

190960

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



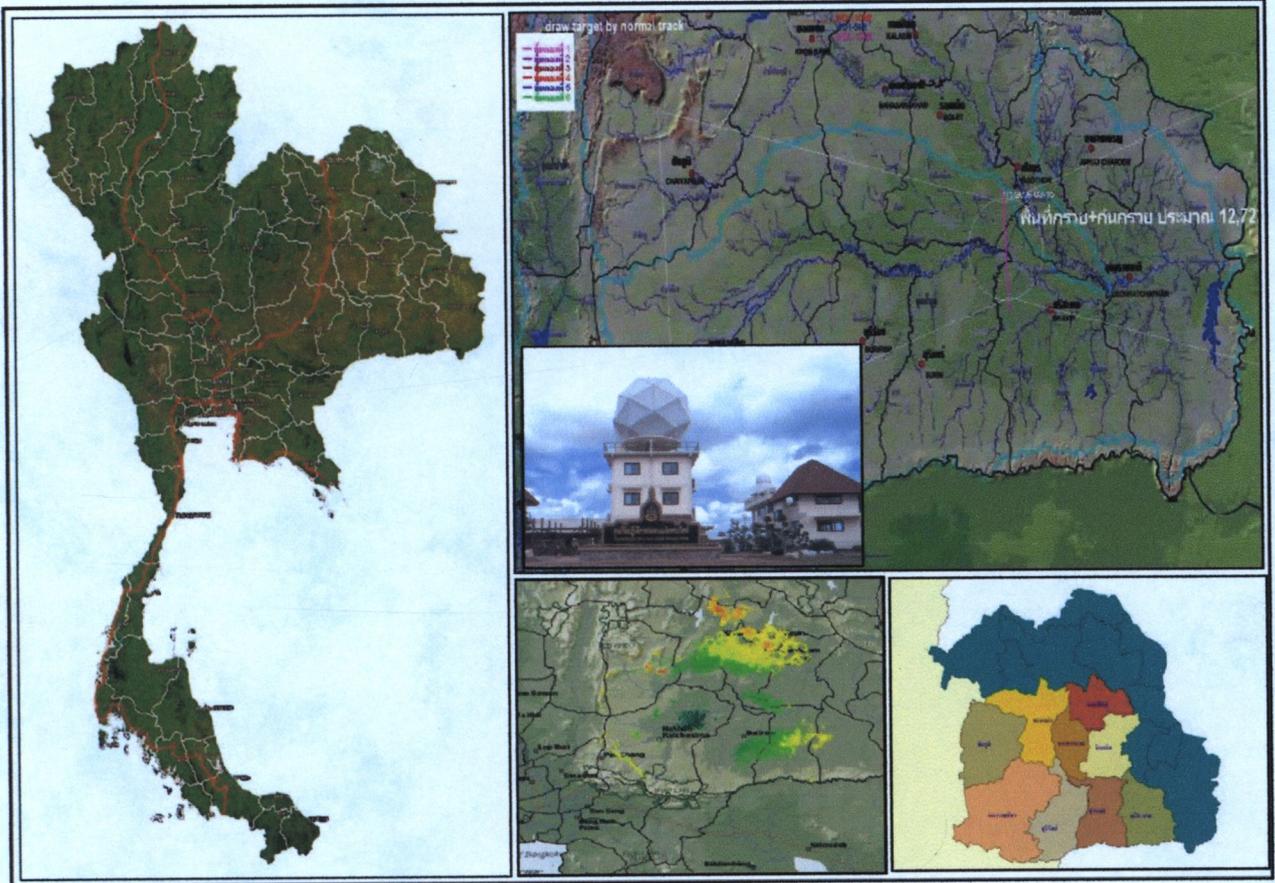
# รายงานฉบับสมบูรณ์

## การพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติการฝนหลวงในพื้นที่ลุ่มน้ำวิกฤต

### กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

*The Development of Rainmaking Efficiency over Critical Drought River Basins.*

*Case Study: The Northeastern River Basin, Thailand*



เล่ม ๑



สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร

สำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงเกษตรและอุตุนิยมวิทยา

ดำเนินการโดย



หน่วยวิจัยเทคโนโลยีธรณีสิ่งแวดล้อมและพิบัติภัยธรรมชาติ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมษายน 2551



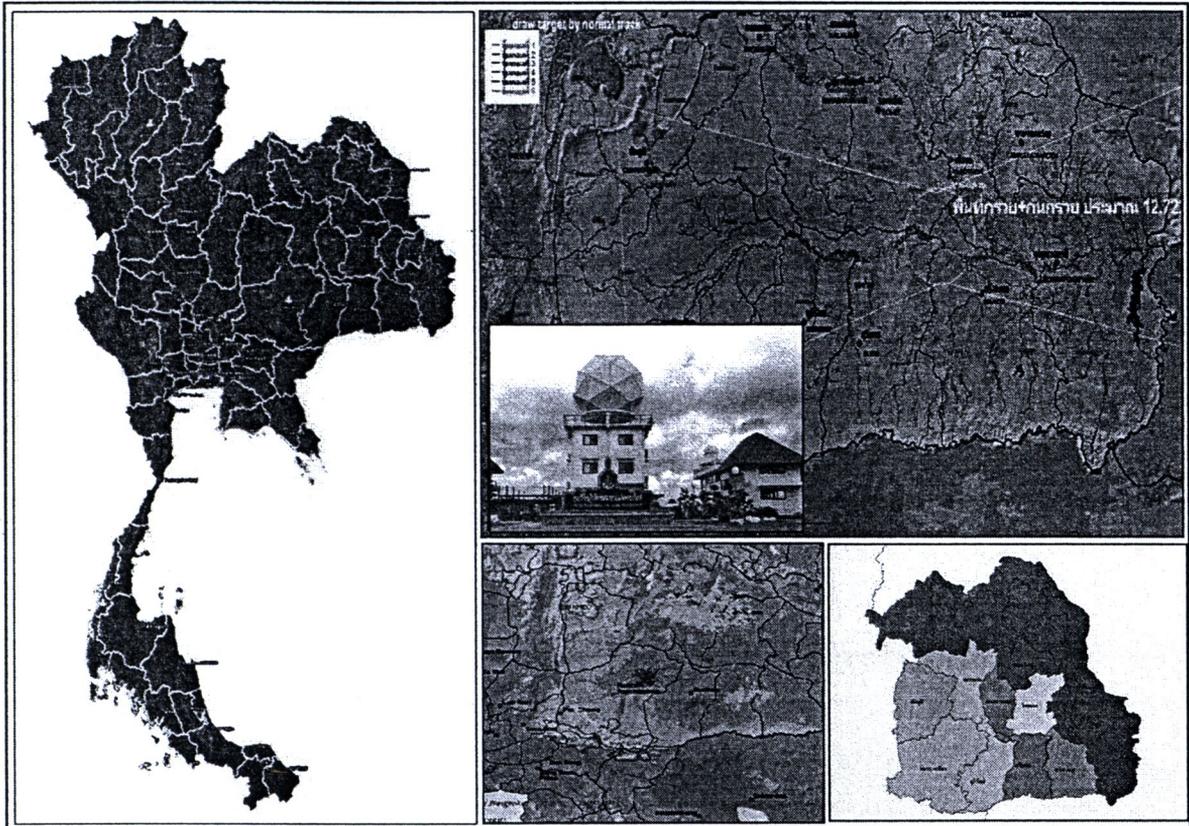
# รายงานฉบับสมบูรณ์

## การพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติการฝนหลวงในพื้นที่ลุ่มน้ำวิกฤต

### กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

*The Development of Rainmaking Efficiency over Critical Drought River Basins.*

*Case Study: The Northeastern River Basin, Thailand*



๑๕๓๑



สำนักงานฝนหลวงและการบินเกษตร

สำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ดำเนินการโดย



หน่วยวิจัยเทคโนโลยีชีวเคมีและพันธุวิศวกรรมชาติ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



เมษายน 2551

# รายงานฉบับสมบูรณ์

1. **เรื่อง :** การพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติการฝนหลวงในพื้นที่ลุ่มน้ำวิกฤต กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ  
The Development of Rainmaking Efficiency over Critical Drought River Basins. Case Study: The Northeastern River Basin, Thailand

2. **หน่วยงานรับผิดชอบ :**

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร

3. **คณะผู้ศึกษา**

3.1 **หัวหน้าโครงการ**

รศ.ดร.นิตยา เลหาะจินดา

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

3.2 **ผู้ร่วมโครงการ**

รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมโชค

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

ผศ. อรรถนพ หอมจันทร์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

ผศ.ดร.กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

ดร. วิรัช วงศ์ไพบูลย์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

อาจารย์วุฒิกกร ตริวิธานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

อาจารย์พงศกร จิวภรณ์คุปต์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

อาจารย์ประหยัด นันทศิลป์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

นางพุลศิริ ชูชีพ

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาระบบนิเวศเกษตร

นางสาวกรองจิต เกษจินดา

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

นางสาวปิยะมาศ อยู่วัฒนพงศ์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

## บทคัดย่อ

การพัฒนาประสิทธิภาพการปฏิบัติการฝนหลวงในพื้นที่ลุ่มน้ำวิกฤต กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะแวดล้อม และลักษณะอุตุนิยมวิทยาที่มีอิทธิพลในการเกิดฝน บริเวณลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สร้างฐานข้อมูลในการติดตามประเมินผลการทำฝนในลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาทำฝนในลุ่มน้ำวิกฤตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 ตารางกิโลเมตร จะมีสถานภาพความวิกฤตในระดับเตือนภัยถึงเสี่ยงภัยแล้ง ลุ่มน้ำที่มีสถานภาพในระดับเตือนภัยแล้ง ได้แก่ ลุ่มน้ำห้วยน้ำฮวย (สถานี Kh.78) ของลุ่มแม่น้ำโขง ลุ่มน้ำชี (ที่สถานี E.18 และ E.20A) และลุ่มน้ำมูล (ที่สถานี M.5 และ M.7) ลุ่มน้ำที่มีสถานภาพในระดับเสี่ยงภัยแล้ง ได้แก่ ลุ่มน้ำชี (ที่สถานี E.1) และลุ่มน้ำมูล (ที่สถานี M.6A และ M.8)

ผลการปฏิบัติการฝนหลวงของศูนย์ปฏิบัติการฝนหลวงที่ 5 ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550 รวมทั้งสิ้น 671 วัน มีวันปฏิบัติการฝนหลวงรวมทั้งสิ้น 253 วัน และไม่ปฏิบัติการรวมทั้งปิดดำเนินการจำนวน 418 วัน และมีรายงานของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรว่ามีฝนตกในพื้นที่เป้าหมายจำนวน 221 วัน จากการวิเคราะห์ตำแหน่งและเวลาการบินทำฝนบริเวณจังหวัดนครราชสีมาพบว่า ช่วงเวลาการโปรยสารเคมีที่มีประสิทธิผลมากที่สุดคือช่วงเวลาระหว่าง 10:30 ถึง 12:00 น. ทำให้มีฝนตกจำนวน 107 วัน และฝนตกเฉลี่ยมากและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง โดยการโปรยสารเคมีที่ระยะห่างเฉลี่ยจากเรดาร์ประมาณ 123.4 กิโลเมตร มีฝนตกเฉลี่ยในพื้นที่รูปกรวย 12.9 มิลลิเมตร ครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 34.7 ของพื้นที่รูปกรวย

จากจำนวนวันปฏิบัติการฝนหลวง 253 วัน พบว่ามีฝนตกในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการปฏิบัติการฝนหลวงหรือพื้นที่รูปกรวยจำนวน 221 วัน แต่เนื่องจากบางวันไม่มีข้อมูลภาพพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการปฏิบัติการฝนหลวงหรือพื้นที่รูปกรวย จึงสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้เพียง 217 วัน คือมีจำนวนวันที่มีฝนตกในพื้นที่เป้าหมายจำแนกตามเกณฑ์ปริมาณฝน 24 ชั่วโมง และเกณฑ์การกระจายของฝน คือมีพื้นที่ตกกระจายถึงฝนตกทั่วไป (มากกว่า 40% ของพื้นที่) มีถึง 76 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 33 ของพื้นที่ตกทั้งหมด และมีฝนตกมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร ถึง 172 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 79 ของพื้นที่ตกทั้งหมด ดังนั้นแสดงให้เห็นได้ว่า การปฏิบัติการฝนหลวงสามารถเพิ่มเติมน้ำฝนบริเวณพื้นที่รูปกรวยได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการปฏิบัติการทำฝนด้วย Double ratio โดยมีลุ่มน้ำบริเวณอำเภอชนบท จังหวัดขอนแก่นเป็นลุ่มน้ำควบคุม พบว่าพื้นที่ลุ่มน้ำของอ่างเก็บน้ำทั้ง 21 แห่งส่วนใหญ่มีค่า double ratio มากกว่า 1 แสดงว่าการปฏิบัติการทำฝนหลวงทำให้มีปริมาณฝนเพิ่มสูงขึ้นกว่าการเกิดเองตามธรรมชาติ โดยอ่างเก็บน้ำวังหิน ตั้งอยู่ที่จังหวัดศรีสะเกษมีค่า double ratio มากที่สุดเท่ากับ 1.36 เท่าของช่วงที่ไม่มีปฏิบัติการฝนหลวง (non seeded) และรองลงมาได้แก่ อ่างเก็บน้ำทุ่งกระเต็น อ.หนองกี่ จ.บุรีรัมย์ บึงทุ่งพงพุด อ.พล จ.ขอนแก่น และอ่างเก็บน้ำหนองทะเลอก อ.นางรอง จ.บุรีรัมย์ มีค่า double ratio เท่ากับ 1.32 1.24 และ 1.24 เท่าของช่วงที่ไม่มีปฏิบัติการฝนหลวง แสดงให้เห็นว่า

การปฏิบัติการทำฝนหลวงสามารถเพิ่มปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นการลดสภาพวิกฤตของลุ่มน้ำด้านความแห้งแล้ง บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ

จากการวิเคราะห์สภาวะอากาศระดับภูมิภาคบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า ในช่วงฤดูหนาวจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (NM) สภาวะอากาศที่มีอิทธิพลทำให้เกิดฝนตกในพื้นที่โครงการฯ คือ AH ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูหนาวเข้าสู่ฤดูร้อน (SIM) สภาวะอากาศที่มีอิทธิพลทำให้เกิดฝนตกในพื้นที่โครงการฯ คือ AH&HL ในช่วงเริ่มต้นฤดูฝนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (OSM) สภาวะอากาศที่มีอิทธิพลทำให้เกิดฝนตกในพื้นที่โครงการฯ คือ WSW ในช่วงกลางฤดูฝนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SM) สภาวะอากาศที่มีอิทธิพลทำให้เกิดฝนตกในพื้นที่โครงการฯ คือ AITCZ ในช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว (WIM) สภาวะอากาศที่มีอิทธิพลทำให้เกิดฝนตกในพื้นที่โครงการฯ คือ AH&HL

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนล่างและร้อยละของสถานีที่มีฝนตกบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง พบว่าเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำฟ้า (Precipitation Water, Pw) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ความสูง 10,000-18,000 ฟุต และดัชนีเสถียรภาพ LI ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนคลื่นเรดาร์ และอัตราการตกของฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติ พบว่าเมฆฝนแบบแผ่น มีสมการ  $Ze = 4.8068 R^{1.8582}$  ( $r^2 = 0.85$ ) และเมฆฝนที่ก่อตัวในแนวตั้ง พบว่า มีสมการ  $Ze = 10^{-5} R^{4.743}$  ( $r^2 = 0.80$ ) และพบว่าระยะทางระหว่างเรดาร์กับสถานีตรวจวัดน้ำฝนไม่มีความสัมพันธ์กับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของฝนและค่า Ze

จากการศึกษาเมฆพิลลัสบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้แก่ วิเคราะห์ค่าการสะท้อนครั้งแรกของเมฆ (first echo) จากข้อมูลเรดาร์ พบว่าในสภาวะอากาศแบบ WITCZ จะมีปริมาณของเมฆที่เกิดการสะท้อนครั้งแรกของเมฆมากที่สุด ร้อยละ 22.8 ของปริมาณเมฆที่เกิดการสะท้อนครั้งแรกทั้งหมด ส่วนทิศที่มีการสะท้อนครั้งแรกของเมฆมากที่สุดได้แก่ทิศเหนือของทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NNW) ร้อยละ 16 และรองลงมาได้แก่ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และเวลาที่เกิดการสะท้อนครั้งแรกของเมฆมากที่สุดคือ เวลา 8:12 น. ประมาณร้อยละ 52 แต่การเกิดการสะท้อนครั้งแรกแล้วก่อให้เกิดฝนตกรายวัน ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าในแต่ละฤดูกาล เมฆฝนจะเริ่มก่อตัวมากในเวลาที่ไม่แตกต่างกันมากนักคืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 12:00 น

ผลการศึกษาพฤติกรรมกรมการก่อตัวของเมฆฝน พบว่าอิทธิพลของร่องความกดอากาศต่ำ ทำให้ในช่วงฤดูฝนมีเมฆมากและฝนตกกระจาย มีปริมาณฝนน้อยถึงปานกลาง ฝนทิ้งช่วง 2 วันและอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้ในช่วงฤดูฝนมีเมฆปานกลาง ฝนตกเป็นแห่งๆ มีปริมาณฝนปานกลางถึงฝนหนัก ฝนทิ้งช่วง 1 วัน อิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อน ทำให้มีเมฆกระจายเต็มท้องฟ้า มีฝนตกทั่วไป ปริมาณฝนปานกลางถึงฝนหนัก อิทธิพลจากการแผ่ลิ้ม ความกดอากาศสูง ทำให้มีเมฆกระจายเต็มท้องฟ้าในวันแรก จากนั้นฟ้าใส มีฝนตกเป็นแห่งๆ ปริมาณฝนน้อย การปฏิบัติการทำฝนมีประสิทธิภาพสูง ในช่วงที่มีสภาวะอากาศแบบร่องมรสุมพาดผ่าน และในช่วงฤดูแล้งที่มีการแผ่ลิ้มของความกดอากาศสูง

## Abstract

190960

The objectives of the study on efficiency development of rainmaking in the critical Northeastern watersheds are the study on environmental conditions and meteorological characteristics influencing rainy cloud formation and data base for rainmaking evaluation as well as the suggestion for rainmaking development in the critical Northeastern watershed.

The Northeastern watershed covering the area more than 500 square kilometers are in the critical state of drought warning to risking. The drought warning subwatersheds were Huay Nam Huay (Station Kh.78) of the Mekong Watershed, stations E.18 and E 20A of Chi Watershed and stations M.5 and M.7 of Mun Watershed. The risking status subwatersheds were station E.1 of Chi Watershed and stations M6 and M8 of Mun Watershed. From a total of 671 days study periods beginning March 1, 2006 to December 31, 2007; there were 253 days of rainmaking operation and 418 days of non-operation days including the recess times.

The results of rainmaking operation reported by the Royal Rainmaking and Agricultural Aviation unit at Nakorn Ratchasima that the rainfall on the target areas from 221 raining days had the best operation times between 10:30 a.m. to 12:00 a.m. for 107 days. This operation time produced high average rainfall and large covered areas. The average distance for chemical dispersion that give the best results was 123.4 kilometer from the radar and inducing the average rainfall in the cone shape target area of 12.9 millimeter, covering 34.7 percents of the cone area.

From the total rainmaking days of 253 found that there were 221 days having the rainfall covered the areas affected by the rainmaking operation. But the complete information including the images of rainfall in the cone shape areas that can be used for analysis only 217 days. These 217 days were analyzed according to 24 hours raining amount distribution as: moderate to mostly distributed (more than 40% areas and up) 76 days covered 33 percents of the total rainfall; small amount of rainfall, more than 0.1 millimeter, 172 days covered 73 percent of the total rainfall. The results indicated that the Royal Rainmaking operation was able to enhance the rainfall in cone shape area very well.

The efficiency analysis on rainmaking operation by double ratio method on 21 watersheds of major reservoirs with Amphoe Chonnabot Reservoirs, Khon Kaen as control site revealed the double ratio values more than 1 which implied that rainmaking operation can enhance more rainfall. The maximum double ratio value was 1.36 at Wang Hin Reservoir, Si Sa Ket which means there was more rain from rainmaking operation in the reservoir 1.36 times of natural condition, and Tung Kraten Reservoir, Nong Ki, Buri Ram, Bung Thung Puang Pud,

Phon, Khon Kaen and Nong Talok Reservoir, Nang Rong, Buri Rum had double ratio values of 1.32, 1.27 and 1.24 respectively. The results confirmed that the royal Rainmaking operation had efficiently increased the water content in the reservoirs of the Northeastern region of Thailand and had good potential to decrease the drought situation in the regions.

Analysis on regional synoptic conditions in Northeastern areas found that in winter season, the influence of Northeastern Monsoon (NM) affecting the rainfall caused by synoptic weather conditions AH, but AH and HL influenced the rainfall in the summer intermonsoonal season (SIM). In Onset Southwest Monsoon Season (OSM), the synoptic weather condition influencing the rainfall in study area was WSW. In Southwest Monsoon Season (SM), influencing the mid rainy season rain is AITCZ condition. During Winter Intermonsoonal Season (WIM), the synoptic condition producing rainfall in the areas were AH and HL.

The relationship analysis between average rainfall amount in the lower Northeastern areas and percentage of rainfall stations indicated the correlation of precipitation water (PW), average relative humidity at 10,000 – 18,000 feet and Lifted Index (LI). The relationship between radar first echo and rate of rainfall obtained from recording raingauge found that Nimbostratus cloud had equation  $Ze = 4.8068 R^{1.8582}$  ( $r^2 = 0.85$ ) and Cumulonimbus cloud had equation  $Ze = 10^{-5} R^{4.743}$  ( $r^2 = 0.80$ ). There was no relationship between radar distance and raingauge station compared to GER and Ze values.

Cloud Physic Analysis from first echo of the radar found that the synoptic weather condition WITCZ had highest first echo of the cloud performing 22.8 percents of the total first echo, with highest cloud reflectivity of 16 percents in direction of North Northwestern (NNW) and Southwest (SW) respectively. The maximum cloud first echo time is 8:12 a.m. at 52 percents. The daily rainfall in Northeastern region from first echo in each season was no different. The maximum rain cloud forming time was no different in different seasons with the best time at 12:00 a.m.

The cloud formation behaviors are under the influence of intertropical convergent zone (ITCZ). The ITCZ conducts distributive low to medium amount of rainfall in the cloudy days of 2 days rainy-day intervals. The southwest monsoon effects on the locally distributed rain with medium to heavy rainfall in the partially cloudy day of rainy-day interval. The low pressure and depressive tropical storm influence on the cloudy sky with distributive medium to heavy rainfall for 1 or 2 days. The active high pressure and heat low conduct cloudy day with locally small amount rainfall. The most effective of rain making period should be operated under the ITCZ and during the summer season of active high pressure and heat low synoptic condition.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรที่ให้ความไว้วางใจในการดำเนินการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำฝนหลวงตามความต้องการน้ำด้านการเกษตรและด้านอื่นๆ จนกระทั่งประสบความสำเร็จตามความมุ่งหมาย

คณะวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งานและการวิจัยต่อไป

รศ.ดร.นิตยา เลาหะจินดา

หัวหน้าโครงการวิจัย

เมษายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(6)
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1-1
1.3 ลักษณะโครงการ	1-1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	1-2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-4
บทที่ 2 หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 ลุ่มน้ำ	2-1
2.2 หลักการและวิธีการวิเคราะห์ความวิกฤตของระบบลุ่มน้ำ	2-1
2.3 กระบวนการเกิดเมฆและฝน	2-2
2.4 สภาพภูมิอากาศเพื่อการทำฝนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	2-7
2.5 เรดาร์อุตุนิยมวิทยา	2-12
2.6 เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจทำฝน	2-21
2.7 เกณฑ์ที่ใช้ในการไม่ปฏิบัติการทำฝน	2-22
2.8 การประเมินปริมาณน้ำฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนบนพื้นดิน	2-25
2.9 ระบบปลูกพืชในเขตภูมิอากาศเขตร	2-26
2.10 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-35
บทที่ 3 พื้นที่ศึกษา	3-1
3.1 ที่ตั้งและอาณาเขต	3-1
3.2 ลักษณะภูมิประเทศ	3-3

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ลักษณะทางธรณีวิทยา	3-5
3.4 ลักษณะทางปฐพีวิทยา	3-7
3.5 ทรัพยากรป่าไม้	3-8
3.6 ลักษณะทางอุทกวิทยา	3-9
3.7 ลักษณะภูมิอากาศ	3-11
บทที่ 4 ผลการศึกษา	4-1
4.1 พื้นที่ลุ่มน้ำวิกฤตบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-1
4.2 การปฏิบัติการฝนหลวงบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-15
4.3 ระบบปลูกพืชในเขตภูมิอากาศเกษตร	4-32
4.4 สภาวะอากาศบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-45
4.5 ข้อมูลตรวจอากาศชั้นบน	4-52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนคลื่นเรดาร์ และอัตราการตกของฝนจาก เครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติ	4-55
4.7 อัตราการตกของฝนกับสภาวะอากาศ	4-62
4.8 เมฆพิลิกส์บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	5-1
5.1 สรุปผลการศึกษา	5-1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5-6
เอกสารอ้างอิง	6-1

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การประเมินสภาพลุ่มน้ำวิกฤตในประเทศไทย โดยใช้ลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2-2
2.2	ชนิดของเมฆ จำแนกตามลักษณะการเกิดและความสูง	2-3
2.3	ชนิดคลื่น ความยาวช่วงคลื่นและช่วงความถี่เรดาร์	2-16
2.4	เกณฑ์ความเหมาะสมของสภาพอากาศในการปฏิบัติการฝนหลวง	2-24
2.5	ความหนาแน่นน้อยสุดของเครือข่ายสถานีวัดน้ำฝน	2-25
3.1	การกระจายของหมวดหินในกลุ่มหินโคราช	3-5
4.1	ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มแม่น้ำโขง	4-3
4.2	ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชี	4-5
4.3	ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำมูล	4-8
4.4	ปริมาณน้ำท่าที่คาดคะเนโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีกับขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับลุ่มน้ำศึกษา	4-11
4.5	การวิเคราะห์ความวิกฤตของลุ่มน้ำบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-12
4.6	การปฏิบัติการฝนหลวงในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 กรกฎาคม พ.ศ.2550	4-15
4.7	ผลการประเมินเปรียบเทียบวิธีการทำฝน (เวลาเริ่มโปรยสาร และทิศทางการบิน) ของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 กรกฎาคม พ.ศ.2550	4-17
4-8	ผลการประเมินเปรียบเทียบวิธีการทำฝน (เวลาเริ่มโปรยสาร และทิศทางการบิน) ของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550 ในจุดภาคที่ 1	4-18
4.9	ผลการประเมินเปรียบเทียบวิธีการทำฝน (เวลาเริ่มโปรยสาร และทิศทางการบิน) ของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550 ในจุดภาคที่ 2	4-19
4.10	ผลการประเมินเปรียบเทียบวิธีการทำฝน (เวลาเริ่มโปรยสาร และทิศทางการบิน) ของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550 ในจุดภาคที่ 3	4-20

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.11	ผลการประเมินเปรียบเทียบวิธีการทำฝน (เวลาเริ่มโปรยสาร และทิศทางการบิน) ของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550 ในจุดภาคที่ 4	4-23
4.12	เกณฑ์การพยากรณ์อากาศบริเวณที่มีฝนตก	4-26
4.13	เกณฑ์การกำหนดปริมาณฝนตกรวมระยะเวลา 24 ชั่วโมง	4-26
4.14	จำนวนวันที่มีฝนตกในพื้นที่โครงการฯ จำแนกตามเกณฑ์ปริมาณฝน 24 ชั่วโมง และเกณฑ์การกระจายของฝน ในระหว่างวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550	4-27
4.15	จำนวนวันที่มีฝนตกในพื้นที่เป้าหมาย (พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากปฏิบัติการฝนหลวง หรือพื้นที่รูปกรวย) จากปฏิบัติการของศูนย์ปฏิบัติการฝนหลวงที่ 4 จำแนกตามเกณฑ์ปริมาณฝน 24 ชั่วโมง และเกณฑ์การกระจายของฝน ในระหว่างวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550	4-29
4.16	ค่า double ratio ของอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่บริเวณพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ.2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2550	4-32
4.17	ความต้องการน้ำด้านเกษตรกรรมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4-33
4.18	ความถี่และช่วงเวลาที่ฝนตก สภาพอากาศระดับภูมิภาคต่างๆ กัน เปรียบเทียบระหว่างฤดูของกลุ่มปีที่มีฝนตกน้อย (DRY) กลุ่มปีที่มีฝนตกมาก (WET) และกลุ่มปีค่ามัธยฐาน (MED) ของฝนจากข้อมูลระหว่างปีพ.ศ.2524 ถึง ปีพ.ศ.2543 ในลุ่มน้ำของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4-47
4.19	จำนวนวันที่ฝนตกที่มีโอกาสเกิดขึ้นจากสภาพอากาศระดับภูมิภาค บริเวณลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-50
4.20	การประเมินดัชนีสภาพอากาศระดับภูมิภาค จากระดับปริมาณฝนและระดับขนาดพื้นที่ปกคลุมของฝน	4-51
4.21	สภาพอากาศระดับภูมิภาคบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2549 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2550	4-52
4.22	รายละเอียดของสถานีและวันที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อน และอัตราการตกของฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติ	4-56
4.23	ระยะห่างระหว่างสถานีเรดาร์กับสถานีตรวจวัดน้ำฝน	4-61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนกับสภาวะอากาศ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-62
4.25	ร้อยละของพื้นที่เมฆที่มีค่าการสะท้อนครั้งแรกในแต่ละสภาวะอากาศ	4-64
4.26	ค่าสะท้อนครั้งแรกของเมฆที่ก่อให้เกิดเมฆฝนในแต่ละฤดู	4-68
4.27	ปริมาณเมฆที่ปกคลุมพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือรายวันเฉลี่ยตามสภาวะอากาศแบบต่างๆ เฉพาะที่มีค่าการสะท้อนตั้งแต่ 22 เดซิเบลขึ้นไป	4-69
4.28	เปรียบเทียบสภาวะอากาศระดับภูมิภาครายวัน (ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2549 - ธันวาคม 2550) ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4-71
4.29	สภาวะอากาศระดับภูมิภาครายวัน ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทย (ช่วงเดือนมีนาคม 49-ธันวาคม 50) ใน 5 ฤดูกาล	4-74

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการชนและรวมตัวกัน (collision-coalescence process) และกระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal growth process)	2-5
2.2	ปัจจัยเสริมในการเกิดเมฆและฝน	2-7
2.3	สภาพภูมิอากาศ มวลอากาศและร่องมรสุมบริเวณประเทศไทย	2-10
2.4	ลักษณะของการหมุนเวียนของกระแสอากาศชั้นบนและชั้นล่างในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย	2-11
2.5	ลักษณะของสภาวะอากาศในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย	2-11
2.6	การตรวจจับวัตถุของเรดาร์	2-13
2.7	เรดาร์ปฐมภูมิ (ซ้าย) เรดาร์ทุติยภูมิ (ขวา)	2-14
2.8	เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ – ส่งสัญญาณร่วมกัน (Monostatic radar)	2-15
2.9	เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ – ส่งสัญญาณแยกกัน (Bistatic radar)	2-15
2.10	ระยะทางและความกว้างของ빔ที่ใช้หาค่าความหนาแน่นของกำลังงานของเรดาร์	2-19
2.11	ค่าภาคตัดขวางในการสะท้อนของวัตถุ (RCS) ขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทางการวางตัว	2-19
3.1	ที่ตั้งและอาณาเขตของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	3-2
3.2	ลักษณะภูมิประเทศบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	3-4
3.3	ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	3-6
3.4	การเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรป่าไม้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (2504-2536)	3-8
4.1	ลุ่มน้ำหลักบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-1
4.2	สถานีวัดน้ำท่าบริเวณลุ่มแม่น้ำโขง	4-2
4.3	กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่า (ล้านลูกบาศก์เมตร) กับขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร) ของลุ่มน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพและการใช้ประโยชน์ที่ดินตามเกณฑ์ที่กำหนด ของลุ่มแม่น้ำโขง	4-4
4.4	สถานีสำรวจอุทกวิทยาบริเวณลุ่มน้ำชี	4-6
4.5	กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร) กับขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร) ของลุ่มน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพและการใช้ประโยชน์ที่ดินตามเกณฑ์ที่กำหนด ของลุ่มน้ำชี	4-7
4.6	สถานีสำรวจอุทกวิทยาบริเวณลุ่มน้ำมูล	4-9

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.7	กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร) กับขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร) ของลุ่มน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพและการใช้ประโยชน์ที่ดินตามเกณฑ์ที่กำหนดของลุ่มน้ำมูล	4-10
4.8	สถานีที่มีสถานภาพเดือนภัยและเสี่ยงภัยแล้ง	4-14
4.9	จำแนกตำแหน่งและทิศทางการบินทำฝนจากระวางแผนที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็น 4 จุดภาค เพื่อประกอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบินทำฝน	4-16
4.10	สถานีตรวจวัดน้ำฝนพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เฉพาะพื้นที่ศึกษาของโครงการ	4-25
4.11	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนมกราคม	4-34
4.12	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนกุมภาพันธ์	4-35
4.13	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนมีนาคม	4-36
4.14	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนเมษายน	4-37
4.15	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนพฤษภาคม	4-38
4.16	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนมิถุนายน	4-39
4.17	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนกรกฎาคม	4-40
4.18	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนสิงหาคม	4-41
4.19	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนกันยายน	4-42
4.20	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนตุลาคม	4-43
4.21	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนพฤศจิกายน	4-44
4.22	แสดงระดับความต้องการน้ำของพีระดับอำเภอเดือนธันวาคม	4-45
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพการสะท้อนคลื่นเรดาร์และอัตราการตกของฝนธรรมชาติ และฝนจากการปฏิบัติการทำฝนที่วัดจากเครื่องวัดน้ำฝนอัตโนมัติของเมฆแบบแบน (บน) และเมฆฝนที่ก่อตัวในแนวตั้ง (ล่าง)	4-58
4.24	การเปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดน้ำฝนกับอัตราการตกของฝนสำหรับเมฆฝนแบบแบน ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5	4-59
4.25	การเปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดน้ำฝนกับอัตราการตกของฝนสำหรับเมฆฝนที่ก่อตัวในแนวตั้ง ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.6	4-60
4.26	การวิเคราะห์ทิศทางและเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เมฆที่เกิดการสะท้อนครั้งแรก (first echo) จากเรดาร์ตรวจอากาศตามสภาวะอากาศแบบ AITCZ, ASW และ D&L(1)	4-65
4.27	การวิเคราะห์ทิศทางและเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เมฆที่เกิดการสะท้อนครั้งแรก (first echo) จากเรดาร์ตรวจอากาศตามสภาวะอากาศแบบ WITCZ, WSW และ D&L(2)	4-66

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.28	การวิเคราะห์ทิศทางและเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เมฆที่เกิดการสะท้อนครั้งแรก (first echo) จากเรดาร์ตรวจอากาศตามสภาวะอากาศแบบ WT และ HL	4-67
4.29	ช่วงเวลาที่เกิดการสะท้อนครั้งแรกของเมฆ (First echo)	4-68
4.30	เปรียบเทียบจำนวนวันของอิทธิพลสภาวะอากาศที่ก่อให้เกิดฝนตกแต่ละฤดูกาล ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงปี พ.ศ. 2549 และ 2550	4-72
4.31	เปรียบเทียบร้อยละของอิทธิพลสภาวะอากาศที่ก่อให้เกิดฝนตกแต่ละฤดูกาล ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงปี พ.ศ. 2549 และ 2550	4-73
4.32	การจำแนกสภาวะอากาศระดับภูมิภาครายวัน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ใน 5 ฤดูกาล โดยแสดงค่าจำนวนวันในภาพ (ก) และค่าร้อยละของวันในภาพ (ข)	4-78
4.33	แผนที่อากาศแสดงสภาพอากาศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูเปลี่ยนจากฤดูหนาวเข้าสู่ฤดูร้อน	4-80
4.34	แผนที่อากาศแสดงสภาพอากาศ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูเริ่มต้นฤดูฝนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้	4-81
4.35	แผนที่อากาศแสดงสภาพอากาศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SM)	4-82
4.36	แผนที่อากาศแสดงสภาพอากาศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเข้าสู่ฤดูหนาว(WIM)	4-83
4.37	แผนที่อากาศแสดงสภาพอากาศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฝนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงฤดูหนาวจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (NM)	4-84
4.38	แผนที่อากาศในช่วงที่มีพายุหมุนเขตร้อนเคลื่อนตัวเข้าสู่ประเทศไทย ส่งผลให้ประเทศไทยมีฝนตกในปริมาณที่มาก	4-88
4.39	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆตัวอย่าง ในวันที่ 17 และ 19 มิถุนายน 2549 (อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-90
4.40	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมายของวันที่ 13 มิถุนายน 2549 (อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อ่อนกำลัง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ภารกิจ/ขั้นตอน : 1/2 13.45-14.05น., 2/3 15.10-15.22 น.)	4-91
4.41	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 21 มิถุนายน 2549 (อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ภารกิจ/ขั้นตอน: 1/2 13.57-14.14 น., 2/3 15.16-15.28 น.)	4-92

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.42	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 23 มิถุนายน 2549 (อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ภารกิจ/ขั้นตอน: 1/2 13.57-14.14 น., 2/3 15.16-15.28 น.)	4-93
4.43	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2549 (อิทธิพลจากร่องมรสุมกำลังแรง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-95
4.44	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2549 (อิทธิพลจากร่องมรสุมกำลังแรง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ภารกิจ/ขั้นตอน: 1/1 10.55-11.15 น., 2/2 11.00-11.20 น., 3/3 13.10-13.25 น., 4/4 15.35-15.50 น., 5/6 14.32-15.34 น.	4-96
4.45	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 24 และ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2549 (อิทธิพลจากร่องมรสุมอ่อนกำลัง) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-97
4.46	สัดส่วนค่าการสะท้อนของเมฆในพื้นที่เป้าหมาย ในวันที่ 24 และ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2549 (อิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อนในพื้นที่ทะเลจีนใต้) บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	4-98

## อักษรย่อ

### ฤดูกาล:

- NM = Northeast Monsoon Season during November to February.  
 SIM = Summer Intermonsoonal Season during March to April.  
 OSM = Onset Southwest Monsoon Season during May to June.  
 SM = Southwest Monsoon Season during July to September.  
 WIM = Winter Inter Monsoonal Season during October

### สภาวะอากาศ:

- CON = Confluence of the low level flow (streamlines) between warm and moist airmass from the South china sea joining with warm and very moist airmass from the Andaman sea.  
 S WIND = The southerly wind from Gulf of Thailand to the heat low cell inland over Indo-china Peninsular.  
 E WIND = The easterly winds from Pacific Subtropical high and South china sea.  
 AH&HL = the active high pressure or cold surges contaminated with heat low cell, usually occur in transition period of the monsoon winds over upper Thailand.  
 ASW = The active southwest monsoon winds.  
 WITCZ = The influential of moderate and weak intertropical convergence zone.  
 DEP&LOW = The influential movement of tropical storm and low depression from the Andaman sea and the South China sea.  
 AITCZ = The influential of active intertropical convergence zone

### สูตรคำนวณอัตราส่วนเชิงซ้อน (Double ratio):

- TS = Target Seeded  
 CS = Control Seeded  
 TN = Target Non Seeded  
 CN = Control Non Seeded
- Ze = Equivalent Radar reflectivity factor ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )  
 GER = Gauge Estimate rainfall (mm/hr)