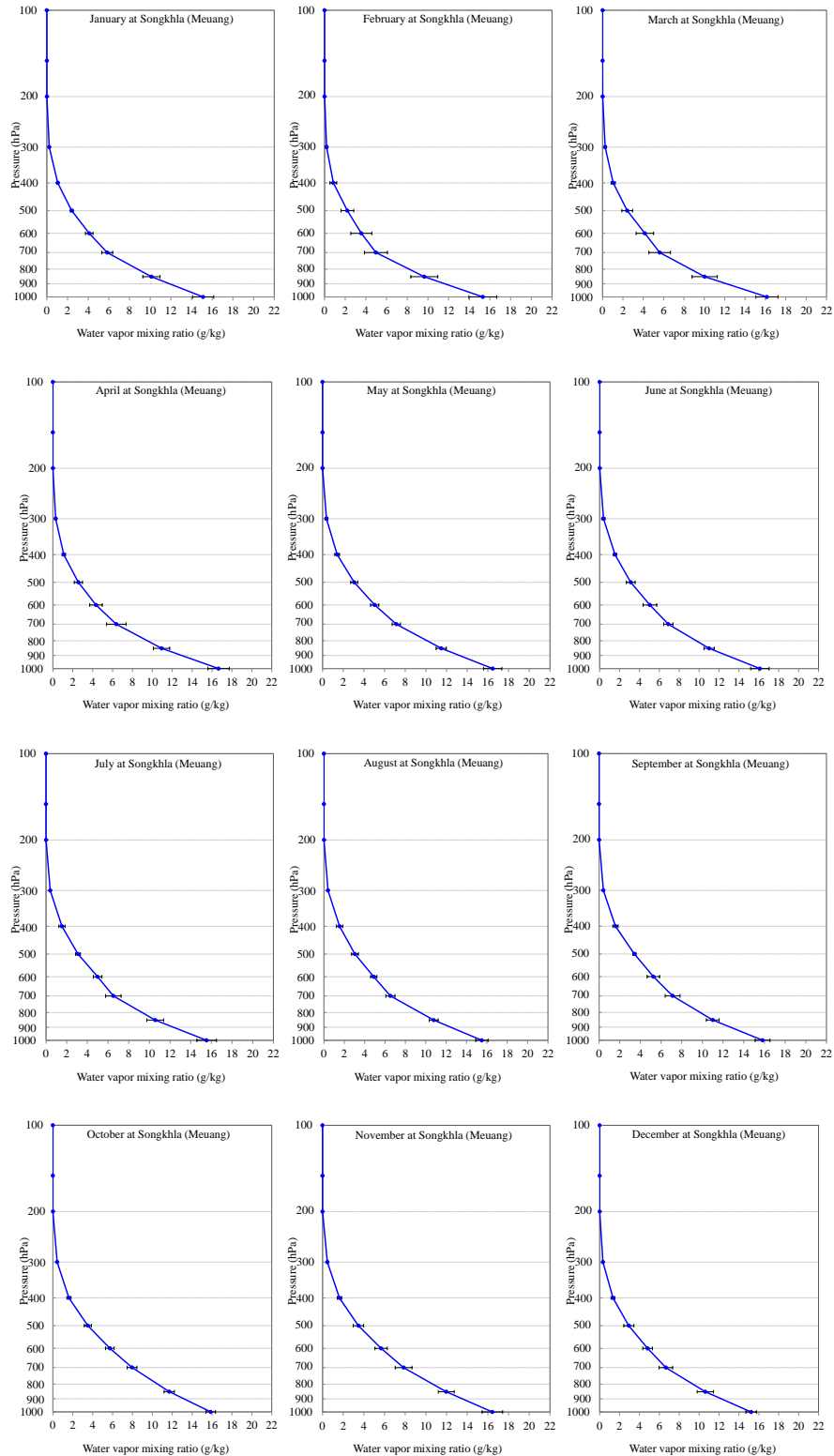
รูปที่ 3.58 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015)

ของสถานีอุบลราชธานี (เมือง) (●) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล



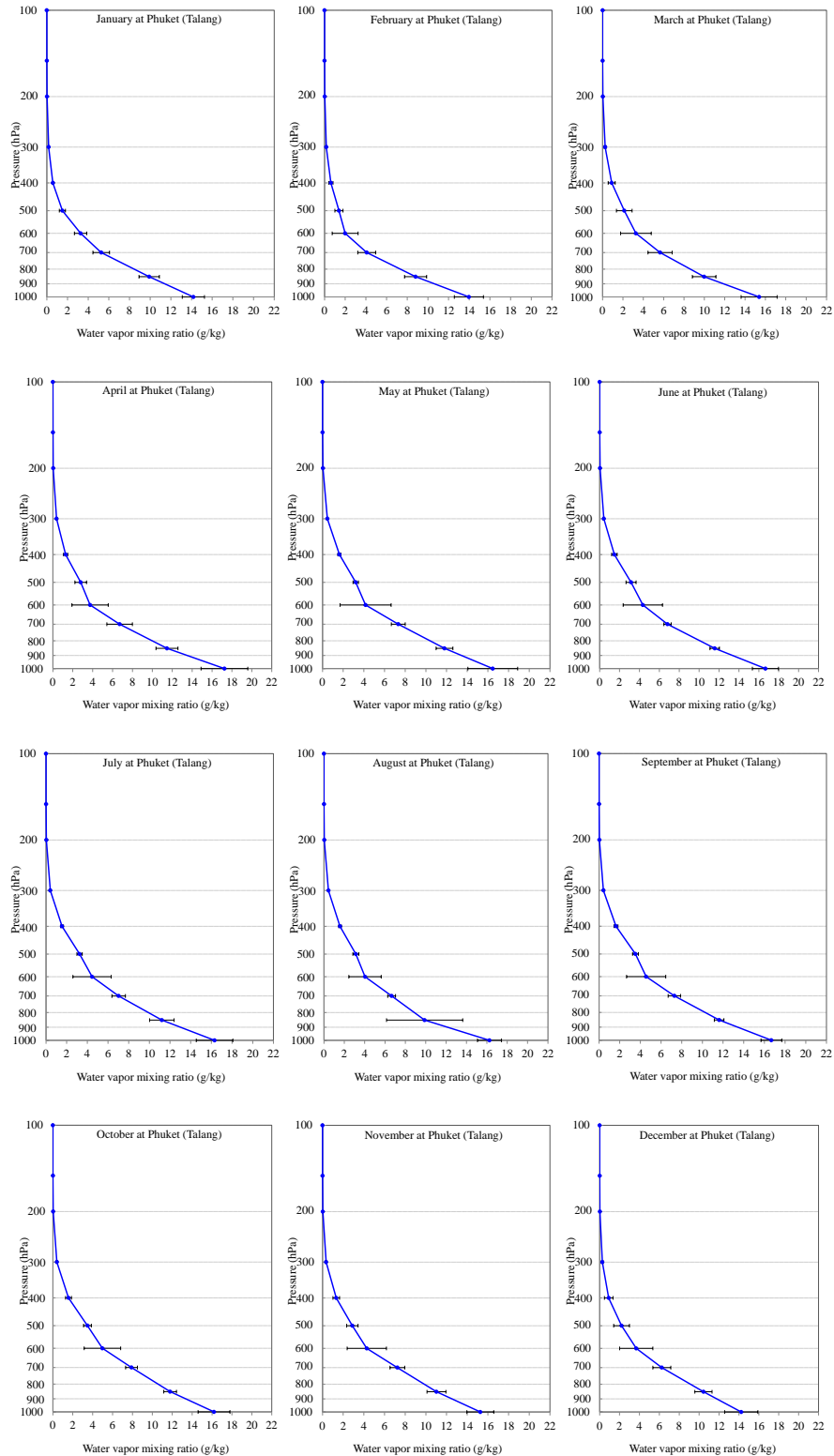
รูปที่ 3.59 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015)

ของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา) (—●— คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)



รูปที่ 3.60 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015)

ของสถานีสงขลา (เมือง) (●) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

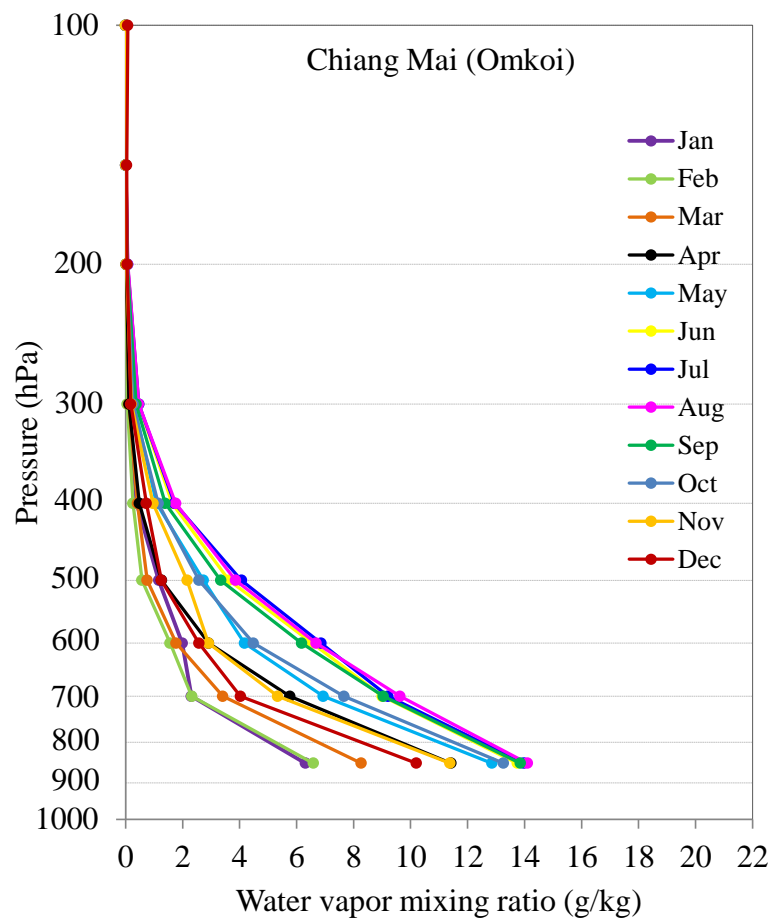


รูปที่ 3.61 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2000 – 2015) ของสถานีภูเก็ต (กลาง) (●-— คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล)

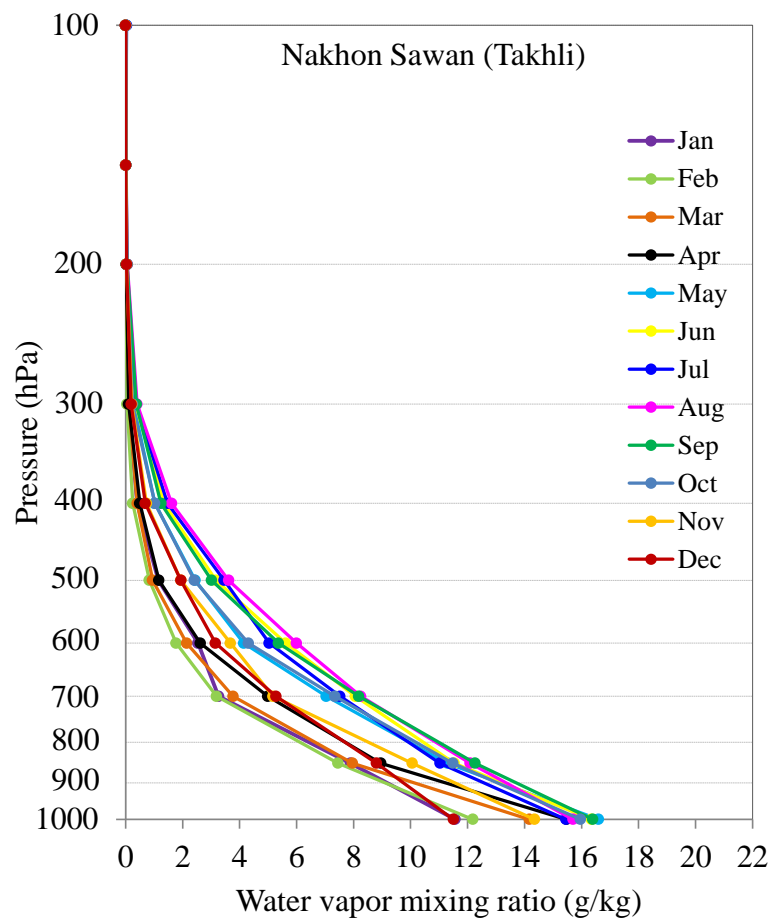
จากการวิเคราะห์ผลที่ได้แสดงมาทั้งหมดดังกล่าว จะเห็นว่าการแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามแนวตั้งของแต่ละสถานีมีลักษณะคล้ายกัน คือมีค่าสูงสุดที่ความดันสูงหรือที่บริเวณผิวพื้น จากนั้นปริมาณไอน้ำจะลดลงตามความสูงจนถึงระดับความดันประมาณ 200 hPa (หรือความสูงประมาณ 8 km) จะไม่พบไอน้ำในบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่ระเหยจากพื้นผิวหรือจากแหล่งน้ำต่าง ๆ จะลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศ เมื่อบรรยากาศมีอุณหภูมิต่ำลง ไอน้ำจะเกิดการควบแน่น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์ลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไอน้ำในบรรยากาศลดลงด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศของเดือนเดียวกันของทุกปีมีการแปรค่าค่อนข้างสูง ในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-พฤษภาคม) ส่วนในช่วงฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม) มีการแปรค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากในช่วงฤดูแล้งมีการแปรค่าของอุณหภูมิอากาศค่อนข้างสูงทำให้การระเหยของน้ำในบรรยากาศมีการแปรค่าสูง ส่วนในฤดูฝนอุณหภูมิอากาศค่อนข้างคงที่ ทำให้การระเหยของน้ำและการควบแน่นของไอน้ำจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

จากนั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูล mixing ratio ของไอน้ำตามแนวตั้งของทุกเดือนในปีเดียวกันของแต่ละสถานีมาเขียนกราฟรวมกันเพื่อให้เห็นการแปรค่าในรอบปีของแต่ละสถานีที่ชัดเจนมากขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.62-3.71

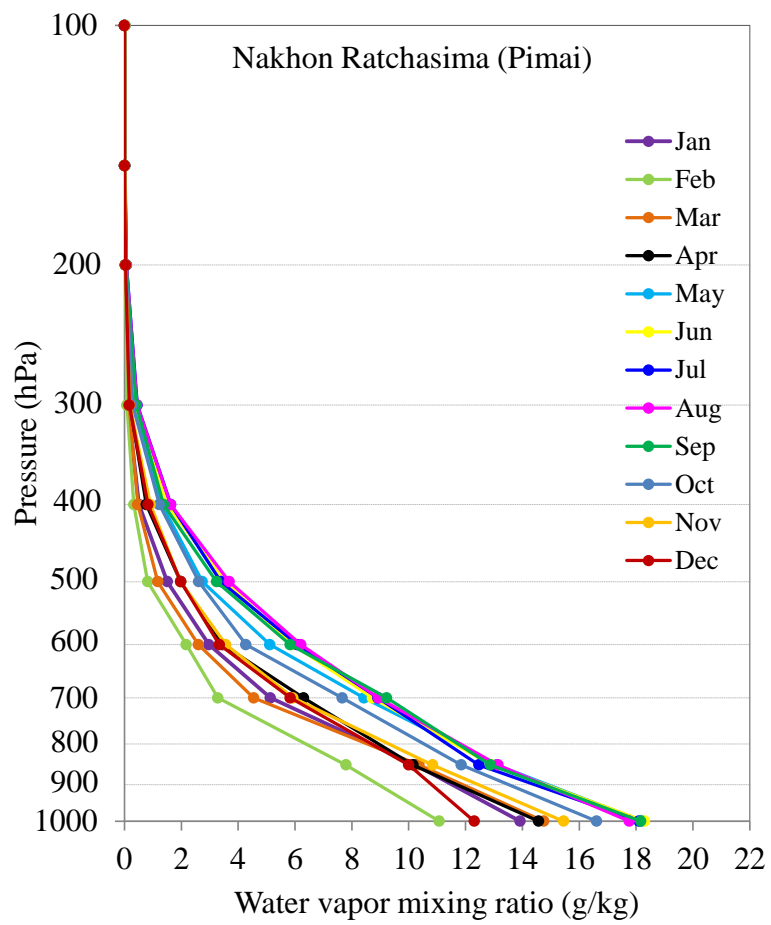




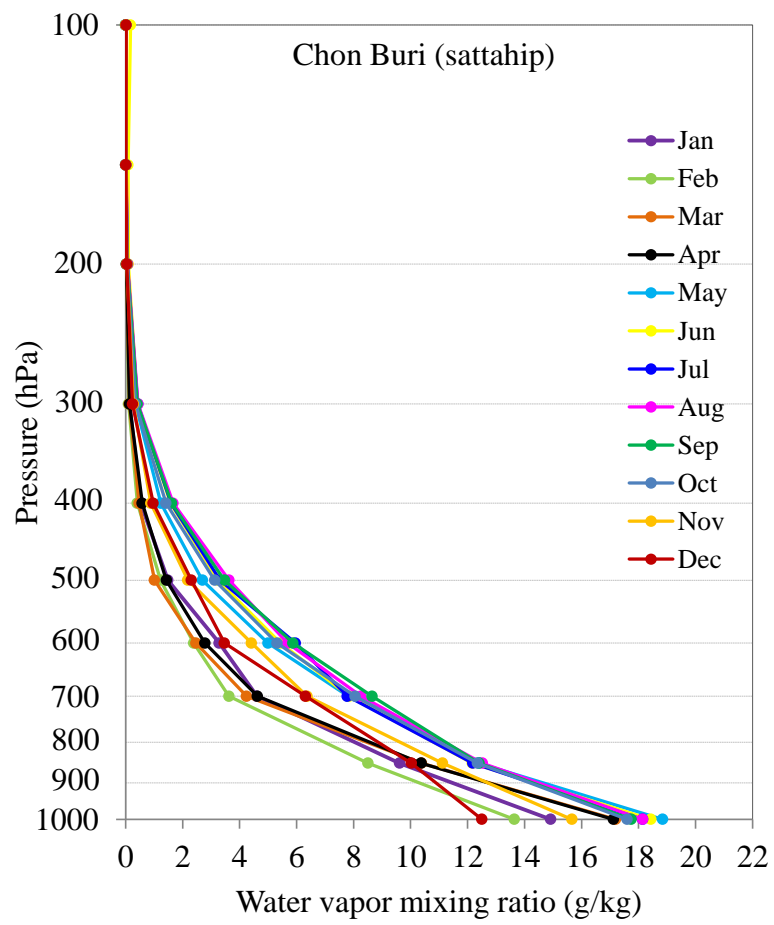
รูปที่ 3.62 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย)



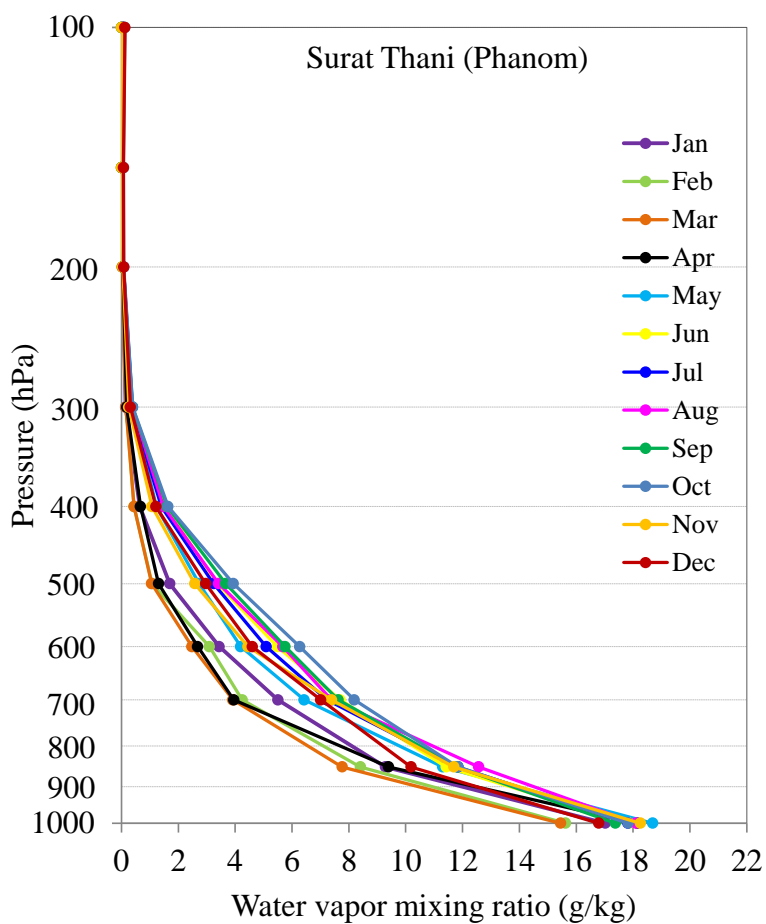
รูปที่ 3.63 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีนครสวรรค์ (ตากลิ)



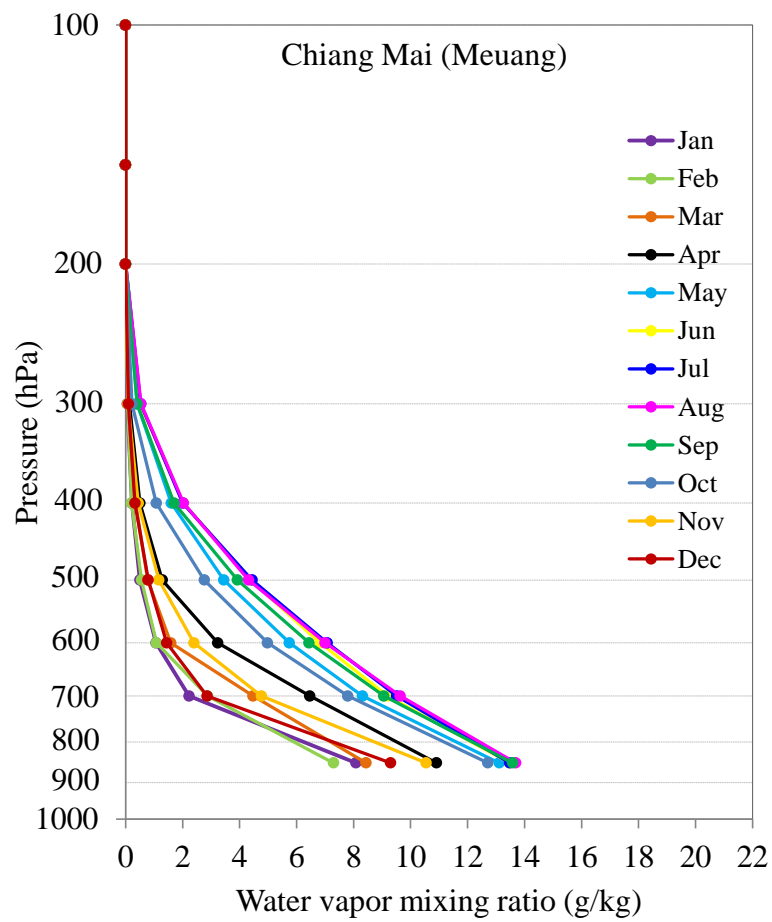
รูปที่ 3.64 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีนครราชสีมา (พิมาย)



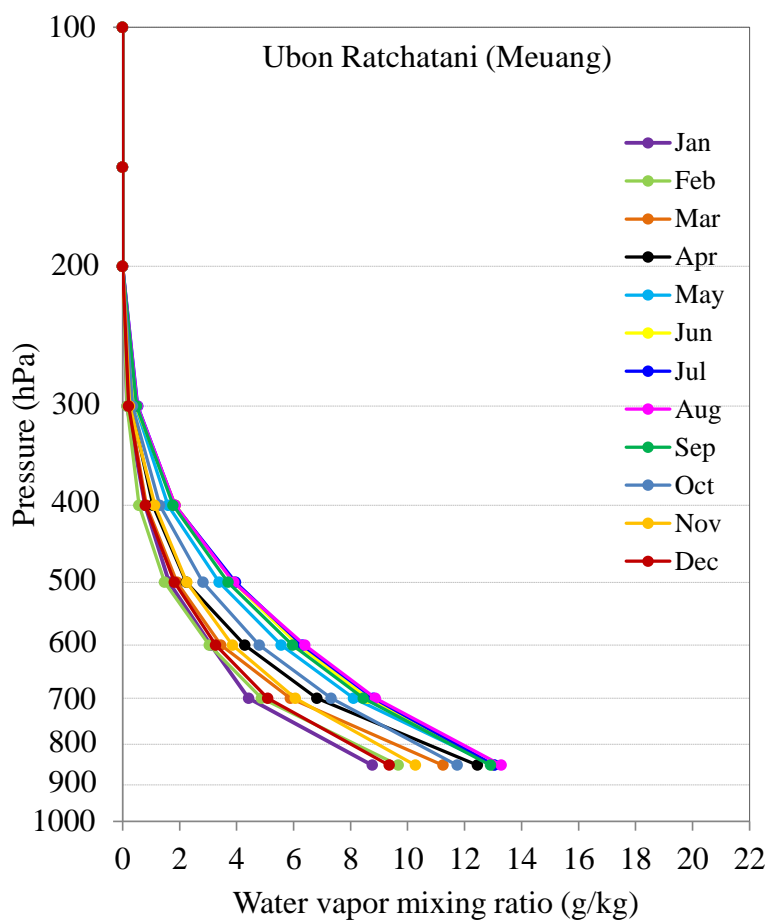
รูปที่ 3.65 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีชลบุรี (สัตหีบ)



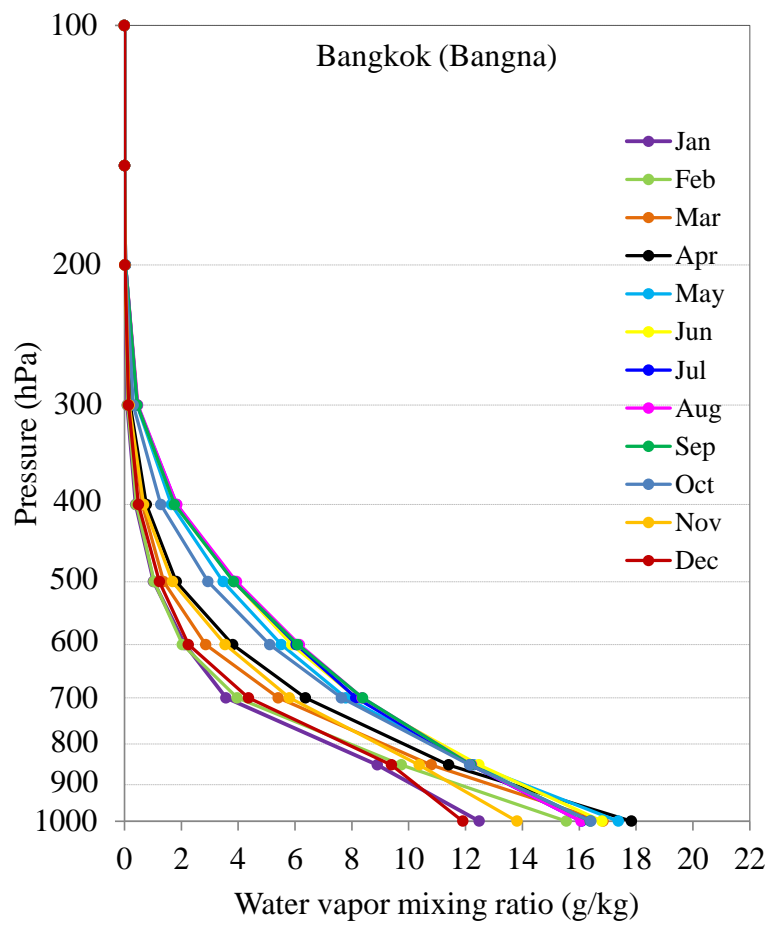
รูปที่ 3.66 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม)



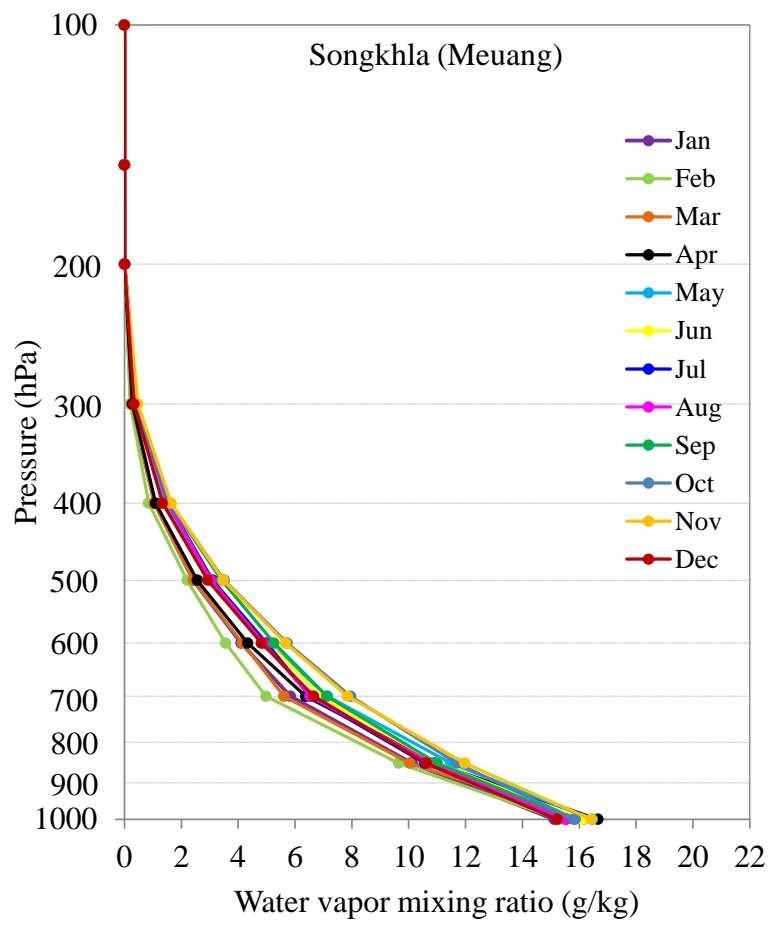
รูปที่ 3.67 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



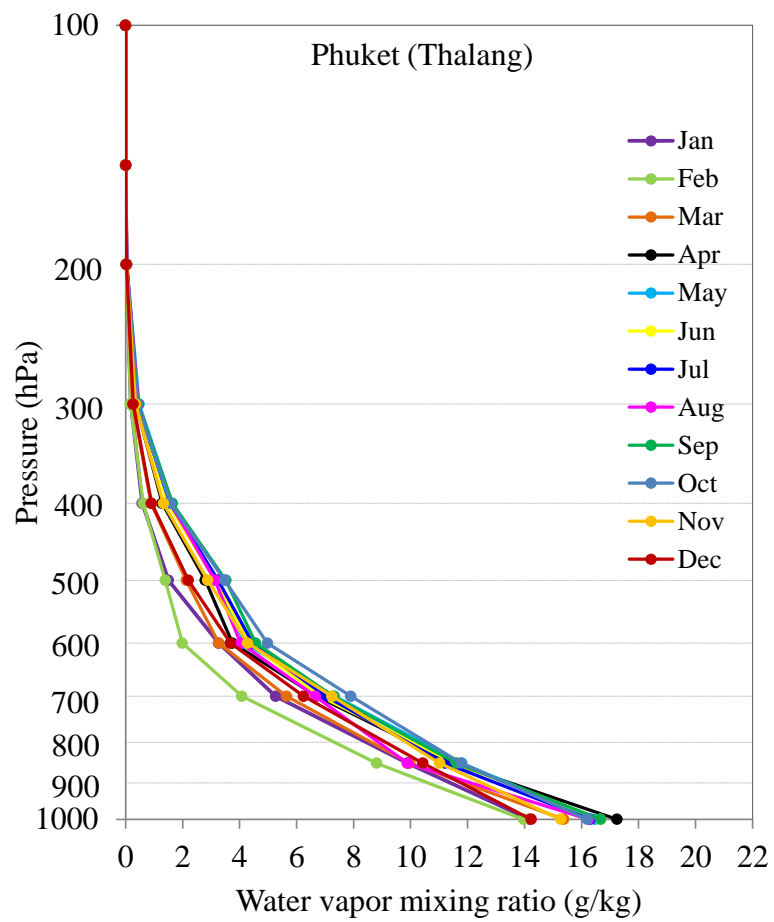
รูปที่ 3.68 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี (เมือง)



รูปที่ 3.69 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา)



รูปที่ 3.70 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีสงขลา (เมือง)



รูปที่ 3.71 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำในรอบปีของสถานีภูเก็ต (กลาง)

จากผลที่ได้จะเห็นว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการแปรค่าในรอบปี สำหรับภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง พบว่า ส่วนใหญ่ปริมาณไอน้ำสูงสุดในช่วงเดือนสิงหาคมและ กันยายน และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคมถึงมกราคม ส่วนภาคใต้ปริมาณไอน้ำมีค่าสูงตั้งแต่เดือน มิถุนายน และมีค่าต่ำสุดประมาณเดือนกุมภาพันธ์ นอกจากนี้จะพบว่าในช่วงฤดูหนาวปริมาณไอน้ำ ตามแนวตั้งของสถานีวัดที่อยู่ในเขตชุมชนเมือง เช่น สถานีกรุงเทพฯ (บางนา) และสถานีเชียงใหม่ (เมือง) มีอัตราการลดลงของปริมาณไอน้ำตามความสูงเร็วกว่าสถานีที่อยู่ในเขตป่าไม้ เช่น สถานีนครสวรรค์ (ตาคลี) และสถานีนครราชสีมา (พิมาย) ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงฤดูหนาวอากาศ ค่อนข้างเย็นทำให้ไม่สามารถกักเก็บไอน้ำในบรรยากาศได้มาก ไอน้ำในบรรยากาศจึงเกิดการควบแน่น ทำให้ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศลดลงรวดเร็ว

3.2.3.2 การแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำตามฤดูกาล

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่าปริมาณไอน้ำตามแนวตั้งมีการแปรค่าในรอบปี ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ ทำการศึกษาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำตามฤดูกาลด้วย โดยแบ่งข้อมูล mixing ratio ของไอน้ำตามแนวตั้งระยะยาวออกตามฤดูกาลต่าง ๆ

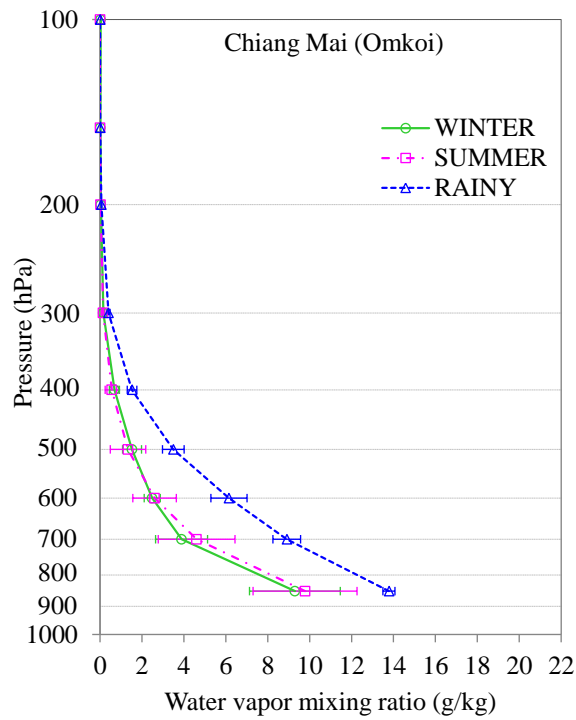
สำหรับสถานีที่อยู่ในบริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง จะแบ่งฤดูกาลดังนี้

- ฤดูหนาว ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม
- ฤดูร้อน ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม
- ฤดูฝน ตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม

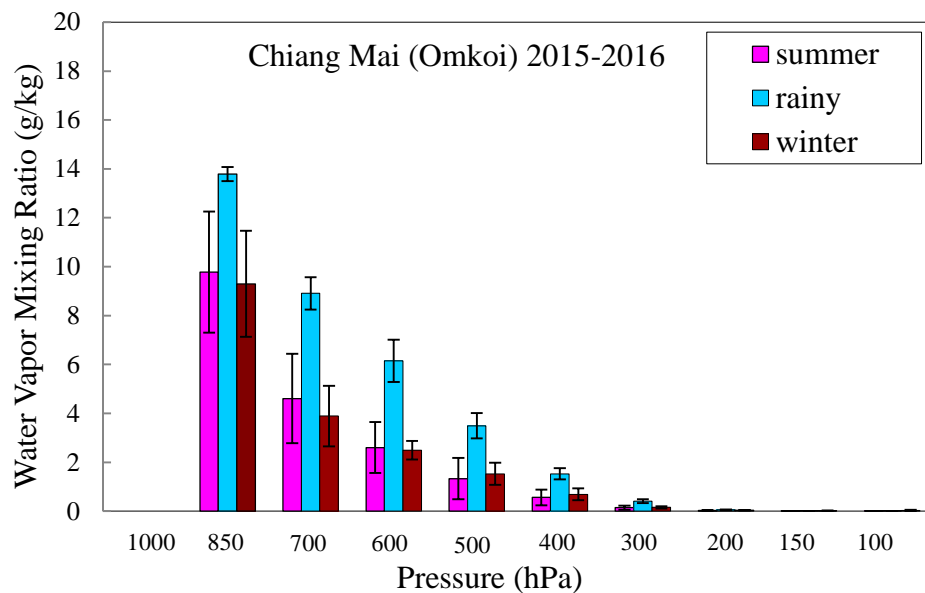
ส่วนสถานีที่อยู่ในบริเวณภาคใต้ จะแบ่งฤดูกาลดังนี้

- ฤดูร้อน ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม
- ฤดูฝน ตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนมกราคม

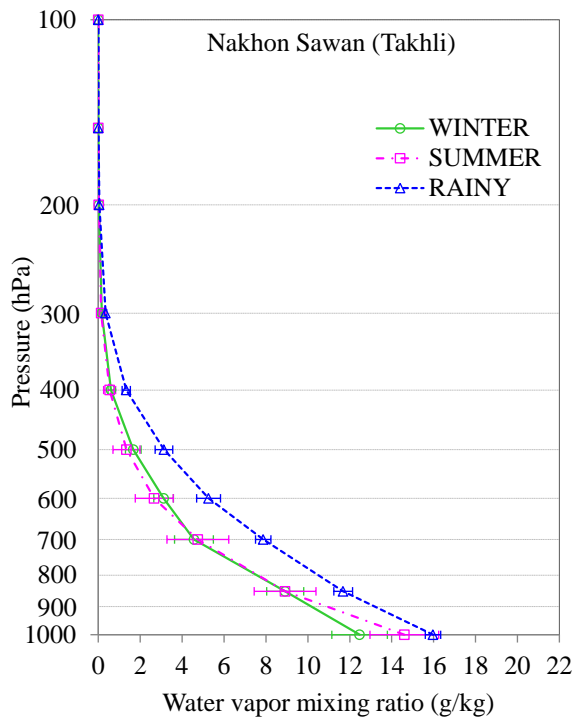
ในส่วนผลการแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำระยะยาวตามฤดูกาลของทั้ง 10 สถานีวัด แสดงได้ดังรูปที่ 3.72-3.91



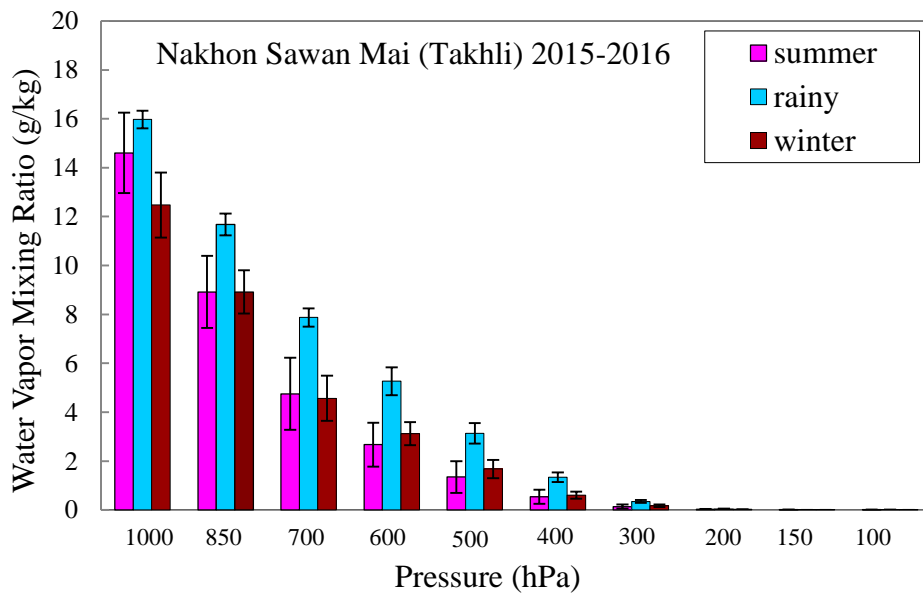
รูปที่ 3.72 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย)



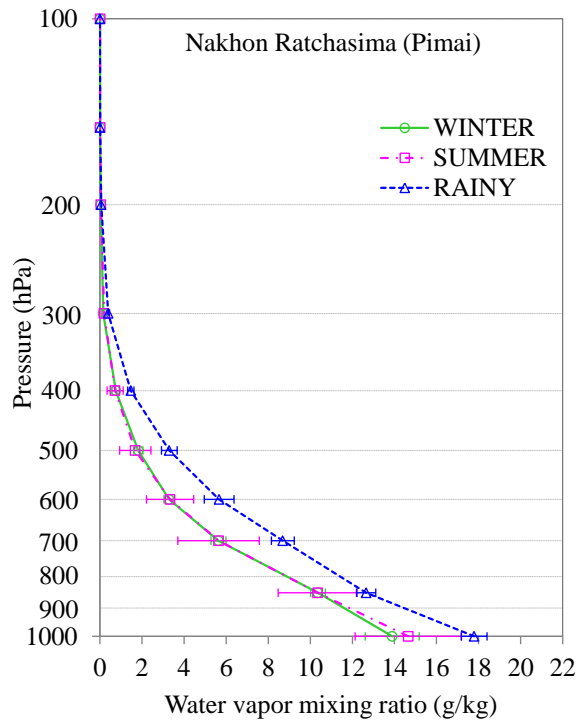
รูปที่ 3.73 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย)



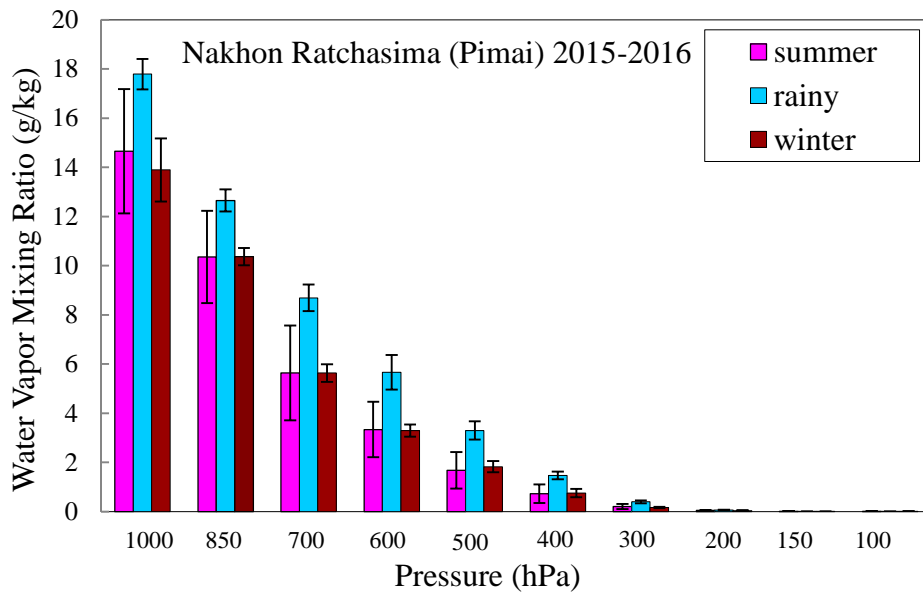
รูปที่ 3.74 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีนครสวรรค์ (ตากลี้)



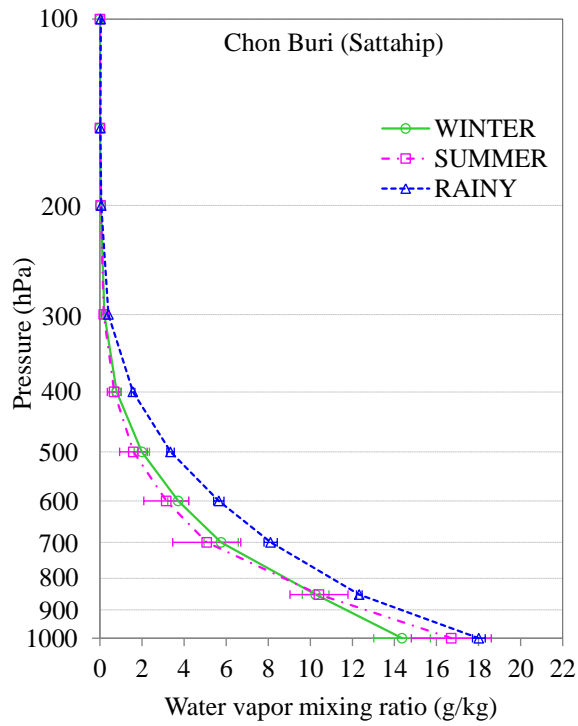
รูปที่ 3.75 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีนครสวรรค์ (ตากลี้)



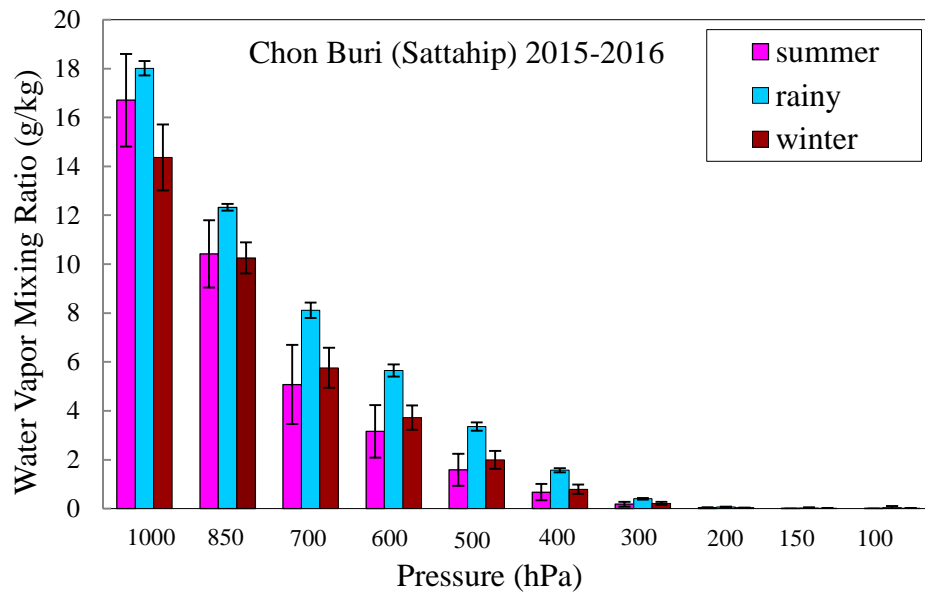
รูปที่ 3.76 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีนครราชสีมา (พิมาย)



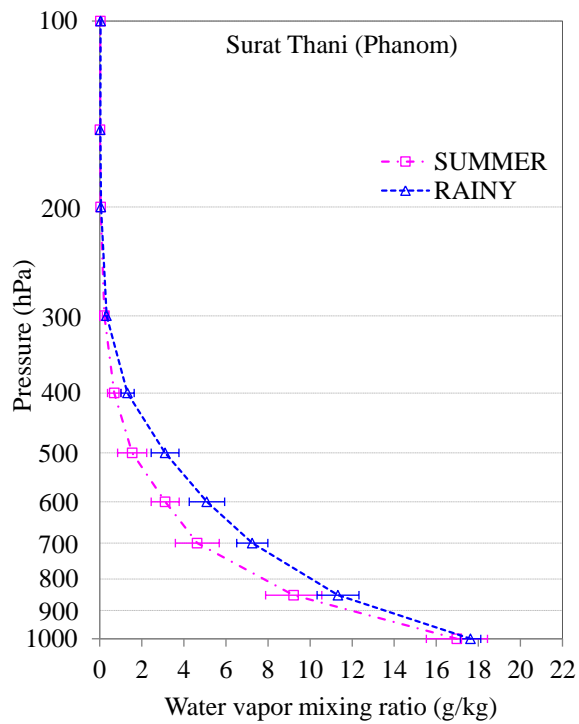
รูปที่ 3.77 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีนครราชสีมา (พิมาย)



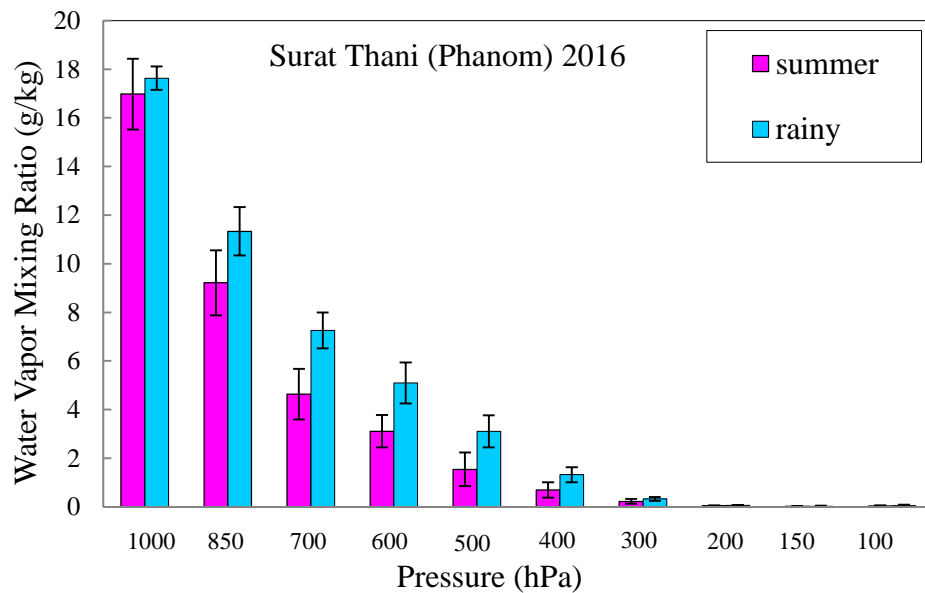
รูปที่ 3.78 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีชลบุรี (สัตหีบ)



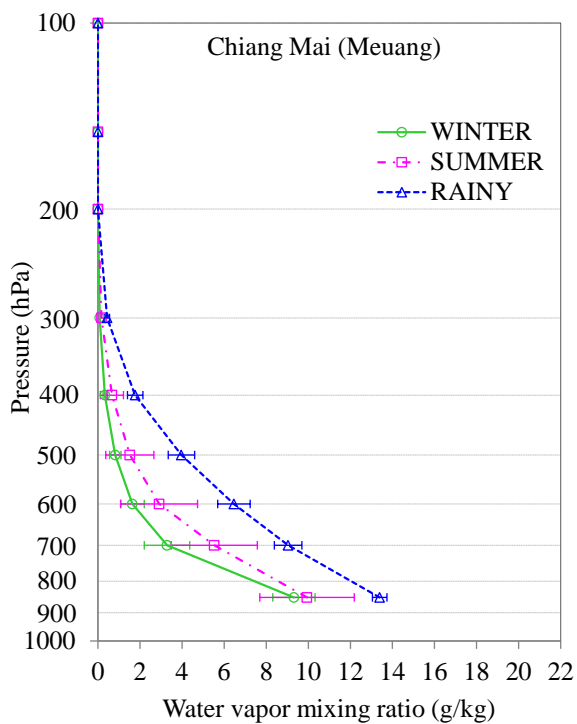
รูปที่ 3.79 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีชลบุรี (สัตหีบ)



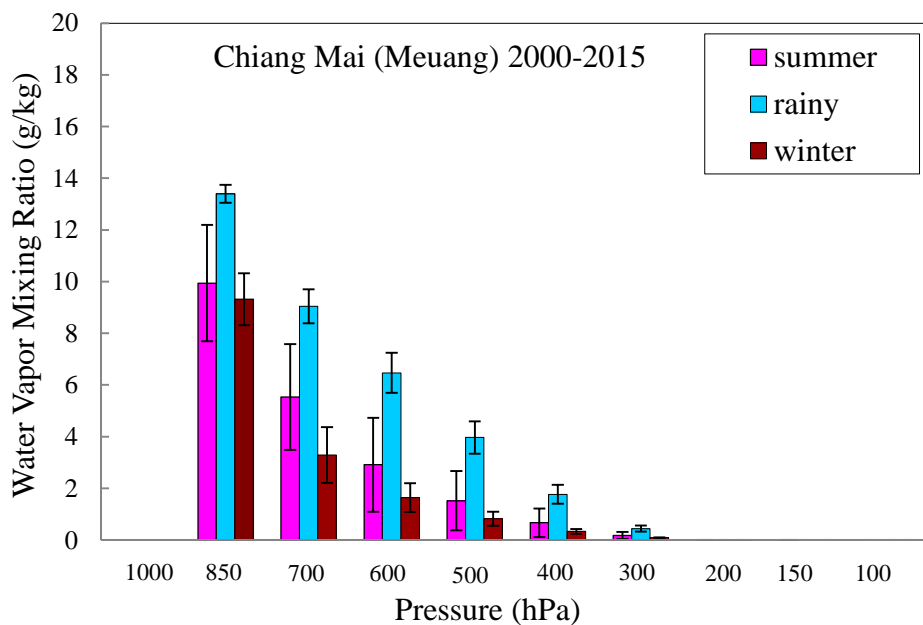
รูปที่ 3.80 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม)



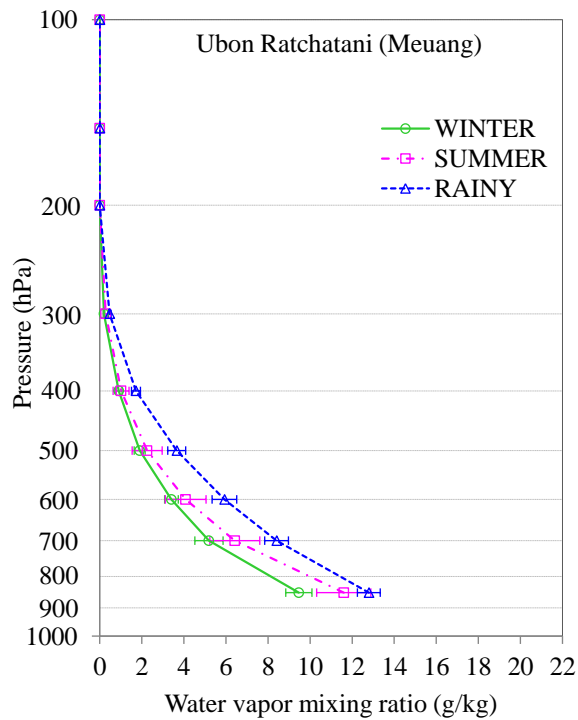
รูปที่ 3.81 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม)



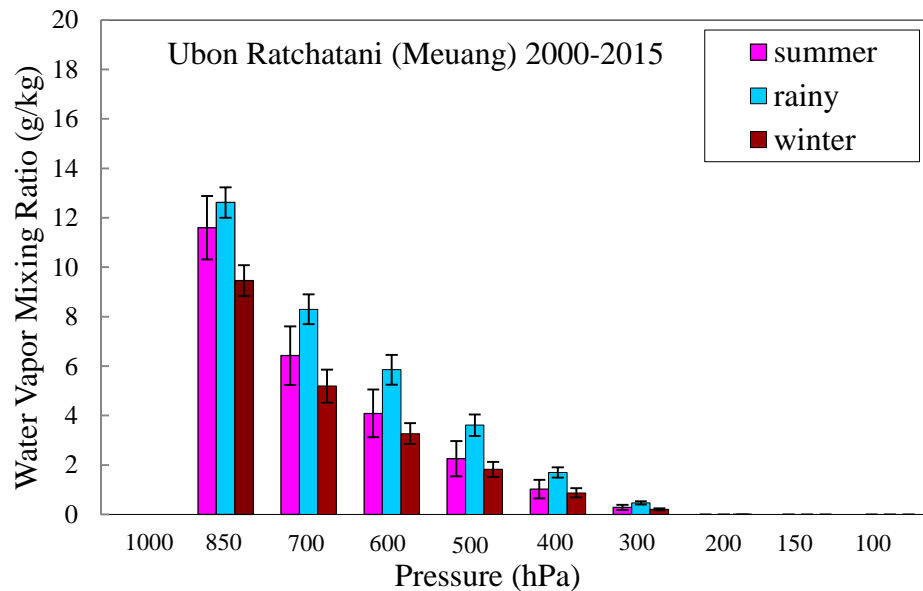
รูปที่ 3.82 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



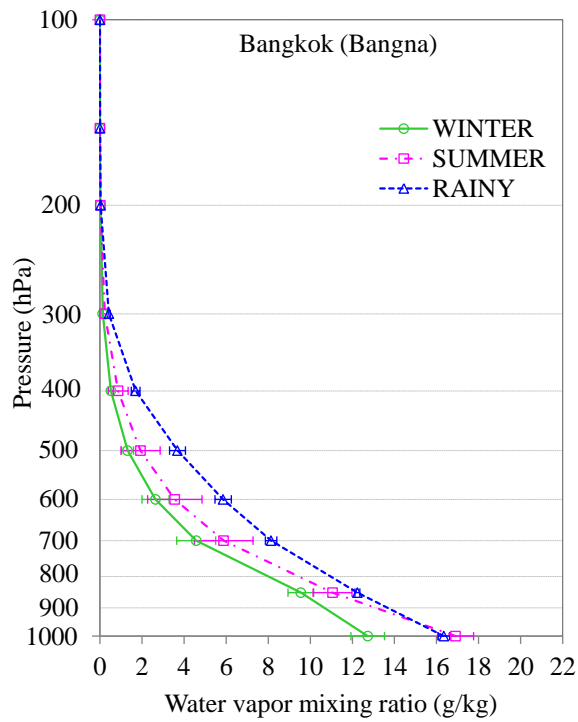
รูปที่ 3.83 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



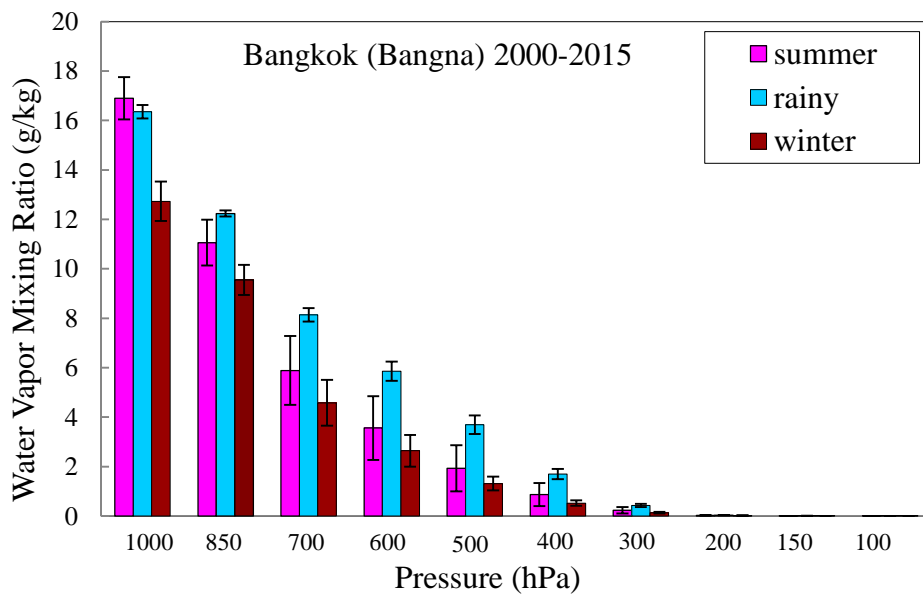
รูปที่ 3.84 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีอุบลราชธานี (เมือง)



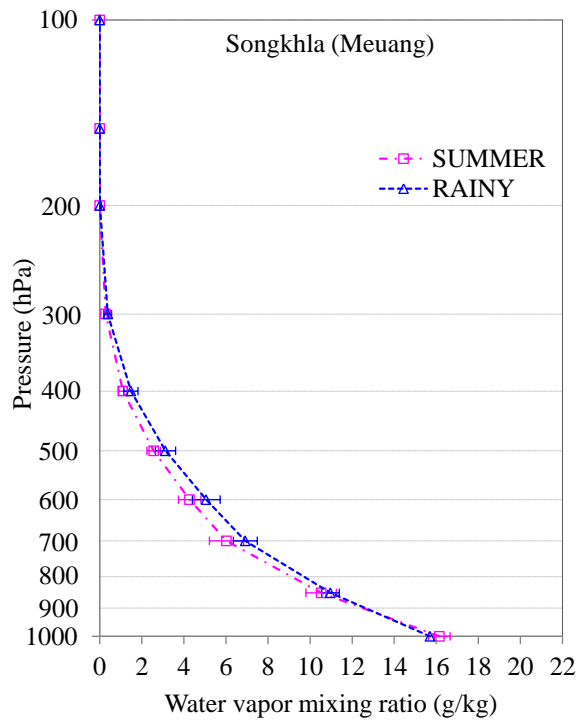
รูปที่ 3.85 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีอุบลราชธานี (เมือง)



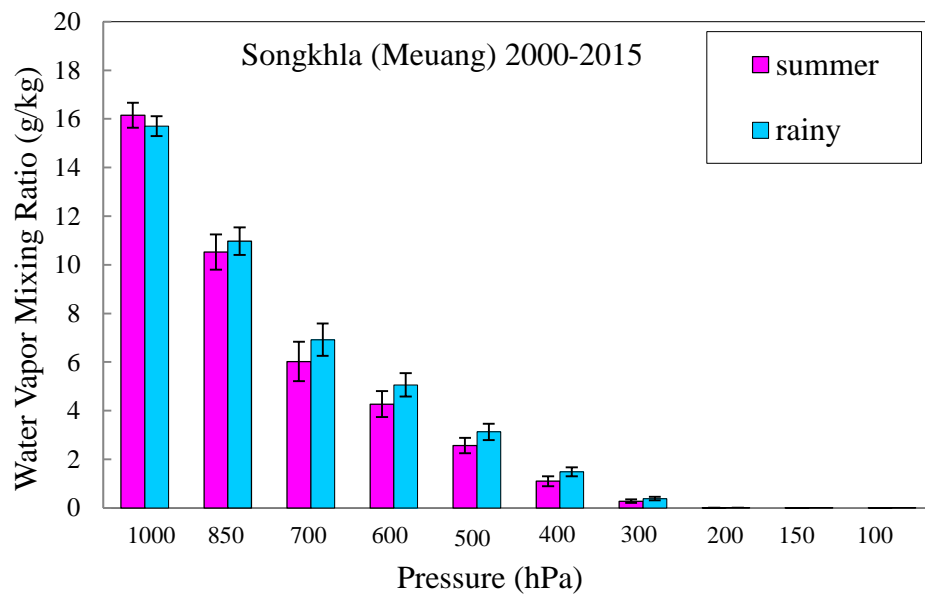
รูปที่ 3.86 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา)



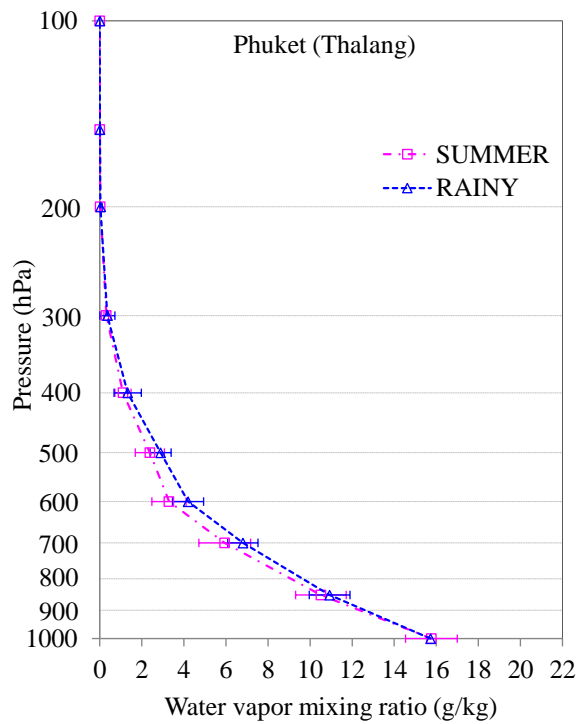
รูปที่ 3.87 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีกรุงเทพฯ (บางนา)



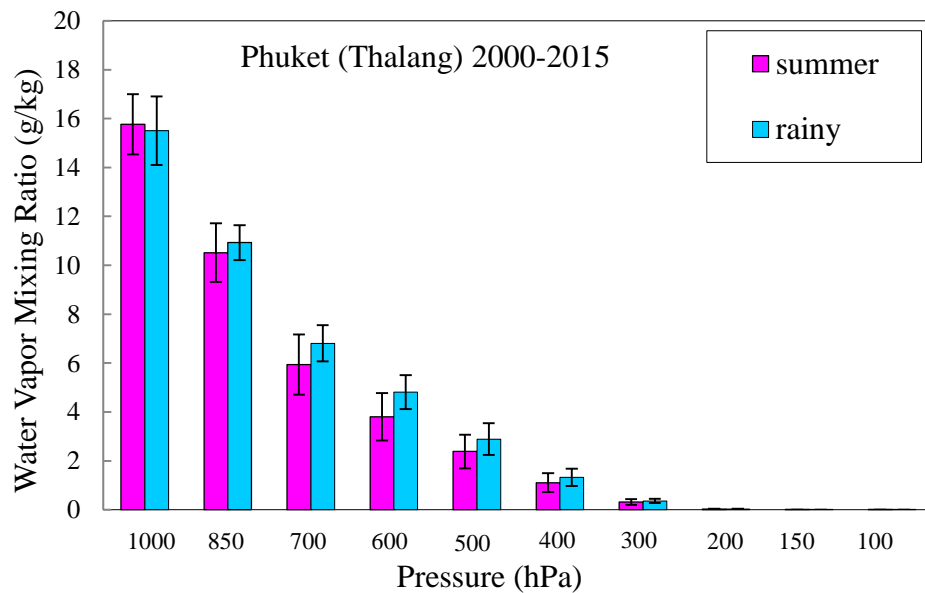
รูปที่ 3.88 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีสงขลา (เมือง)



รูปที่ 3.89 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีสงขลา (เมือง)



รูปที่ 3.90 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำตามฤดูกาลของสถานีภูเก็ต (กลาง)



รูปที่ 3.91 ค่า mixing ratio ของไอน้ำที่แต่ละระดับความดันในฤดูกาลต่าง ๆ ของสถานีภูเก็ต (กลาง)

จากผลที่ได้ จะเห็นการแปรค่าของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศตามฤดูกาลได้ชัดเจนขึ้น โดยภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง พบว่าที่ความดันทุกระดับไอน้ำจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูฝน และมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดูหนาว ส่วนฤดูร้อนสามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกสถานีวัดอยู่ในเขตชุมชนเมือง ปริมาณไอน้ำจะมีค่าสูงกว่าปริมาณไอน้ำในฤดูหนาวเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากในเขตชุมชนเมืองมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงในช่วงฤดูร้อน ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงจึงเกิดการระเหยของน้ำมากขึ้น และบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงก็สามารถกักเก็บไอน้ำได้มากกว่าบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และกรณีที่สองสถานีวัดอยู่ในเขตป่าไม้ ปริมาณไอน้ำในฤดูร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำในฤดูหนาวอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือช่วงฤดูร้อนจะมีปริมาณไอน้ำที่ค่อนข้างน้อยใกล้เคียงกับปริมาณไอน้ำในฤดูหนาว ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิอากาศในช่วงฤดูดังกล่าวมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงเกิดการควบแน่นของ ไอน้ำได้ง่าย ส่งผลให้ไอน้ำในบรรยากาศลดลง ส่วนภาคใต้ซึ่งแบ่งฤดูกาลออกเป็น 2 ฤดูกาล พบว่า ปริมาณไอน้ำที่ผิวพื้นในช่วงฤดูฝนมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณไอน้ำในช่วงฤดูร้อน ทำให้ไอน้ำในบรรยากาศที่ผิวพื้นมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งปี และที่ความดันต่ำลงปริมาณไอน้ำในช่วงฤดูฝนจะมีค่าสูงกว่าในช่วงฤดูร้อนเล็กน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากพื้นที่ภาคใต้เป็นพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลซึ่งมีแหล่งน้ำมากและได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทำให้มีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี

นอกจากนี้พบว่าปริมาณไอน้ำที่ผิวพื้นสูงสุดมีค่าประมาณ 18 g/kg ที่สถานีชลบุรี (สัตหีบ) และสถานีสุราษฎร์ธานี (พนม) ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลและอยู่บริเวณป่าไม้ และมีค่าต่ำสุดประมาณ 10 g/kg ที่สถานีเชียงใหม่ (เมือง) และสถานีเชียงใหม่ (อมก๋อย) ซึ่งอยู่ในเขตภาคเหนือมีอุณหภูมิอากาศค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับภาคอื่น ๆ



บทที่ 4

สรุป

จากความสำคัญของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลมฟ้าอากาศ อีกทั้งมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นสีอาทิตย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณไอน้ำที่คำนวณได้จากข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากการตรวจอากาศชั้นบน และข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ผิวพื้น ณ ตำแหน่งสถานีอุตุนิยมวิทยา 4 แห่ง ซึ่งตั้งอยู่ที่สถานีวัดจังหวัดเชียงใหม่ สถานีวัดจังหวัดอุบลราชธานี สถานีวัดกรุงเทพมหานคร และสถานีวัดจังหวัดสงขลา โดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2000 - 31 ธันวาคม ค.ศ. 2009 จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยนำข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ผิวพื้นที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา 4 แห่ง ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ระหว่างปี ค.ศ. 2010 - 2015 มาทำการหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศโดยอาศัยแบบจำลองที่สร้างขึ้น จากนั้นนำปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sunphotometer ของเครือข่าย AERONET ซึ่งติดตั้งไว้ที่สถานีเดียวกัน ผลที่ได้พบว่า ปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากเครื่อง sunphotometer โดยมีความแตกต่างในรูปของ root mean square difference เท่ากับ 14.3% และ mean bias difference เท่ากับ -9.2%

ต่อมาผู้วิจัยได้นำแบบจำลองดังกล่าวไปคำนวณค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2010 - 2015) ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศไทยจำนวน 81 แห่ง ซึ่งมีการวัดข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ผิวพื้น และศึกษาการแปรค่าของปริมาณไอน้ำที่ได้พบว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปี โดยภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง มีลักษณะการแปรค่าโดยรวมที่คล้ายคลึงกัน คือมีปริมาณไอน้ำสูงในช่วงเดือนเมษายนถึงตุลาคมซึ่งเป็นฤดูฝน และจะค่อยลดต่ำลงในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคมซึ่งเป็นฤดูแล้ง ส่วนสถานีในภาคใต้จะมีปริมาณไอน้ำค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการแปรค่าตามแนวตั้งของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในประเทศไทย โดยการรวบรวมข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันอากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ จากสถานีวัดของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรจำนวน 5 แห่ง ได้แก่ 1) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลยางเปียง อำเภอมกก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ 2) สถานีเรดาร์ฝนหลวงตาคี อำเภอตาคี จังหวัดนครสวรรค์ 3) สถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี 4) ศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงเฉลิมพระเกียรติ ตำบลรังกาใหญ่ อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดนครราชสีมา และ 5) สถานีเรดาร์ฝนหลวง ตำบลพนม อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสถานีวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 5 แห่ง ได้แก่ 1) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัด

เชียงใหม่ 2) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง อำเภอมือง จังหวัดอุบลราชธานี 3) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ 4) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอมือง จังหวัดสงขลา และ 5) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันตก อำเภอมือง จังหวัดภูเก็ต จากนั้นทำการคำนวณปริมาณไอน้ำในบรรยากาศในรูปของ mixing ratio เฉลี่ยรายเดือนของแต่ละปีและเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว จากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ความดันต่าง ๆ แล้วทำการศึกษาการแปรค่า mixing ratio ตามแนวตั้ง ซึ่งจากการศึกษาการแปรค่า mixing ratio ของทั้ง 10 สถานีพบว่า mixing ratio มีการแปรค่าตามแนวตั้งในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือมีค่าสูงสุดที่พื้นผิว จากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามความสูงที่เพิ่มขึ้นจนถึงความดันประมาณ 200 hPa หรือความสูงประมาณ 8 km ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่ระเหยจากพื้นผิวหรือจากแหล่งน้ำต่าง ๆ จะลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศ เมื่อบรรยากาศมีอุณหภูมิต่ำลงไอน้ำจะเกิดการควบแน่น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์ลดลงตามความสูงจะทำให้ไอน้ำในบรรยากาศลดลงด้วย ในส่วนของการเปรียบเทียบการแปรค่า mixing ratio ของข้อมูลเดือนเดียวกันของทุกปีพบว่าการแปรค่าไม่มากนัก

สำหรับการศึกษาการแปรค่าของ mixing ratio ตามแนวตั้งตามฤดูกาล พบว่า mixing ratio มีค่าสูงสุดในช่วงฤดูฝน และมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดูหนาว ส่วนฤดูร้อนจะมีค่า mixing ratio สูงกว่าค่าในฤดูหนาวเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงฤดูฝนพื้นที่ประเทศไทยโดยเฉพาะภาคใต้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งจะพัดพาเอามวลอากาศรวมถึงไอน้ำจากทะเลและจากพื้นที่อื่น ๆ มายังประเทศไทย ทำให้บรรยากาศเหนือประเทศไทยมีไอน้ำมากขึ้น ส่วนช่วงฤดูหนาว mixing ratio จะมีค่าต่ำกว่าฤดูอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงเกิดการควบแน่นของไอน้ำได้ง่าย ส่งผลให้ไอน้ำในบรรยากาศลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การแปรค่า mixing ratio ตามแนวตั้งยังขึ้นกับลักษณะของพื้นที่ที่ศึกษา เช่น ชุมชนเมือง ชุมชนป่าไม้ และบริเวณพื้นที่ติดแหล่งน้ำ เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- AGU. (1995). A spatial report: Water vapour in the climate system. *American Geophysical Union*.
- Ahrens, C. D. (2012). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. USA: Brooks/Cole.
- Basha, S. G. (2013.). Studies on vertical Distribution of Atmospheric Water Vapor,. pp 241.
- Bock, O., Bouin, M. N., Walpersdorf, A., Lafore, J.-P., Janicot, S., Guichard, F., & Agustí-Panareda, A. (2007). Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(629), 2011-2027.
- Bruegge, C. J., Conel, J. E., Green, R. O., Margolis, J. S., Holm, R. G., & Toon, G. (1992). Water vapor column abundance retrievals during FIFE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D17), 18759-18768.
- Campmany, E., Bech, J., Rodríguez-Marcos, J., Sola, Y., & Lorente, J. (2010). A comparison of total precipitable water measurements from radiosonde and sunphotometers. *Atmospheric Research*, 97(3), 385-392.
- Cooney, J., Petri, K., Salik, A., . (1980.). *Acquisition of atmospheric water vapor profiles by a solar band Raman lidar, in Atmospheric Water Vapor*, : Academic Press, New York.
- Coster, A., Niell, A., Solheim, F., Mendes, V., Toor, P., Buchmann, K., & Upham, C. (1996). Measurements of precipitable water vapor by GPS, radiosondes, and a microwave water vapor radiometer. *INST OF NAVIGATION, ALEXANDRIA, VA,(USA)*. 1, 625-634.
- Exell, R. (1978). The water content and turbidity of the atmosphere in Thailand. *Solar Energy*, 20(5), 429-430.
- Foth, A., Baars, H., Di Girolamo, P., & Pospichal, B. (2015). Water vapour profiles from Raman lidar automatically calibrated by microwave radiometer data during HOPE. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 7753-7763.

- Guiraud, F. O., Howard, J., & Hogg, D. C. (1979). A dual-channel microwave radiometer for measurement of precipitable water vapor and liquid. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 17(4), 129-136.
- Hay, J. E. (1971). Precipitable water over Canada: II distribution. *Atmosphere*, 9(4), 101-111.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press.
- Kämpfer, N. (2013). *Monitoring atmospheric water vapour: ground-based remote sensing and in-situ methods* (Vol. 10). New York: Springer.
- Larsen, N. F., & Stamnes, K. (2005). Use of shadows to retrieve water vapor in hazy atmospheres. *Applied optics*, 44(32), 6986-6994.
- Liou, K.-N. (2002). *An introduction to atmospheric radiation* (Vol. 84): Academic press.
- Malmusi, S., & Boccolari, M. (2010). Upper and middle precipitable water calculated from METEOSAT-8/-9 tropospheric humidity and NCEP/NCAR temperatures. *Atmospheric Research*, 95(1), 8-18.
- Murray, F. W. (1967). *On the computation of saturation vapor pressure*. Retrieved from Navas-Guzmán, F., Fernandez-Galvez, J., Granados-Munoz, M. J., Guerrero-Rascado, J. L., Bravo-Aranda, J. A., & Alados-Arboledas, L. (2014). Tropospheric water vapour and relative humidity profiles from lidar and microwave radiometry. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(5), 1201-1211.
- Pierrehumbert, C. (1972). Precipitable water statistics, Australia monthly statistics of precipitable water between surface and 400 mb at 2300 GMT, 1958-1969(Monthly statistics of precipitable water over Australia in atmosphere from 400 mb to surface, determined from daily radiosonde ascents, 1958 through 1969).
- Reitan, C. H. (1960). Distribution of precipitable water vapor over the continental United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 41, 79-87.
- Revuelta, A., Rodriguez, C., Mateos, J., & Garmendia, J. (1985). A model for the estimation of precipitable water. *Tellus B*, 37(4-5), 210-215.
- Shankar, M. E. (2002). Radiosonde, 1-14. Retrieved from www.radiosondemuseum.org
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92): Academic press.

- Wang, M., Fang, X., Hu, S., Hu, H., Li, T., & Dou, X. (2015). Variation characteristics of water vapor distribution during 2000–2008 over Hefei (31.9 N, 117.2 E) observed by L625 lidar. *Atmospheric Research*, 164, 1-8.
- Wang, Y., Liu, Y., Liu, L., Guo, Z., Ge, X., & Xu, H. (2009). Retrieval of the change of precipitable water vapor with zenith tropospheric delay in the Chinese mainland. *Advances in Space Research*, 43(1), 82-88.
- Wu, S., Dai, G., Song, X., Liu, B., & Liu, L. (2016). Observations of water vapor mixing ratio profile and flux in the Tibetan Plateau based on the lidar technique. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3).

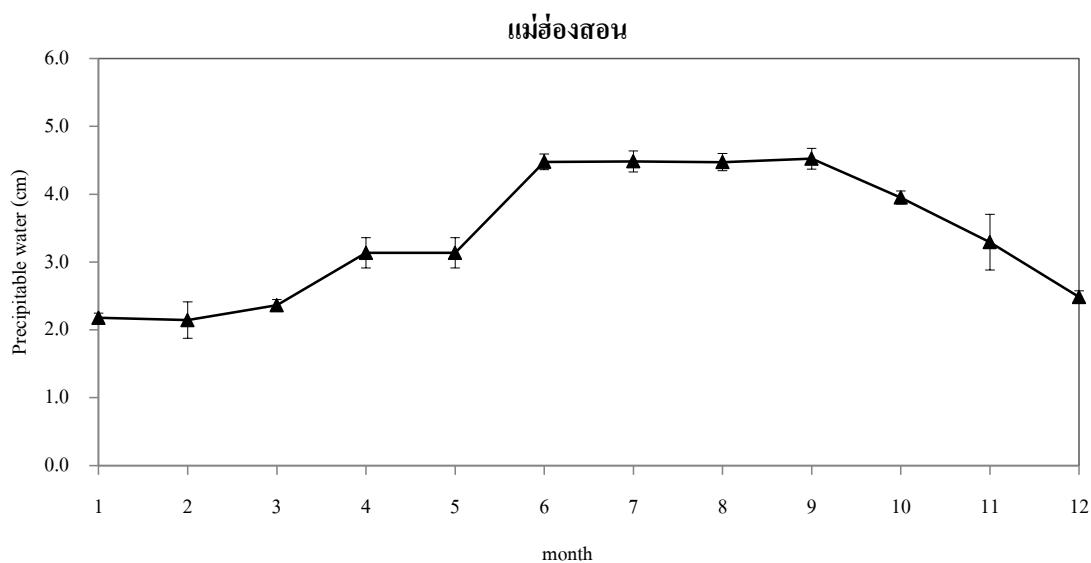




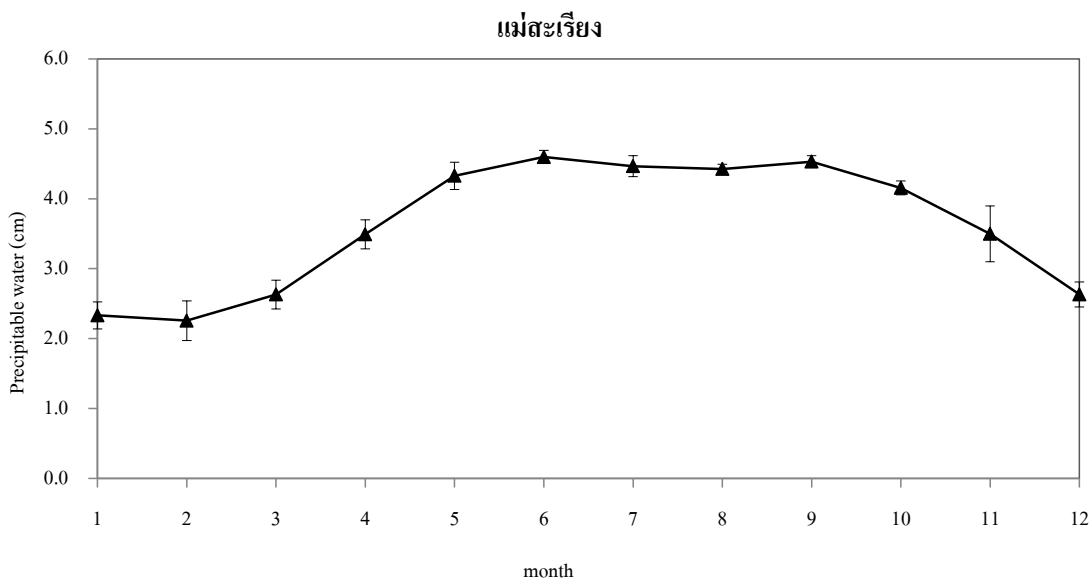
ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร

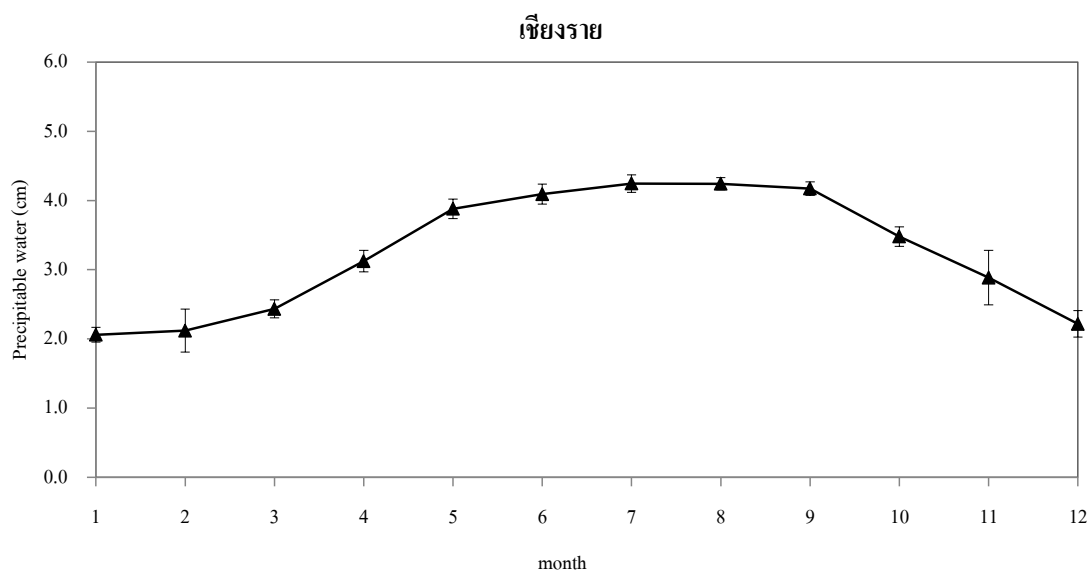




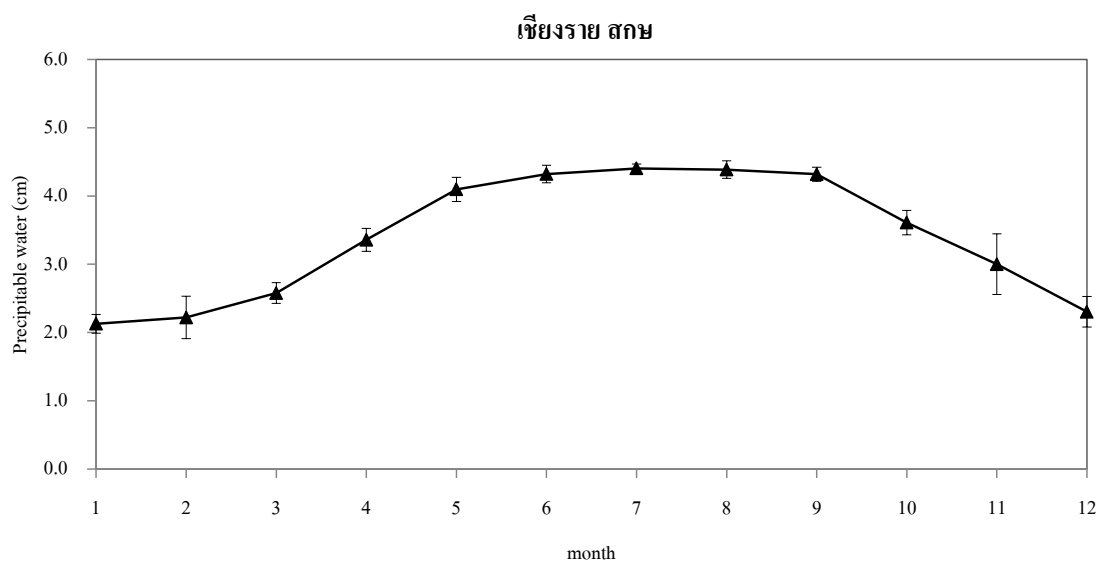
รูปที่ A1.1 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่ฮ่องสอน อำเภอเมือง จังหวัดแม่ฮ่องสอน



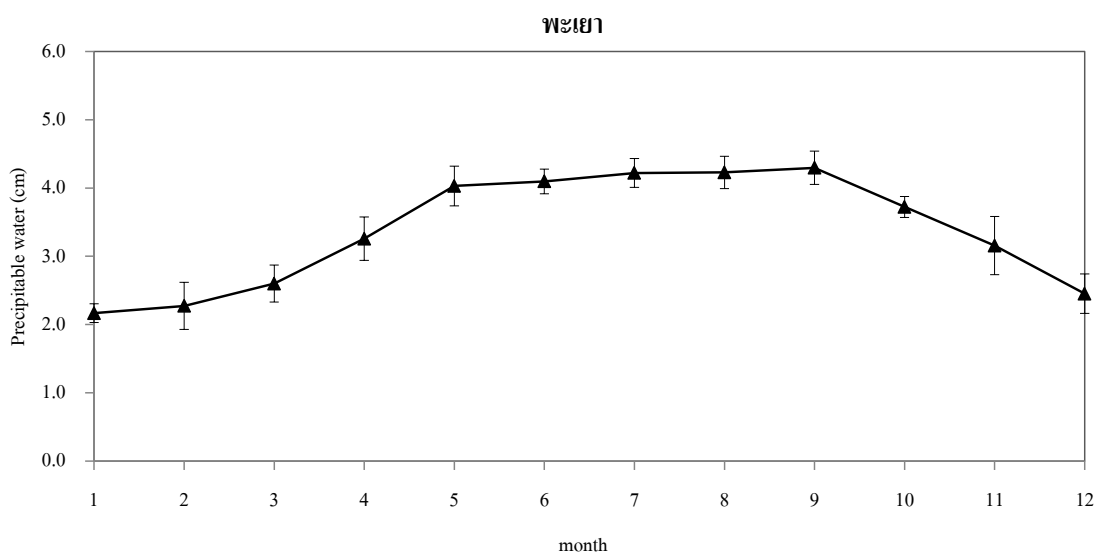
รูปที่ A1.2 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่สะเรียง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน



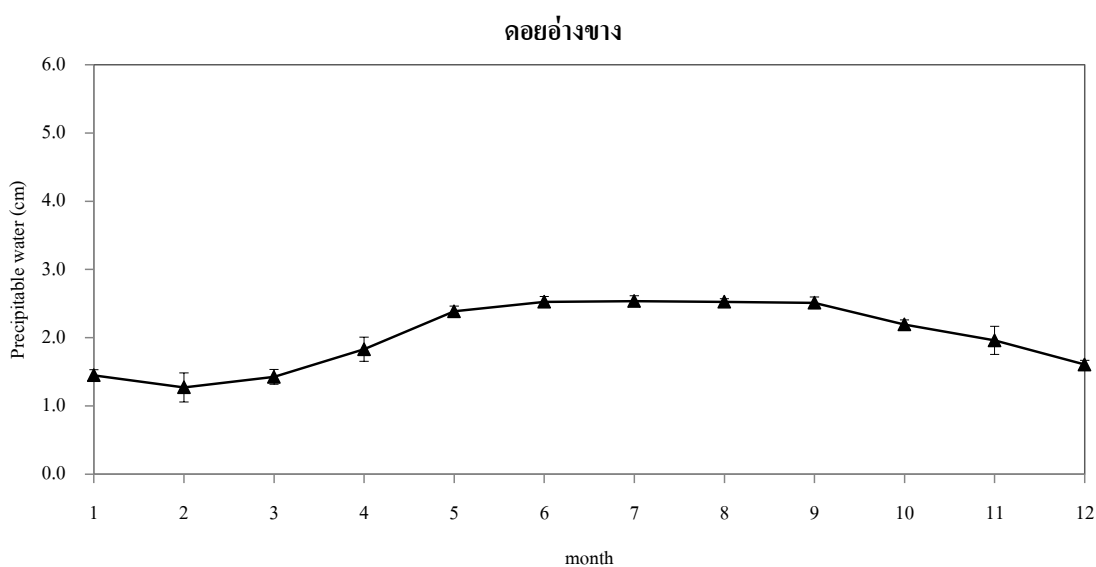
รูปที่ A1.3 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



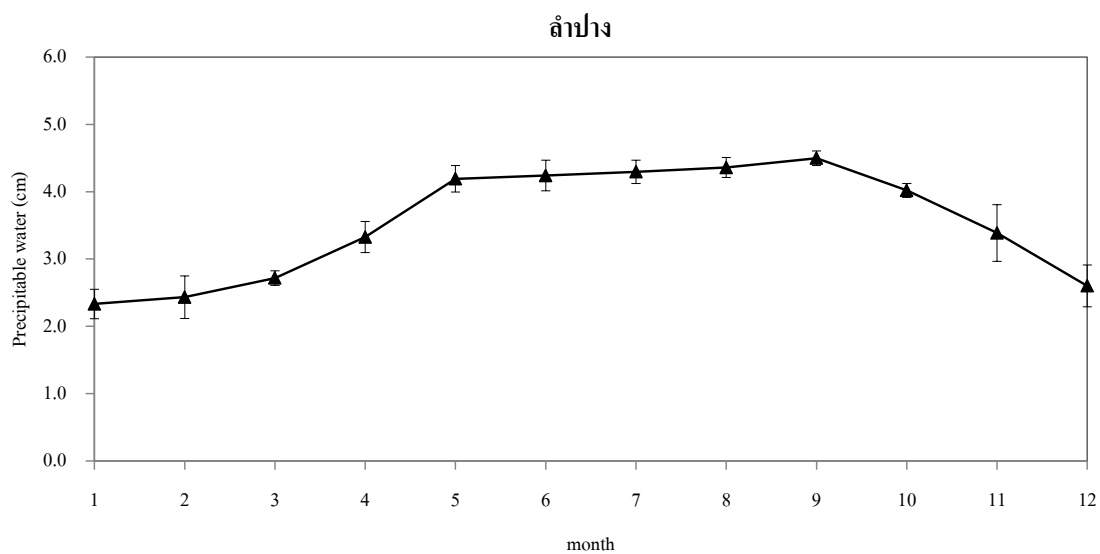
รูปที่ A1.4 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอากาศเกษตรเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



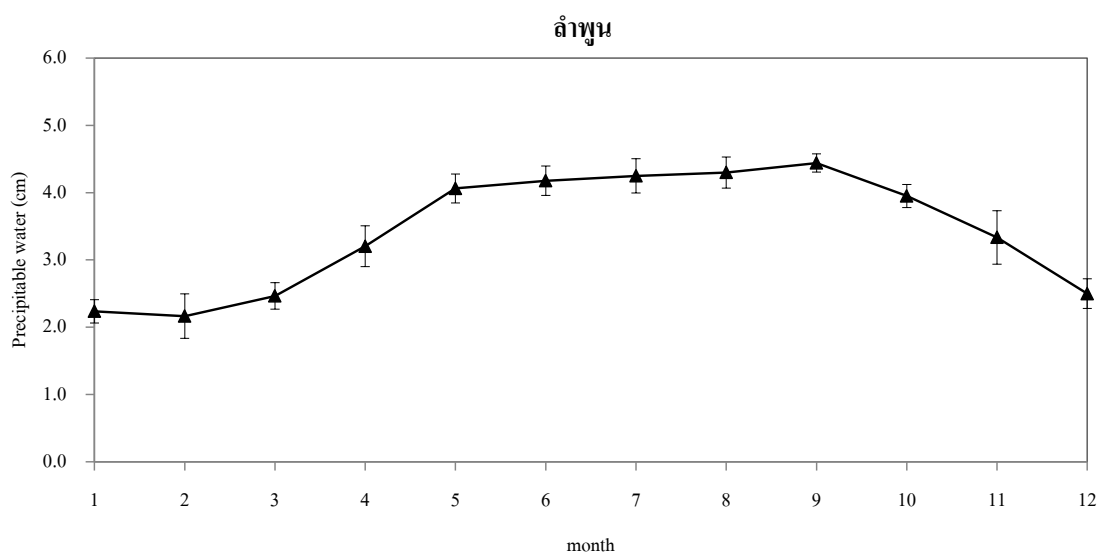
รูปที่ A1.5 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา



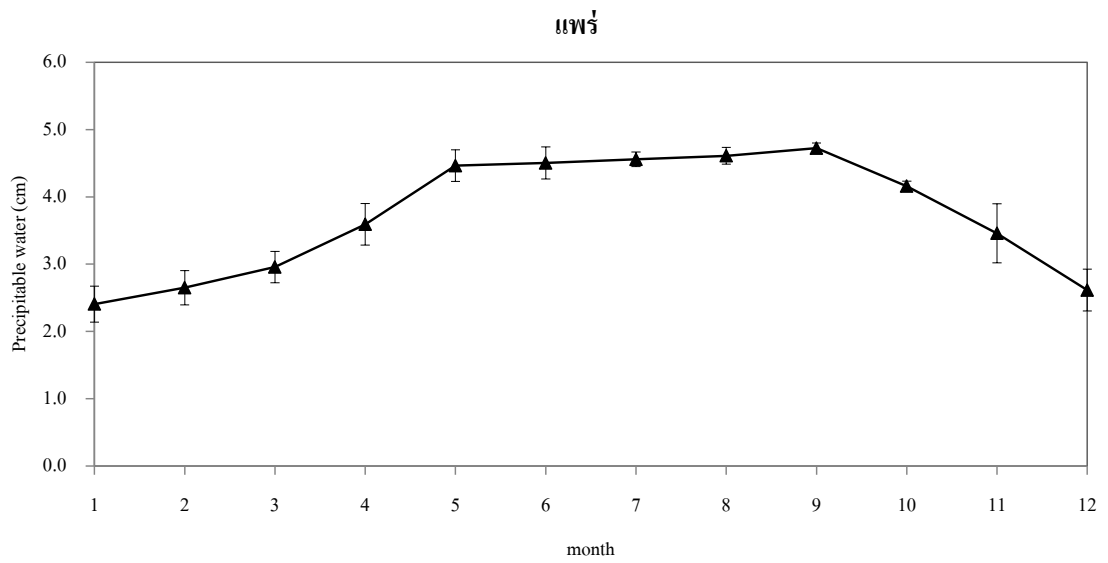
รูปที่ A1.6 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาดอยอ่างขาง อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่



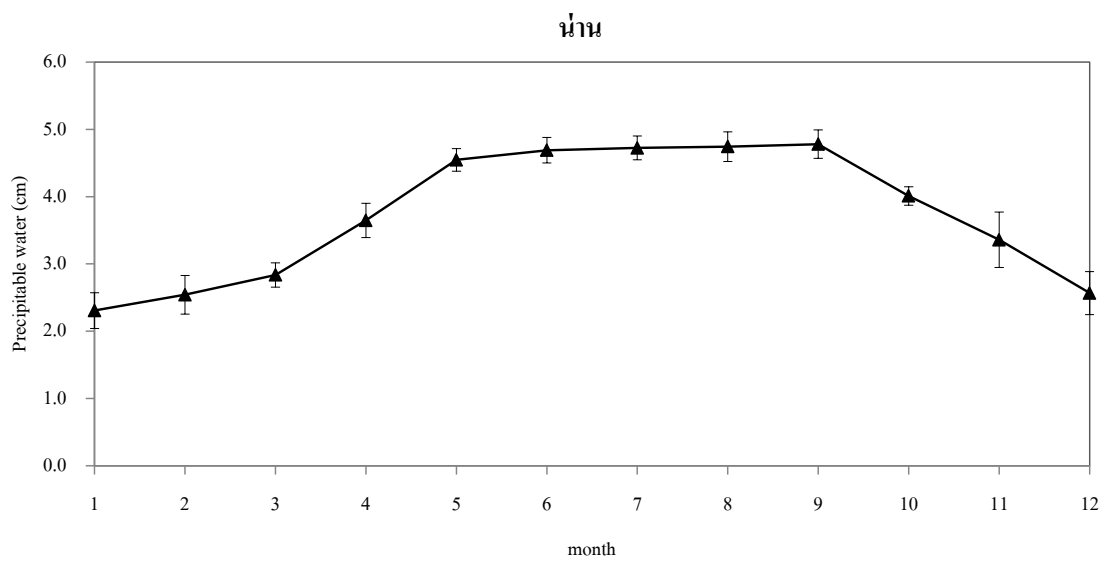
รูปที่ A1.7 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง



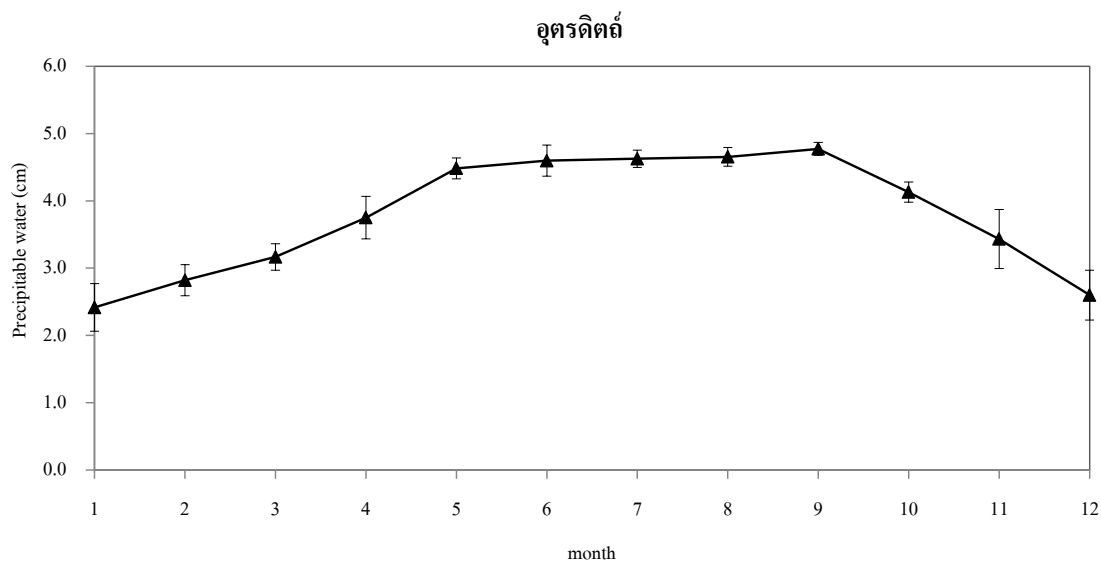
รูปที่ A1.8 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาลำพูน อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน



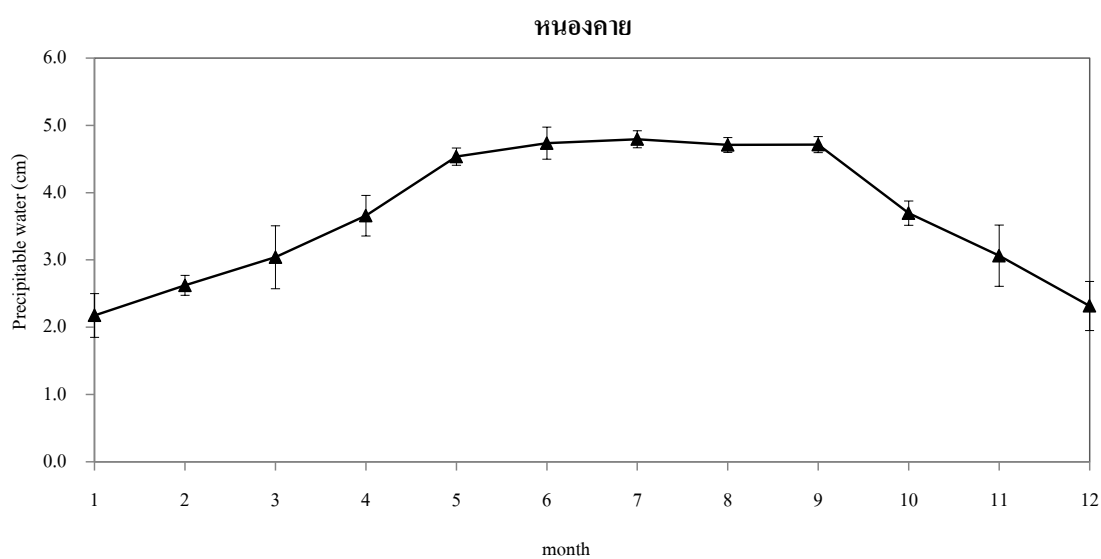
รูปที่ A1.9 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่



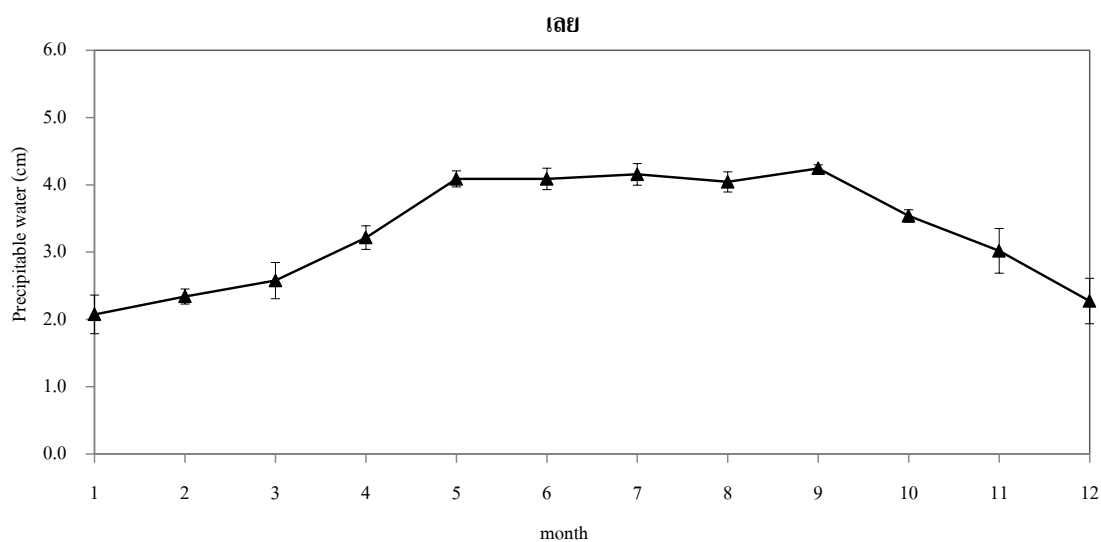
รูปที่ A1.10 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน



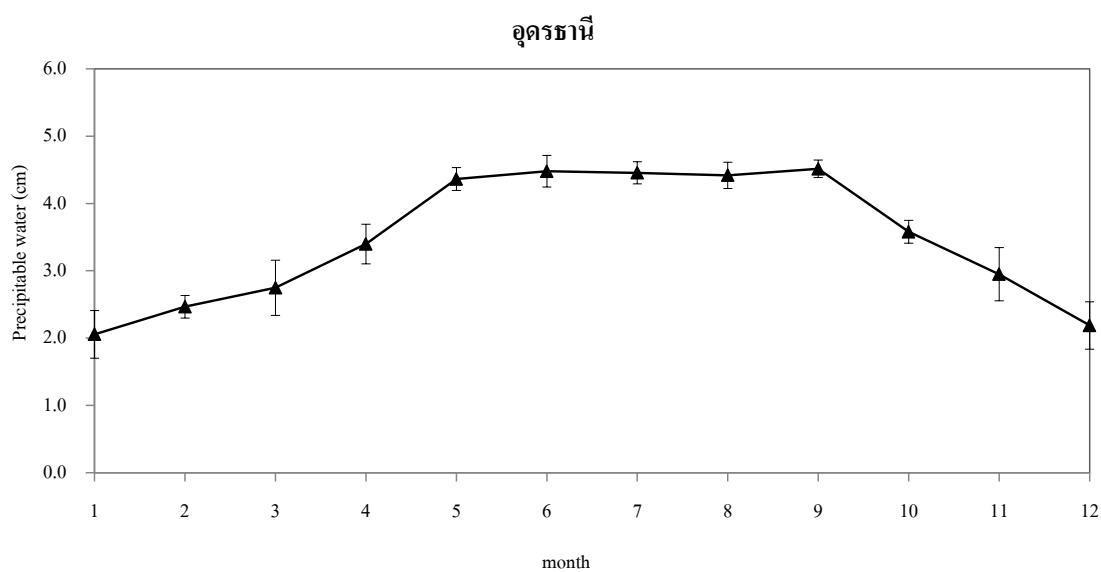
รูปที่ A1.11 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์



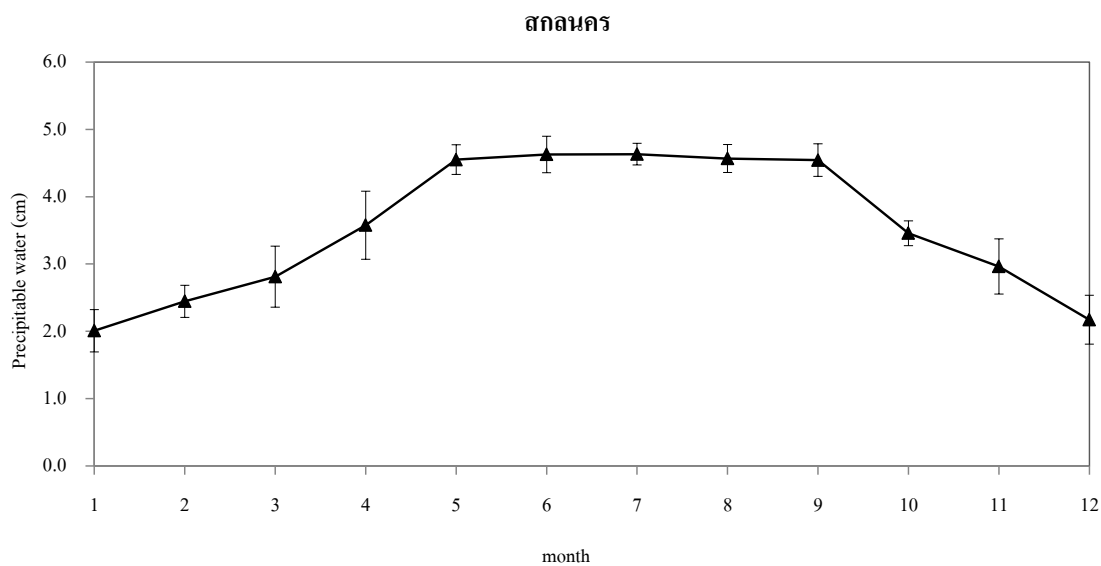
รูปที่ A1.12 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาหนองคาย อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย



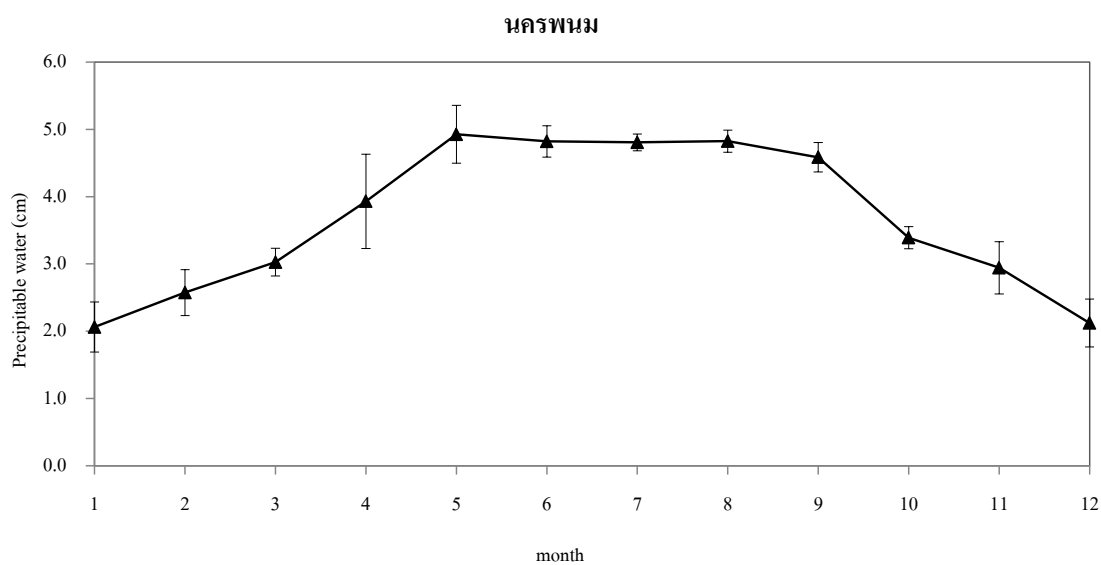
รูปที่ A1.13 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเลย อำเภอเมือง จังหวัดเลย



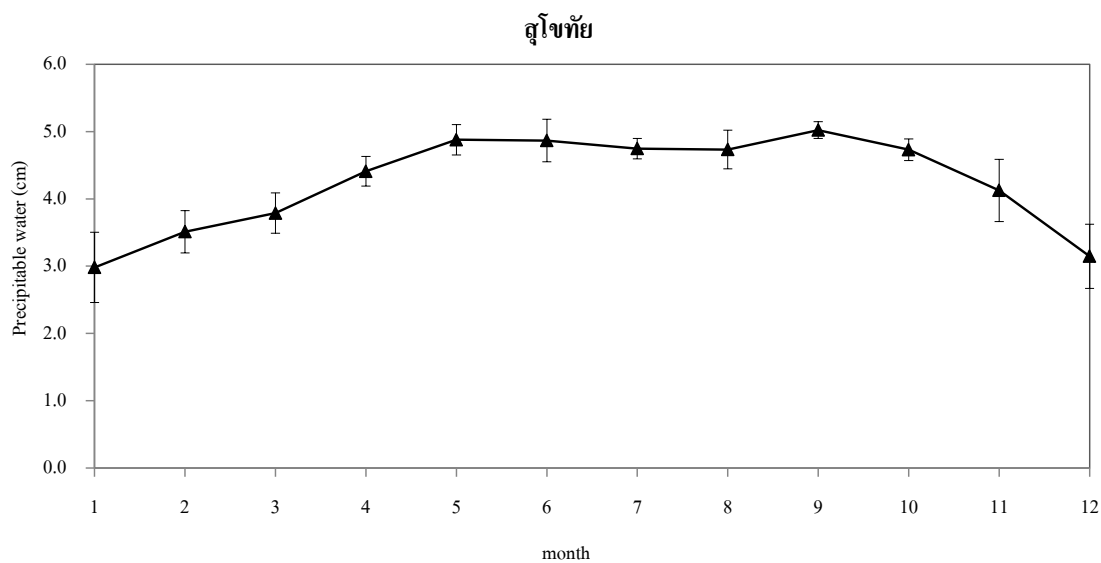
รูปที่ A1.14 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี



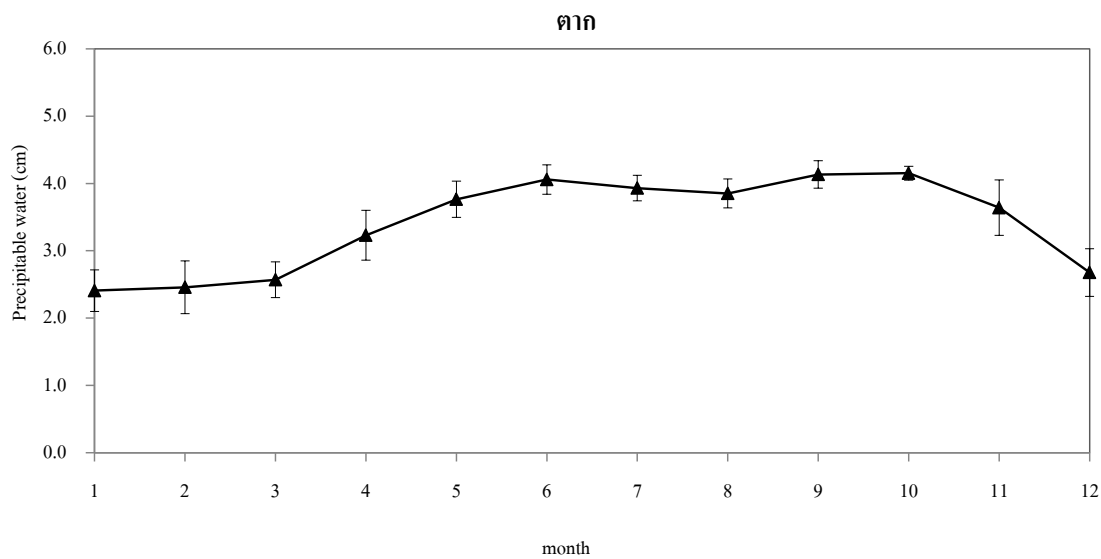
รูปที่ A1.15 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร



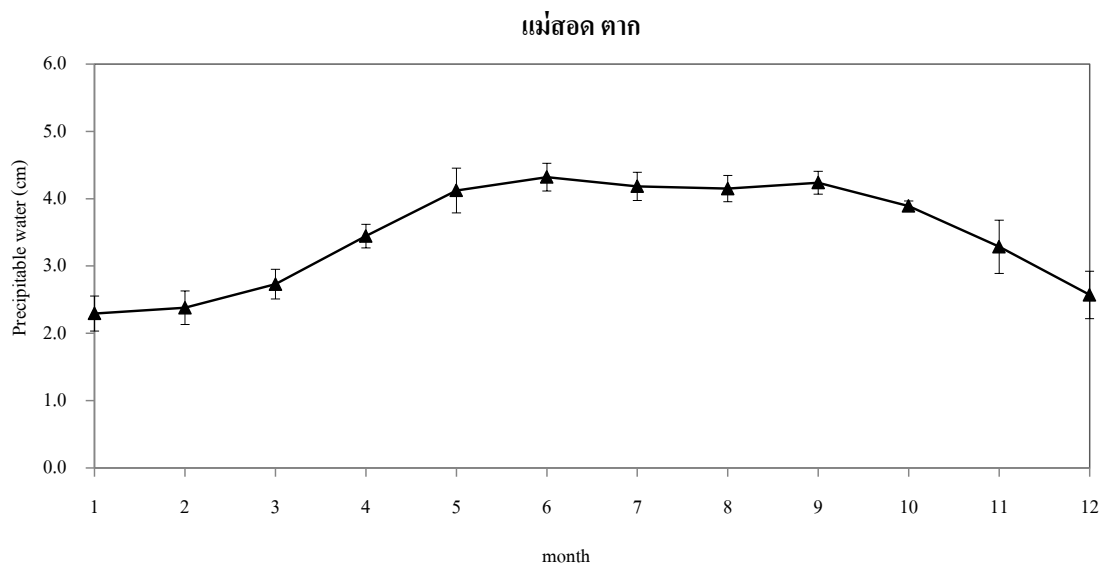
รูปที่ A1.16 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม



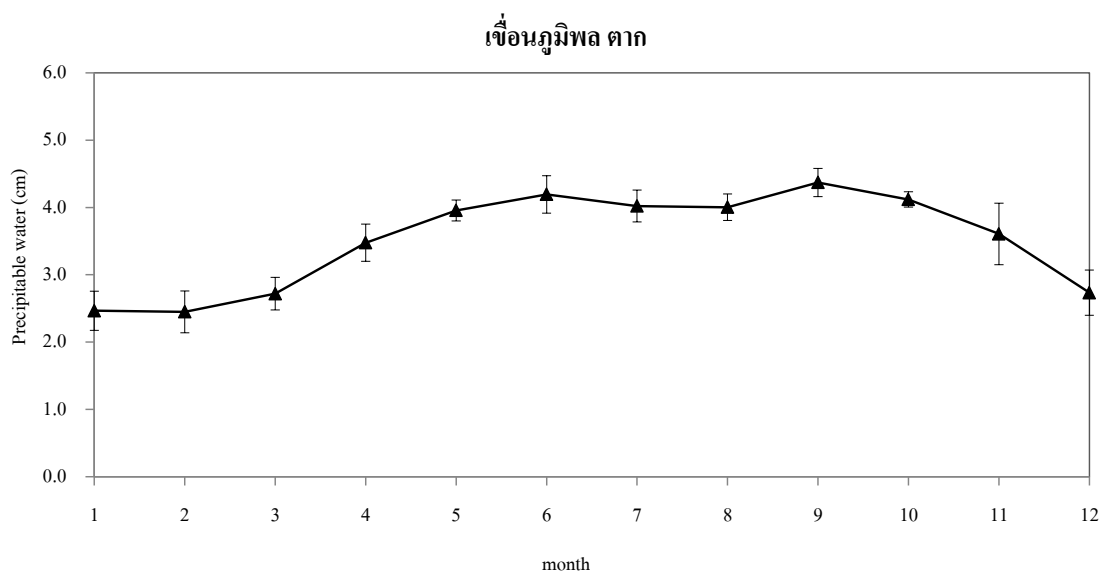
รูปที่ A1.17 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสุโขทัย อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย



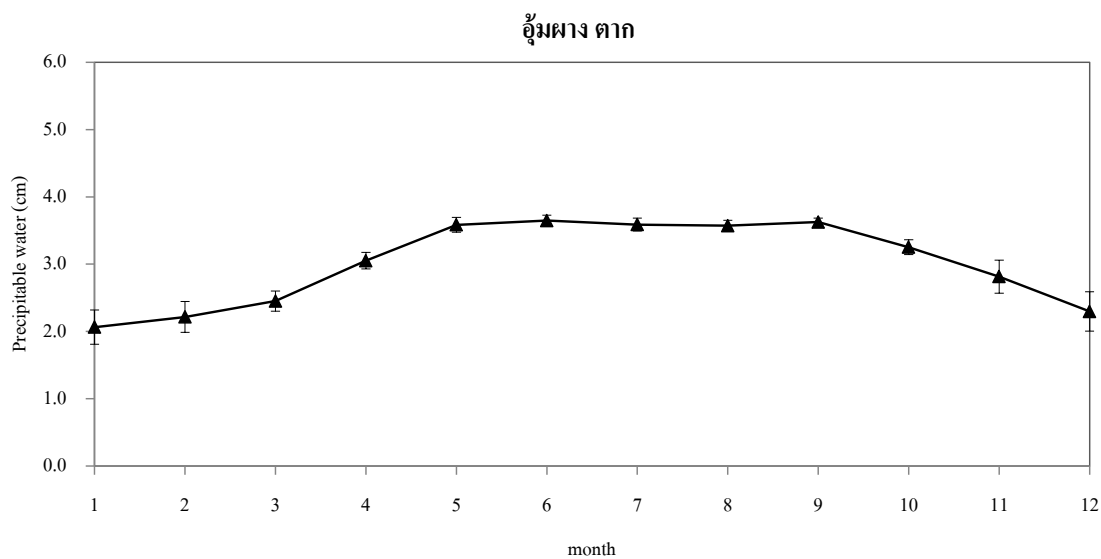
รูปที่ A1.18 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาทาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก



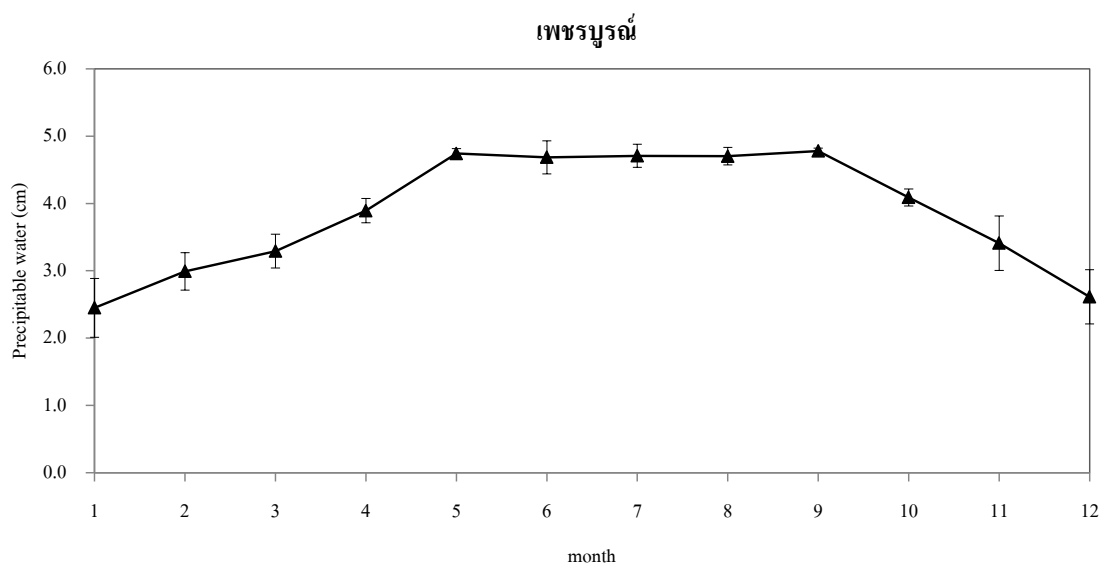
รูปที่ A1.19 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่สอด อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก



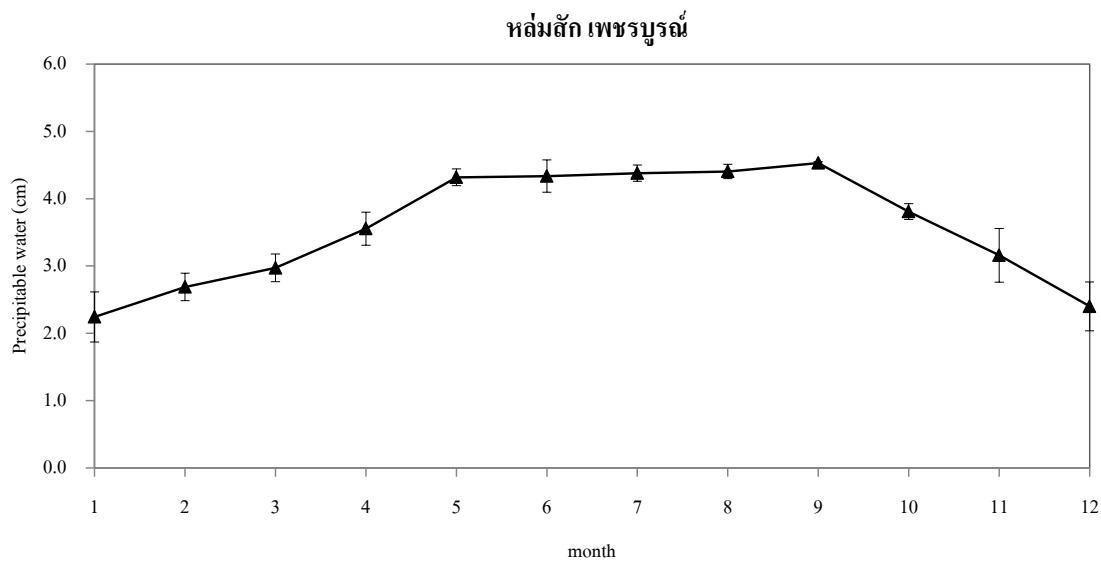
รูปที่ A1.20 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเขื่อนภูมิพล อำเภอสามเงา จังหวัดตาก



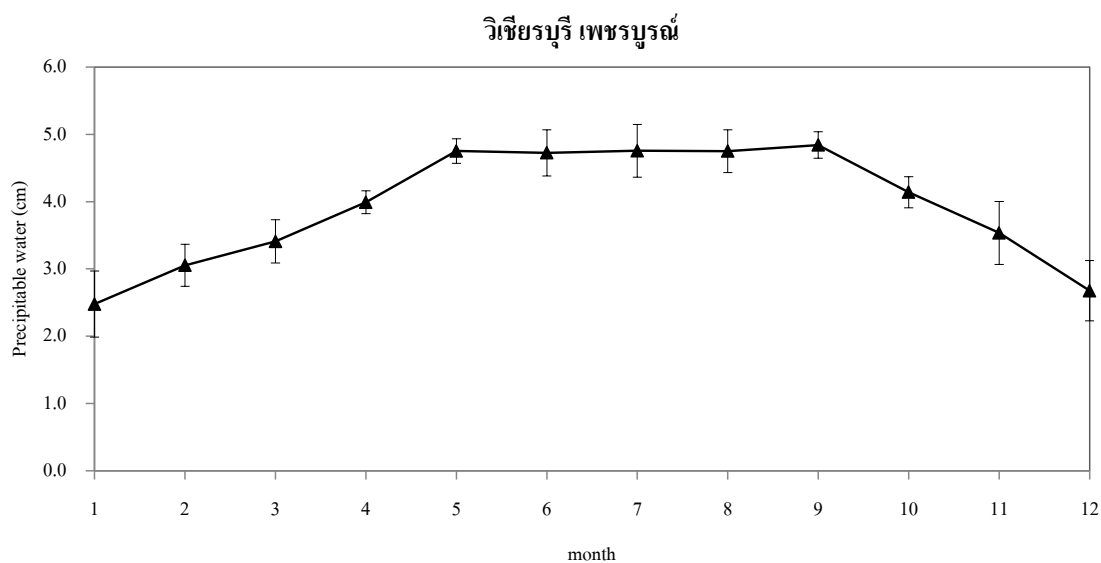
รูปที่ A1.21 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผาง อำเภออุ้มผาง จังหวัดตาก



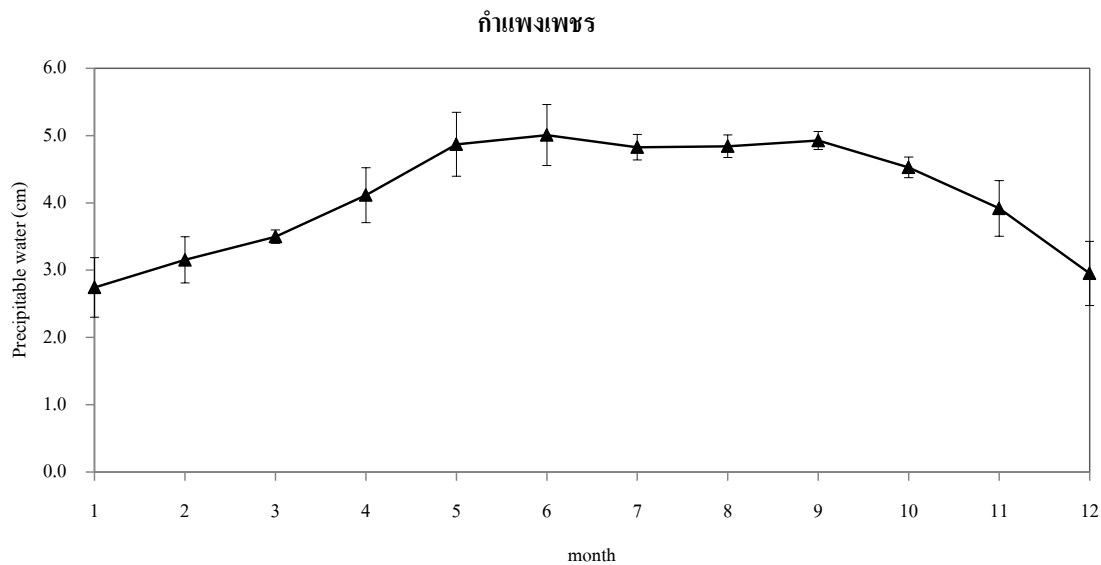
รูปที่ A1.22 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์



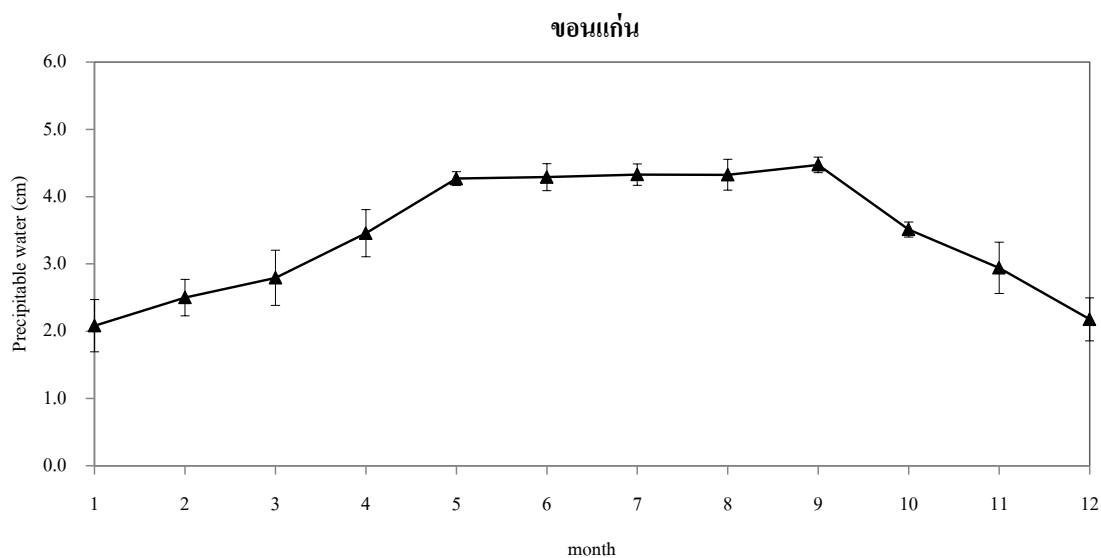
รูปที่ A1.23 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาหล่มสัก อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์



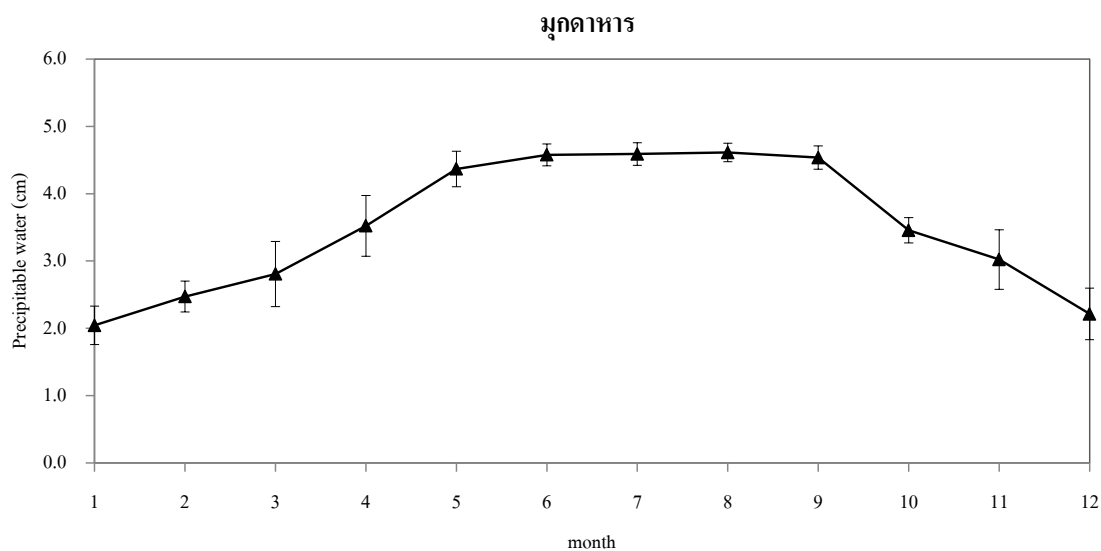
รูปที่ A1.24 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาวิเชียรบุรี อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์



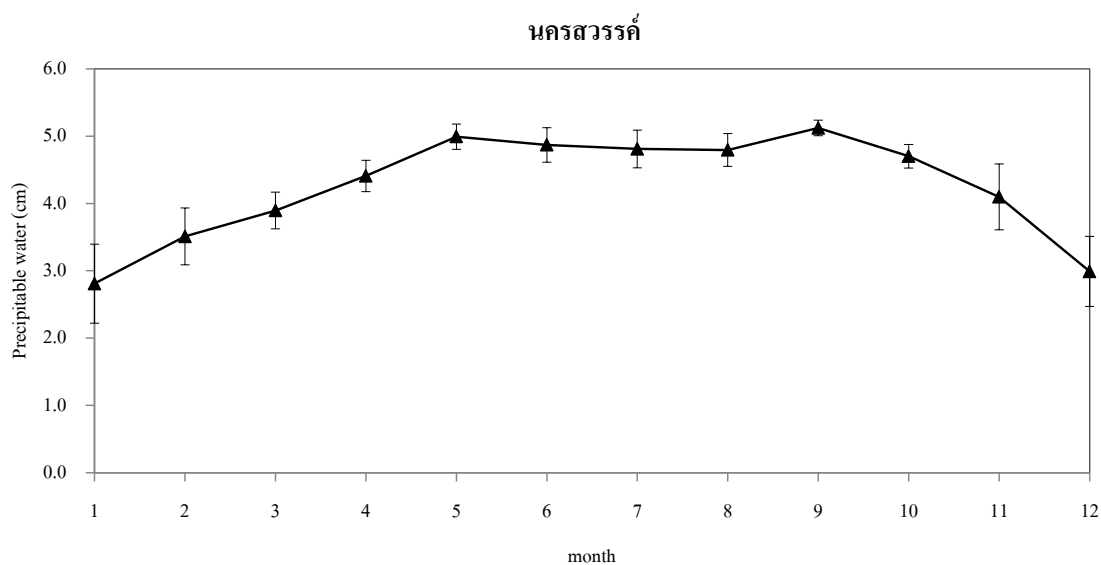
รูปที่ A1.25 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยากำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร



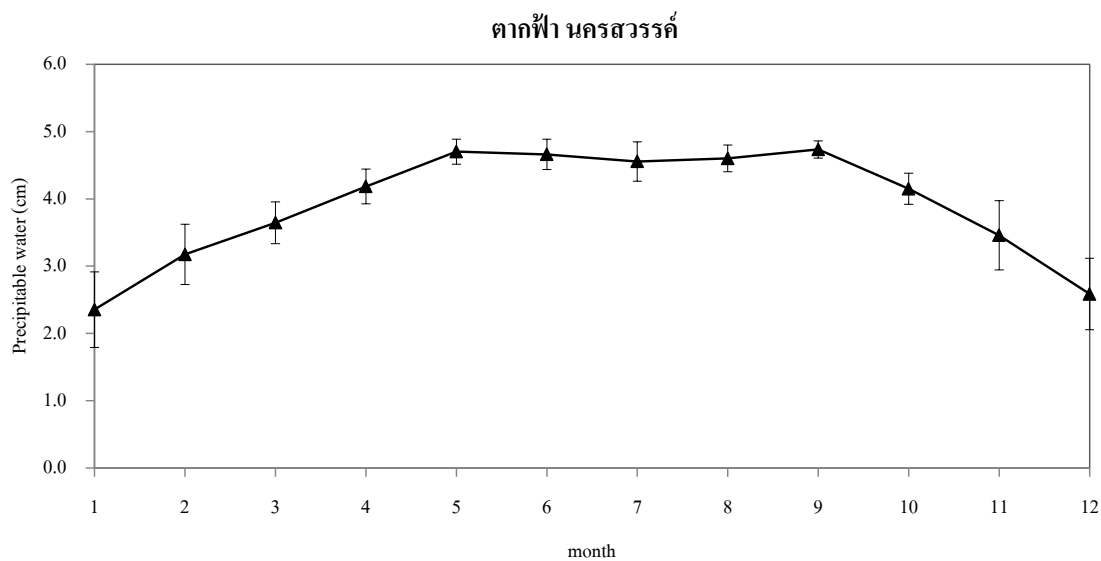
รูปที่ A1.26 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น



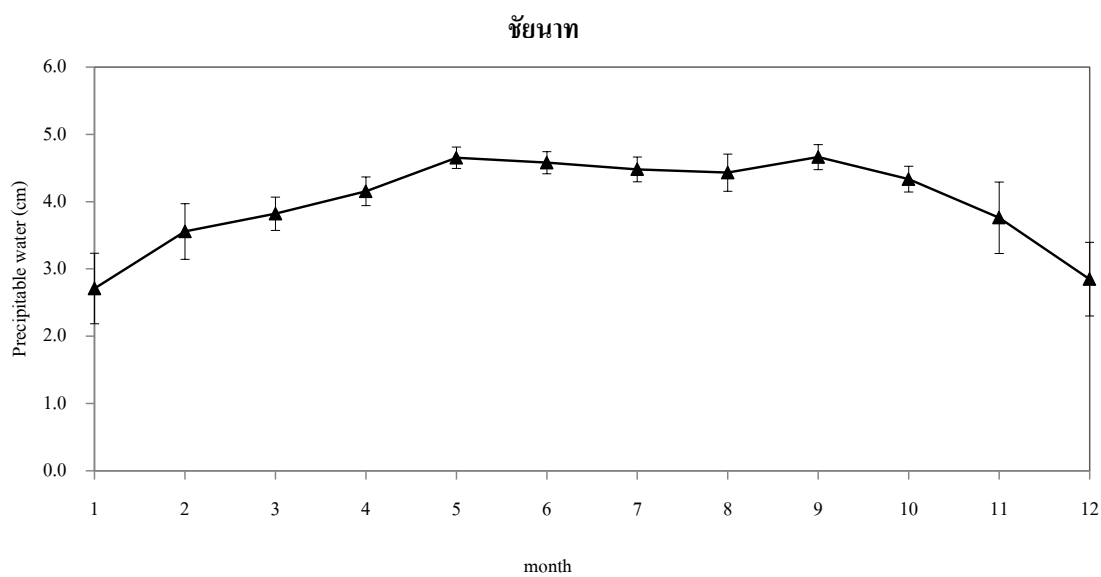
รูปที่ A1.27 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยา มุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร



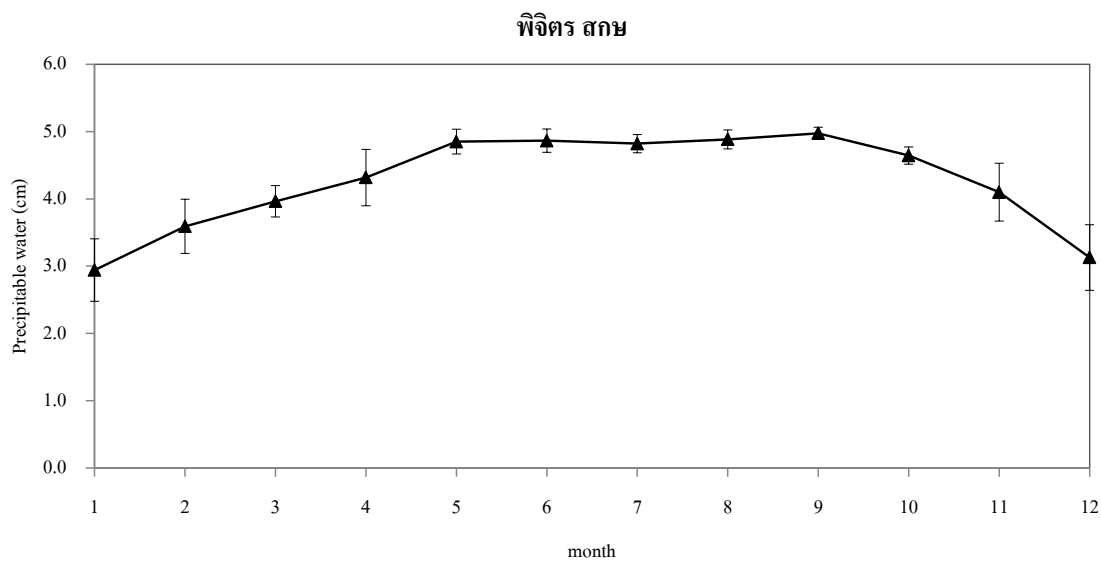
รูปที่ A1.28 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์



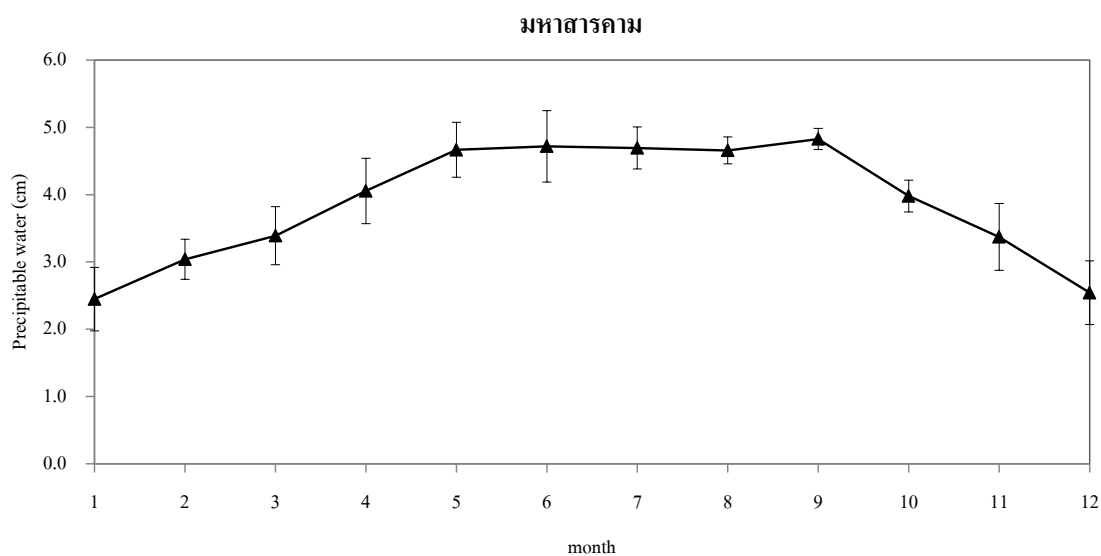
รูปที่ A1.29 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาตากฟ้า อำเภอตากฟ้า จังหวัดนครสวรรค์



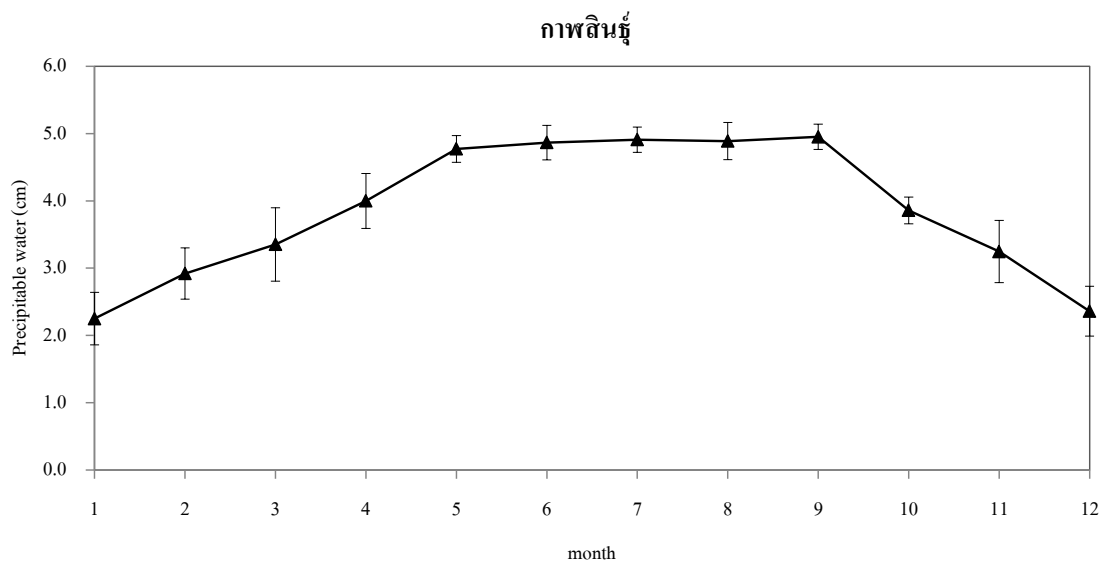
รูปที่ A1.30 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยนาท อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท



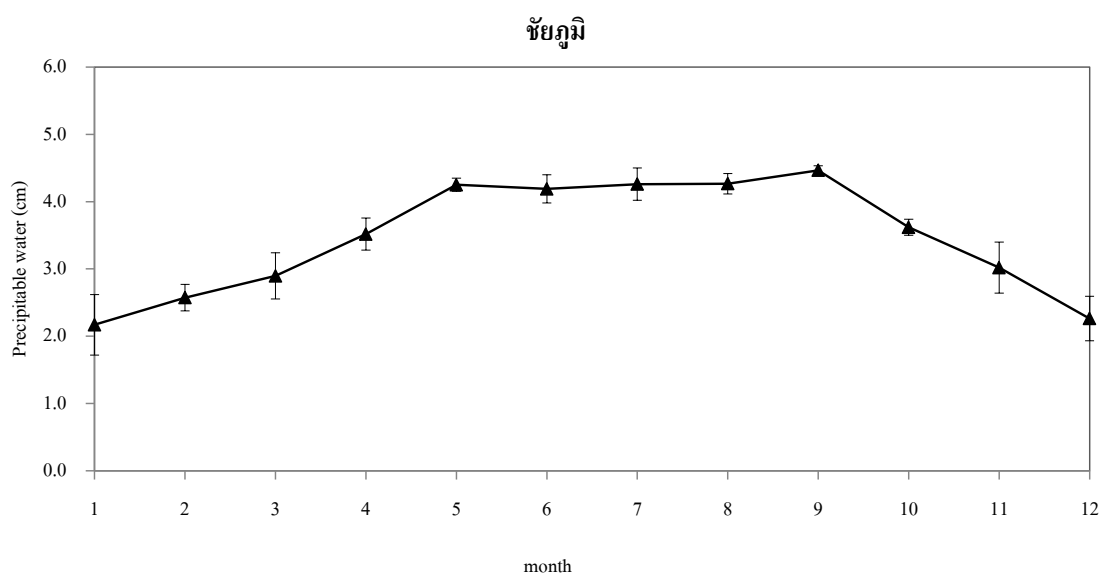
รูปที่ A1.31 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอากาศเกษตรพิจิตร อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร



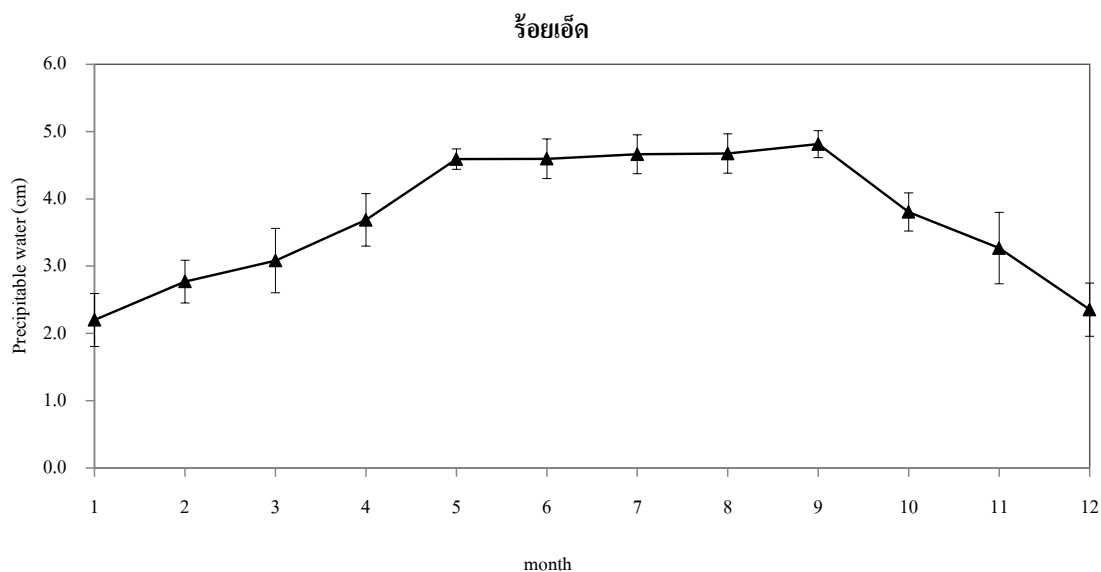
รูปที่ A1.32 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยามหาสารคาม อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม



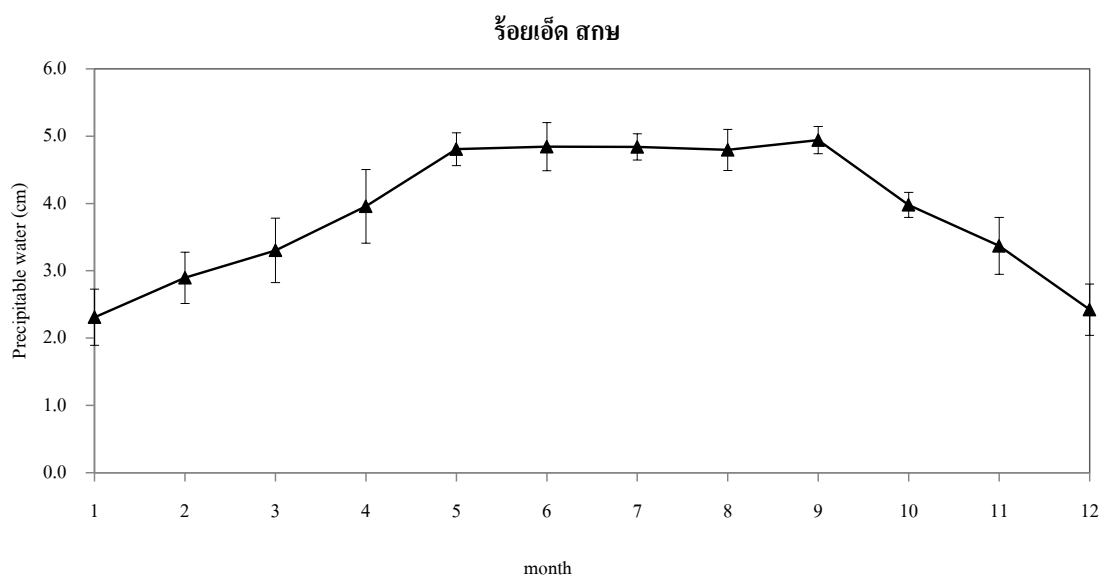
รูปที่ A1.33 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยากาฬสินธุ์ อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์



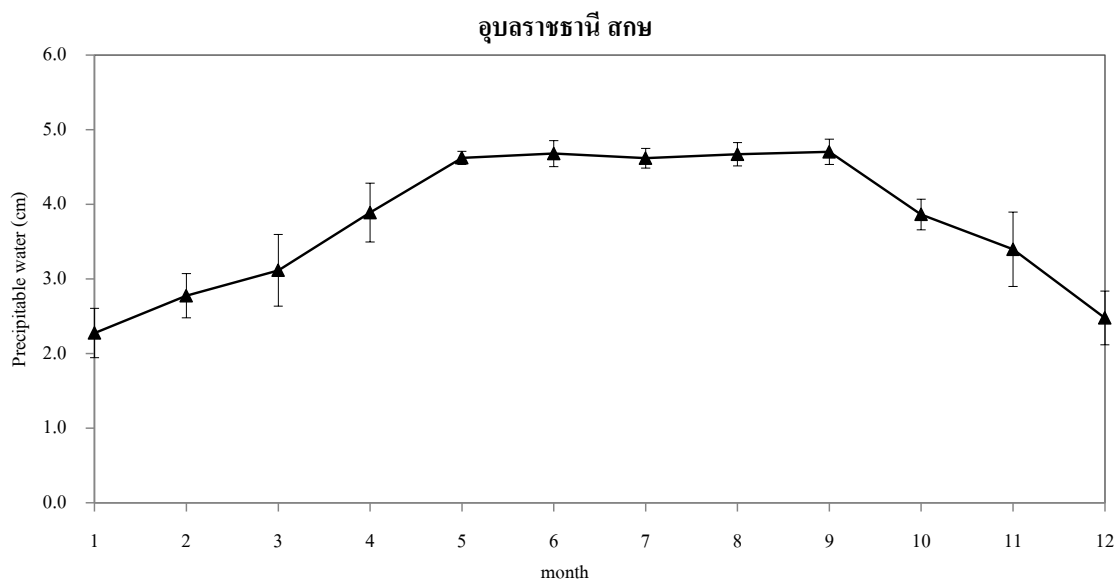
รูปที่ A1.34 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ



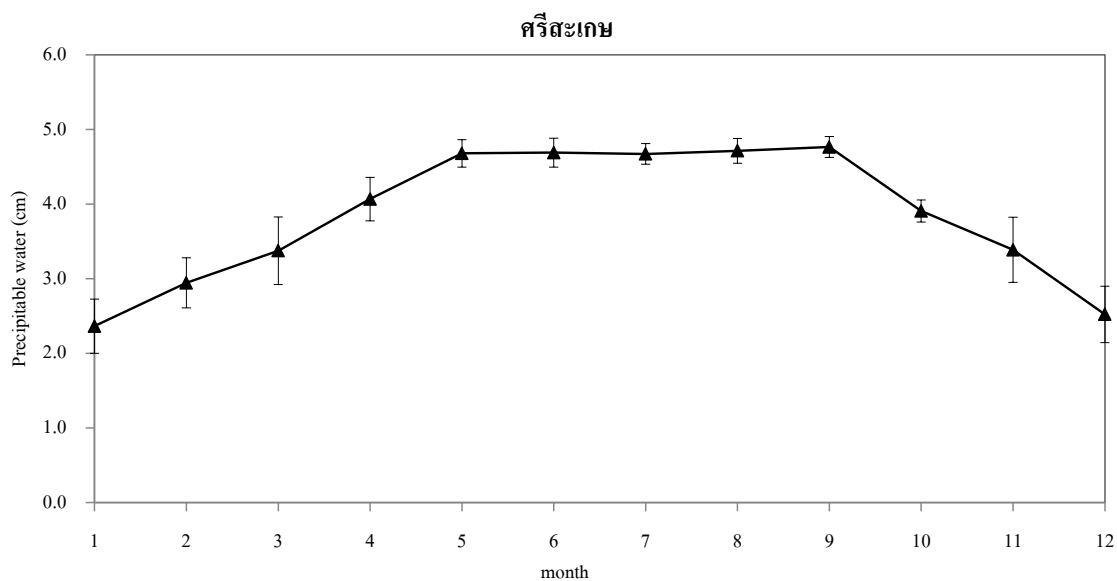
รูปที่ A1.35 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด



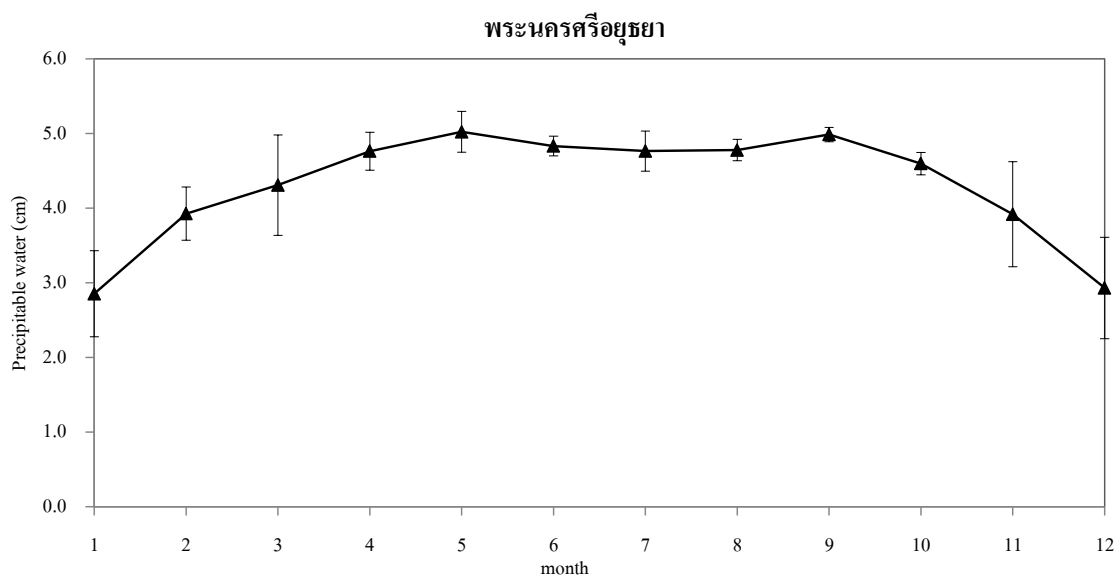
รูปที่ A1.36 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอากาศเกษตรร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด



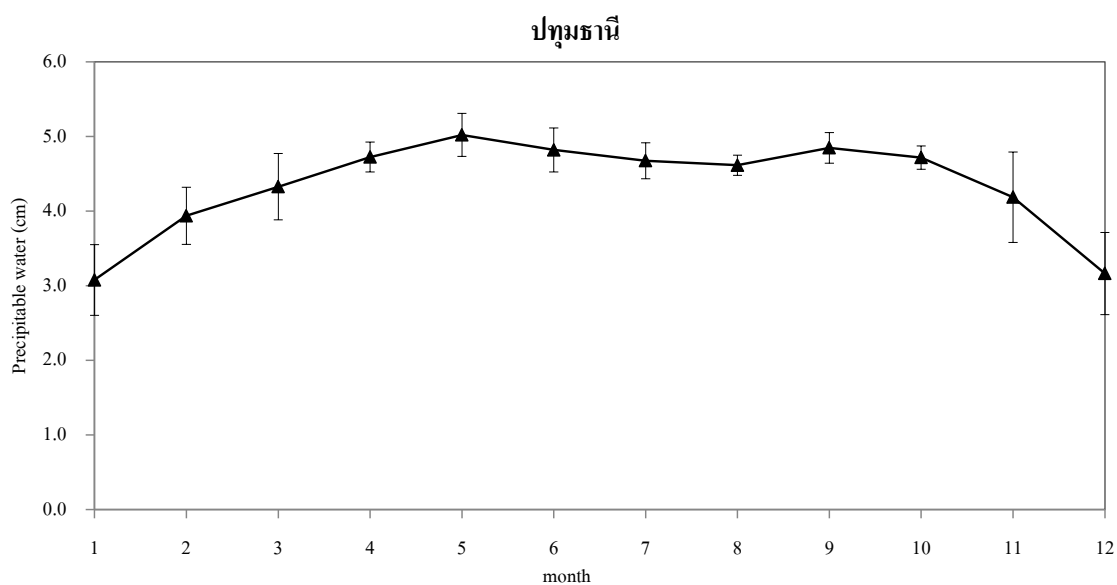
รูปที่ A1.37 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีระวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี



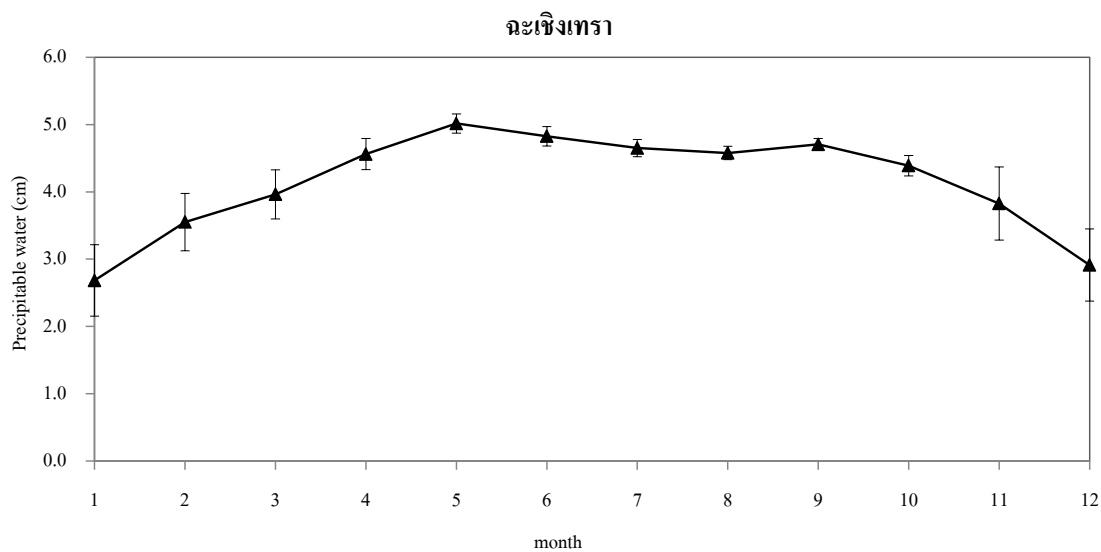
รูปที่ A1.38 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ



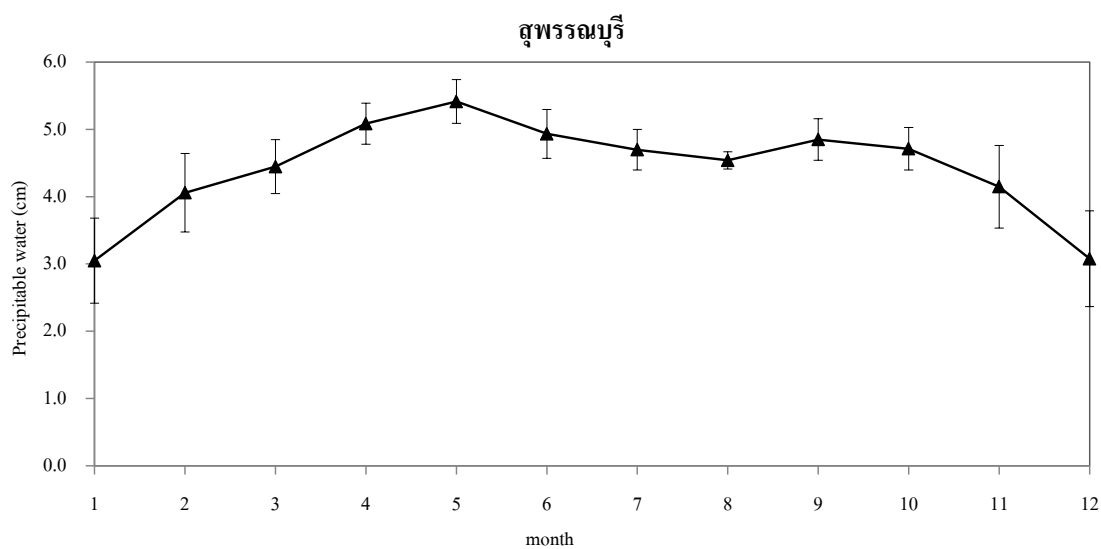
รูปที่ A1.39 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาพระนครศรีอยุธยา อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



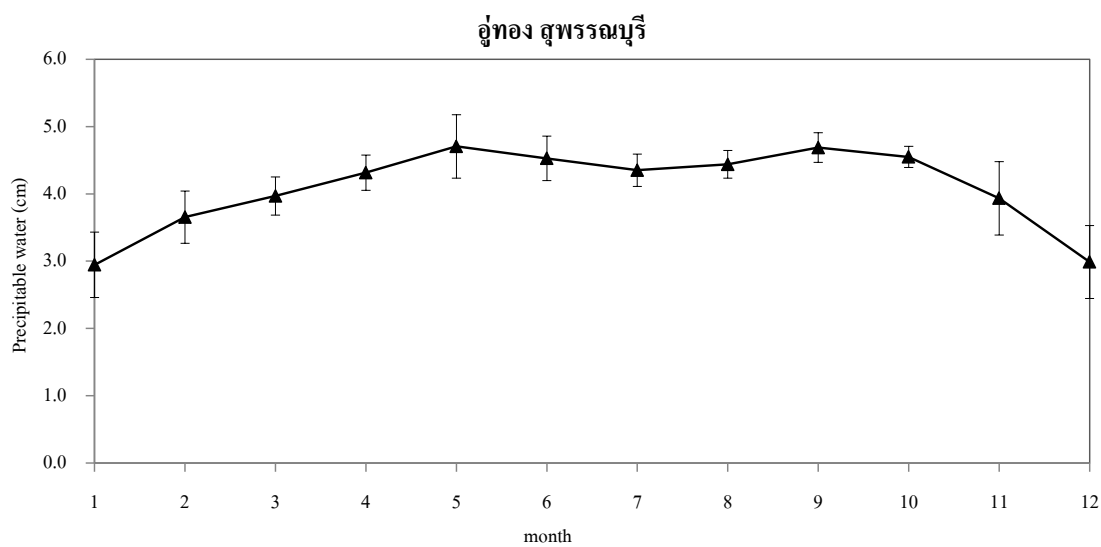
รูปที่ A1.40 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาปทุมธานี อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี



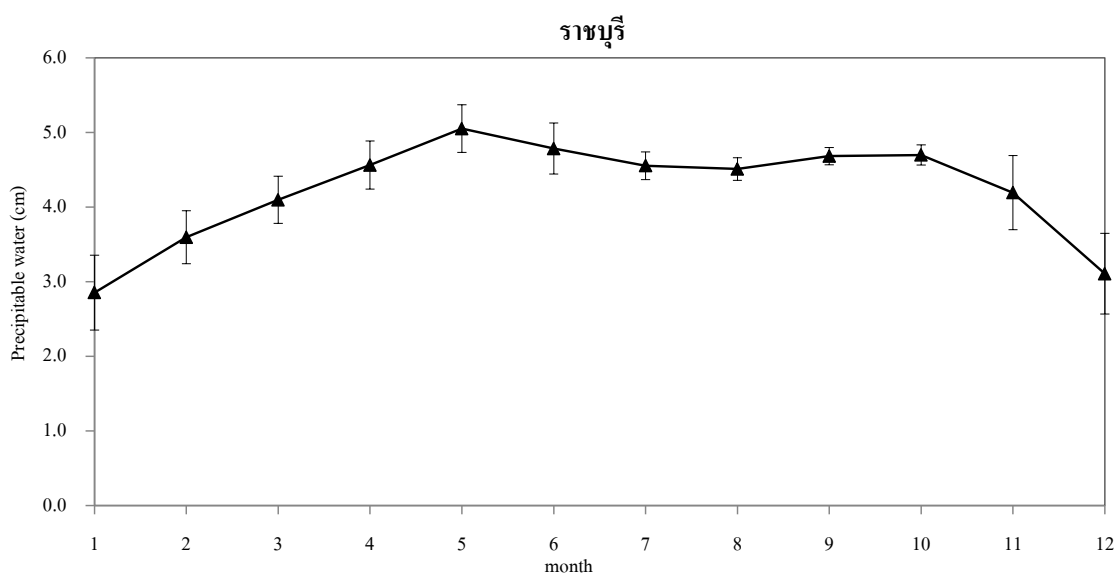
รูปที่ A1.41 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา



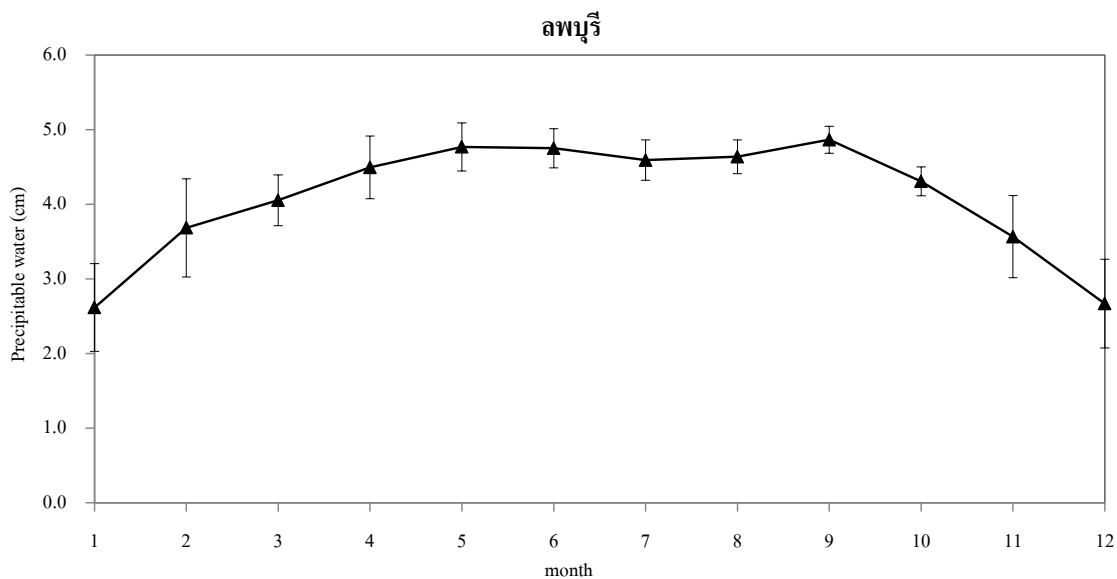
รูปที่ A1.42 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสุพรรณบุรี อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี



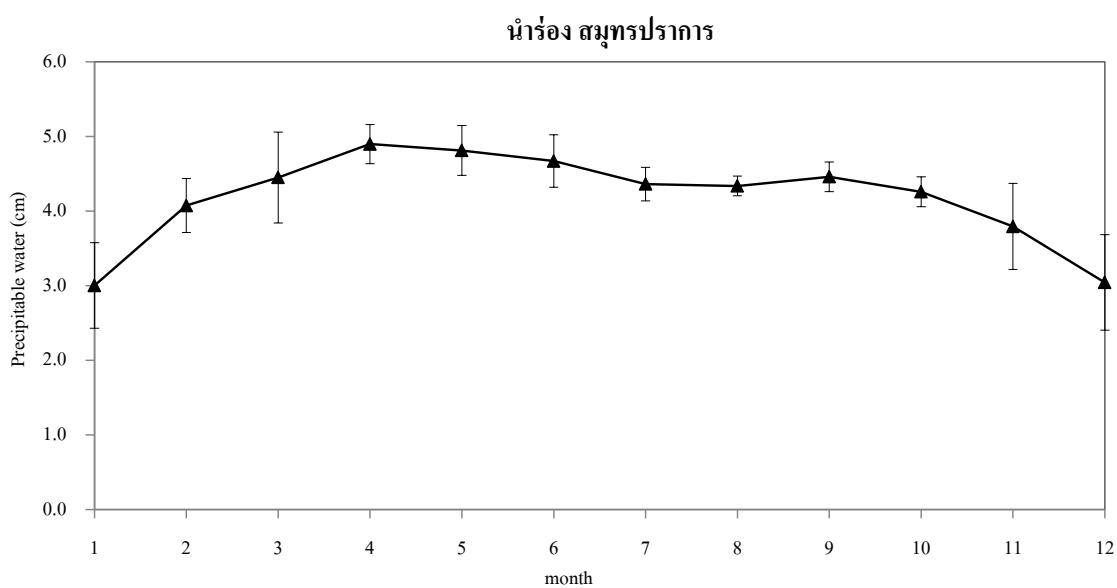
รูปที่ A1.43 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทอง อำเภออุทอง จังหวัดสุพรรณบุรี



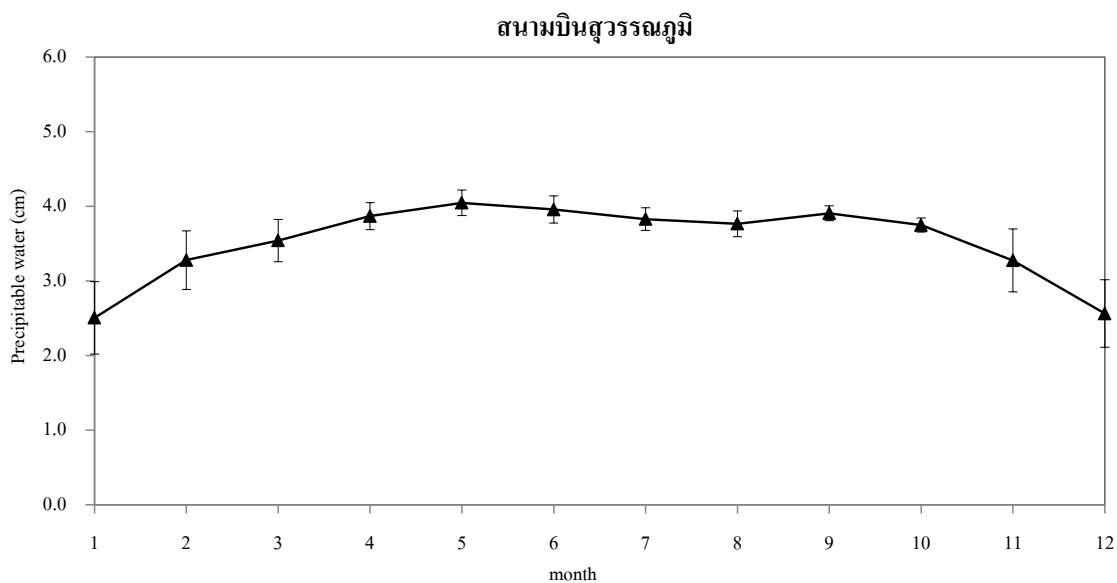
รูปที่ A1.44 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี



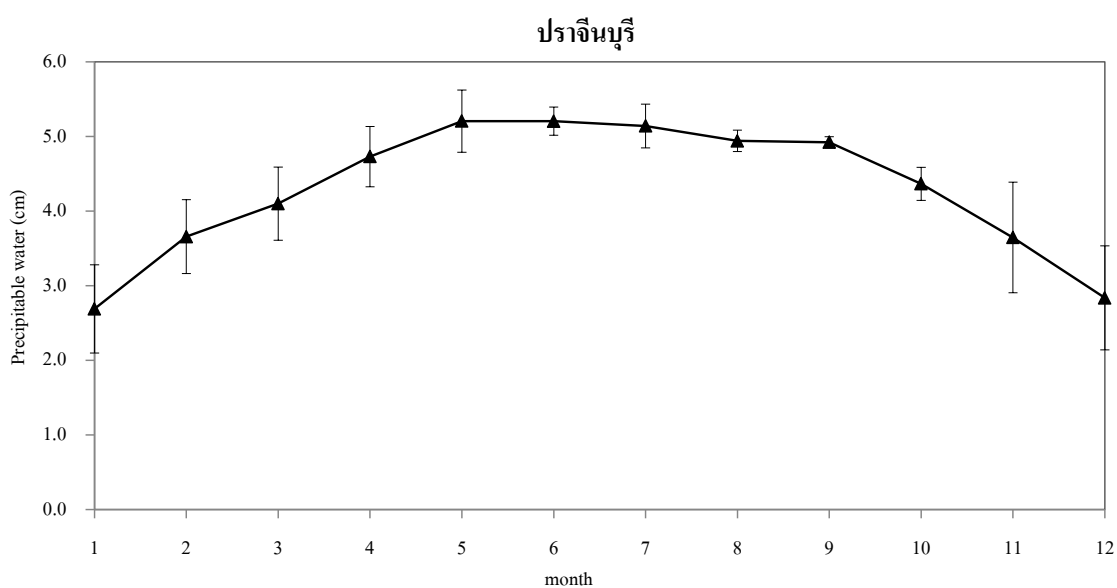
รูปที่ A1.45 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาลพบุรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี



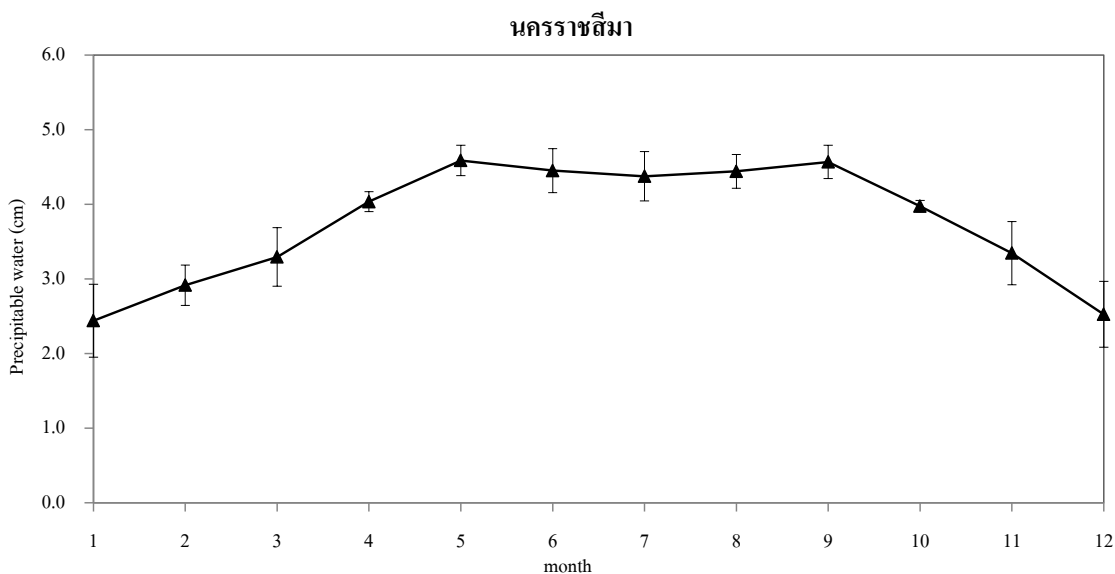
รูปที่ A1.46 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานาร่อง อำเภอนาร่อง จังหวัดสมุทรปราการ



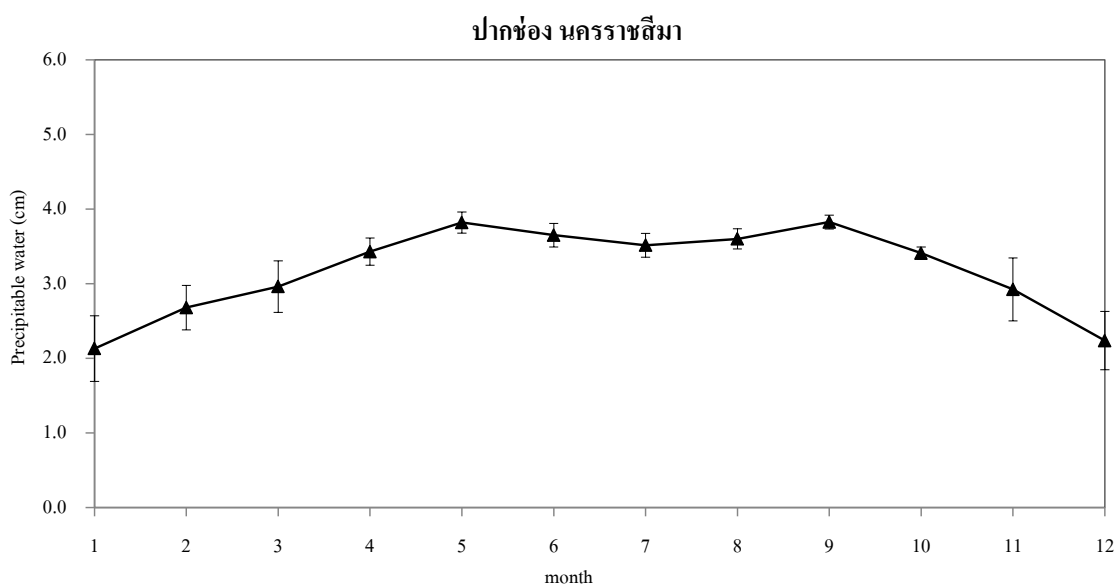
รูปที่ A1.47 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสถาณบึงสุวรรณภูมิ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ



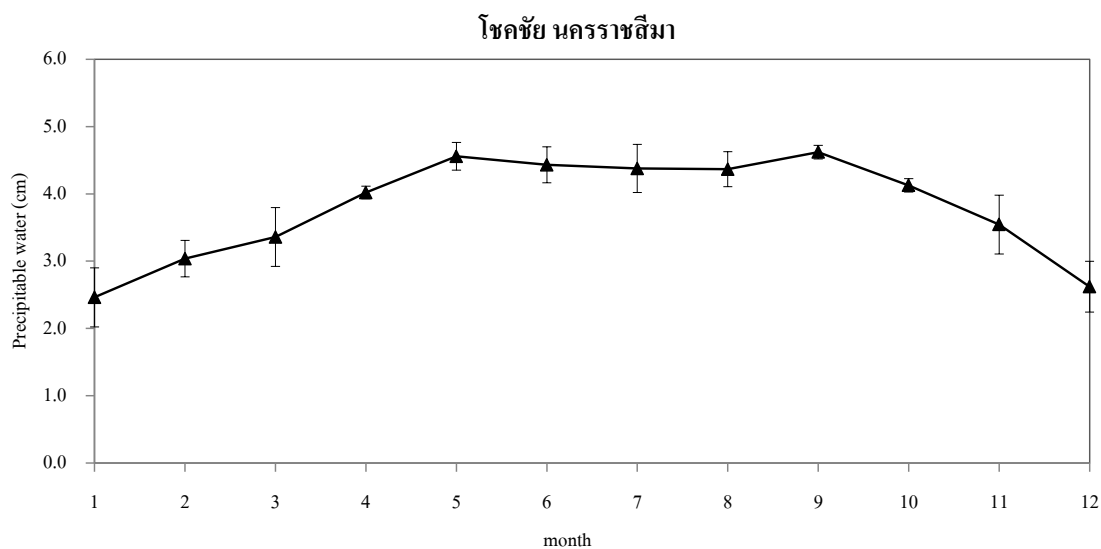
รูปที่ A1.48 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาปราจีนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี



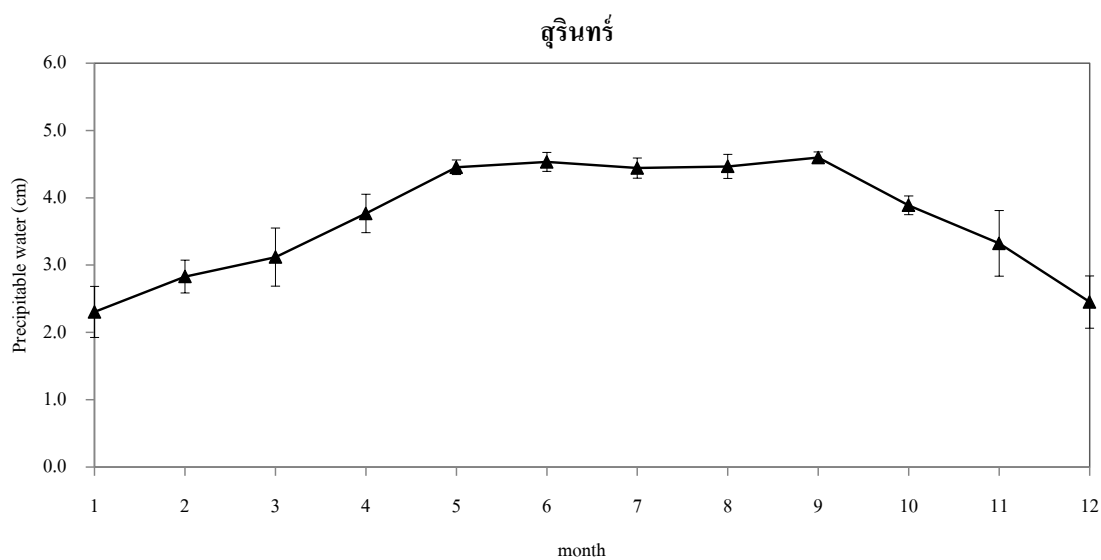
รูปที่ A1.49 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา



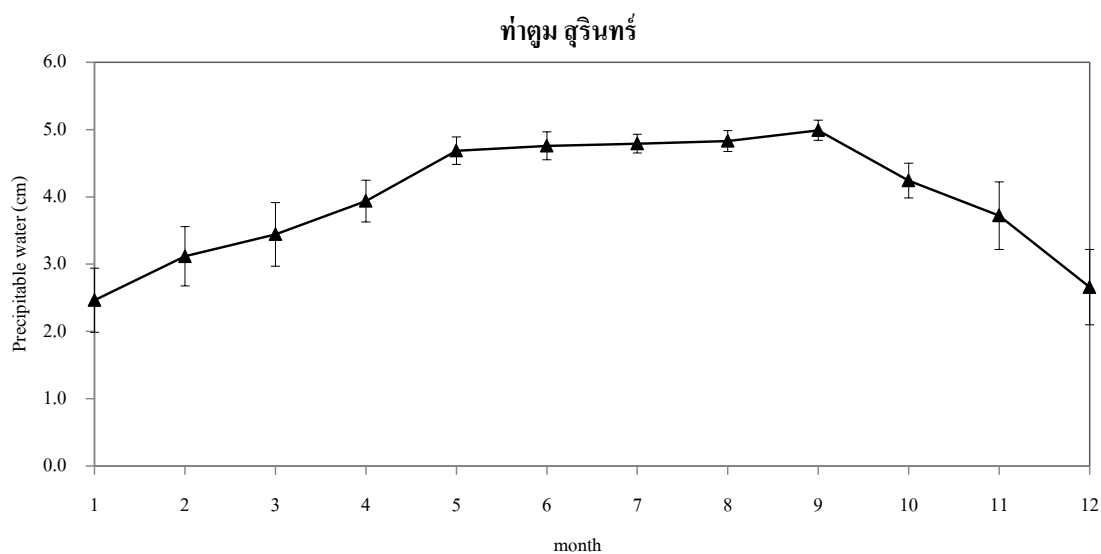
รูปที่ A1.50 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา



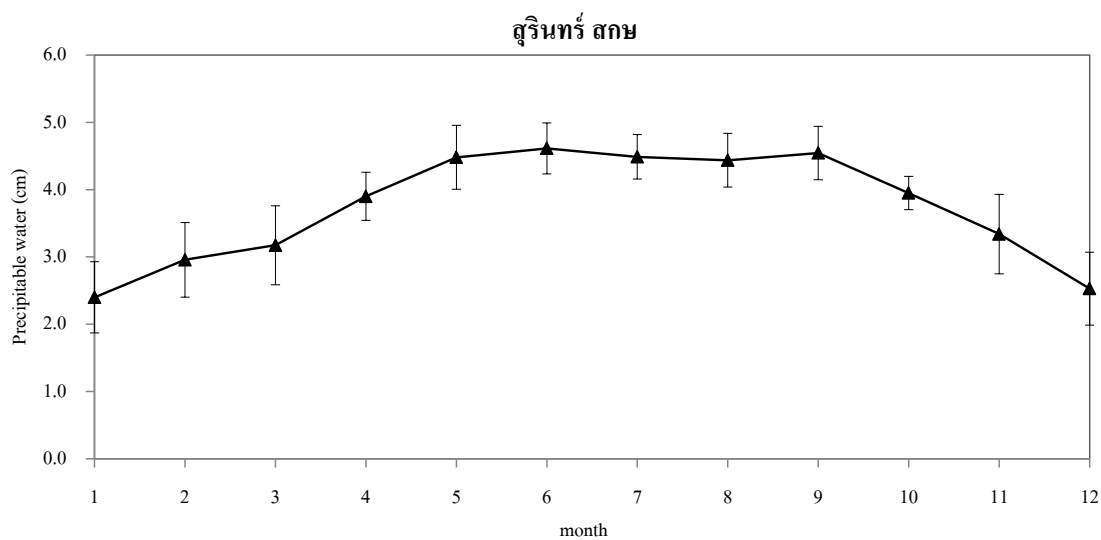
รูปที่ A1.51 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาโชคชัย อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา



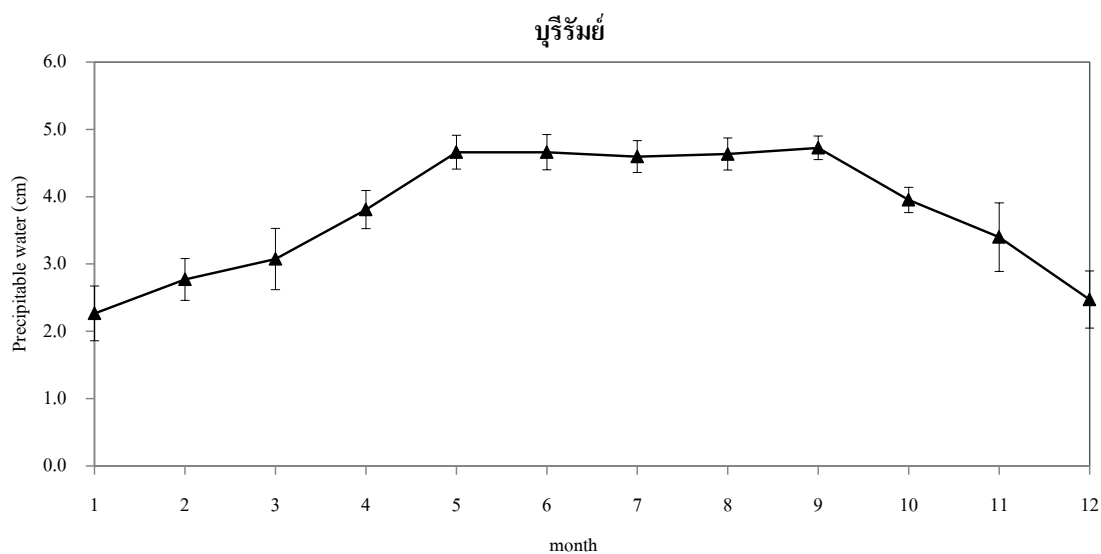
รูปที่ A1.52 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสุรินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์



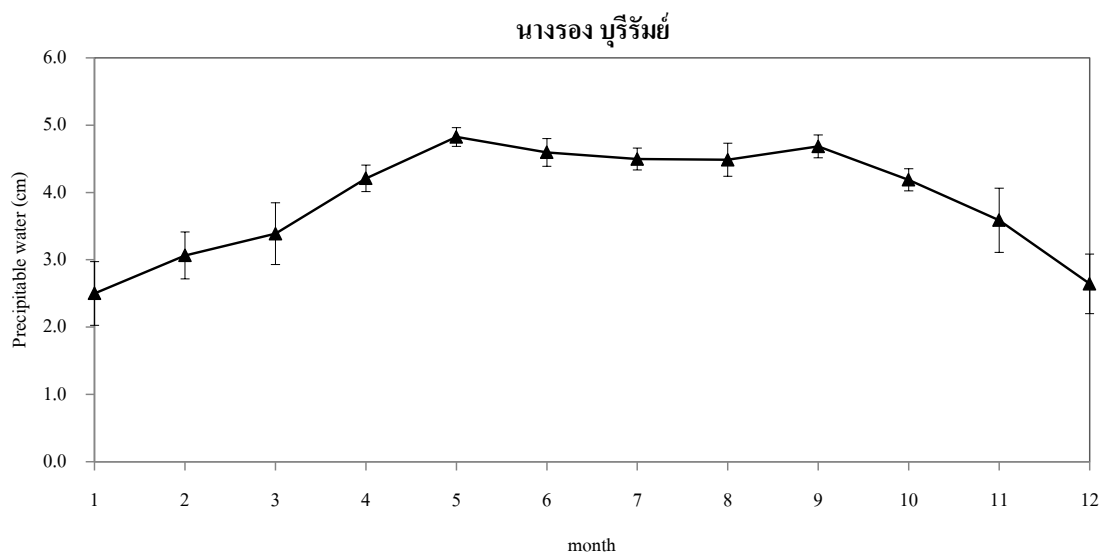
รูปที่ A1.53 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาท่าตูม อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์



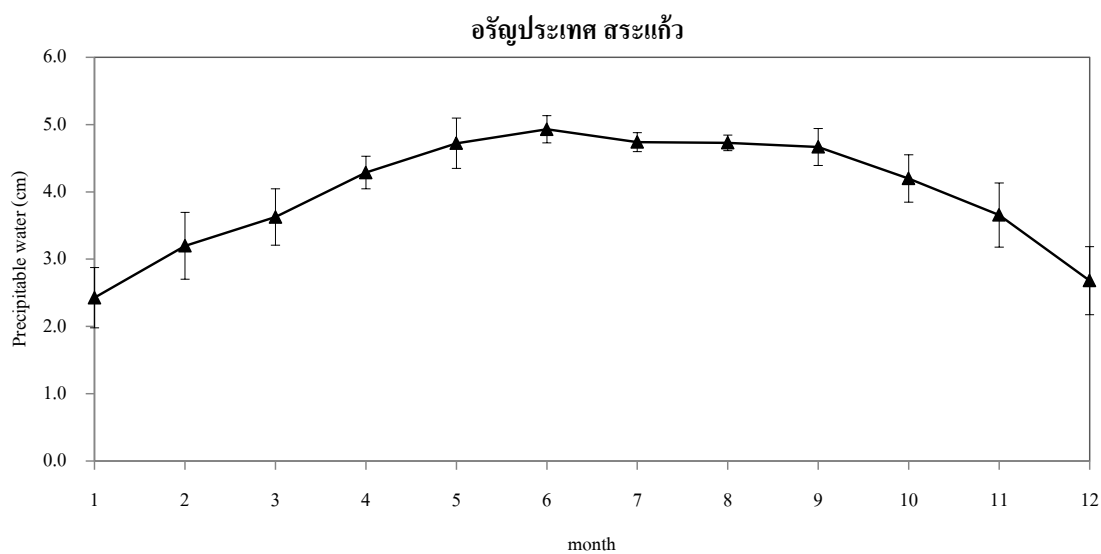
รูปที่ A1.54 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอากาศเกษตรสุรินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์



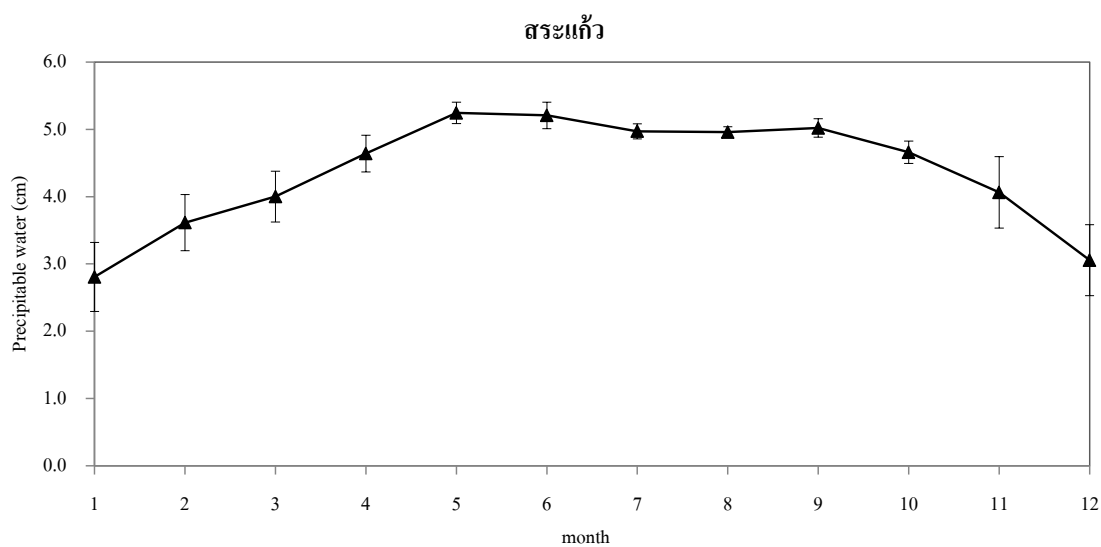
รูปที่ A1.55 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาบุรีรัมย์ อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์



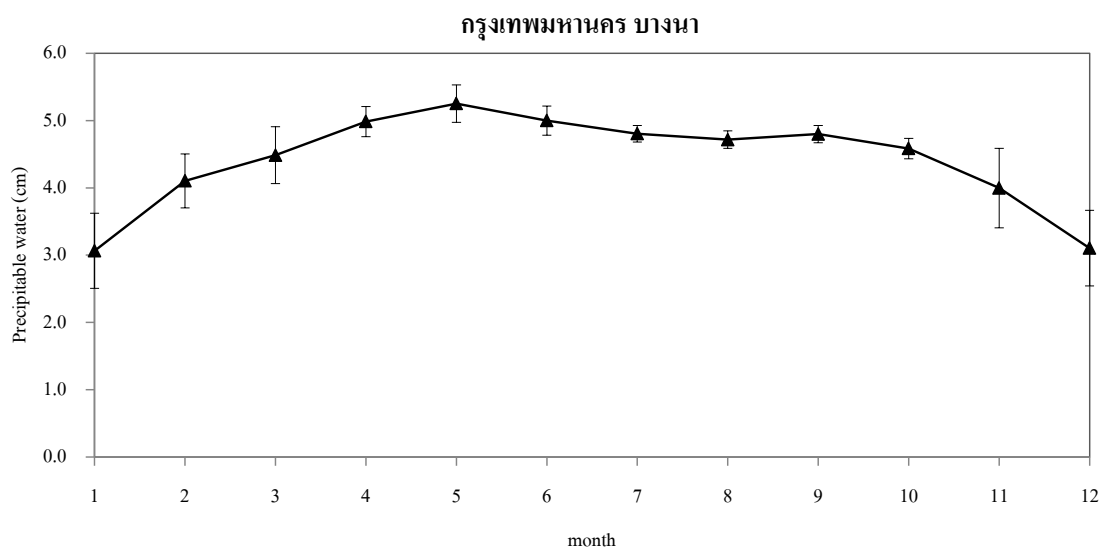
รูปที่ A1.56 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานางรอง อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์



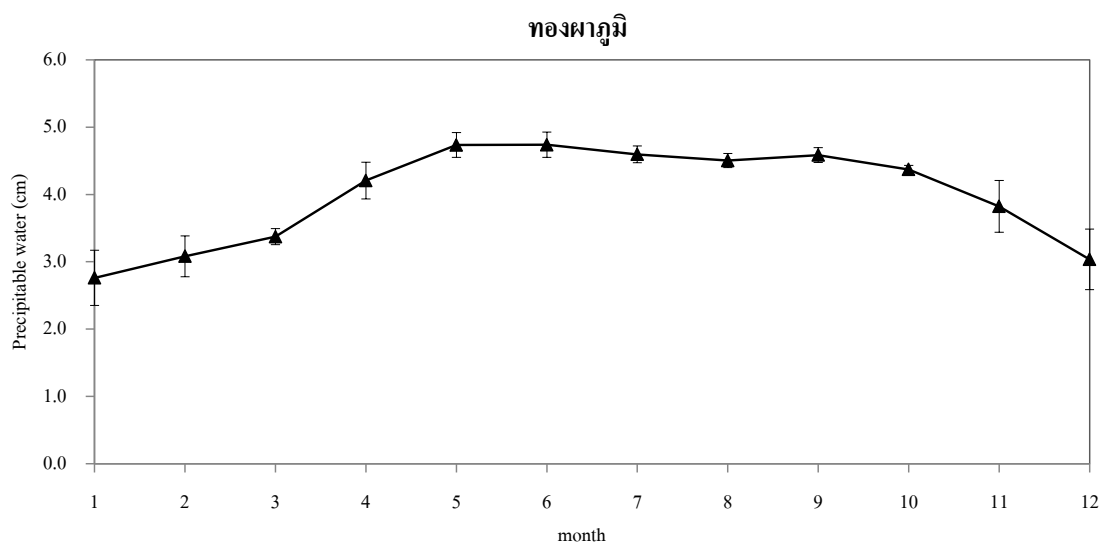
รูปที่ A1.57 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาอรัญประเทศ อำเภออรัญประเทศ จังหวัดสระแก้ว



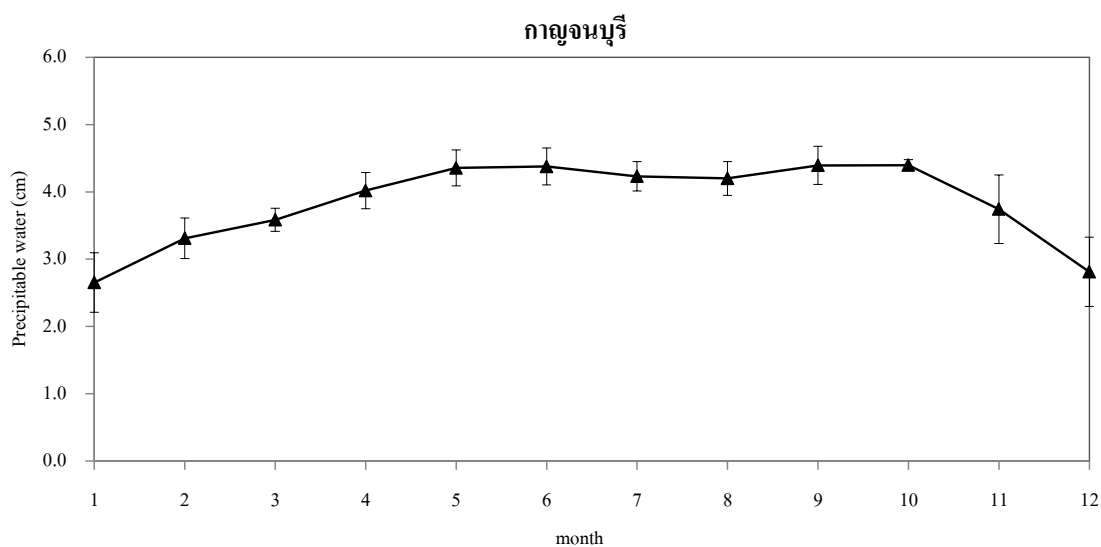
รูปที่ A1.58 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสระแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสระแก้ว



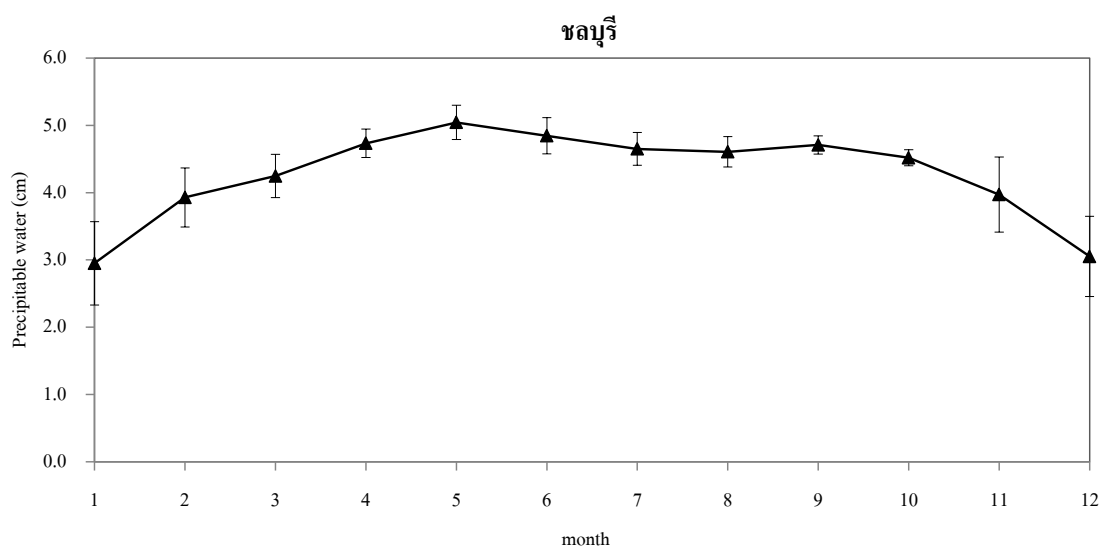
รูปที่ A1.59 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร



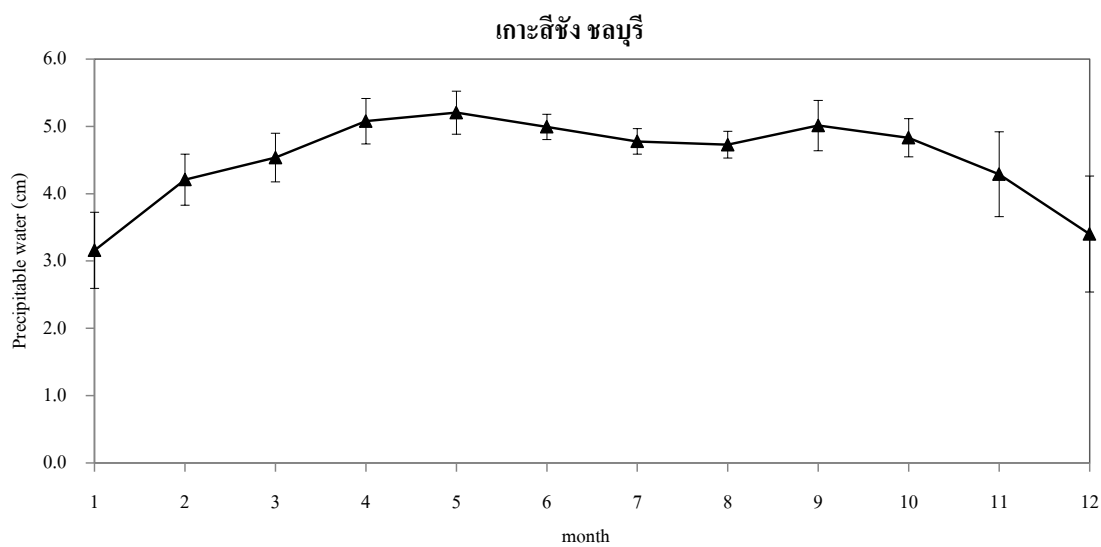
รูปที่ A1.60 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาทองผาภูมิ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี



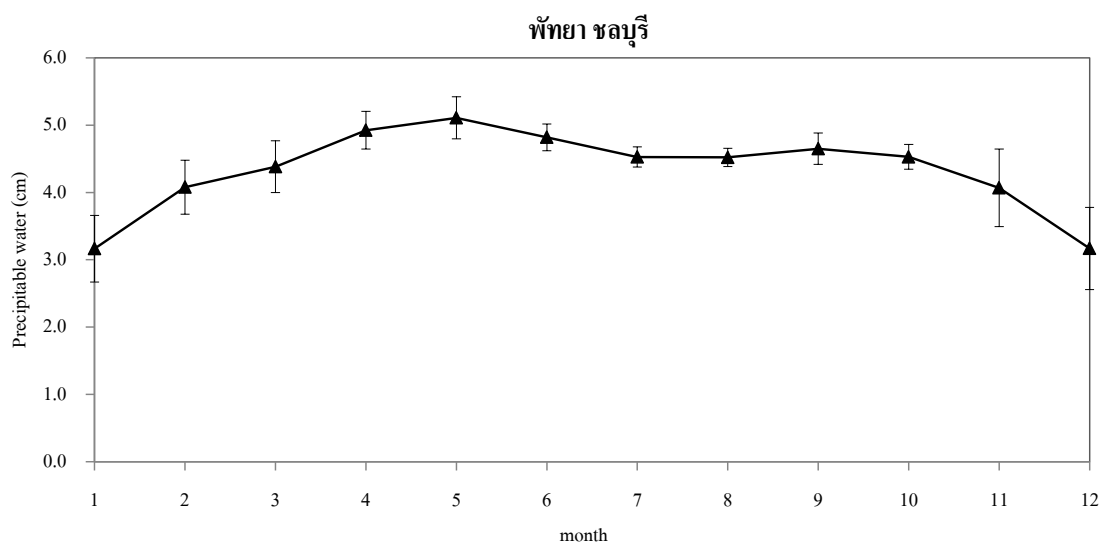
รูปที่ A1.61 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยากาญจนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี



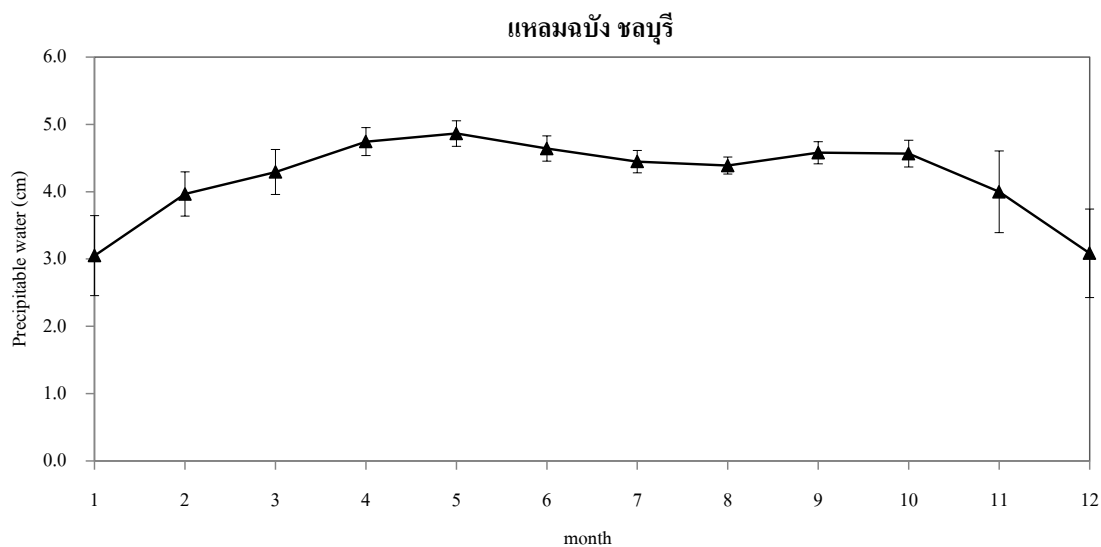
รูปที่ A1.62 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาชลบุรี อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี



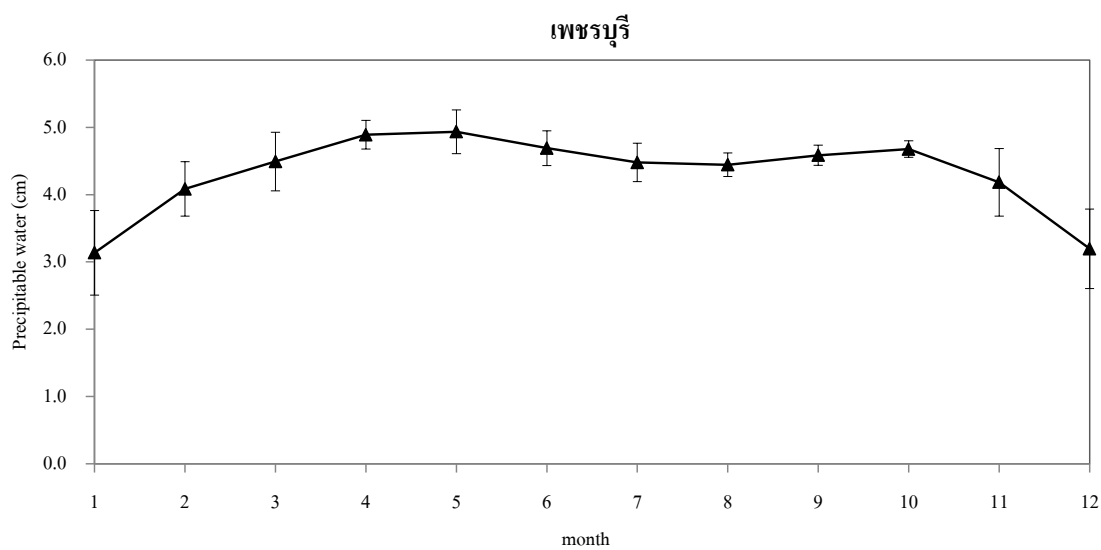
รูปที่ A1.63 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเกาะสีชัง อำเภอกะสีชัง จังหวัดชลบุรี



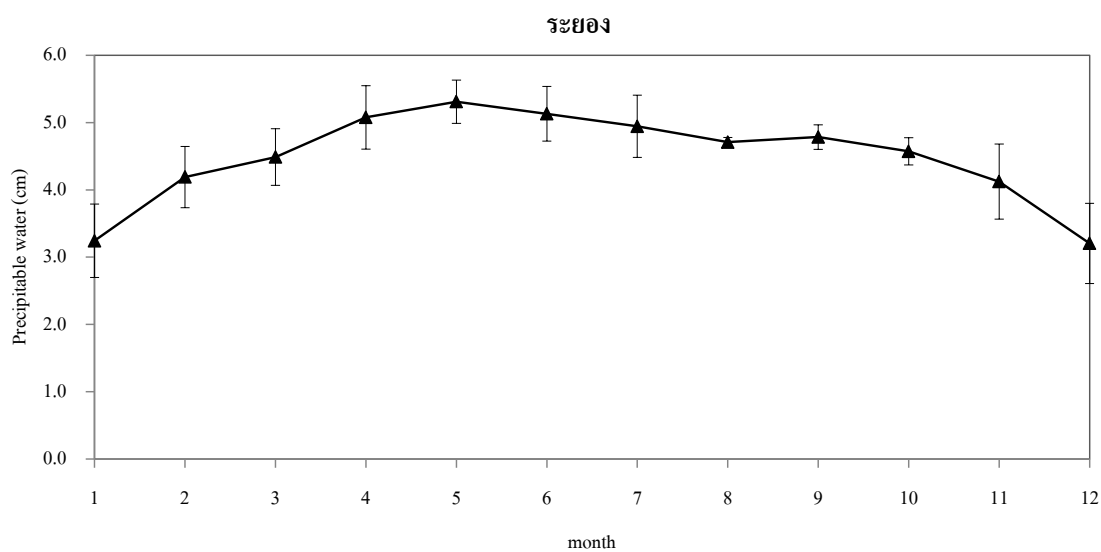
รูปที่ A1.64 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาพัทยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี



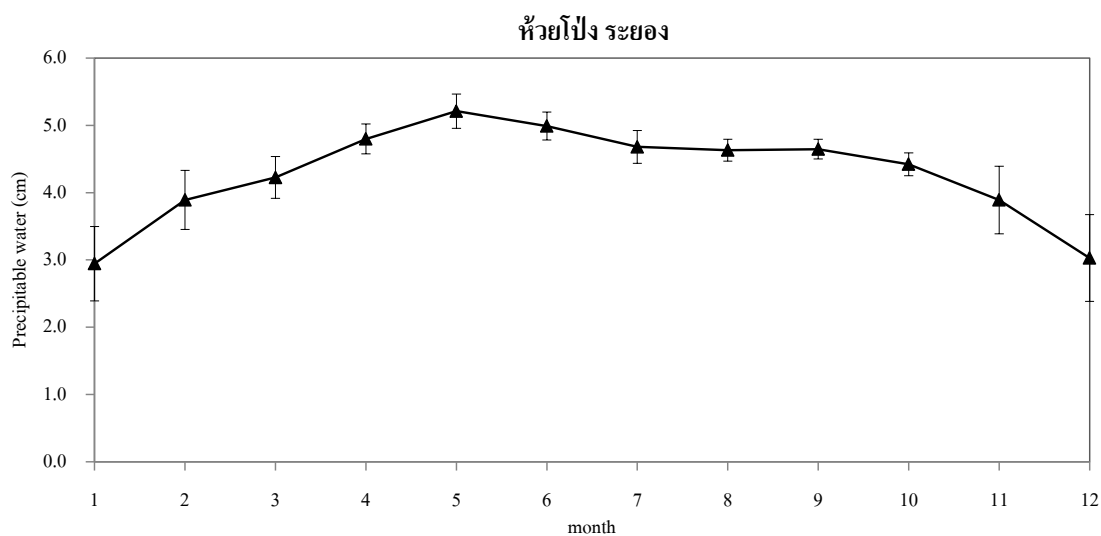
รูปที่ A1.65 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี



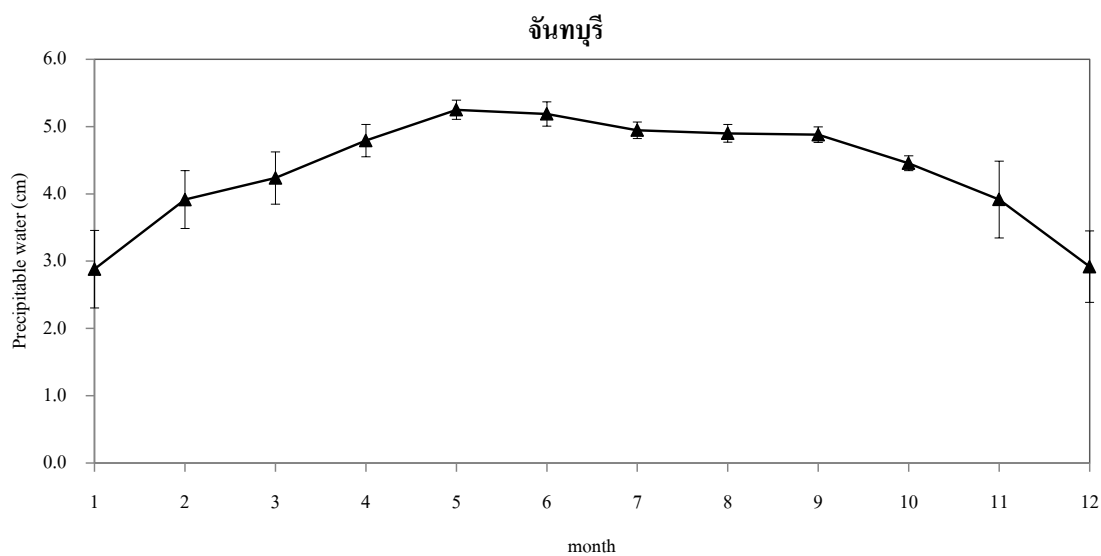
รูปที่ A1.66 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี



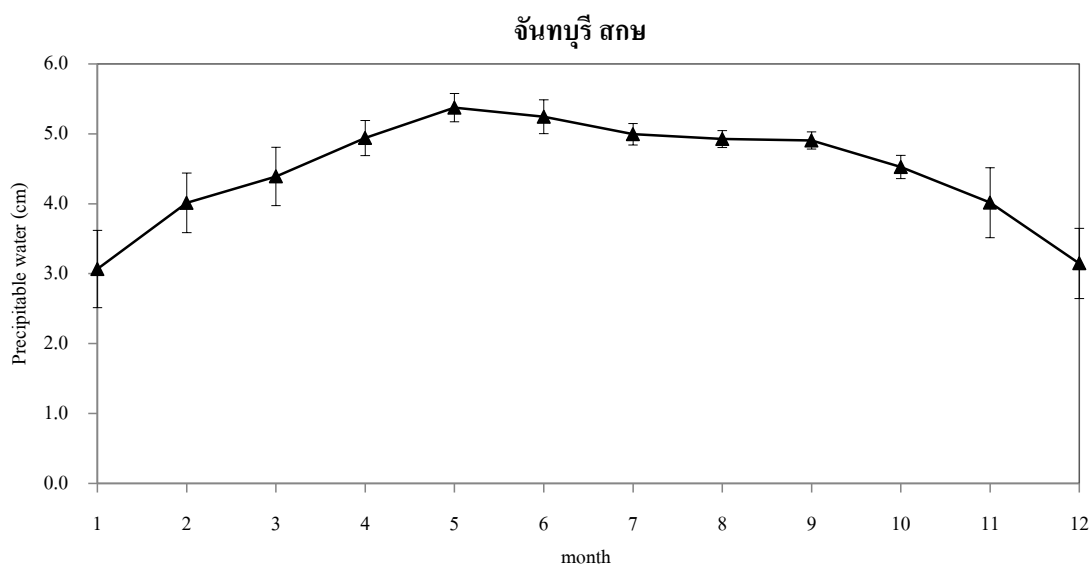
รูปที่ A1.67 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาระยอง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง



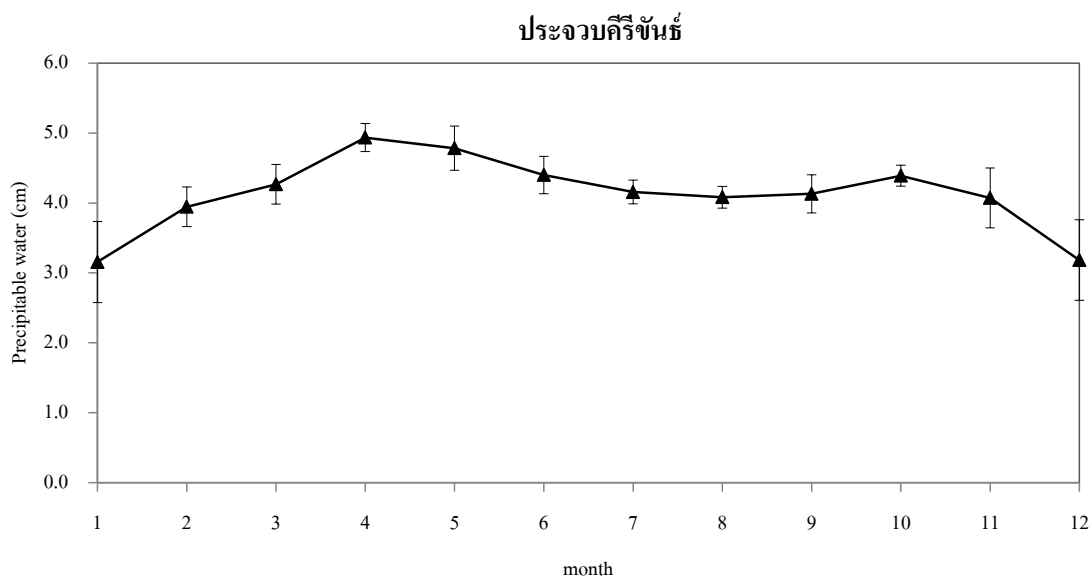
รูปที่ A1.68 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาห้วยโป่ง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง



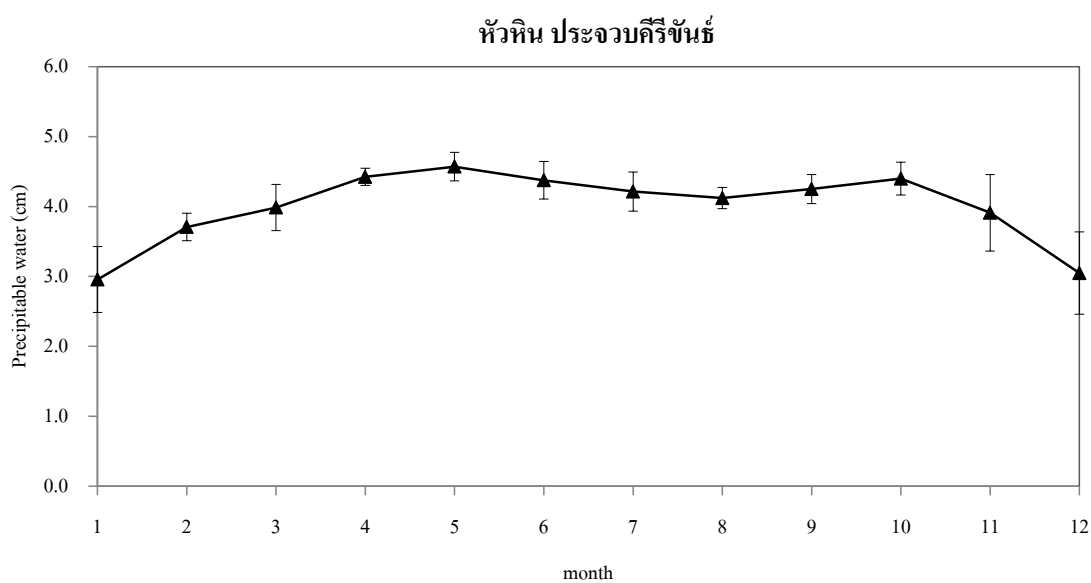
รูปที่ A1.69 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาจันทบุรี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี



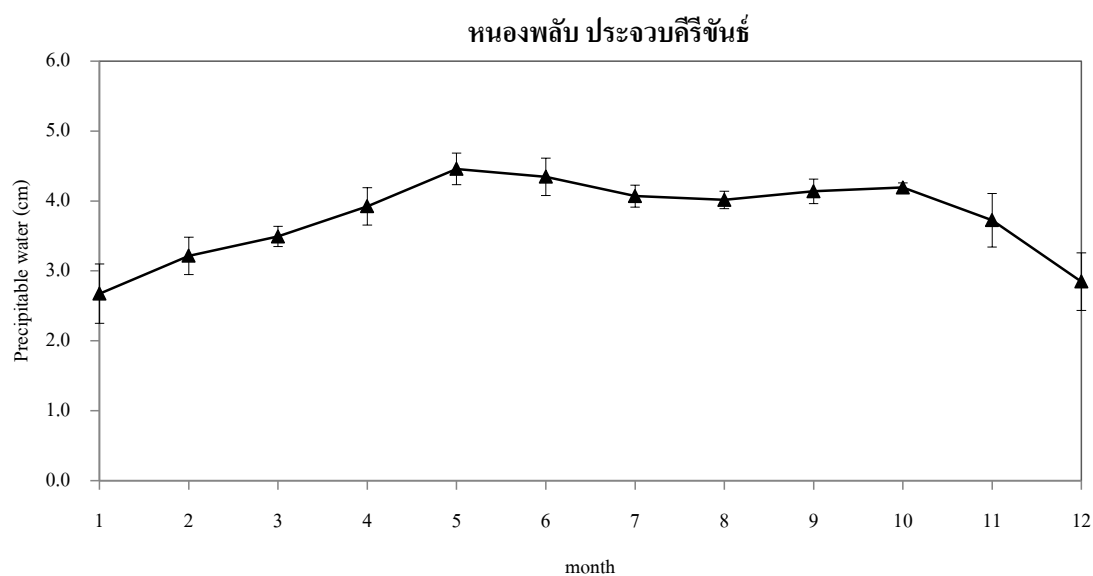
รูปที่ A1.70 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอากาศเกษตรจันทบุรี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี



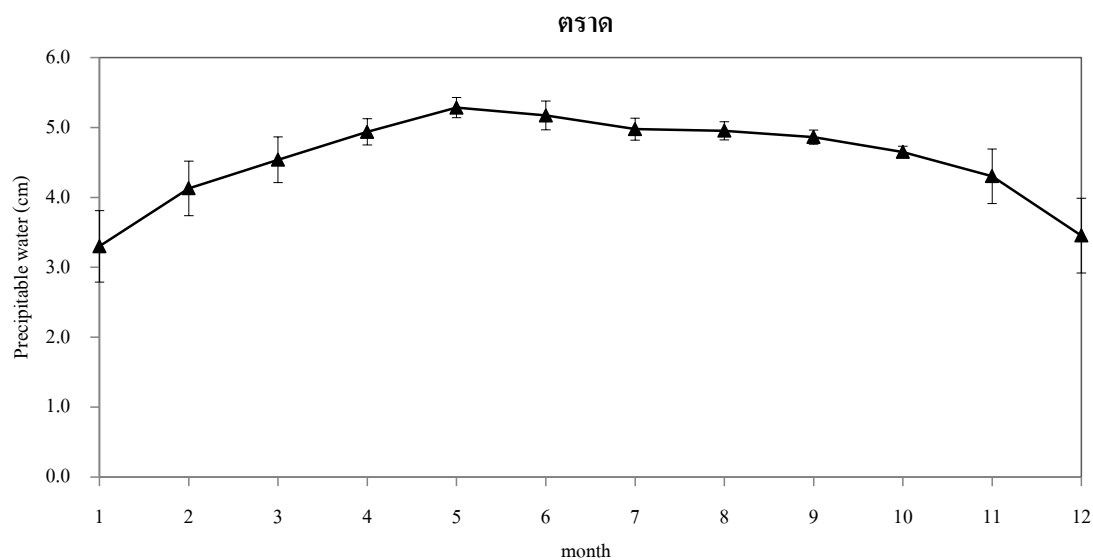
รูปที่ A1.71 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาประจวบคีรีขันธ์ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



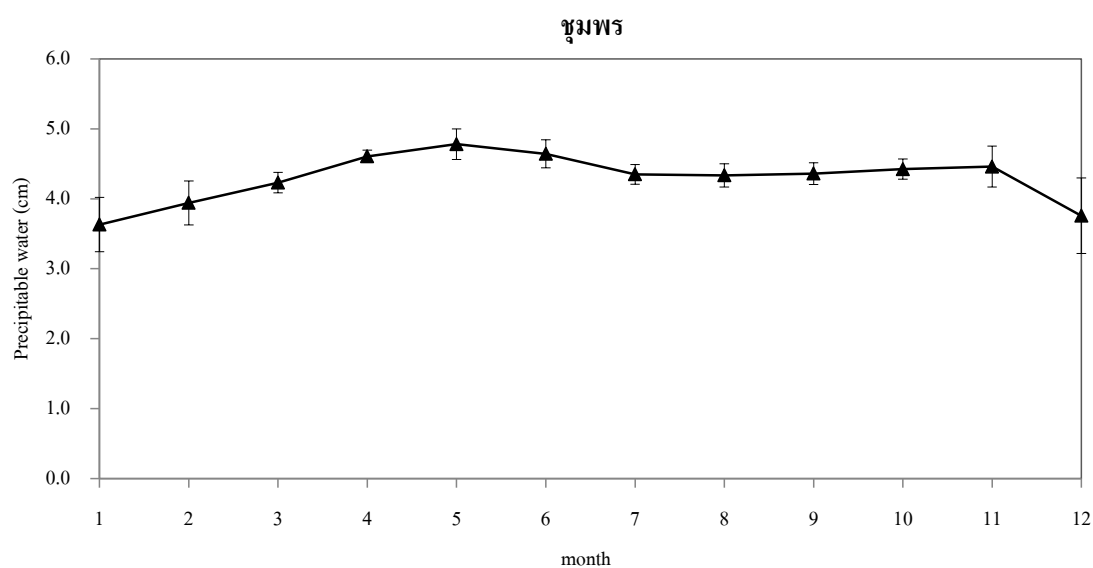
รูปที่ A1.72 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาหัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



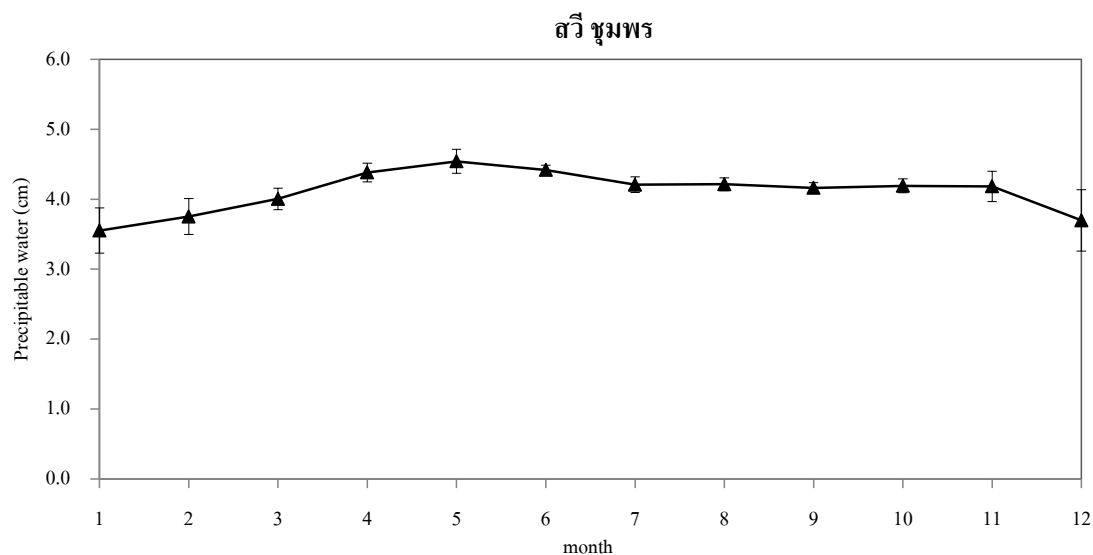
รูปที่ A1.73 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาหนองพลับ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



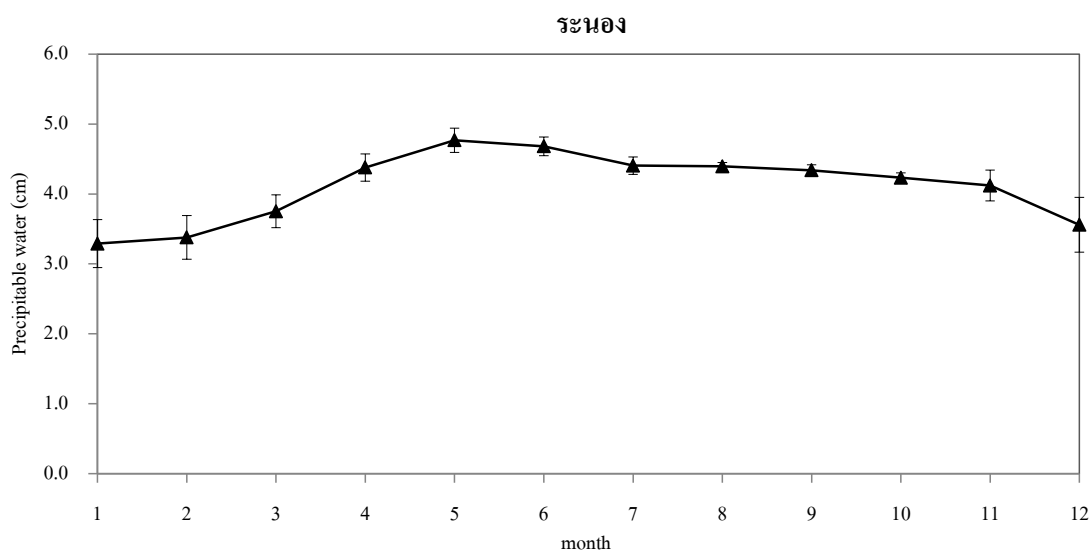
รูปที่ A1.74 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาตราด อำเภอคลองใหญ่ จังหวัดตราด



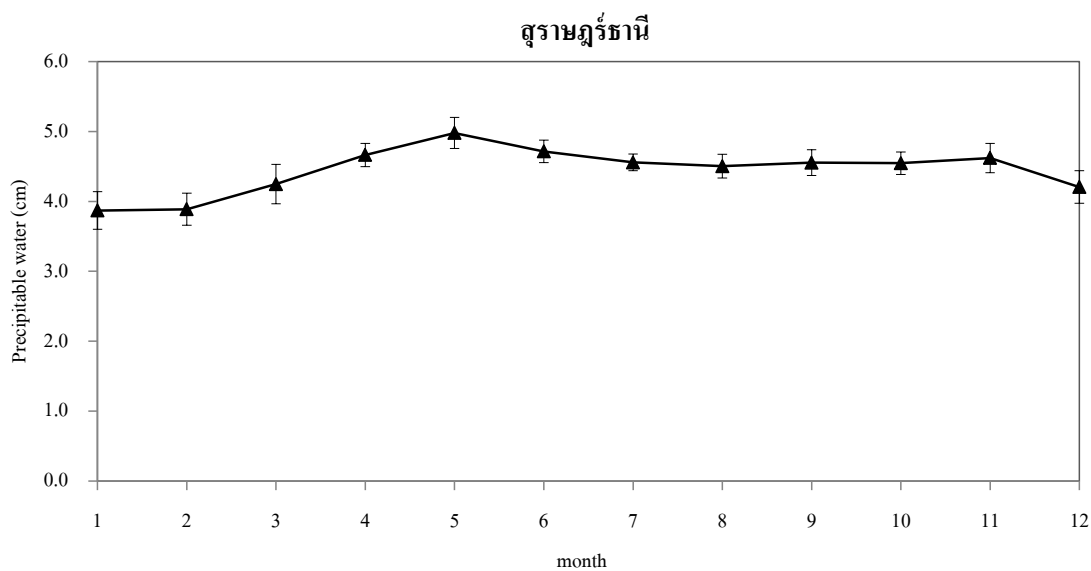
รูปที่ A1.75 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาชุมพร อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร



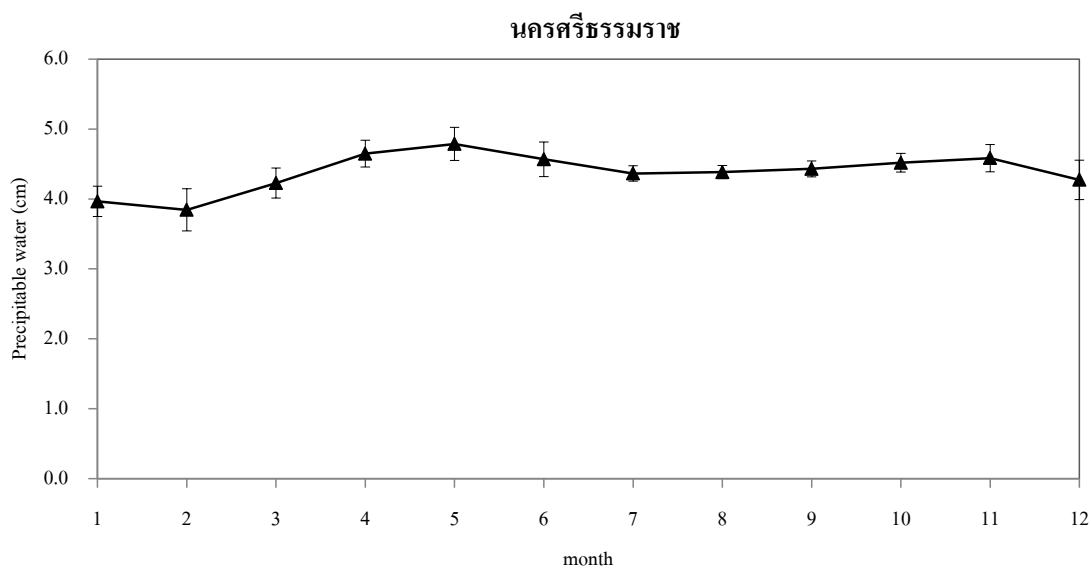
รูปที่ A1.76 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสวี อำเภอสวี จังหวัดชุมพร



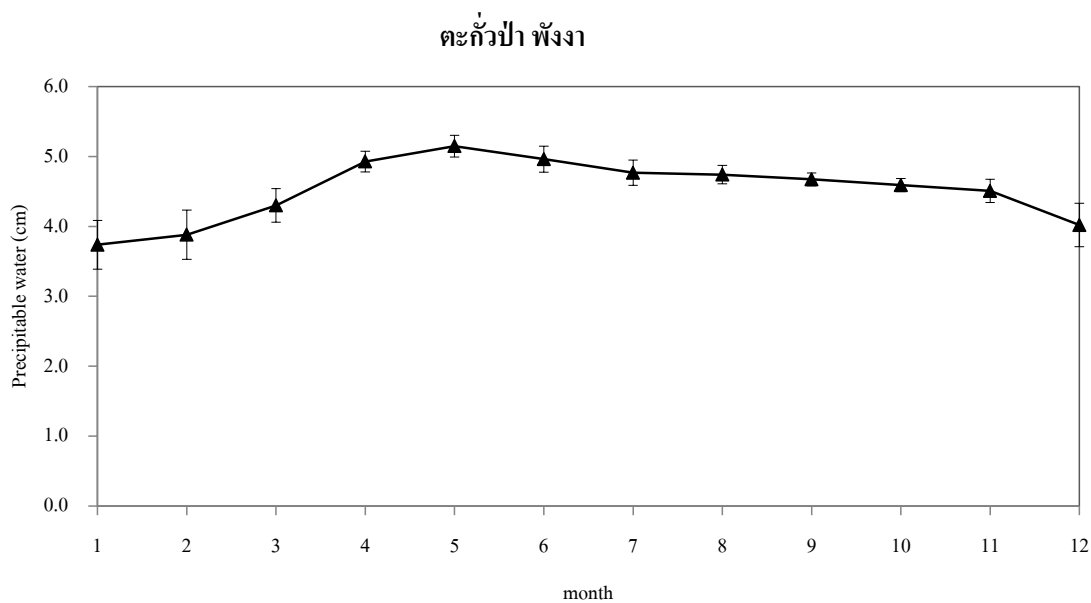
รูปที่ A1.77 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาระนอง อำเภอเมือง จังหวัดระนอง



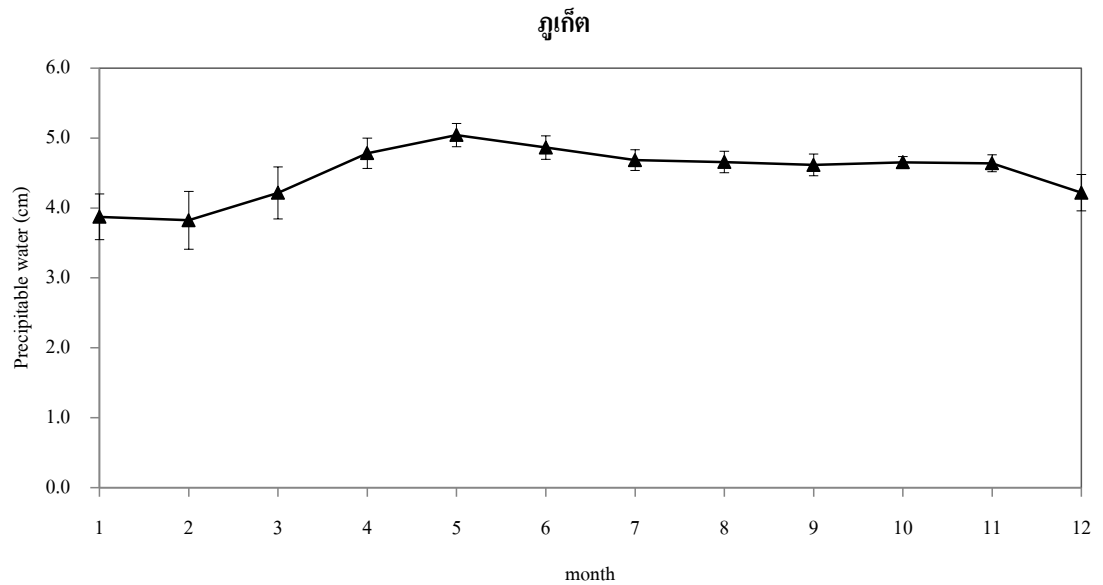
รูปที่ A1.78 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาสุราษฎร์ธานี อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี



รูปที่ A1.79 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยานครศรีธรรมราช อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช



รูปที่ A1.80 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาตะกั่วป่า อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา

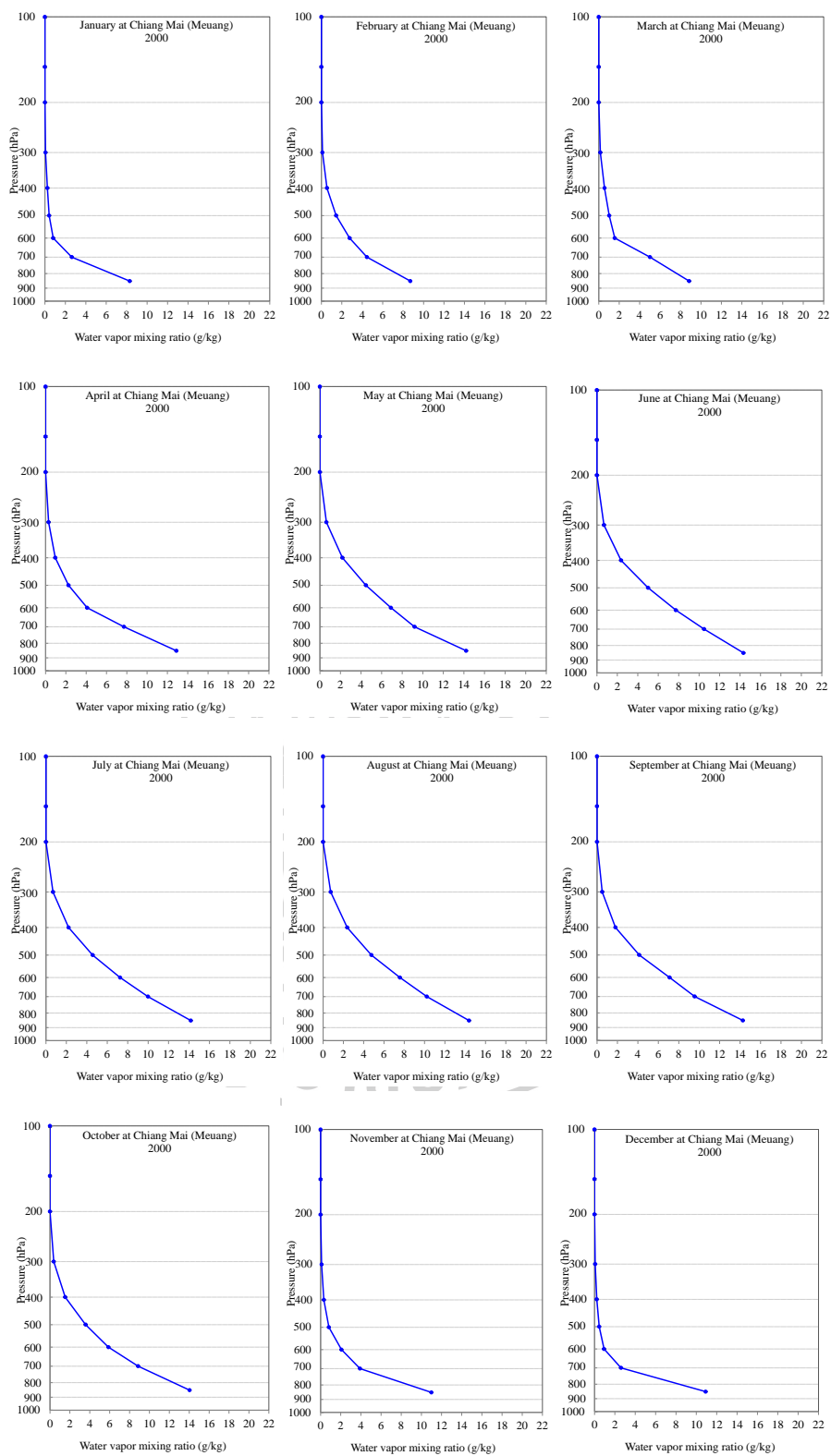


รูปที่ A1.81 การแปรค่าตามเวลาในรอบปีของ Precipitable water (cm) รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่
สถานีอุตุนิยมวิทยาภูเก็ต อำเภอถลาง จังหวัดภูเก็ต

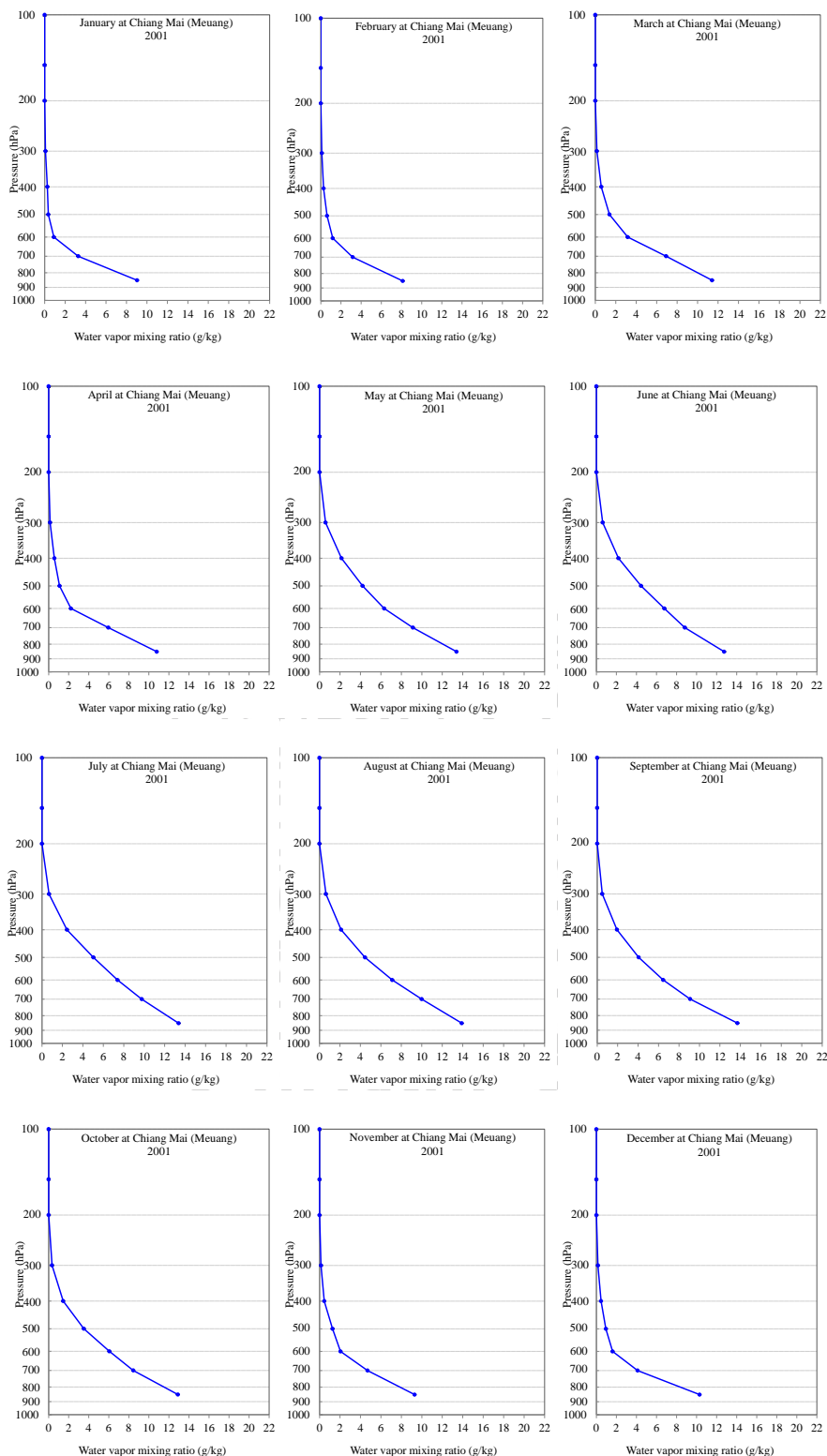


ภาคผนวกที่ 2
การแปรค่า mixing ratio ของไอน้ำตามแนวตั้งเฉลี่ยรายเดือนของ 10 สถานีวัดในประเทศไทย

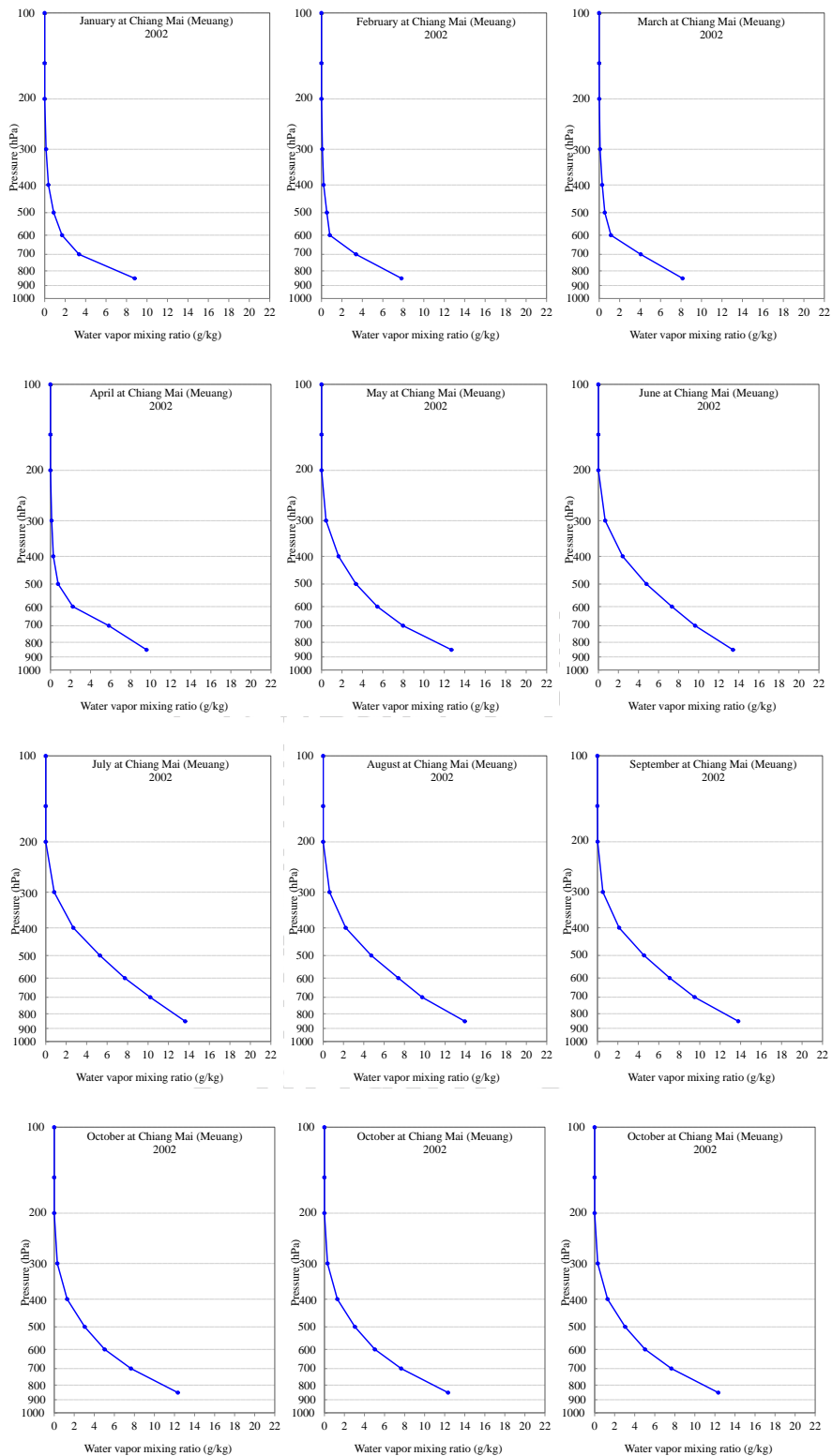




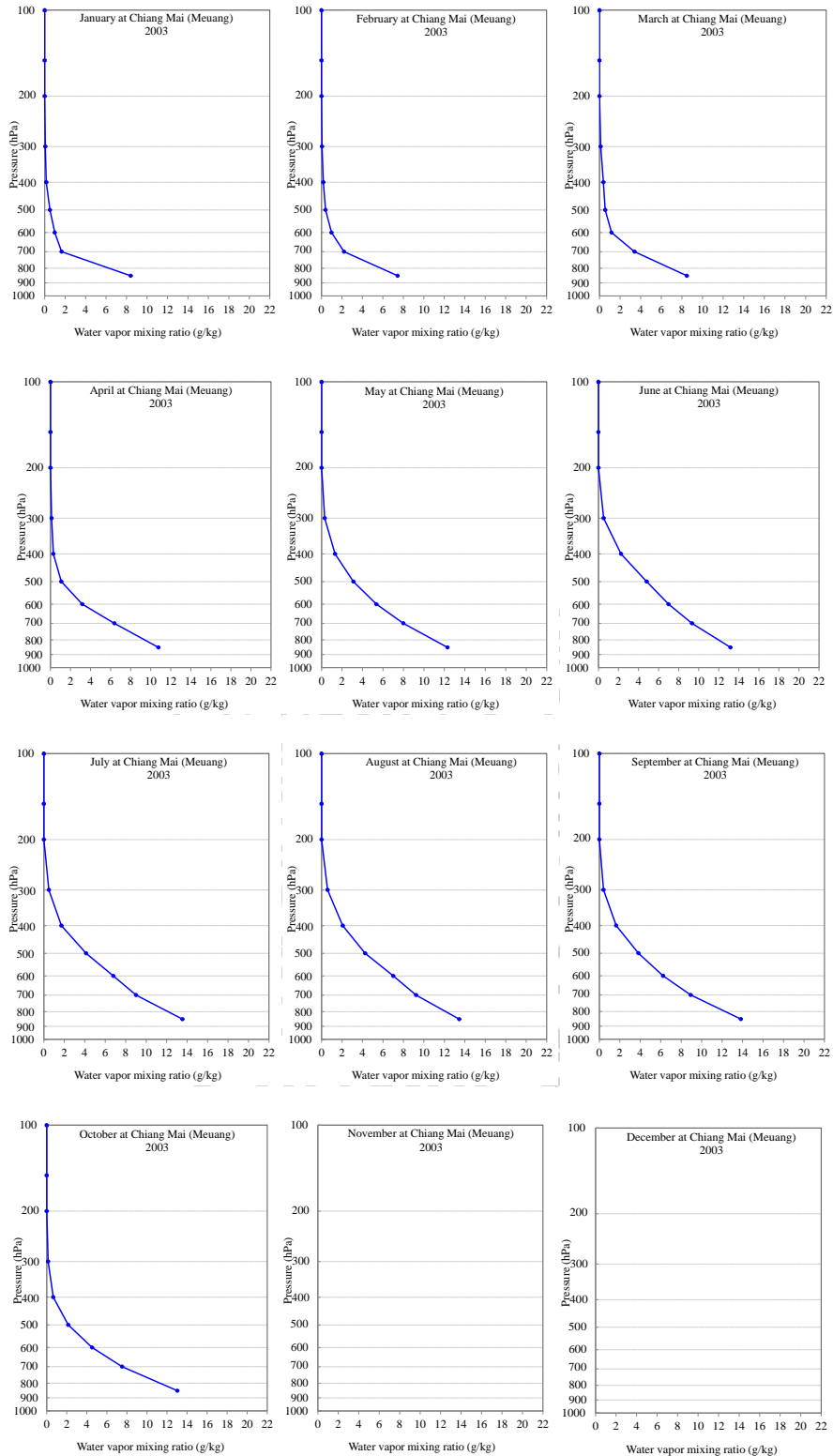
รูปที่ A2.1 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



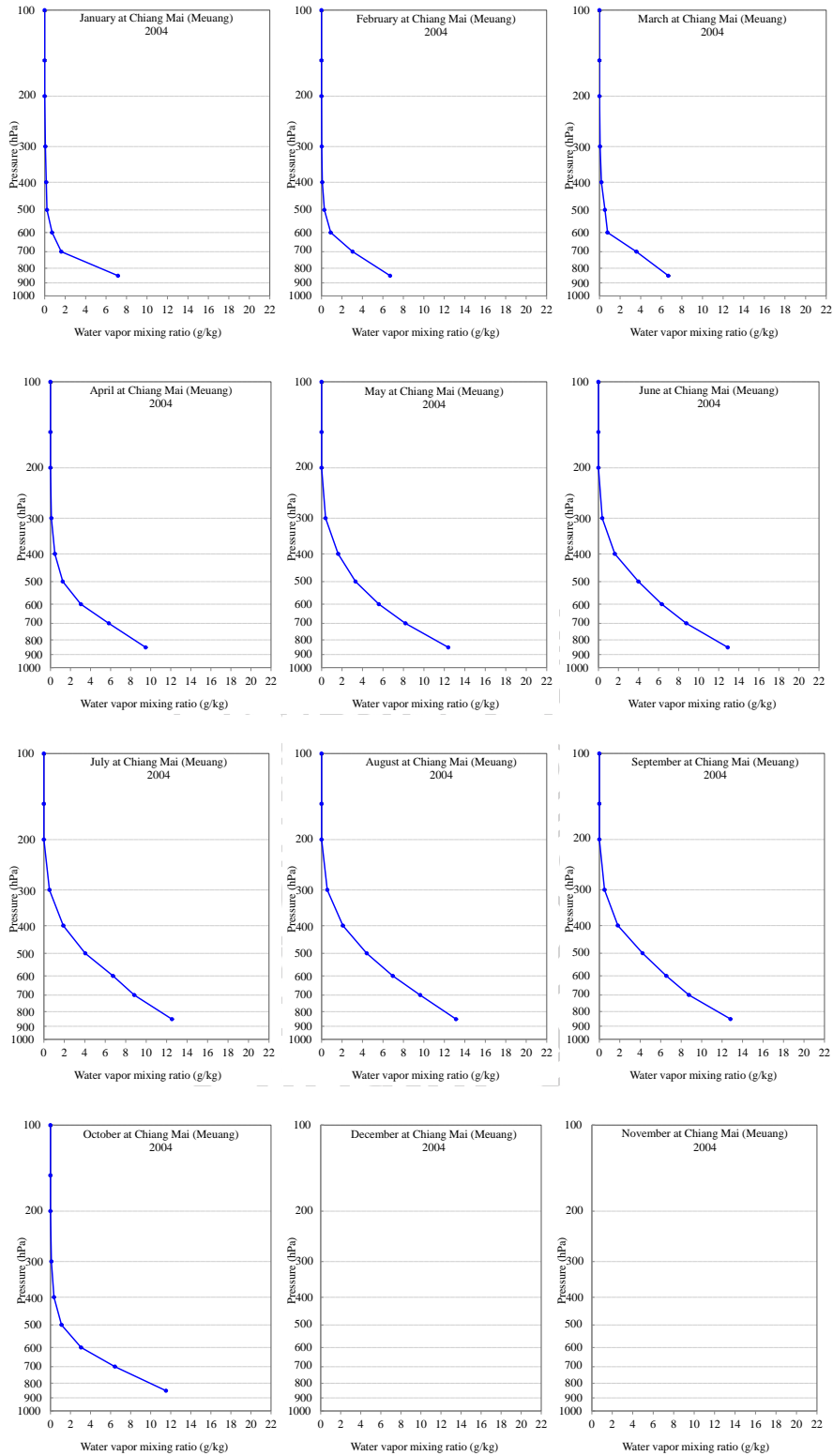
รูปที่ A2.2 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



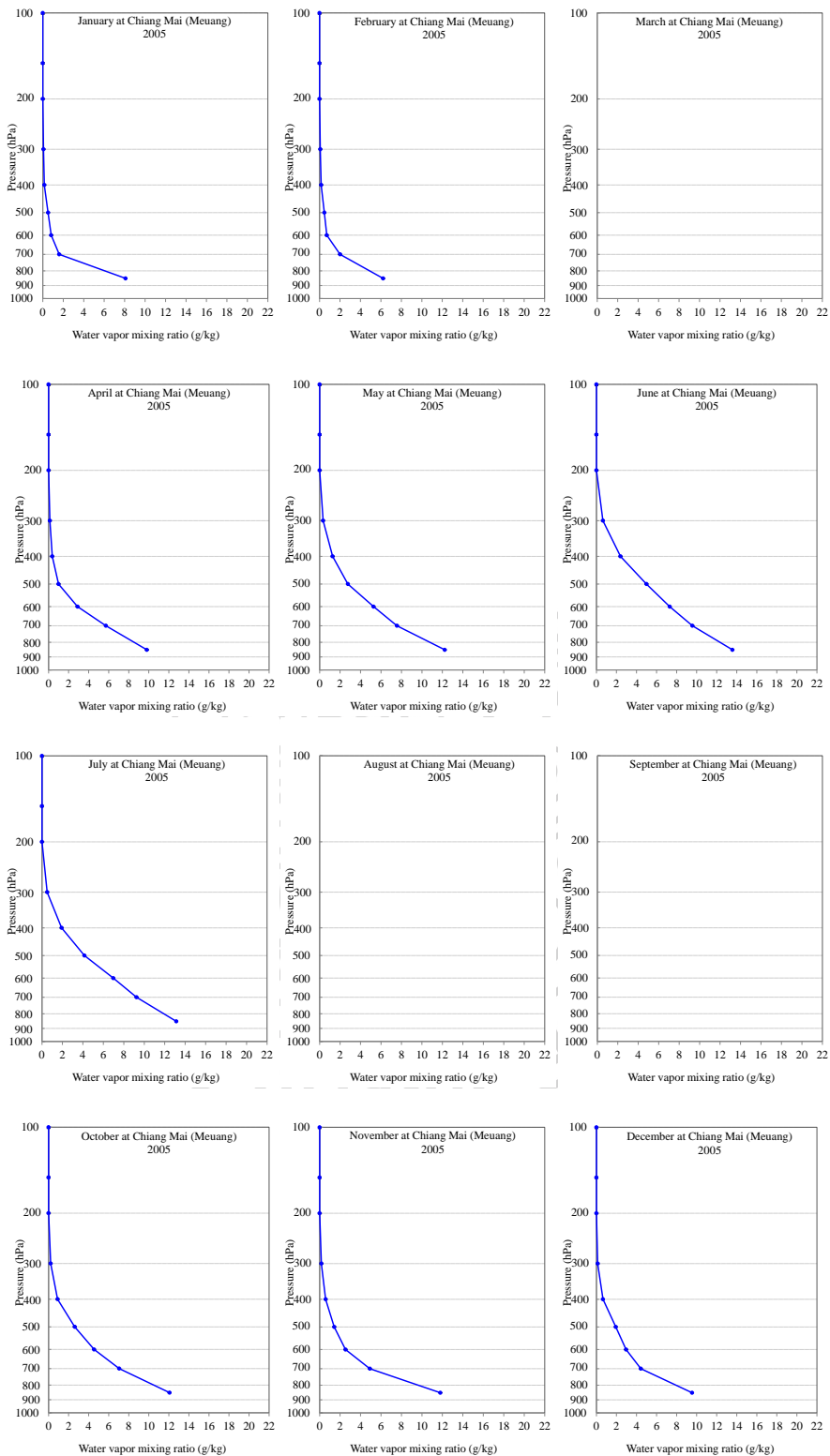
รูปที่ A2.3 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



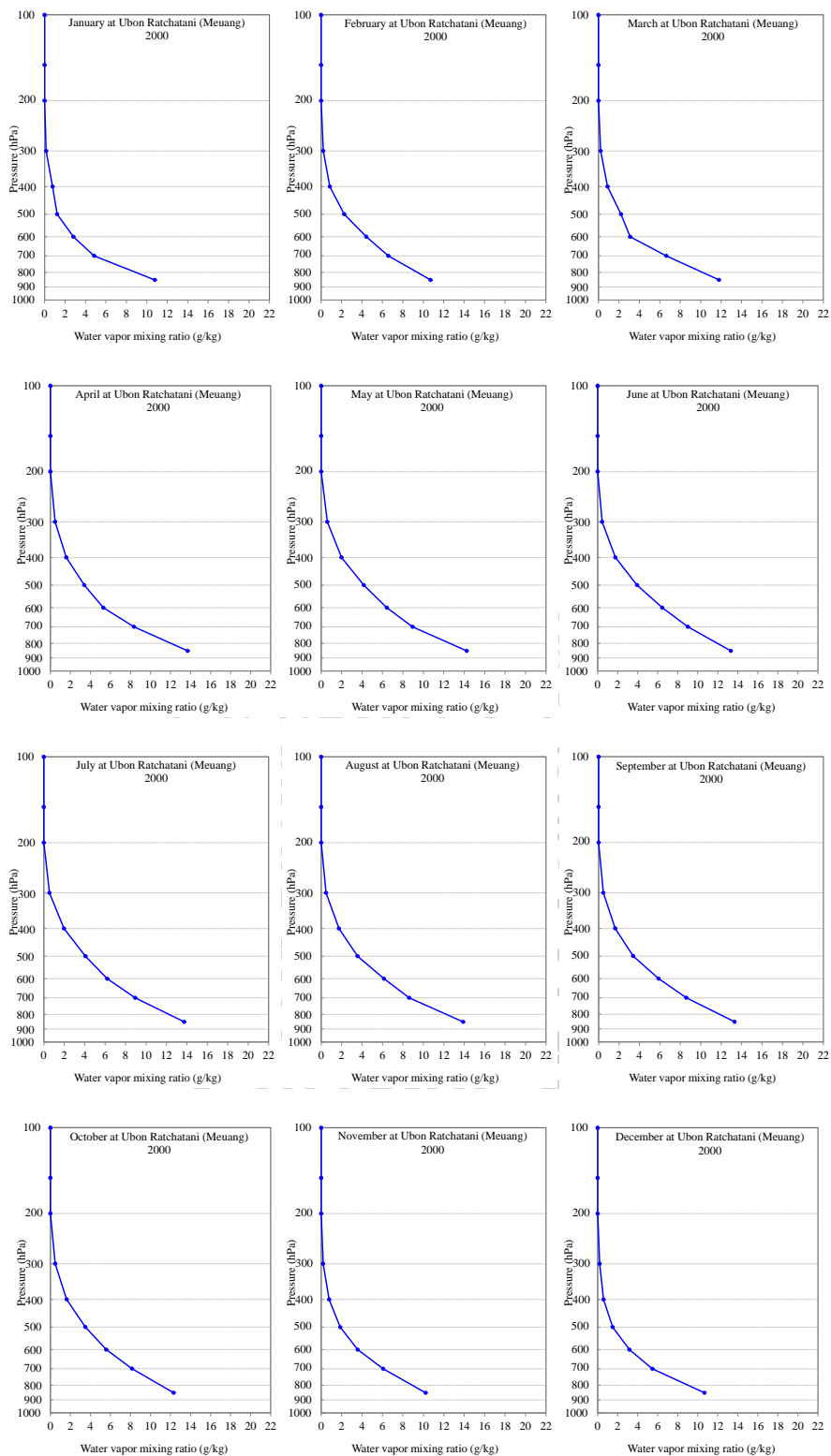
รูปที่ A2.4 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



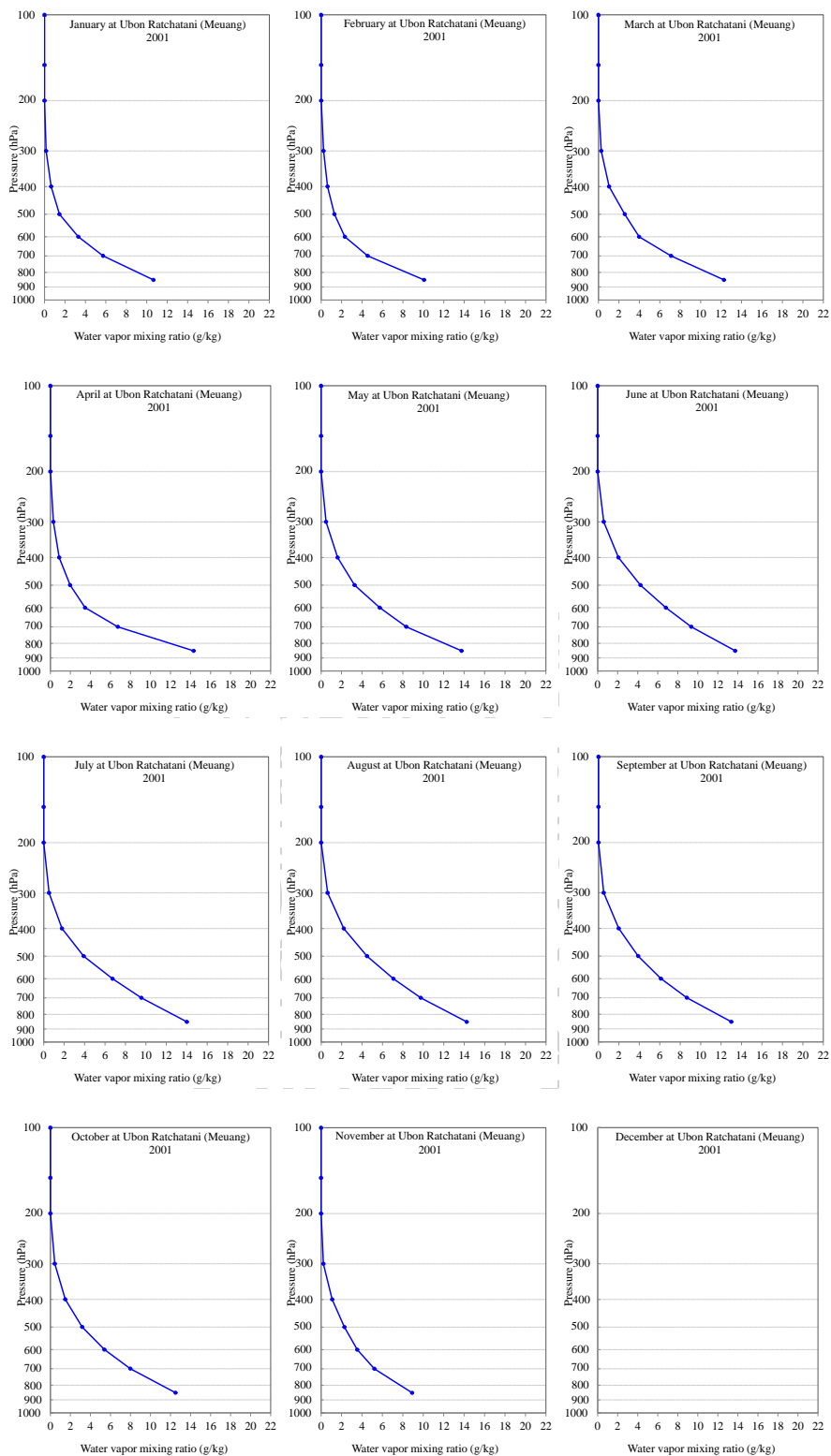
รูปที่ A2.5 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



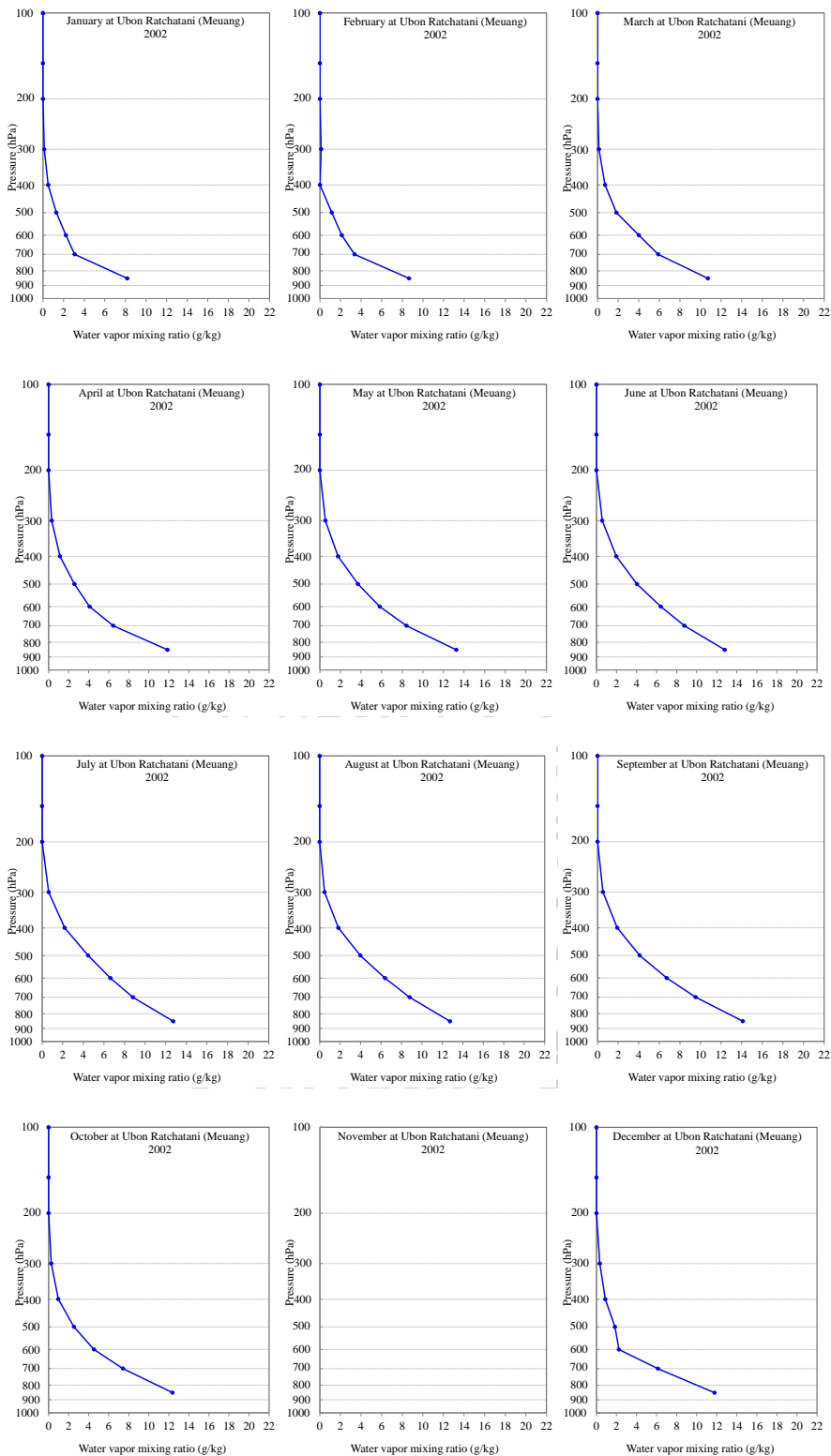
รูปที่ A2.6 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานีเชียงใหม่ (เมือง)



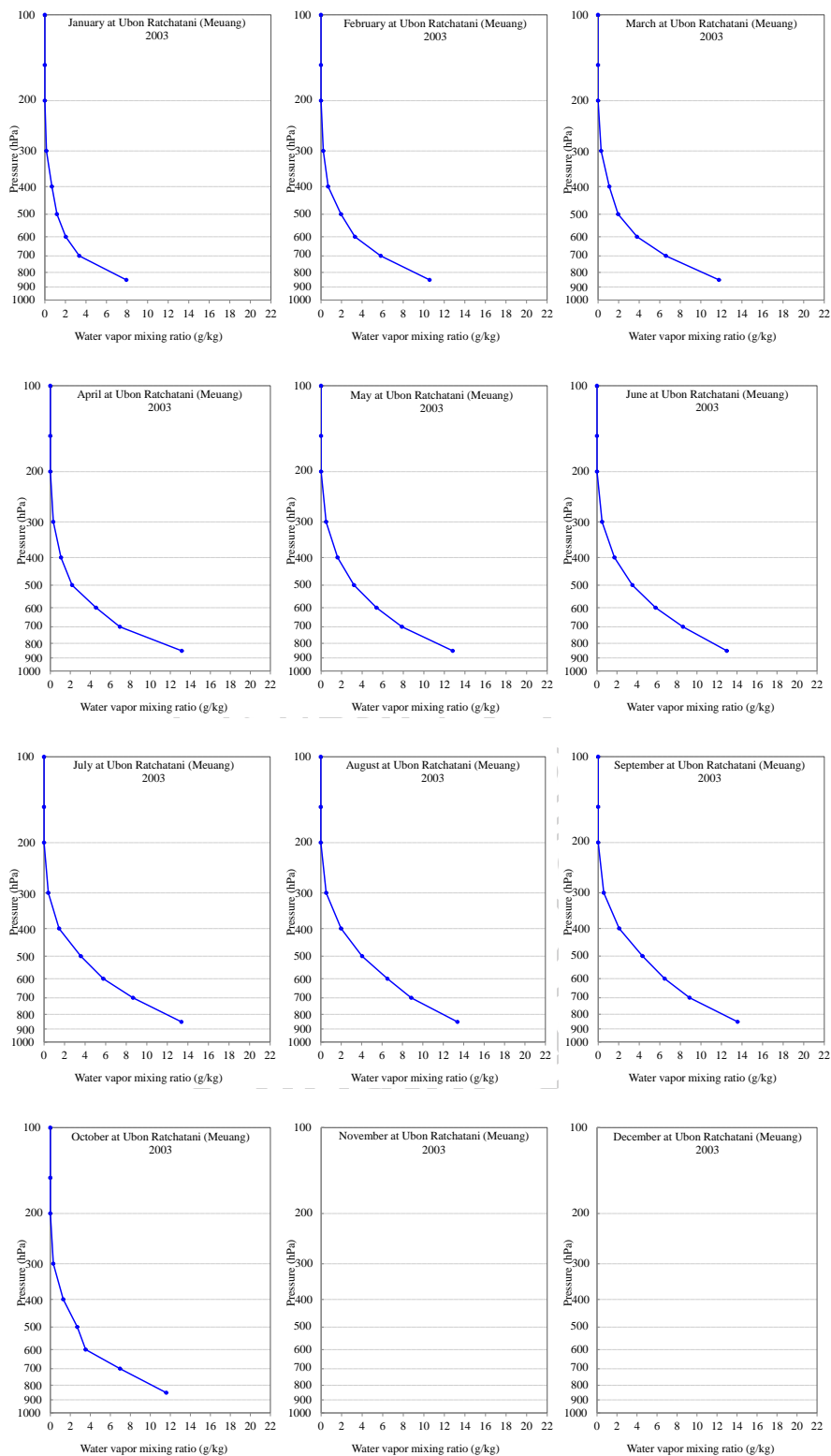
รูปที่ A2.7 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



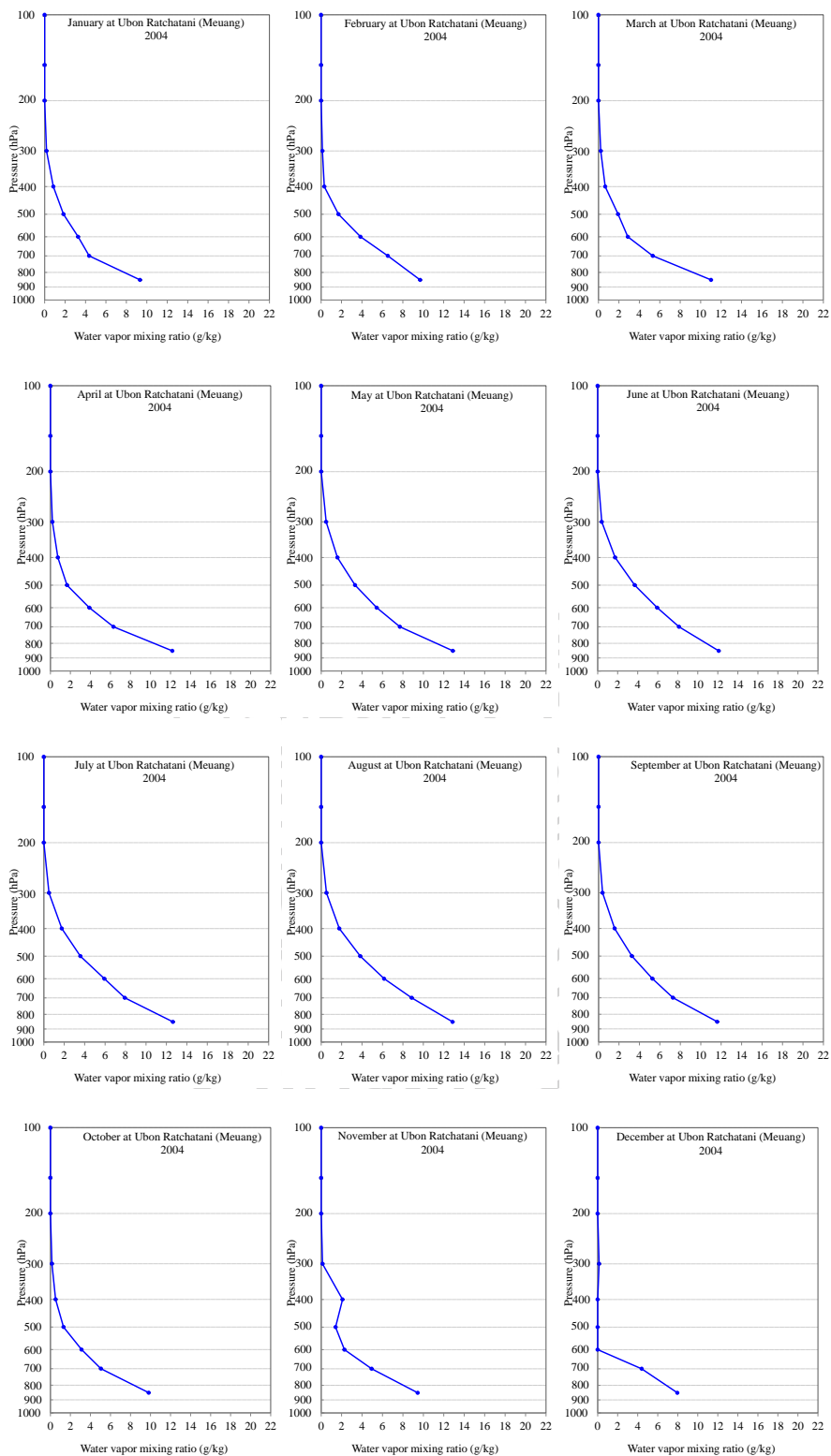
รูปที่ A2.8 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



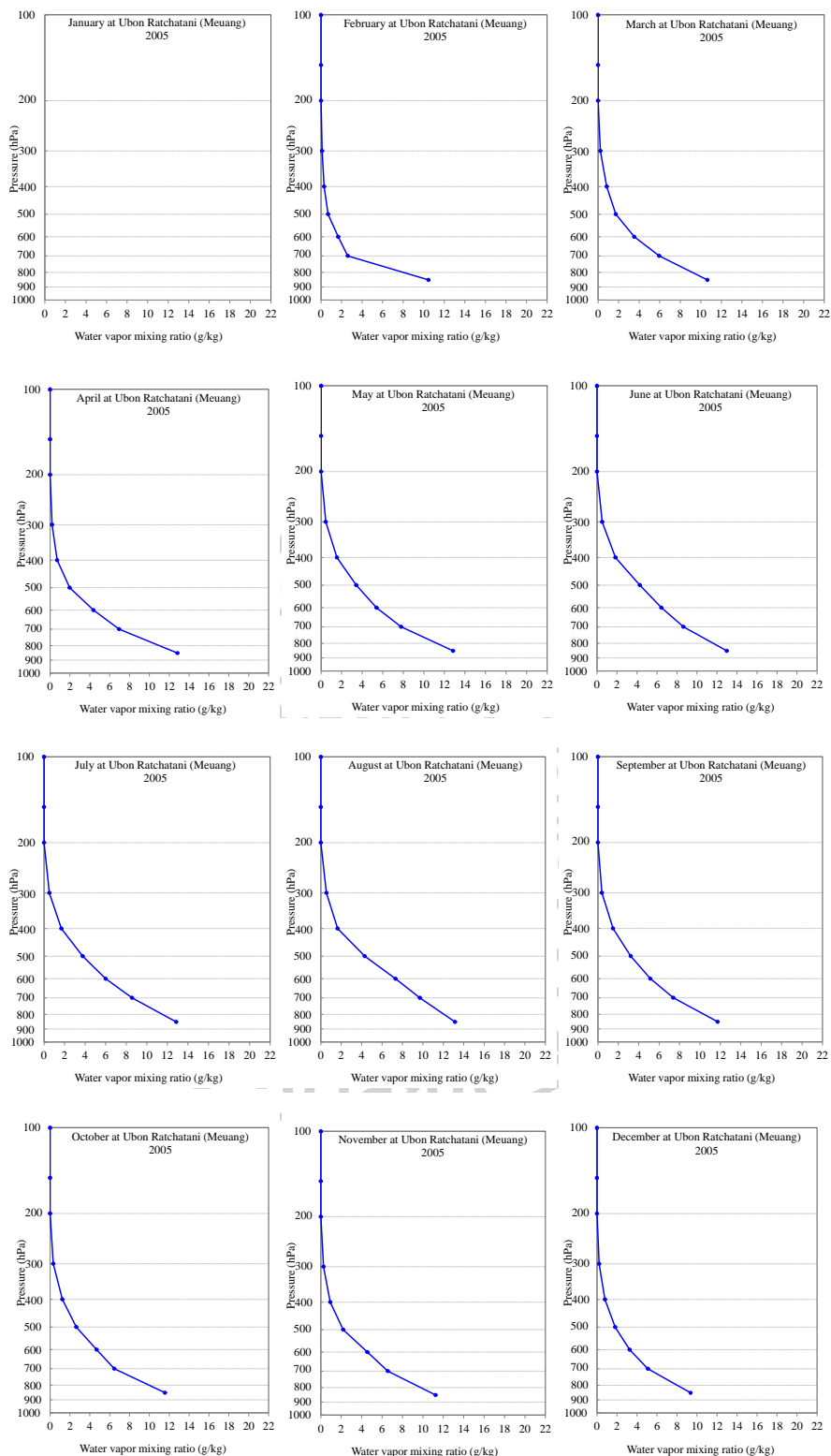
รูปที่ A2.9 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



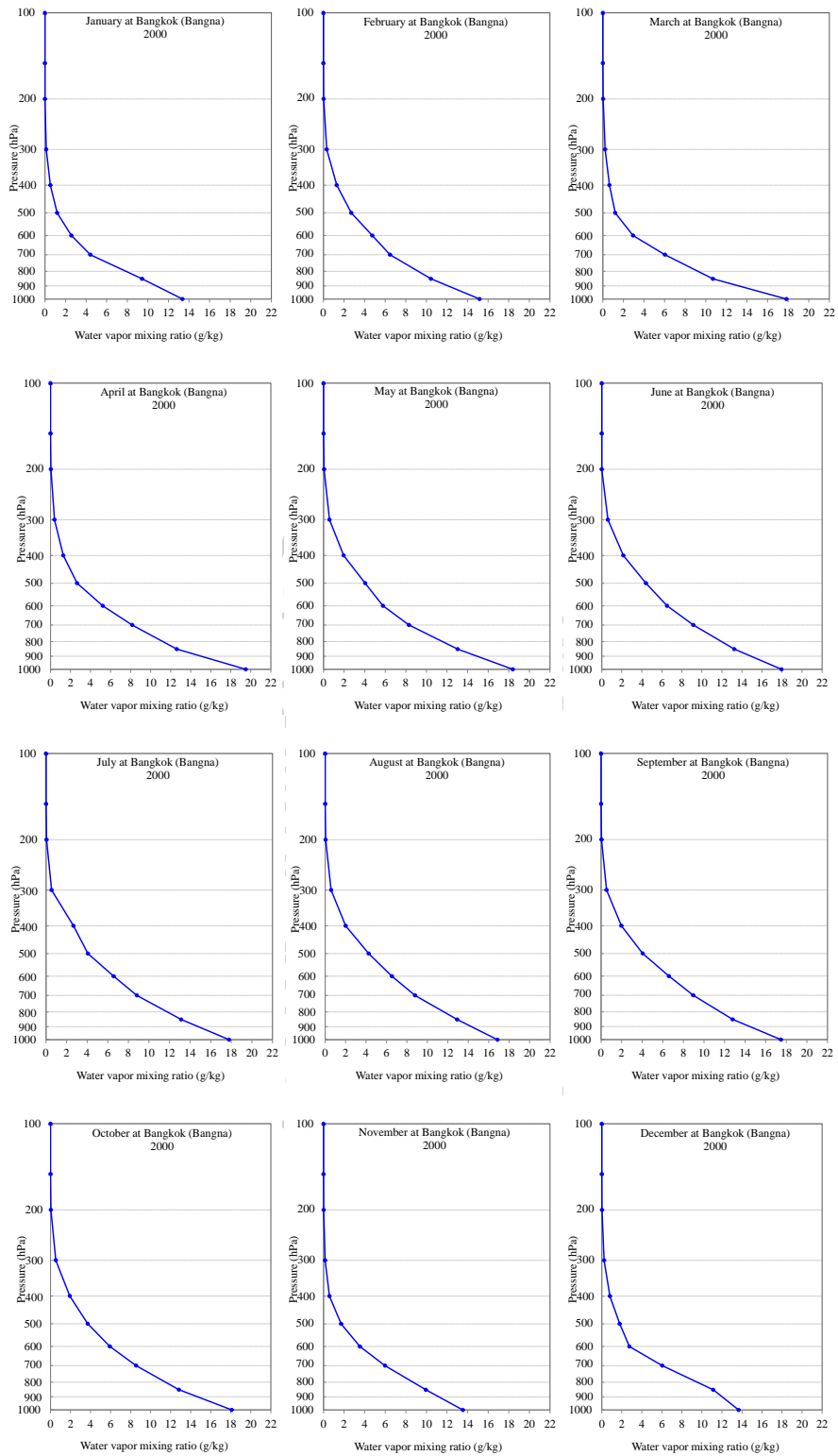
รูปที่ A2.10 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



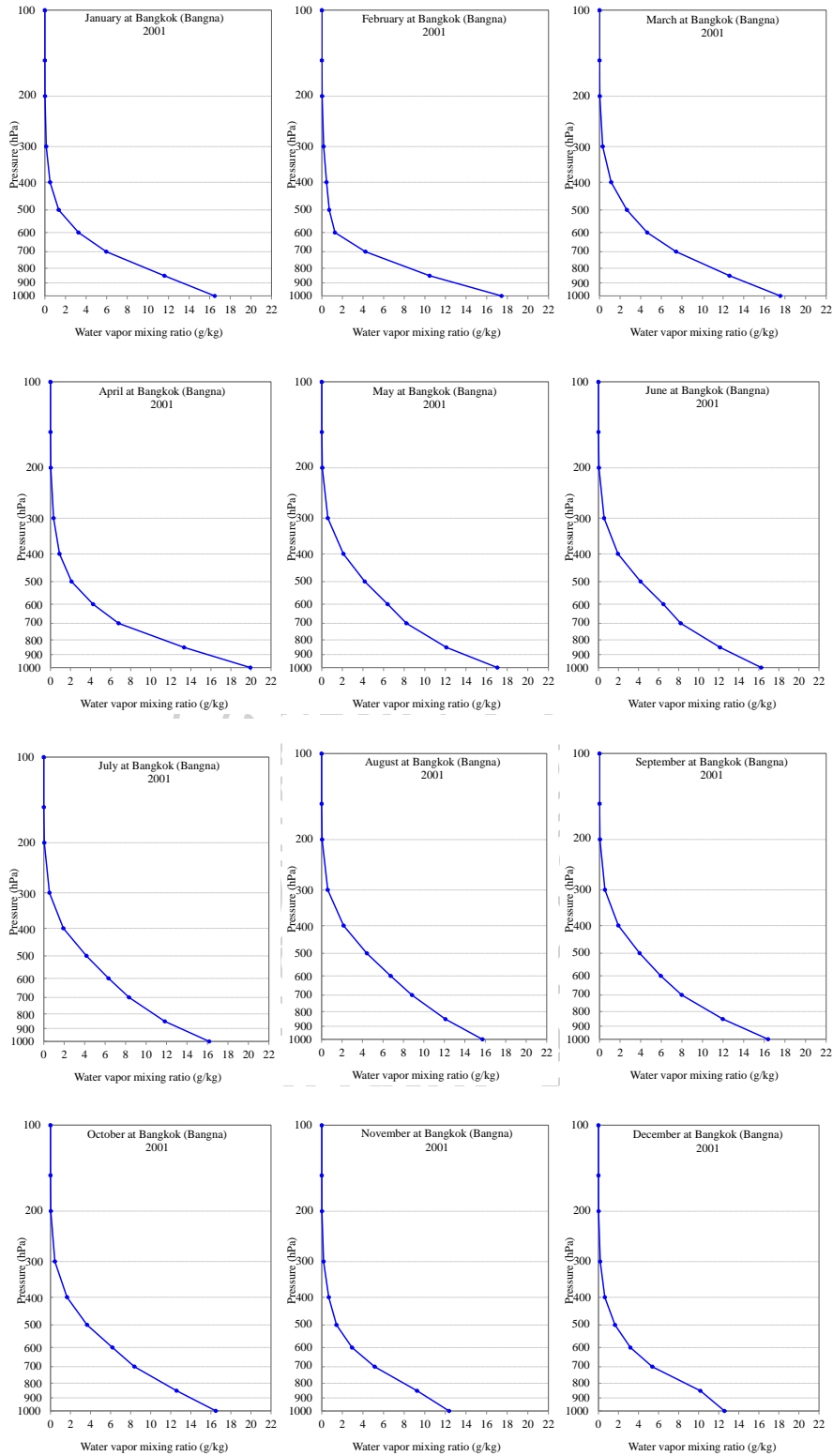
รูปที่ A2.11 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



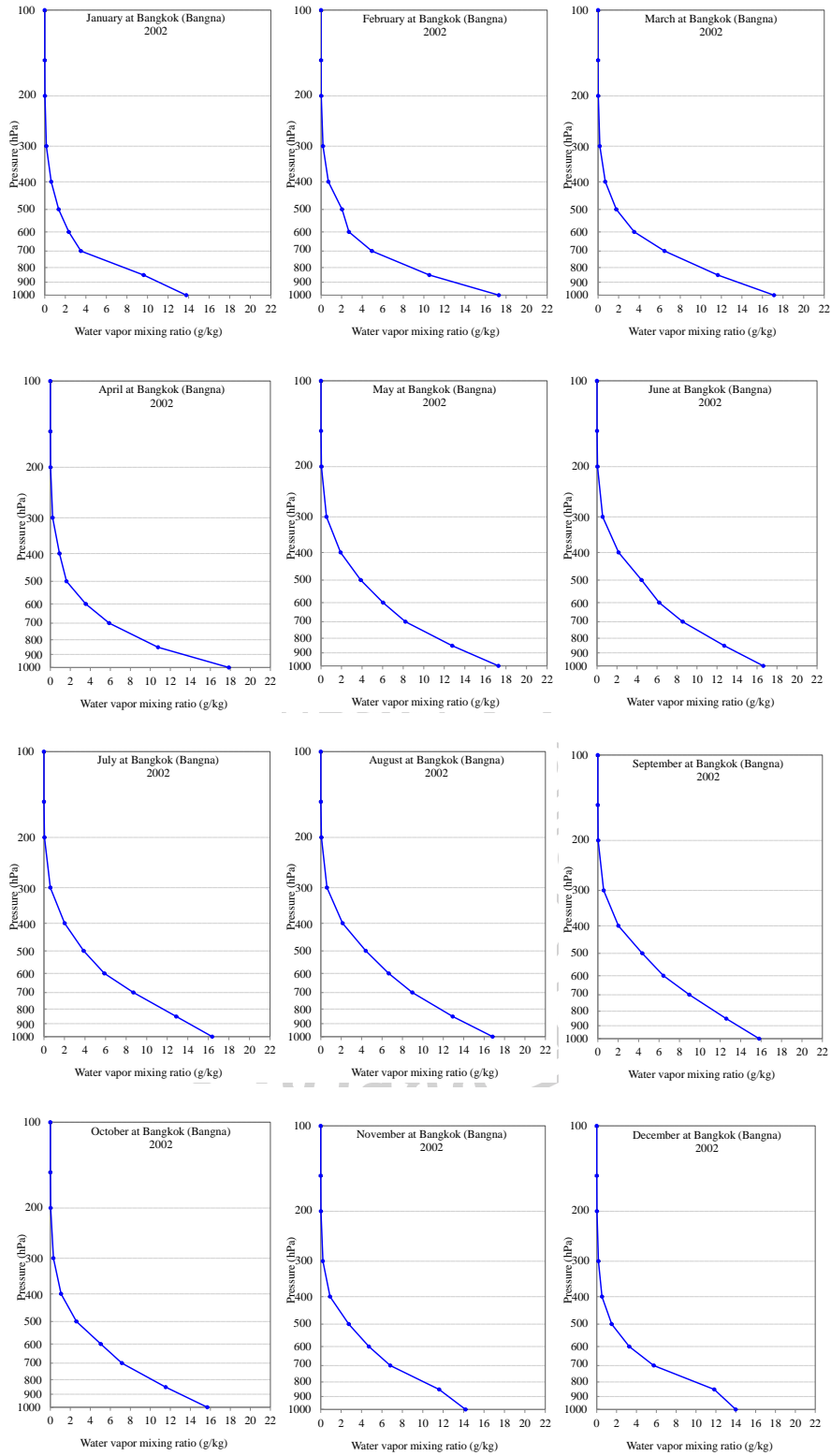
รูปที่ A2.12 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานี อุบลราชธานี (เมือง)



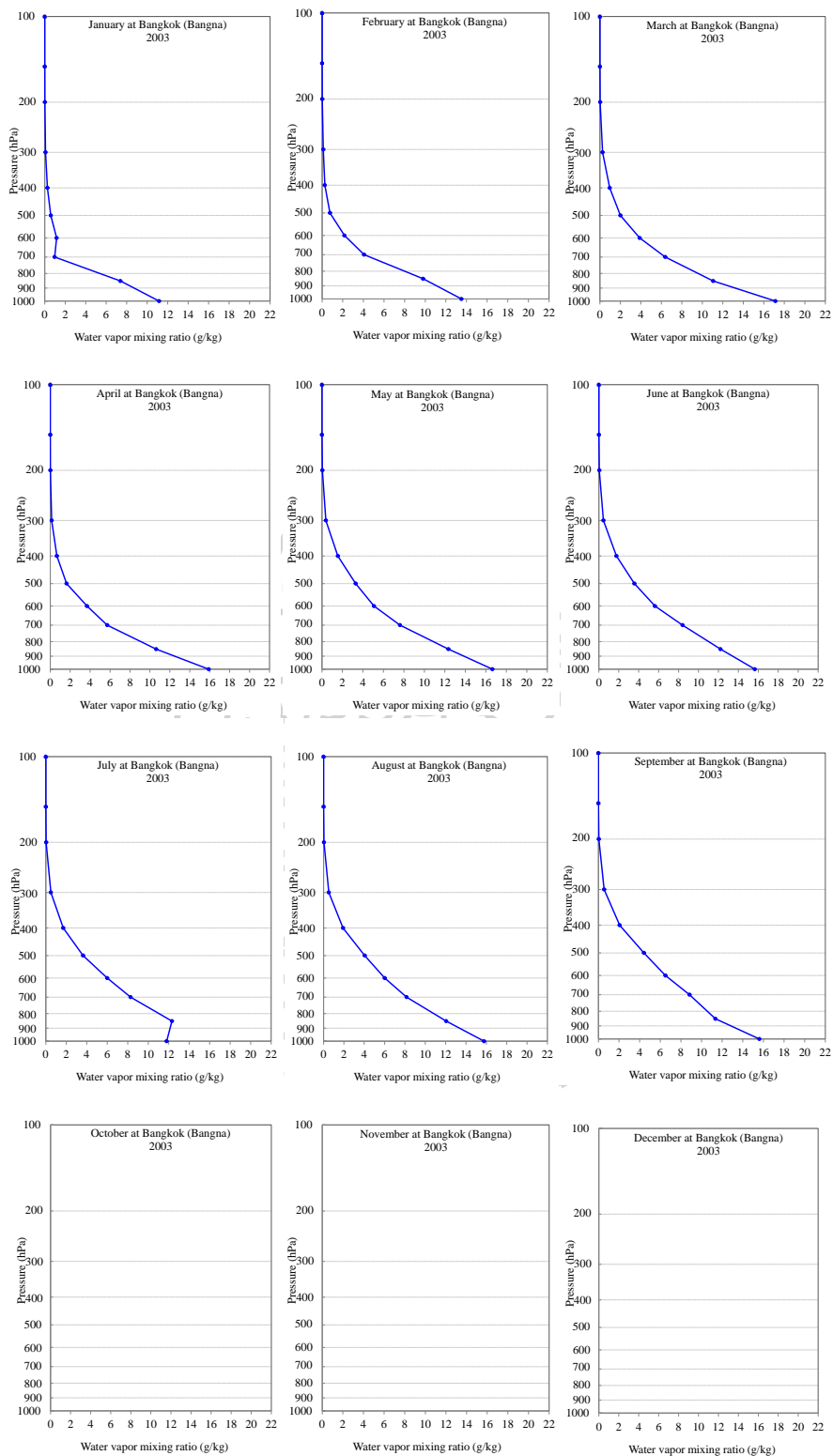
รูปที่ A2.13 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



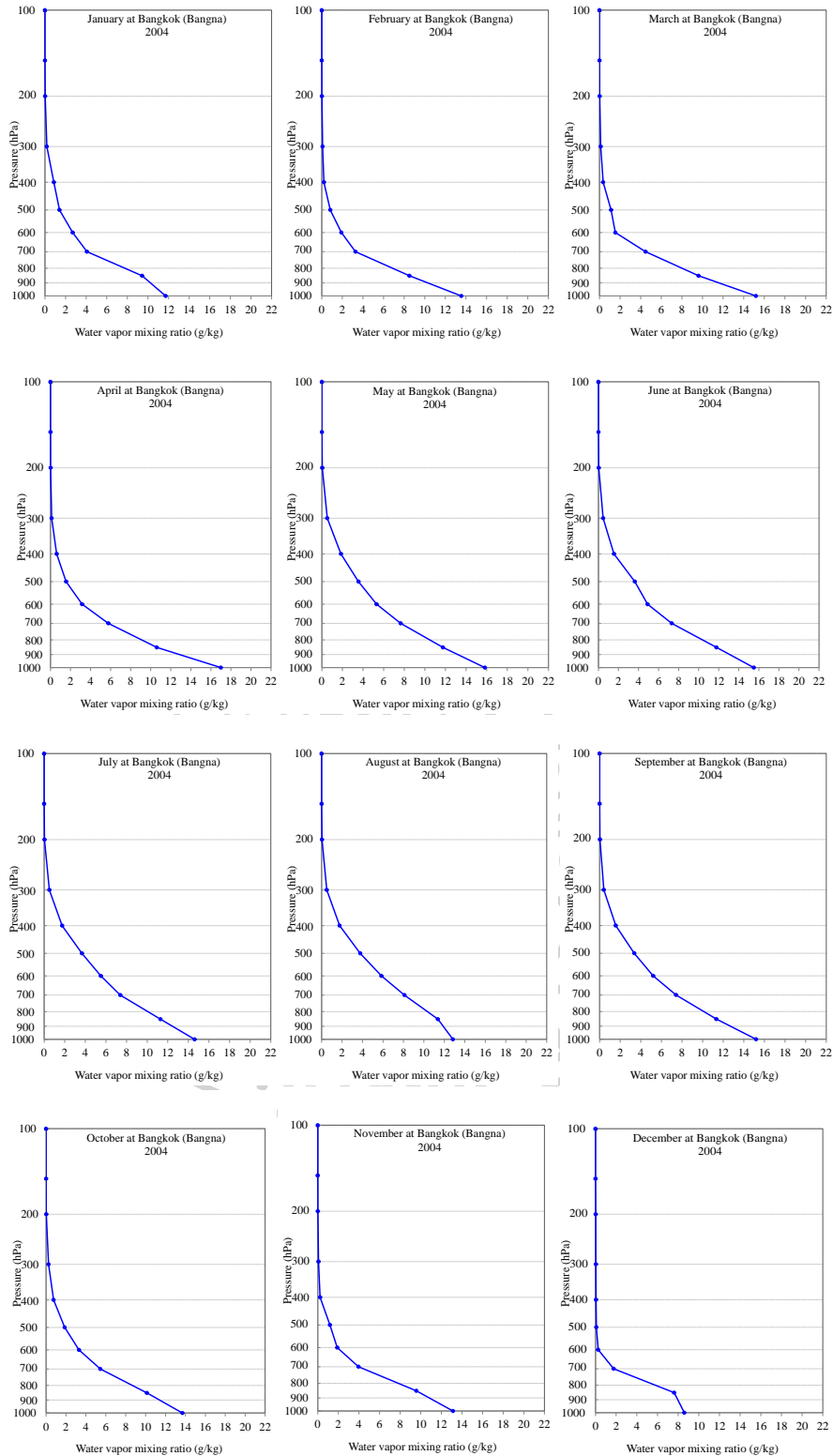
รูปที่ A2.14 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



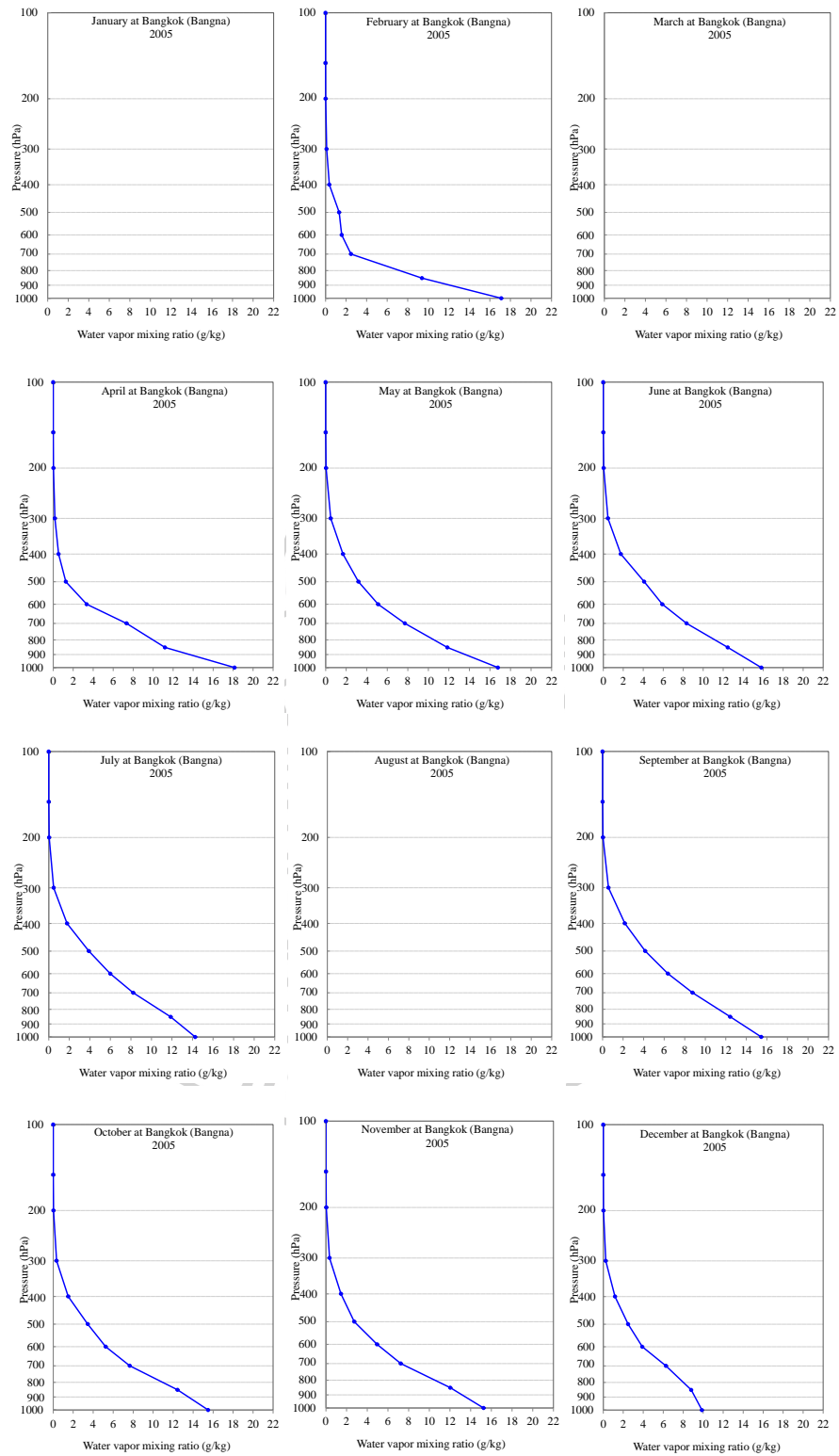
รูปที่ A2.15 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



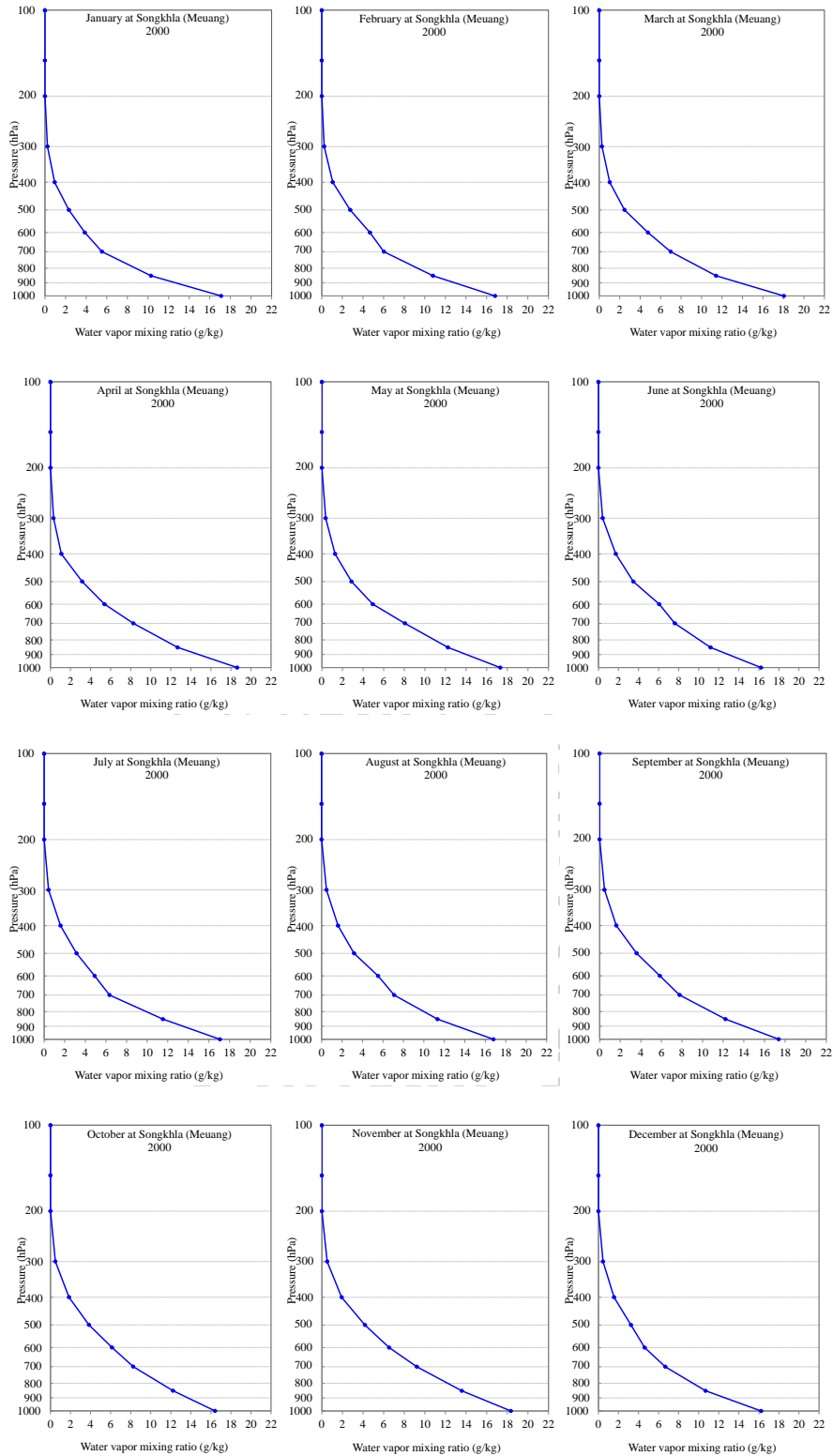
รูปที่ A2.16 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานี
กรุงเทพฯ (บางนา)



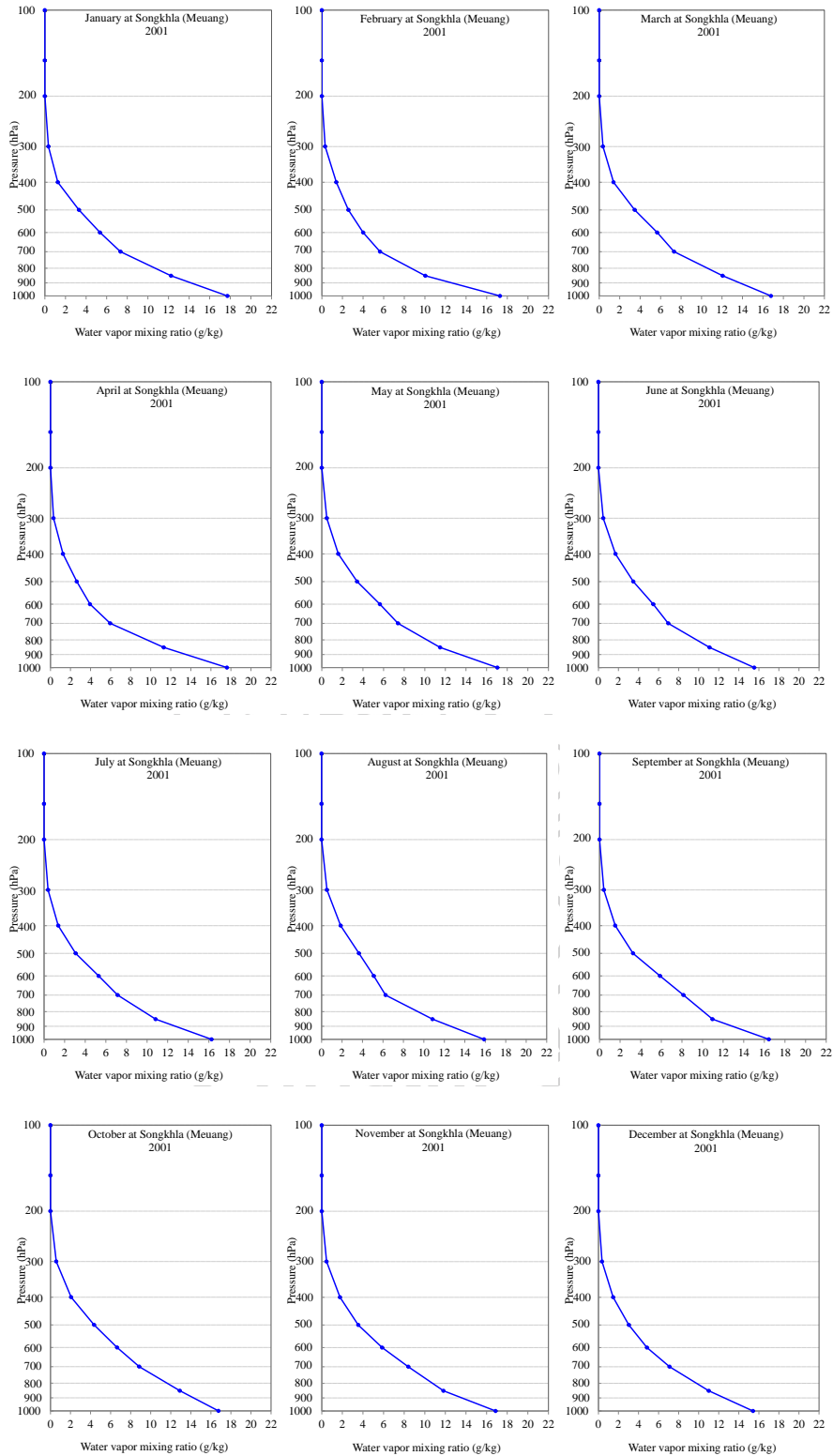
รูปที่ A2.17 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



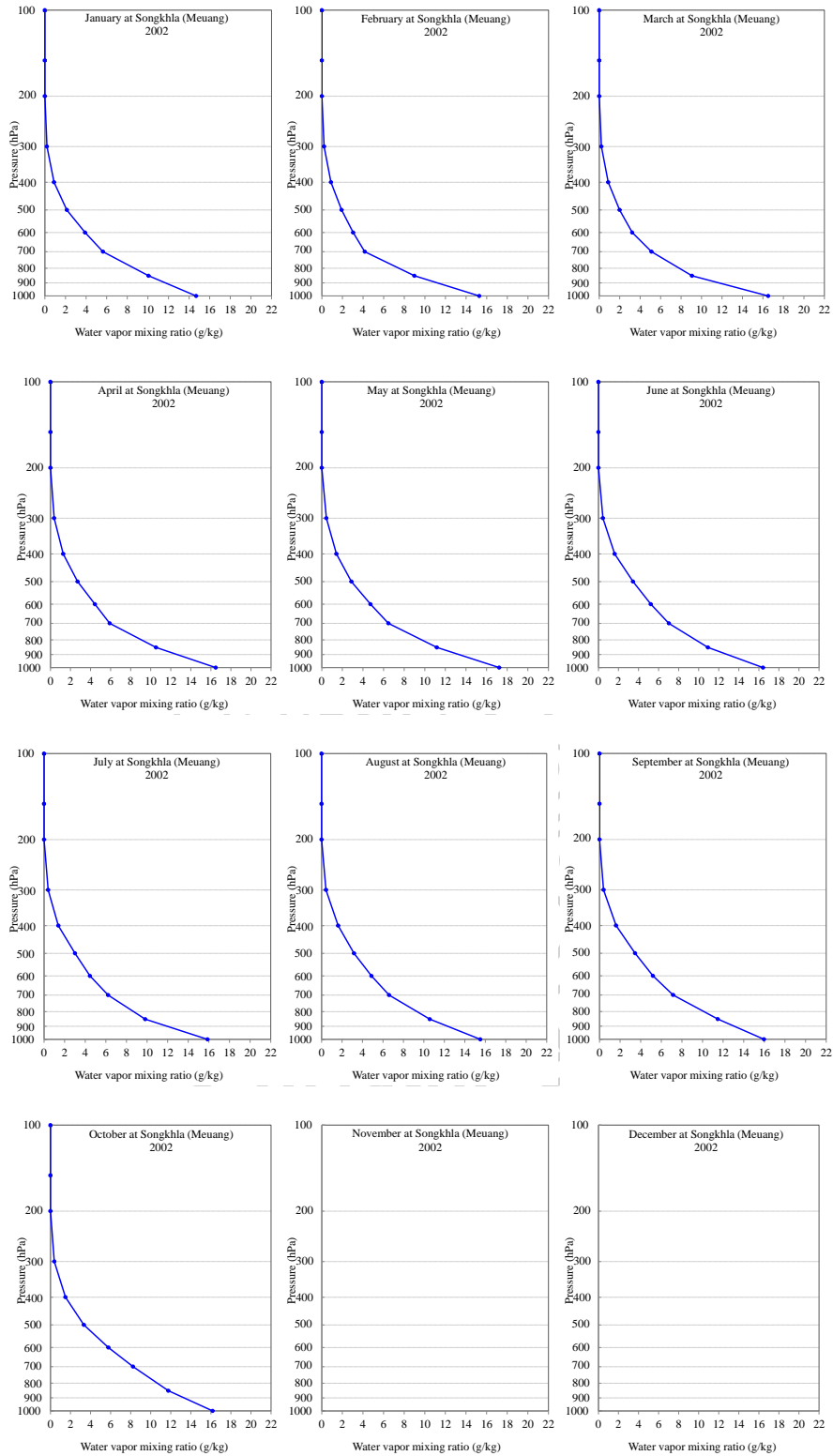
รูปที่ A2.18 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานี กรุงเทพฯ (บางนา)



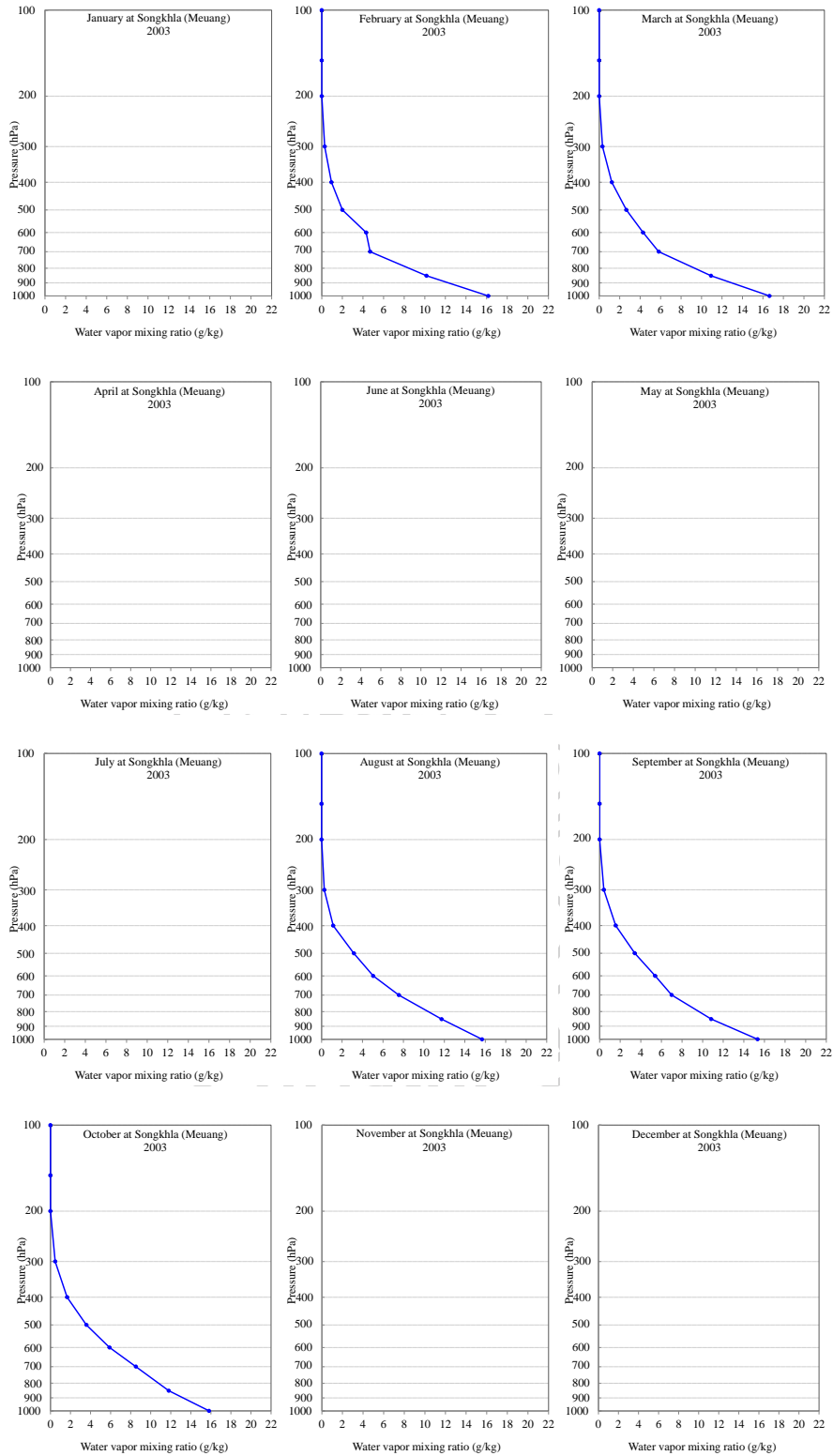
รูปที่ A2.19 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานีสงขลา (เมือง)



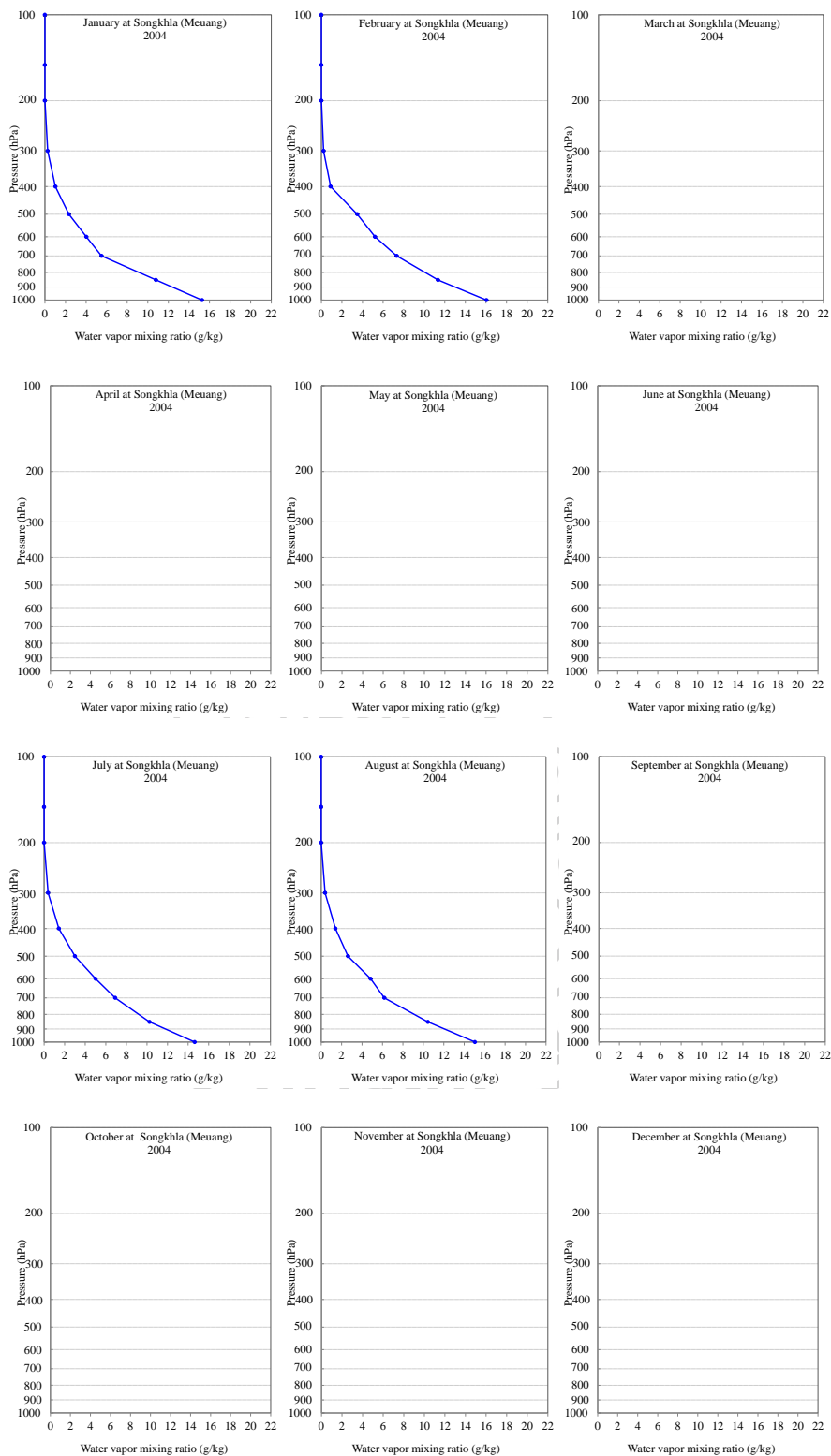
รูปที่ A2.20 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานีสงขลา (เมือง)



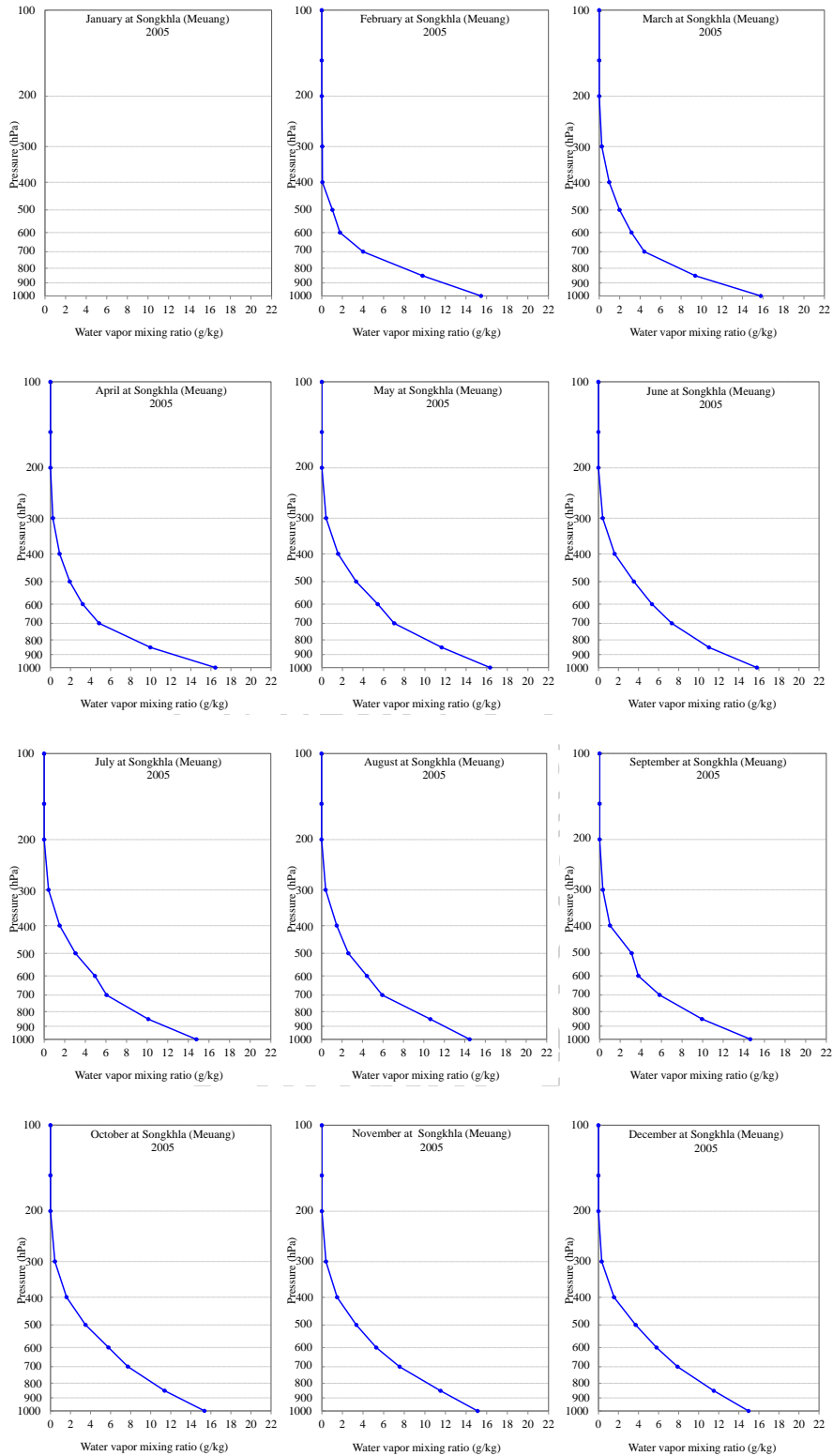
รูปที่ A2.21 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานีสงขลา (เมือง)



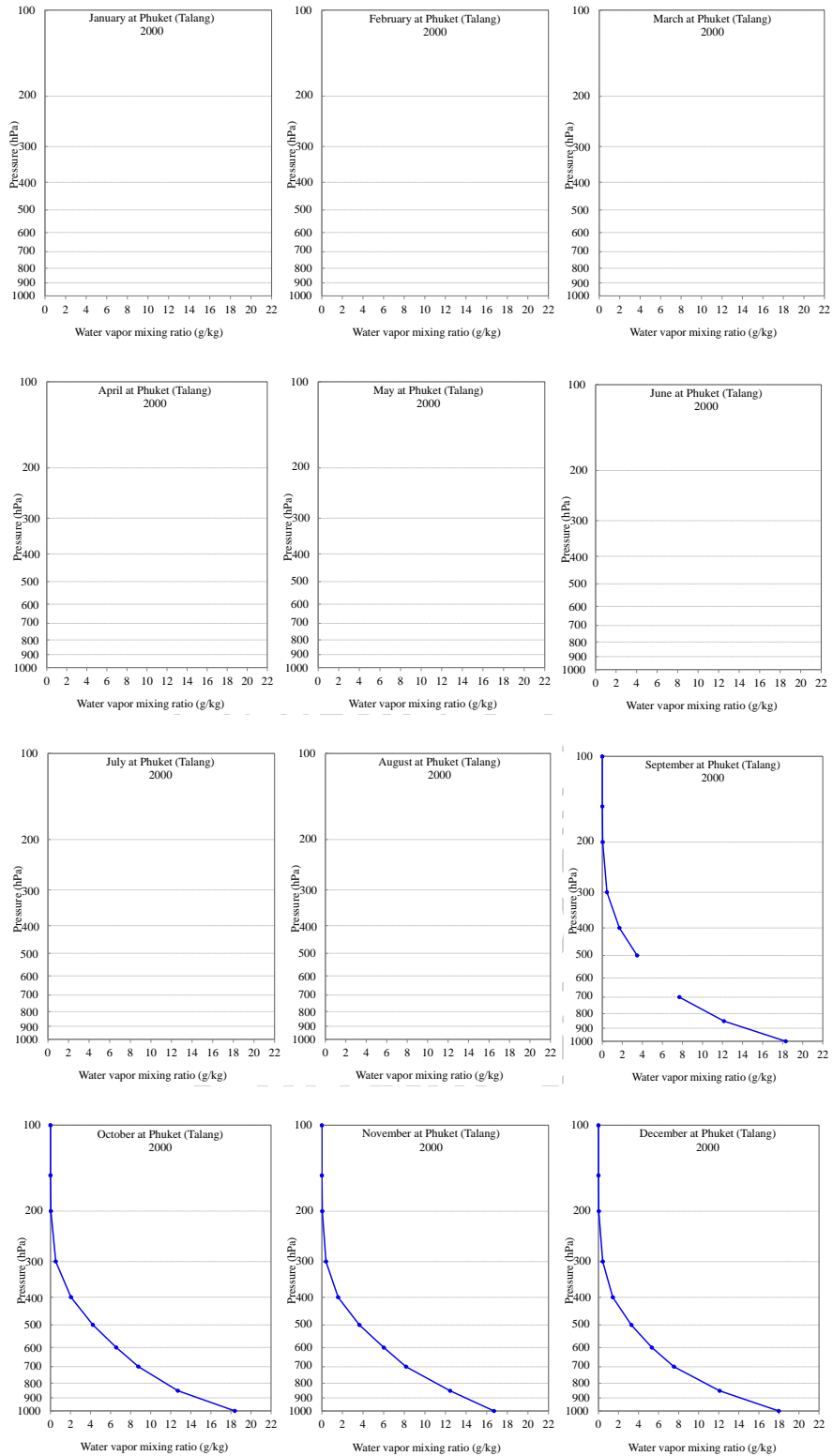
รูปที่ A2.22 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานีสงขลา (เมือง)



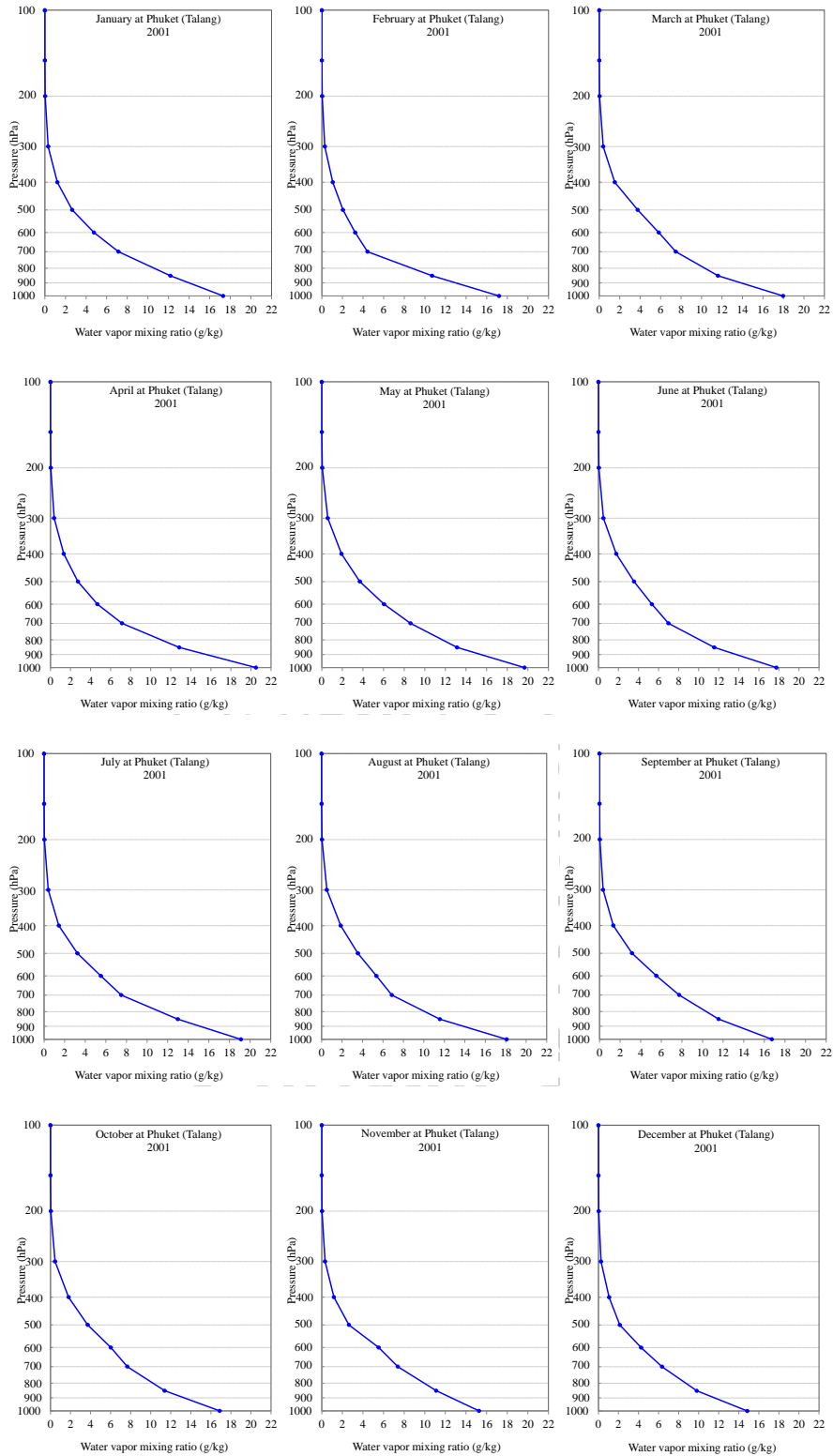
รูปที่ A2.23 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานีสงขลา (เมือง)



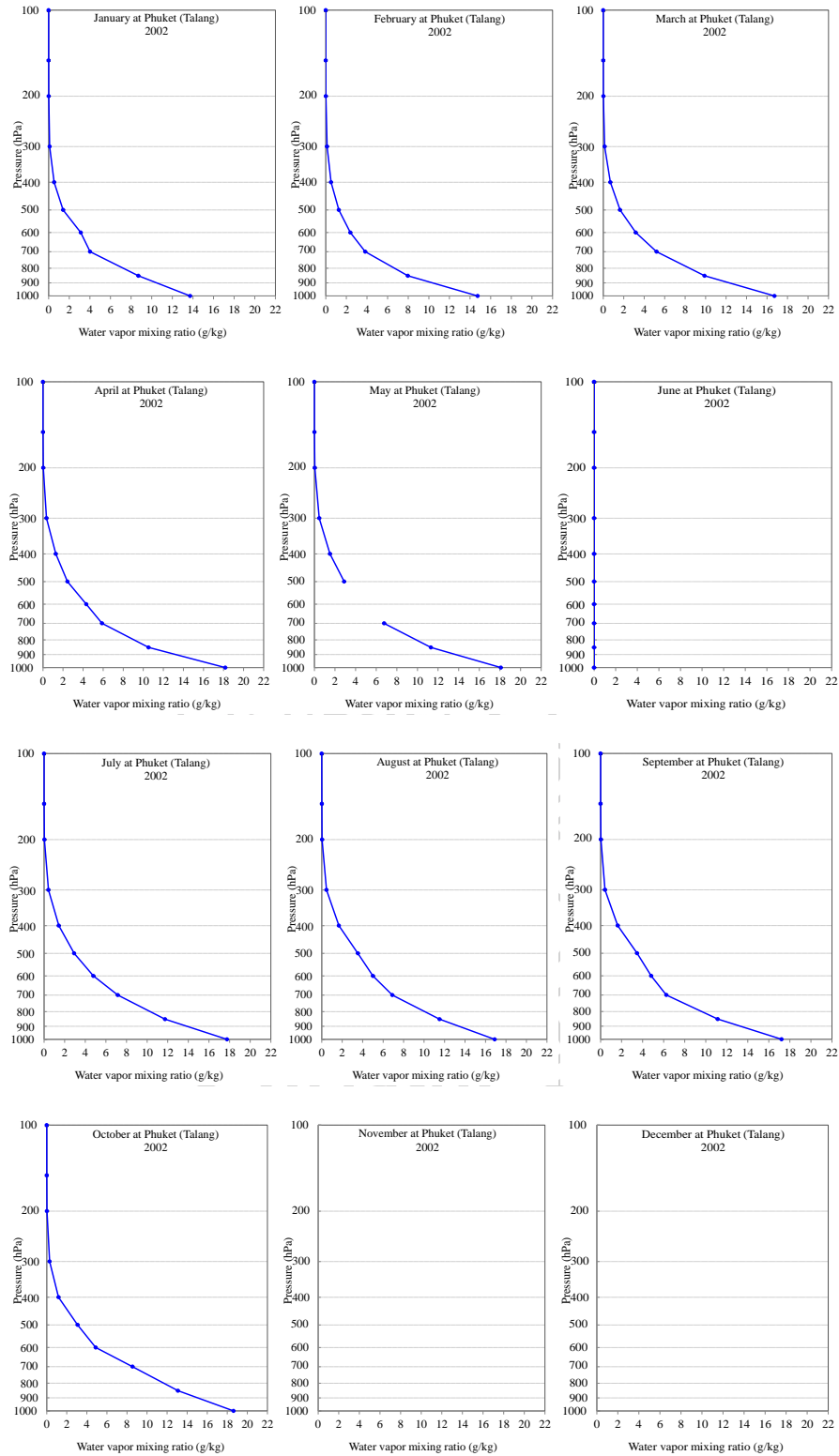
รูปที่ A2.24 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานีสงขลา (เมือง)



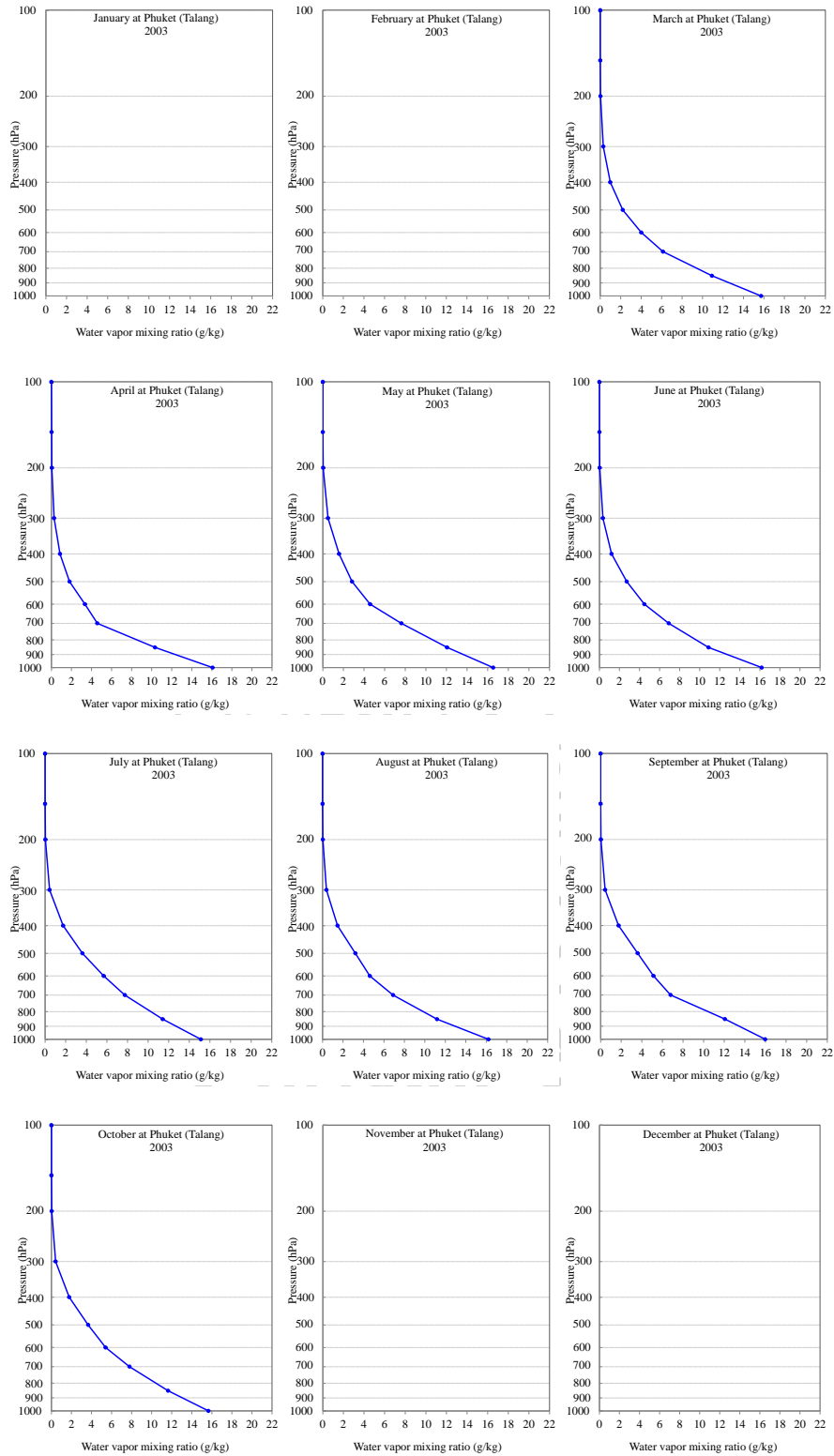
รูปที่ A2.25 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2000 ของสถานีภูเก็ต (ถลาง)



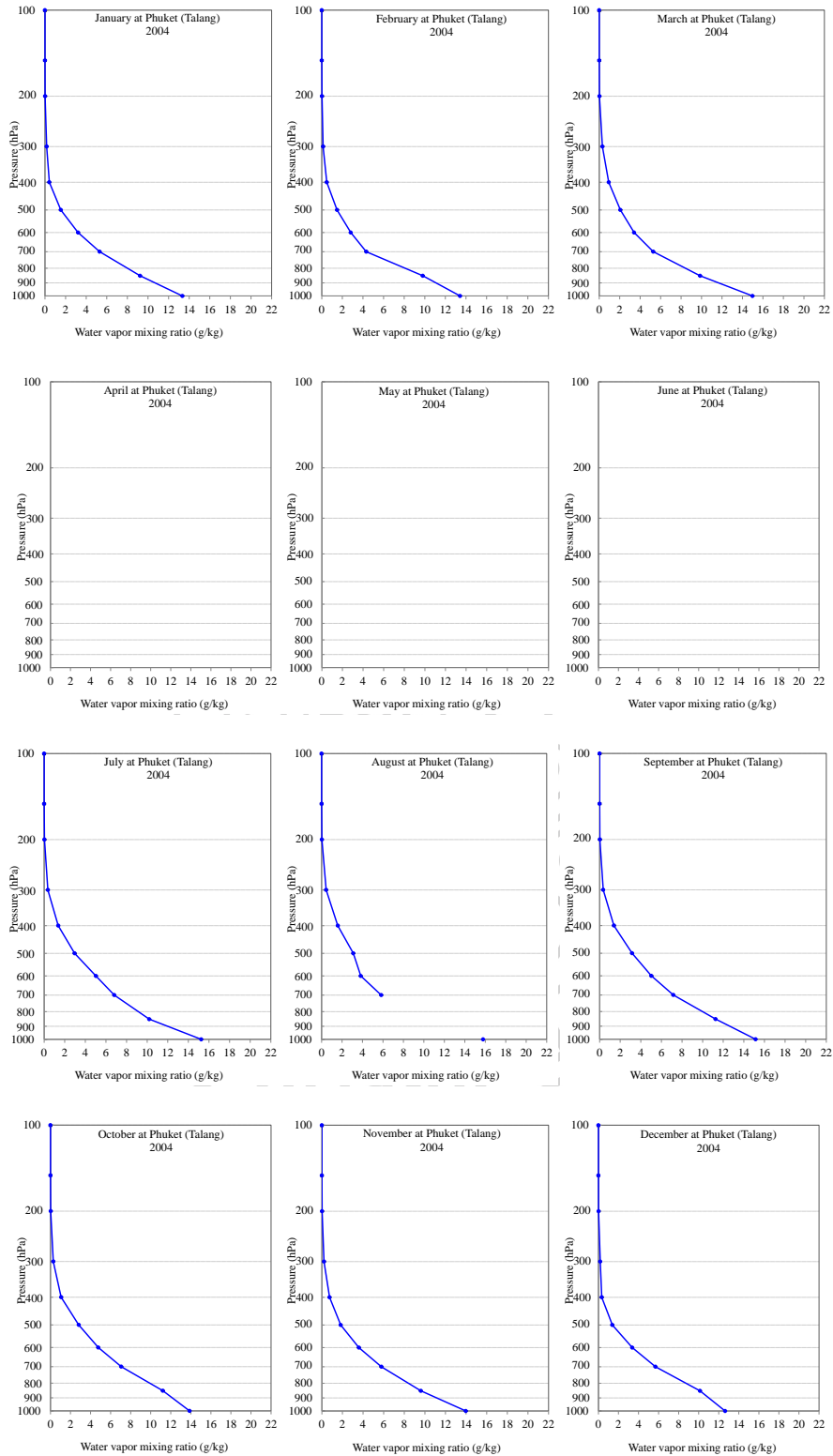
รูปที่ A2.26 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2001 ของสถานีภูเก็ต
(กลาง)



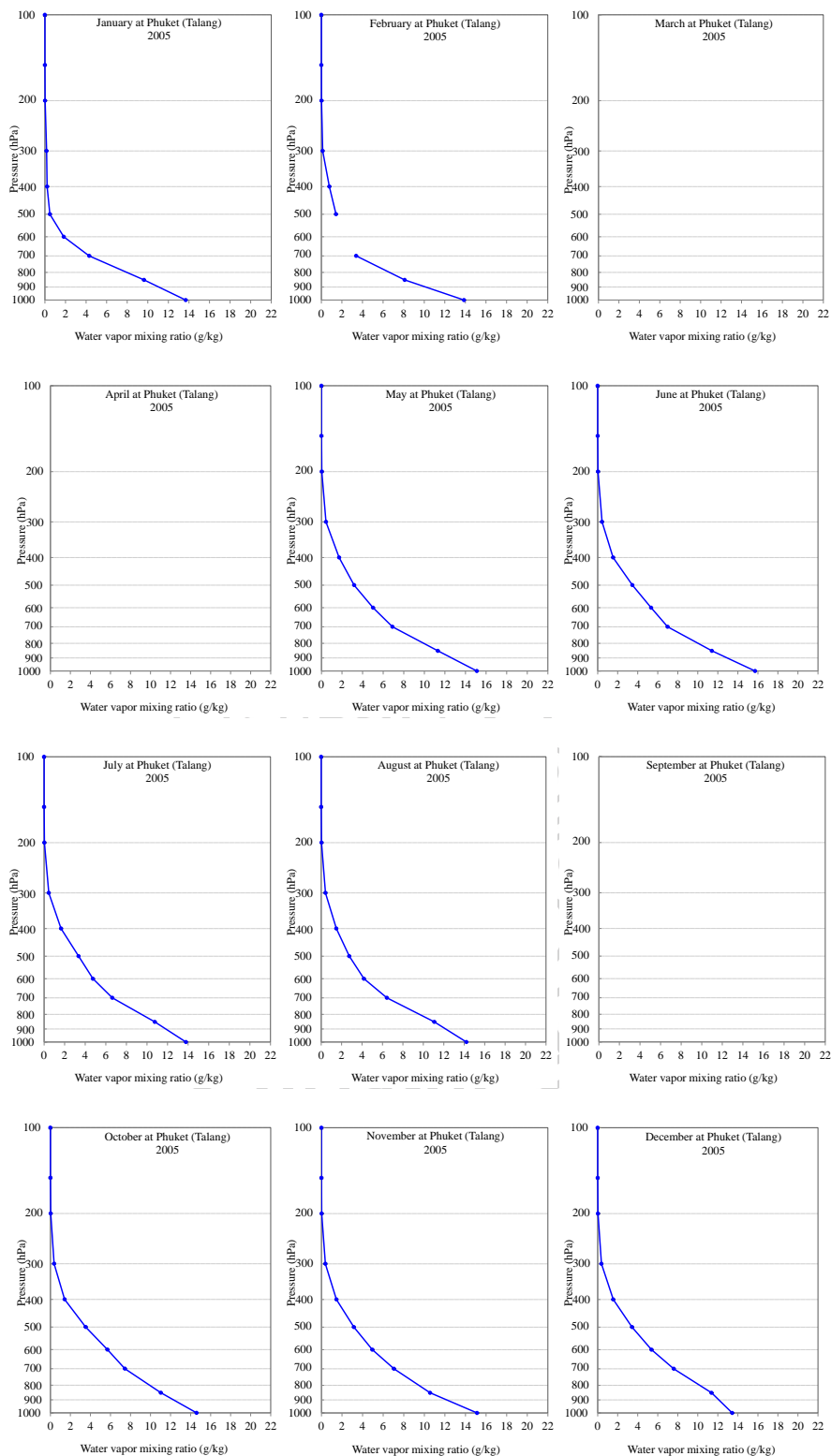
รูปที่ A2.27 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2002 ของสถานีภูเก็ต (ถลาง)



รูปที่ A2.28 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2003 ของสถานีภูเก็ต (ถลาง)



รูปที่ A2.29 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2004 ของสถานีภูเก็ต (ถลาง)



รูปที่ A2.30 การแปรค่าของ mixing ratio ของไอน้ำเฉลี่ยรายเดือน ปี ค.ศ. 2005 ของสถานีภูเก็ต (กลาง)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จินดารัตน์ ปรีโยธร
วัน เดือน ปี เกิด	18 สิงหาคม พ.ศ.2534
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	114/71 ถนน บ้านปากแรต ตำบล บ้านโป่ง อำเภอ บ้านโป่ง จังหวัด ราชบุรี 70110
ผลงานตีพิมพ์	Jindarat Pariyothon, Sumaman Buntoung, Serm Janjai., 2016. Comparison of precipitable water obtained from radiosonde and ground - base measurement at Omkoi, Chiang Mai.

