บทที่ 2
หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลุ่มน้ำ

ลุ่มน้ำ (Watershed) หมายถึง หน่วยพื้นที่หนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำโดยเฉพาะ มีขนาดตามความต้องการของบุคคลและประเภทของการศึกษา โดยมีผลิตผลที่ต้องการสูงสุดของการจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำคือ ปริมาณ คุณภาพและระยะเวลาการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัด (Indicators Index) ที่สำคัญทำให้ทราบได้ว่า การจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำนั้นๆ มีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด

2.2 หลักการและวิธีการวิเคราะห์ความวิกฤตของระบบลุ่มน้ำ

การประเมินลุ่มน้ำวิกฤต

เกษม จันทร์แก้ว และคณะ (2539) กำหนดหลักการและเกณฑ์ในการวิเคราะห์ลุ่มน้ำวิกฤต โดยการประเมินลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบ (ชนิด ปริมาณ สัดส่วนและการกระจาย) และการทำหน้าที่ขององค์ประกอบของลุ่มน้ำ ซึ่งแสดงสถานภาพของลุ่มน้ำหรือระบบลุ่มน้ำเป็นระดับความวิกฤตของพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งประกอบด้วยระดับสมดุล ระดับเตือนภัย ระดับเสี่ยงภัย และระดับวิกฤต มีรายละเอียดดังนี้

1) ในกรณีที่โครงสร้างและหน้าที่ขององค์ประกอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงไปบ้างแต่ไม่เกินมาตรฐานที่หน่วยงานทางสิ่งแวดล้อมได้กำหนดไว้ เรียกว่า ระบบลุ่มน้ำนั้นอยู่ในสภาพสมดุล

2) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ขององค์ประกอบไปจนเกินมาตรฐาน แต่สามารถคืนสภาพได้ในเวลารวดเร็ว เรียกว่า ระบบลุ่มน้ำนั้นอยู่ในสภาพเตือนภัย

3) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ขององค์ประกอบไปจนเกินมาตรฐาน และต้องใช้เวลาในการคืนสภาพระยะหนึ่ง เรียกว่า ระบบลุ่มน้ำ นั้นอยู่ในสภาพเสี่ยงภัย

4) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ขององค์ประกอบไปจนเกินมาตรฐาน และต้องใช้เวลาในการคืนสภาพนานมาก หรือไม่สามารถคืนสภาพได้ เรียกระบบลุ่มน้ำนั้นอยู่ในสภาพวิกฤต

Witthawatchutikul (1997) เสนอแบบจำลองในการประเมินสภาพลุ่มน้ำวิกฤตในประเทศไทย โดยใช้ลักษณะภูมิกายภาพ (Physiographic conditions) ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ลักษณะการไหลของน้ำสูงสุดในฤดูฝน ลักษณะการไหลของน้ำต่ำสุดในฤดูแล้ง และปริมาณตะกอนที่ถูกพัดพาออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยกำหนดเกณฑ์ของสถานภาพสมดุล เตือนภัย เสี่ยงภัย และวิกฤตในลุ่มน้ำภาคตะวันออก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตารางที่ 2.1 การประเมินสภาพลุ่มน้ำวิกฤตในประเทศไทย โดยใช้ลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

พื้นที่	อัตราการไหลสูงสุด/พื้นที่ (Qp/A) (ลบ.ม./วินาที/ตร.กม.)			ปริมาณน้ำท่าต่ำสุด/พื้นที่(Ql/A) (ล้านลบ.ม./ตร.กม.)			ปริมาณตะกอน/พื้นที่ (Sy/A) (ตัน/ตร.กม.)		
(ตร.กม.)	normal	Warning	risking	normal	warning	risking	normal	warning	Risking
50	2.97	3.31	3.65	0.0269	0.0235	0.0201	45.30	46.24	47.18
100	1.49	1.66	1.83	0.0350	0.0306	0.0262	30.94	31.59	32.23
500	0.30	0.33	0.36	0.0645	0.0564	0.0483	12.77	13.03	13.30

ที่มา: Witthawatchutikul (1997)

หมายเหตุ: Qp = อัตราการไหลสูงสุด (The peak discharge;cms)
A = พื้นที่ (Area; sq.km)
Ql = ปริมาณการไหลต่ำสุด (The low flow amount or minimum discharge; MCM)
Sy = ปริมาณตะกอน (Sedimentary Yield; tons)
ถ้าค่า Qp/A มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดแสดงว่าอยู่ในสภาพเสี่ยงภัยอุทกภัย และถ้าค่า Ql/A มีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดแสดงว่าอยู่ในสภาพเสี่ยงภัยแล้ง

2.3 กระบวนการเกิดเมฆและฝน

1) กระบวนการเกิดเมฆ

เมฆ (Cloud) คือ มวลอากาศที่ลอยตัวขึ้นจากผิวดินจนถึงระดับความสูงหนึ่ง จึงเกิดการควบแน่นเนื่องจากสภาวะอากาศในขณะนั้นมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เกิดหยดน้ำ (Water droplets) หรือ ผลึกน้ำแข็ง (Ice crystals) แขวนลอยอยู่ในมวลอากาศนั้น (Wallace and Hobb, 1977) ดังนั้น กระบวนการเกิดเมฆจึงเกิดจากกระบวนการควบแน่น ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย 3 ประการ คือ

- ไอน้ำในอากาศ (Water vapor)
- กลวิธีในการควบแน่น (Mechanism of condensation)
- แกนควบแน่น (Condensation nuclei)

เมฆ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ เมฆชั้นสูง เมฆชั้นกลาง เมฆชั้นต่ำ และเมฆที่ก่อตัวตามแนวตั้ง เมฆแต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ โดยมีชื่อเรียกตามลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.2) สำหรับเมฆที่เกี่ยวข้องในการทำฝนหลวงส่วนใหญ่ คือ เมฆคิวมูลัส (Cumulus)

2) การเกิดเมฆคิวมูลัส

ในตอนเช้าของวันใหม่เมื่อพลังงานจากดวงอาทิตย์ ตกกระทบพื้นผิวโลก พลังงานบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้พื้นโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความแตกต่างของความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบรวมถึงคุณสมบัติในการรับความร้อนที่แตกต่างกันของพื้นผิวโลก ทำให้อุณหภูมิบริเวณต่างๆ เพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเกิดการแผ่พลังงานความร้อนออกสู่อากาศเพิ่มมากขึ้น อากาศที่สัมผัสอยู่กับพื้นผิวที่ร้อนกว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศบริเวณข้างเคียง จึงลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเบื้องบนและมีการไหลเข้ามาแทนที่ของอากาศที่แวดล้อมอยู่โดยรอบ ซึ่งกระบวนการนี้มีชื่อเรียกว่า การพาความร้อน (Convection) ในทำนองเดียวกัน ในช่วงเวลากลางวัน พื้นดินจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำก่อให้เกิดกระแสลม (Wind) ในระดับต่ำที่พัดจากทะเลเข้าสู่แผ่นดิน และพาความชื้นและสารแขวนลอยที่เกิดจากการระเหย (Evaporation) ของน้ำทะเลเข้าสู่แผ่นดิน และสะสมอยู่ในบรรยากาศระดับต่ำก่อนที่จะมีการคลุกเคล้า (Mixing) และป้อนเข้าสู่ระบบของการลอยสูงขึ้น (Upward motion) ก่อเกิดเป็นเมฆและอาจตกเป็นฝนในที่สุด

การที่เมฆจะสามารถรักษารูปทรงหรือมีขนาดโตขึ้นต่อไปได้ในบรรยากาศโดยรอบที่แห้งกว่านั้น จะต้องอาศัยกระบวนการพาความร้อนและกระบวนการควบแน่น (Convection and Condensation Process) บริเวณใต้ฐานเมฆที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มก้อนเม็ดน้ำ (Cloud droplets) เข้าไปในก้อนเมฆในอัตราที่เท่ากับหรือสูงกว่าการระเหยของเม็ดน้ำที่ผิวของก้อนเมฆอันเนื่องมาจากการคลุกเคล้ากับอากาศแห้งโดยรอบ (Entrapment) ดังนั้น ช่วงอายุของเมฆ ขนาดของเมฆ และอัตราการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำภายในเมฆ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จในการตกเป็นฝน เมื่อพิจารณาเมฆคิวมูลัสในบางวันที่ก่อตัวเป็นเมฆในสภาพอากาศทรงตัว ซึ่งไม่มีการเจริญเติบโตและจะสลายตัวไปในตอนบ่ายโดยไม่ตกเป็นฝน จึงเรียกชื่อเมฆนี้ว่าเมฆคิวมูลัสในภาวะอากาศดี (Fair Cumulus)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของเมฆ จำแนกตามลักษณะการเกิดและความสูง

ชนิดเมฆ	ชื่อเมฆ	ความสูง (กม.)	ลักษณะ
ชั้นสูง	เซอร์รัส (Cirrus, Ci)	6 - 18	ริ้วขาวบาง
	เซอร์โรสเตรตัส (Cirrostratus, Cs)		แผ่นขาวบาง
	เซอร์โรคิวมูรัส (Cirrocumulus, Cc)		ก้อนเล็กคล้ายระลอกทราย
ชั้นกลาง	อัลโตสเตรตัส (Altostratus, As)	2-8	แผ่นทึบและต่ำกว่าเซอร์โรสเตรตัส คล้ายฝูงแกะ
	อัลโตคิวมูลัส (Altocumulus, Ac)		
ชั้นต่ำ	สเตรโตคิวมูรัส (Stratocumulus, Sc)	ผิวพื้น - 2	อยู่ต่ำ ก้อนกลมเป็นคลื่น
	นิมโบสเตรตัส (Nimbostratus, Ns)		แผ่นหนาฟ้ามืดครึ้ม
ก่อตัวแนวตั้ง	คิวมูรัส (Cumulus, Cu)	ผิวพื้น - 18	เมฆก้อนหนา
	คิวมูโลนิมบัส (Cumulonimbus; Cb)		ก้อนหนาทึบยอดแผ่สูง

ที่มา: Ahrens (1998)

3) เสถียรภาพของอากาศ (Stability of air)

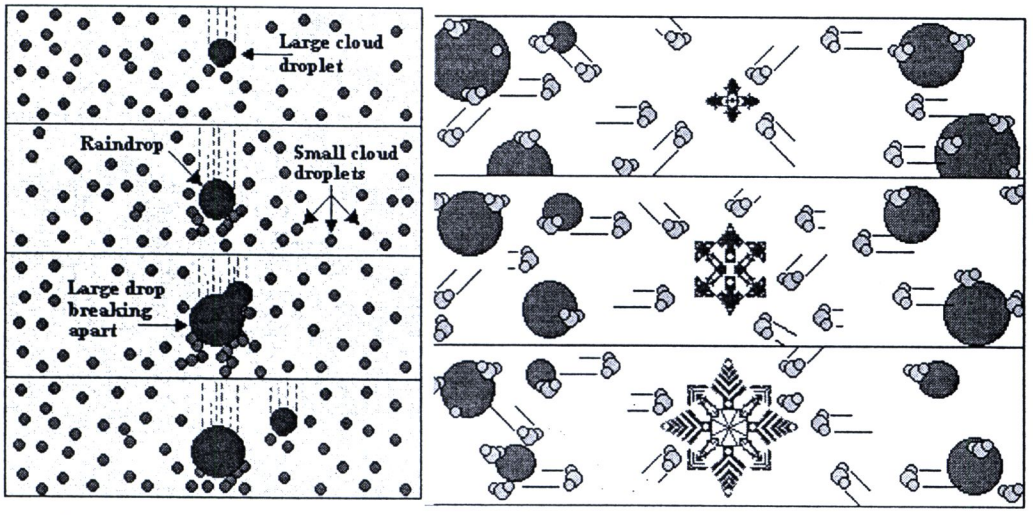
การเจริญเติบโตของเมฆนั้นขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของอากาศในแต่ละวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากทฤษฎีกล่องอากาศ (Parcel Theory) กล่าวว่า ถ้ากำหนดแบ่งมวลของอากาศให้เป็นปริมาตรของกล่องเล็ก (Parcel) กล่องอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศข้างเคียงจะถูกยกให้ลอยขึ้น ขณะที่กล่องอากาศลอยสูงขึ้นไปในบรรยากาศ จะเกิดการขยายตัวทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในกล่องลดลงในอัตราประมาณ 9.8 องศาเซลเซียส ทุกๆ ความสูง 1 กิโลเมตร เรียกว่าอัตราการลดอุณหภูมิตามความสูงแบบ อะเดียแบติกแห้ง (Dry adiabatic lapse rate) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dewpoint) จะลดลงประมาณ 2 องศาเซลเซียสทุกๆ 1 กิโลเมตร ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิทั้งสอง (Dewpoint depression) จะลดลงเป็นลำดับในขณะที่กล่องอากาศลอยสูงขึ้นไป จนถึงระดับที่อุณหภูมิทั้งสองเท่ากัน จะเป็นระดับที่อากาศภายในกล่องจะเริ่มอิ่มตัวด้วยไอน้ำ (Saturation) หรือมีความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์

เมื่อกล่องอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ จะเริ่มเกิดการควบแน่นของไอน้ำ (Condensation) บนพื้นผิวของอนุภาคสารแขวนลอยชนิดต่างๆ เรียกว่า แกนกลั่นตัว (Cloud condensation nuclei, CCN) เกิดเป็นเม็ดน้ำจำนวนมากและปรากฏเป็นเมฆ ถ้ากล่องอากาศยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแวดล้อม กล่องอากาศจะลอยสูงขึ้นต่อไป แต่อัตราการลดลงของอุณหภูมิตามความสูงหลังจากอากาศอิ่มตัวจะลดลงเหลือประมาณ 5 องศาเซลเซียส ต่อ 1 กิโลเมตร เรียกว่า อัตราการลดอุณหภูมิตามความสูงแบบอะเดียแบติกอิ่มตัว (Saturation adiabatic lapse rate) จนกระทั่งอุณหภูมิภายในกล่องอากาศเคลื่อนที่ขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม การเคลื่อนที่ของมวลกล่องอากาศจะหยุดลง ซึ่งจะเป็นระดับของยอดเมฆสูงสุดประจำวัน (Neutral buoyancy level หรือ Equilibrium level) ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างอัตราการลดอุณหภูมิตามความสูงของกล่องอากาศ กับอุณหภูมิที่ลดลงของชั้นบรรยากาศ (Environmental lapse rate) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของบรรยากาศ (Stability index) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า วันที่อากาศไม่เสถียรภาพ (Unstable) จะเป็นวันที่เมฆก่อตัวและเจริญเติบโตได้ดี และมีโอกาสตกเป็นฝนได้มากกว่าวันที่บรรยากาศเสถียรภาพหรือทรงตัว (Stable)

4) กระบวนการเกิดฝน

กระบวนการควบแน่นจะทำให้เกิดหยดน้ำขนาดเล็ก ดังนั้น การเพิ่มขนาดและปริมาณของหยดน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต่อเนื่องในกระบวนการเกิดเมฆ ซึ่งประกอบด้วย (1) กระบวนการชนและรวมตัวกัน (Collision-coalescence process) กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเมฆที่มีการรวมตัวกันของหยดน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง เรียกว่า เมฆอุ่น (Warm cloud) การชนและการรวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดน้ำที่เหมาะสม ประจุไฟฟ้าในหยดน้ำ สนามไฟฟ้าในเมฆ ความหนาแน่นของเมฆ และกระแสการไหลขึ้น (Updraft) ในเมฆ หยดน้ำในเมฆจะไหลลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดการชนกัน

กับหยดน้ำขนาดเล็กกว่าเกิดเป็นการเพิ่มขนาดขึ้นตามลำดับ (ภาพที่ 2.1) กระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal growth process) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้เกิดหยาดน้ำฟ้าในบริเวณเขตอบอุ่นหรือเขตหนาว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นในเมฆส่วนที่อยู่ในระดับความสูงกว่าระดับเยือกแข็งหรือต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส จึงเรียกเมฆชนิดนี้ว่า เมฆเย็น (Cold cloud) หยดน้ำในเมฆนั้นเรียกว่า หยดน้ำเย็นยิ่งยวด (Super cooled droplets) กระจายรอบผลึกน้ำแข็งเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นเกินกว่ากระแสอากาศจะพยุงไหว ก็จะตกลงมาเกิดการเพิ่มขนาดไปเรื่อยๆ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เกิดเป็นหิมะ (Snow) หรือหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) ตกลงบนพื้นดินในที่สุด



ภาพที่ 2.1 กระบวนการชนและรวมตัวกัน (collision-coalescence process) และกระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal growth process)
ที่มา: http://www.rbs2.com/w2.htm (2005)

ดังนั้น กระบวนการเกิดฝนที่สำคัญมี 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเกิดฝนในเมฆอุ่น และกระบวนการเกิดฝนในเมฆเย็น

1) กระบวนการเกิดฝนในเมฆอุ่น (Warm rain process)

เมฆอุ่น คือ เมฆที่มีการเจริญเติบโตและให้ฝนในชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยมีกระบวนการชนกันและรวมตัวกัน (Collision and Coalescence process) เป็นกระบวนการหลักในการเจริญเติบโตของเม็ดน้ำ ซึ่งอธิบายได้ว่า เม็ดน้ำภายในเมฆที่เกิดจากกระบวนการควบแน่นของไอน้ำบนแกนกลั่นตัว (CCN) จะมีขนาดเล็กมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งจะมีการรวมตัวของเม็ดน้ำจำนวนหนึ่งทำให้มีขนาดที่แตกต่างกัน จากนั้นเม็ดน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าจะเคลื่อนที่ลงด้วยแรงดึงดูดของโลกในอัตราที่เร็วกว่าเม็ดน้ำที่มีขนาดเล็กกว่า (ความเร็วในการร่วงหล่นของวัตถุ จะ

เป็นปฏิภาคตรงกับรัศมียกกำลังสองของวัตถุนั้น) ด้วยเหตุนี้เม็ดน้ำขนาดใหญ่กว่า (ตกเร็วกว่า) จึงมีโอกาสชนกับเม็ดน้ำขนาดเล็กกว่า ตามแนวทางที่ร่วงหล่น และรวมตัวกันทำให้เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนที่จะแตกตัวออกเป็นเม็ดน้ำขนาดกลางจำนวนมากขึ้น และวิ่งชนและรวมตัวกับเม็ดน้ำขนาดที่เล็กกว่าต่อไป หากพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Chain reaction) ในที่สุดเม็ดน้ำภายในเมฆจะมีขนาดใหญ่จำนวนมาก และสามารถตกเป็นฝนได้ ซึ่งกระบวนการชนกันและรวมตัวกันนี้จะมีส่วนสำคัญต่อการเกิดฝนในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย แต่เนื่องจากในบรรยากาศที่มีแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติขนาดเล็ก และจำนวนมากเกินไป จะเกิดกระจายตัวของความชื้นในการเกาะแกนกลั่นตัว ทำให้เม็ดน้ำที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและจำนวนมากตามไปด้วย ทำให้กระบวนการชนกัน และรวมตัวกันของเม็ดน้ำไม่มีประสิทธิภาพซึ่งต้องใช้เวลามากในการเจริญเติบโตไปเป็นเม็ดฝน ดังนั้น เมฆจึงสลายตัวไปก่อนที่เม็ดน้ำจะโตพอที่จะตกเป็นฝน

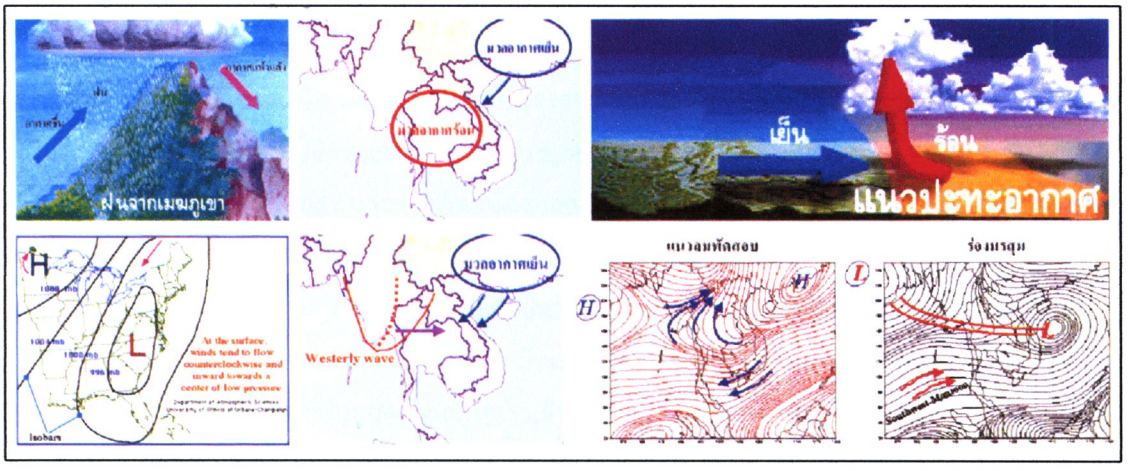
2) กระบวนการเกิดฝนในเมฆเย็น (cold rain process)

เมฆเย็น คือ เมฆที่มีการเจริญเติบโตและก่อยอดสูงขึ้นไปในชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยมีกระบวนการสร้างผลึกน้ำแข็ง (Ice–crystal process) เกิดขึ้นบริเวณยอดเมฆที่มีอุณหภูมิระหว่าง –3 ถึง –4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิของเม็ดน้ำต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ยังไม่กลายเป็นน้ำแข็ง เรียกเม็ดน้ำเย็นนี้ว่า เม็ดน้ำเย็นยิ่งยวด (Super cooled droplets) และเมื่ออยู่ร่วมกับแกนของการเยือกแข็ง (Ice nuclei) ซึ่งเป็นอนุภาคของสสารประเภทแร่ ดินเหนียว สารอินทรีย์และเกลือทะเล ที่จะทำหน้าที่เป็นแกนของการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) และการเจริญเติบโตต่อไปของผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น เกิดจากการระเหิดอย่างต่อเนื่องของน้ำจากเม็ดน้ำเย็นยิ่งยวด ซึ่งมีความดันไอ (Vapor pressure) ที่ผิวสูงกว่า ไปจับเกาะและกลายเป็นน้ำแข็ง (Sublimation) บนผิวของผลึกน้ำแข็งซึ่งมีความดันไอต่ำกว่าเรียกว่ากระบวนการเบอร์เจรอน (Burgeron process) หรือเกิดจากการสัมผัสของผลึกน้ำแข็งกับเม็ดน้ำเย็นยิ่งยวดโดยตรง ทำให้เม็ดน้ำเย็นยิ่งยวดกลายเป็นเม็ดน้ำแข็ง (Contact freezing) ในขณะที่ผลึกน้ำแข็งหรือเม็ดน้ำแข็งมีขนาดโตขึ้นและร่วงหล่นลงมา ชนกับผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า แล้วเกาะติดกันทำให้มีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อผลึกน้ำแข็งหรือเม็ดน้ำแข็งมีขนาดใหญ่มากขึ้น ในที่สุดก็จะตกพ้นฐานเมฆลงมาเป็นหิมะหรือลูกเห็บ หรืออาจละลายเป็นน้ำฝนเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลเซียส ก่อนตกลงสู่พื้นดิน

การเปลี่ยนสถานะของเม็ดน้ำกลายเป็นเม็ดน้ำแข็งจะมีการคายความร้อนแฝงออกมาเป็นพลังงานเสริมในการเจริญเติบโตของยอดเมฆ ทำให้เมฆมีขนาดใหญ่ขึ้นและมียอดสูงขึ้น และกลายเป็นเมฆฝนฟ้าคะนอง (Cumulonimbus) ฝนที่เกิดจากเมฆชนิดนี้จึงมักจะมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าฝนเมฆอุ่น และอาจมีฟ้าแลบฟ้าร้อง ฟ้าผ่า และลูกเห็บตามมา ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะพบฝนเมฆเย็นในช่วงเปลี่ยนฤดู หรือบริเวณที่มีตัวการที่ทำให้เกิดการยกตัวของมวลอากาศอย่างรวดเร็ว เช่น แนวปะทะอากาศบริเวณร่องความกดอากาศต่ำ หรือ บริเวณพายุหมุน

5) ปัจจัยเสริมในการเกิดเมฆและฝน

การยกตัวของมวลอากาศที่ก่อให้เกิดเมฆและฝนจากกระบวนการพาความร้อนดังกล่าว ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกหลายลักษณะที่เกิดขึ้นเดี่ยวๆ หรือเกิดขึ้นแบบเสริมกัน ซึ่งประกอบด้วยการยกตัวของไอน้ำ เมื่อผ่านบริเวณแนวเทือกเขา การยกตัวของไอน้ำบริเวณที่มีการปะทะกันของมวลอากาศ การยกตัวของไอน้ำบริเวณแนวร่องมรสุม การยกตัวของไอน้ำบริเวณที่มีแนวลมพัดสอบเข้าหากัน ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปัจจัยเสริมในการเกิดเมฆและฝน
ที่มา : สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร (2544)

2.4 สภาพภูมิอากาศเพื่อการทำฝนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

1) การจำแนกสภาพภูมิอากาศ

การจำแนกสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย โดยใช้เกณฑ์ในการจำแนกระบบนิเวศน์ตามระบบสากลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ FAO (1982) สามารถจำแนกสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยตามระบบนิเวศน์ใหญ่ๆ ที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของปริมาณน้ำฝน และสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของลุ่มน้ำ ออกเป็น 2 ส่วน คือ สภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยตอนบน รวมถึงจังหวัดเพชรบุรี และตอนบนของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ยกเว้นจังหวัดจันทบุรี และจังหวัดตราด กับสภาพภูมิอากาศบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ตั้งแต่ตอนล่างของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ลงมา รายละเอียดของสภาพภูมิอากาศและพืชพรรณ มีดังนี้

(1) สภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยตอนบน ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคเป็นบริเวณที่มีฤดูแล้งชัดเจน อาจมีระยะเวลานานระหว่าง 1 ถึง 6 เดือน ที่มีปริมาณฝนต่ำกว่า 60 มิลลิเมตร เรียกว่า ภูมิอากาศแบบแห้งและชื้นเขตร้อน (Tropical wet and dry climate, AW) ภูมิอากาศแบบนี้ปกคลุมพื้นที่ร้อยละ 86.4 ของประเทศ พืชพรรณธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืชกลุ่มผลัดใบ

(2) สภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยตอนล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีฝนตกมากและทุกเดือน ฝนตกมากกว่า 60 มิลลิเมตร ภูมิอากาศแบบนี้ เรียกว่าภูมิอากาศแบบป่าฝนเขตร้อน (Tropical rainforest climate, AF) ซึ่งปกคลุมพื้นที่ที่ร้อยละ 13.6 ของประเทศ พืชพรรณส่วนใหญ่เป็นป่าดงดิบชื้นเขตร้อน กลุ่มพืชจะผลัดใบไม่ชัดเจน พบว่ามีพืชใบเขียวตลอดปี

2) ฤดูกาล

สภาวะอากาศบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้รับอิทธิพลจากการไหลเวียนของอากาศระหว่างแผ่นดินกับมหาสมุทร ลักษณะการไหลเวียน (Air flow) ของอากาศชั้นล่าง และอากาศชั้นบนในแต่ละช่วงเวลาในรอบปี จำแนกตามลักษณะของอากาศในเขตร้อน Silverman และคณะ (1986) จำแนกฤดูกาลได้สอดคล้องกับลักษณะการหมุนเวียนของอากาศได้ 5 รูปแบบ ดังนี้ (ภาพที่ 2.3 ถึง 2.5)

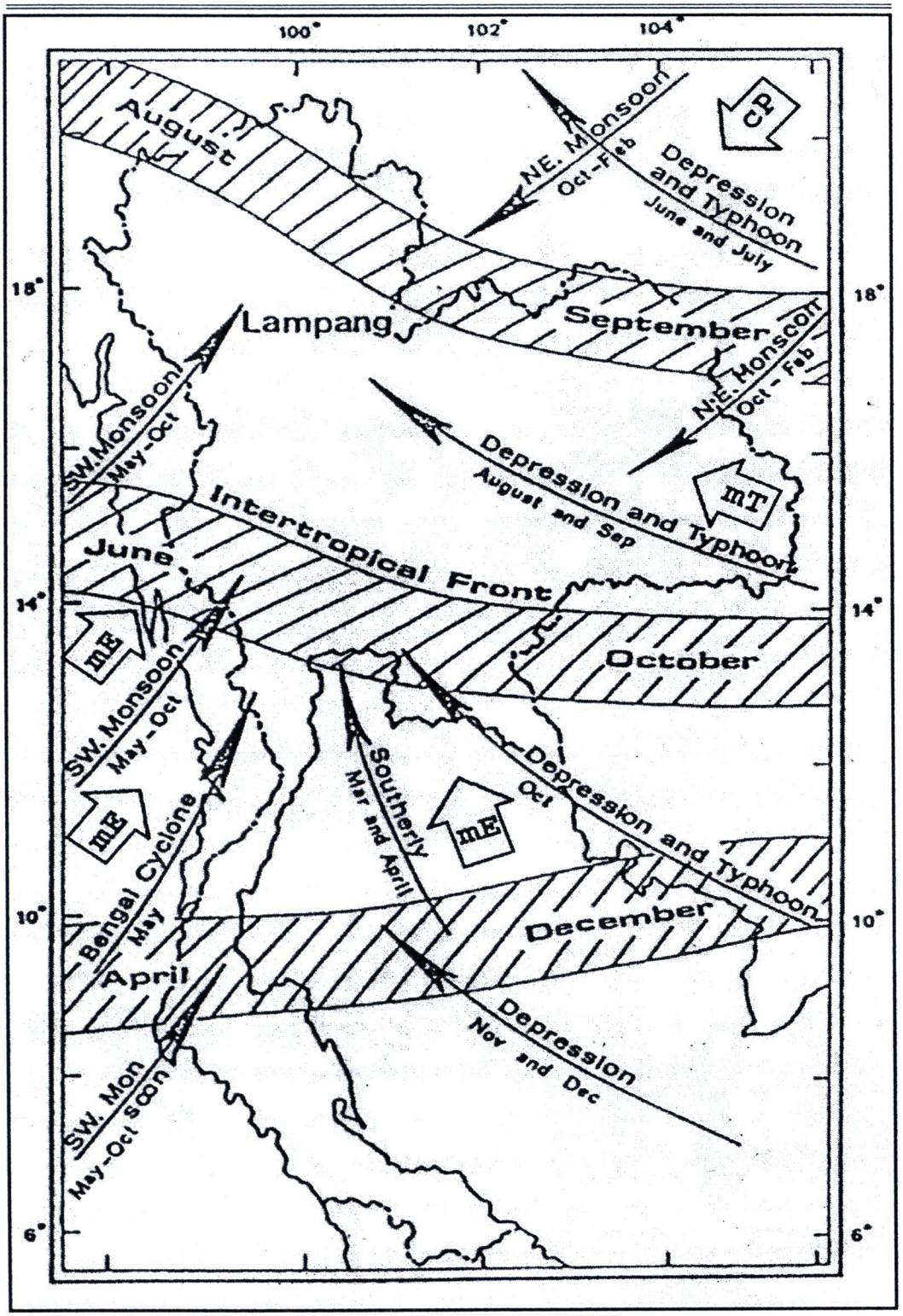
(1) ช่วงฤดูหนาวจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนกุมภาพันธ์ของปีถัดไป ช่วงเวลานี้อากาศชั้นล่างคือลมมรสุมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือพัดพาอากาศแห้งและเย็นเข้าสู่ภูมิภาคนี้ ทำให้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอากาศหนาว อากาศชั้นบนตั้งแต่แนวปะทะอากาศ มีทิศทางตรงกันข้ามกับมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

(2) ช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูหนาวเข้าสู่ฤดูร้อน เป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน ในช่วงนี้ลมชั้นบนและลมชั้นล่างส่วนใหญ่มีทิศทางไม่แน่นอน และมีกำลังอ่อน ประกอบกับแนวตั้งฉากของดวงอาทิตย์พาดผ่านกลางประเทศ ทำให้แผ่นดินได้รับพลังงานมากและคายพลังงานความร้อนออกมามากจึงมีอุณหภูมิอากาศสูงกว่าฤดูอื่น ช่วงเวลานี้อาจเกิดพายุฤดูร้อนจากการแผ่ขยายลงมาของความกดอากาศสูงและการพัดสอบของลมที่พัดจากทะเลอันดามัน อ่าวไทย และทะเลจีนใต้ ทำให้มีฝนตกแรงแต่บริเวณไม่กว้างมาก

(3) ช่วงเริ่มต้นฤดูฝนจากอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึงต้นเดือนมิถุนายน ช่วงเวลานี้ลมระดับล่างเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงปะทะกับลมกำลังอ่อนกว่าจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ ประกอบกับการเกิดหย่อมความกดอากาศต่ำที่ต่อเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแนวตั้งฉากของดวงอาทิตย์ของช่วงเวลาที่แล้ว ซึ่งปรากฏบนแผ่นดินก่อนเกิดในทะเล ทำให้แนวปะทะอากาศวางตัวอยู่ในแนวเฉียงตามการเกิดของหย่อมความกดอากาศต่ำ และมีฝนตกหนักเป็นบริเวณกว้างตามแนวปะทะอากาศเขตร้อนหรือร่องมรสุมนี้

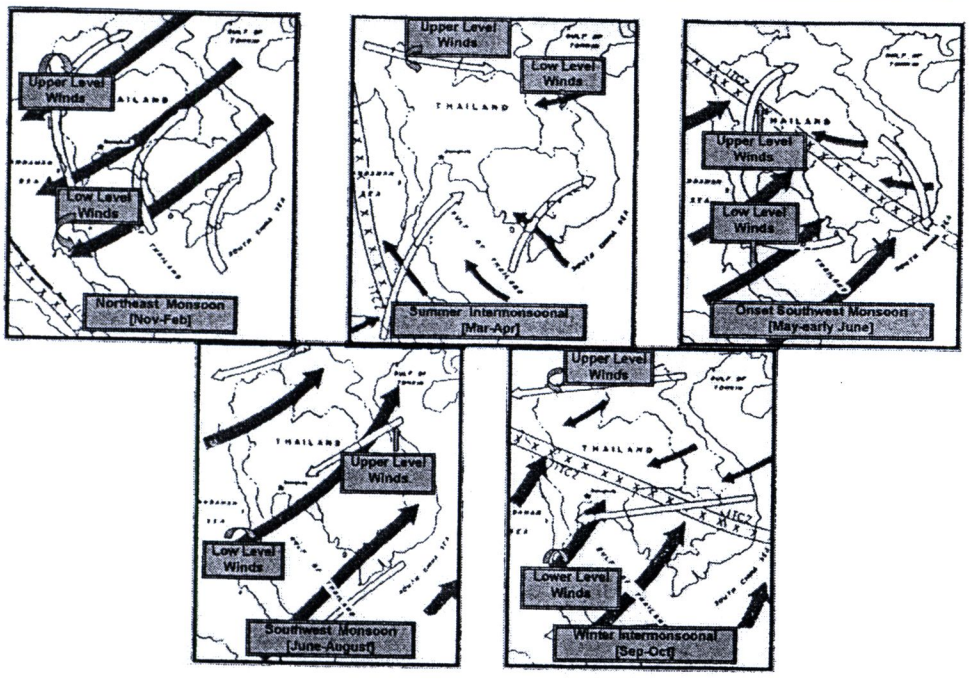
(4) ช่วงกลางฤดูฝนจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน ช่วงเวลานี้อากาศชั้นล่างจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนกรกฎาคมมีฝนตกน้อยเมื่อเทียบกับเดือนอื่นๆ ในช่วงเวลาเดียวกัน หลังจากนั้น ร่องมรสุมจะเคลื่อนที่กลับมาปกคลุมในเดือนสิงหาคม และกันยายน ทำให้มีฝนตกหนักเป็นบริเวณกว้าง ฝนตกในช่วง 2 เดือนนี้ จะสูงที่สุดในรอบปี

(5) ช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว เป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนตุลาคม ช่วงเวลานี้ ร่องมรสุมเคลื่อนลงไปปกคลุมตอนล่างของภาคกลางและภาคตะวันออก และเริ่มลงสู่ภาคใต้ บางปีที่ร่องมรสุมยังไม่เลื่อนลงสู่ภาคใต้ ประกอบกับความกดอากาศสูงระลอกแรกๆ ของปี ลงมาปะทะกับอากาศอุ่นชื้นจากภาคใต้ จะมีฝนตกมากบริเวณที่ร่องมรสุมดังกล่าว แต่ถ้าปีใดร่องมรสุมเคลื่อนสู่ภาคใต้ทันทีหรือไม่ปรากฏแนวร่องมรสุมปีนั้นก็จะเริ่มเข้าสู่ฤดูแล้งเร็วกว่าปกติ



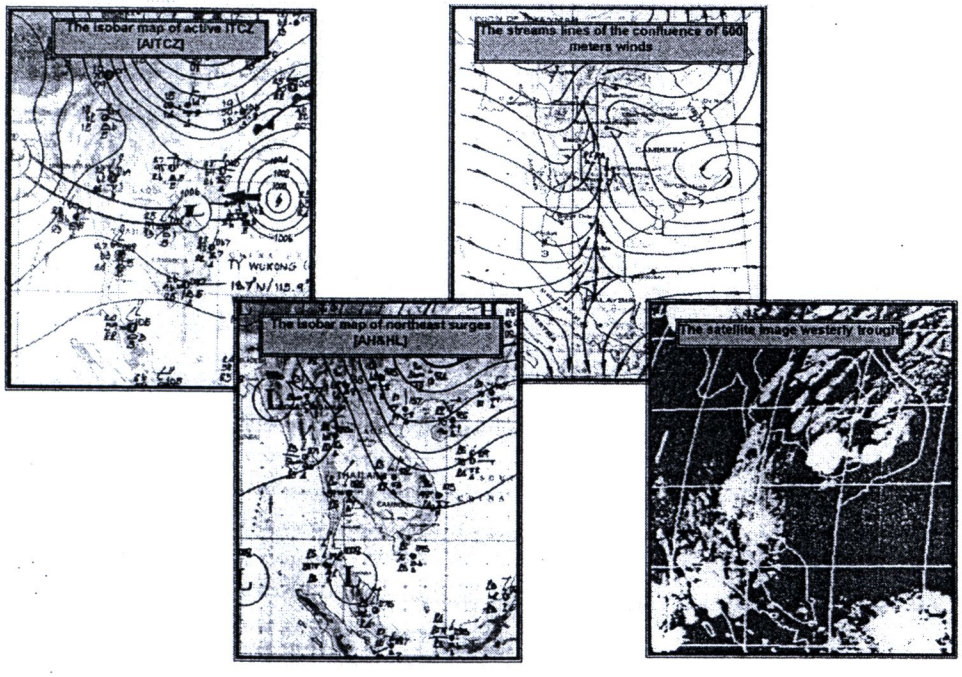
ภาพที่ 2.3 สภาพภูมิอากาศ มวลอากาศและร่องมรสุมบริเวณประเทศไทย

ที่มา: ดัดแปลงจากกองภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของการหมุนเวียนของกระแสอากาศชั้นบนและชั้นล่างในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย

ที่มา : Silverman และคณะ (1986)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของสภาวะอากาศในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย

ที่มา : Silverman และคณะ (1986)

2.5 เรดาร์อุตุนิยมวิทยา

ปัจจุบันกรมอุตุนิยมวิทยา และสำนักฝนหลวงและการบินเกษตร ใช้เรดาร์อุตุนิยมวิทยาในการตรวจวัดกลุ่มเมฆฝนครอบคลุมทุกพื้นที่ของรัศมีการตรวจวัด และในทุกช่วงเวลาที่ต้องการตรวจ โดยเรดาร์ชนิดดอปเพลอร์ (Doppler) สามารถประเมินปริมาตรของฝน รวมทั้งให้ข้อมูลในเชิงปริมาณ เมื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณการตรวจวัดน้ำฝนบนพื้นดิน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการติดตามและประเมินปริมาณฝนที่เป็นผลมาจากปฏิบัติการทำฝน

Doviak and Zrnic (1992) กล่าวว่า เรดาร์ (RADAR) ย่อมาจาก Radio Detection and Ranging เป็นเครื่องมือที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟออกไปกระทบเป้าหมาย จากนั้นคลื่นจะสะท้อนกลับมายังจานสายอากาศไปสู่ระบบเครื่องรับแล้วแสดงผลในค่าของระยะทางและตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย ระบบเรดาร์นำไปประยุกต์ในงานด้านต่างๆ มากมายอันเป็นประโยชน์ต่อการติดต่อสื่อสารทางโทรคมนาคม การขนส่ง การพยากรณ์อากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความต้องการในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่า เรดาร์สามารถใช้ได้ทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศอีกด้วย สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานโดยทั่วไปของระบบเรดาร์ ตลอดจนการประยุกต์ใช้เรดาร์ในการวัดข้อมูลในบรรยากาศอันจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูลในจากภาพเรดาร์ต่อไป

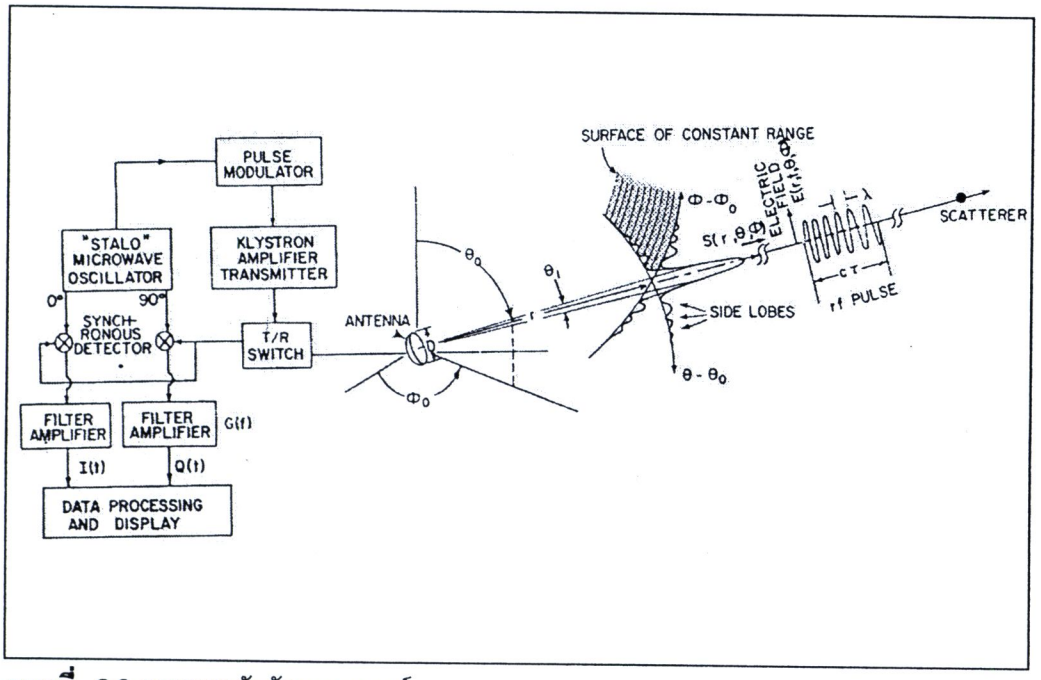
1) ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์

ระบบเรดาร์ทำงานด้วยการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบวัตถุแล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป ส่วนการนำระบบเรดาร์ไปประยุกต์กับงานเฉพาะด้านนั้นจะต้องเลือกช่วงความถี่ และชนิดของเรดาร์ให้เหมาะสมกับเป้าหมายและเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ได้ผลการตรวจวัดข้อมูลที่ต้องการได้ดีที่สุด ให้ความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือได้

2) หลักการทำงาน

เรดาร์ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ไปในอวกาศด้วยความเร็ว 2.998×10^8 เมตรต่อวินาที เมื่อกระทบกับวัตถุต่างๆ ที่อยู่ตามแนวทางเดินของมันจะเกิดการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของคลื่น ทำให้ค่าความเร็วนี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับมา สามารถนำมาคำนวณหาระยะทางและความเร็วของวัตถุ นอกจากนี้ยังใช้ระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการวัดซึ่งสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงที่รู้ตำแหน่งแน่นอนได้ เรดาร์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ภาคส่งคลื่น (Transmitter) เพื่อผลิตพลังงานที่มีความถี่ในช่วงเรดาร์ไปตามสายส่งคลื่นมาที่จานส่งคลื่น (Antenna) ส่งพลังงานออกไปและรับสัญญาณที่สะท้อนกลับ โดยการส่ง

คลื่นจะส่งไปในลักษณะของลำคลื่นหรือบีม (Beam) ซึ่งเปลี่ยนแปลงทิศทางตามการหมุนหรือการเคลื่อนที่แบบกวาดของสายอากาศ ทำให้คลื่นกระจายออกไปโดยรอบเพื่อตรวจหาวัตถุที่ต้องการดังภาพที่ 2.6 และเมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุจะเกิดการสะท้อนสัญญาณกลับมายังจานรับบางส่วน ซึ่งจะถูกส่งไปที่เครื่องรับหรือภาครับ (Receiver) เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนที่ปนมาออกก่อนที่จะทำการขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนกลับมาค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่ง เพื่อให้ได้ระดับของสัญญาณที่เหมาะสมก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์และแสดงผล



ภาพที่ 2.6 การตรวจจับวัตถุของเรดาร์

ที่มา: Doviak and Zrnic (1992)

ชนิดของวัตถุที่เรดาร์สามารถตรวจจับได้ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1) เป้าหมายผิวไม่แข็ง (Soft target) วัตถุประเภทนี้จะเป็นองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศ เช่น เมฆ ไอน้ำ ฝุ่นละออง ฝน ก๊าซ และอนุภาคอื่นๆ ในอากาศ

2) เป้าหมายผิวแข็ง (Hard target) วัตถุประเภทนี้จะให้ค่าการสะท้อนที่สูงกว่าเป้าหมายผิวไม่แข็ง เช่น นก แมลง ตึก เรือ เครื่องบิน ฯลฯ

เนื่องจากคุณสมบัติของวัตถุดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถระบุรูปร่างของเป้าหมายผิวไม่แข็งได้อย่างชัดเจนแล้ว ค่าการกระจายของอนุภาคหรือสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะเพิ่มตามระยะทางที่มากขึ้น ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวนี้จะไม่ปรากฏในเป้าหมายผิวแข็ง

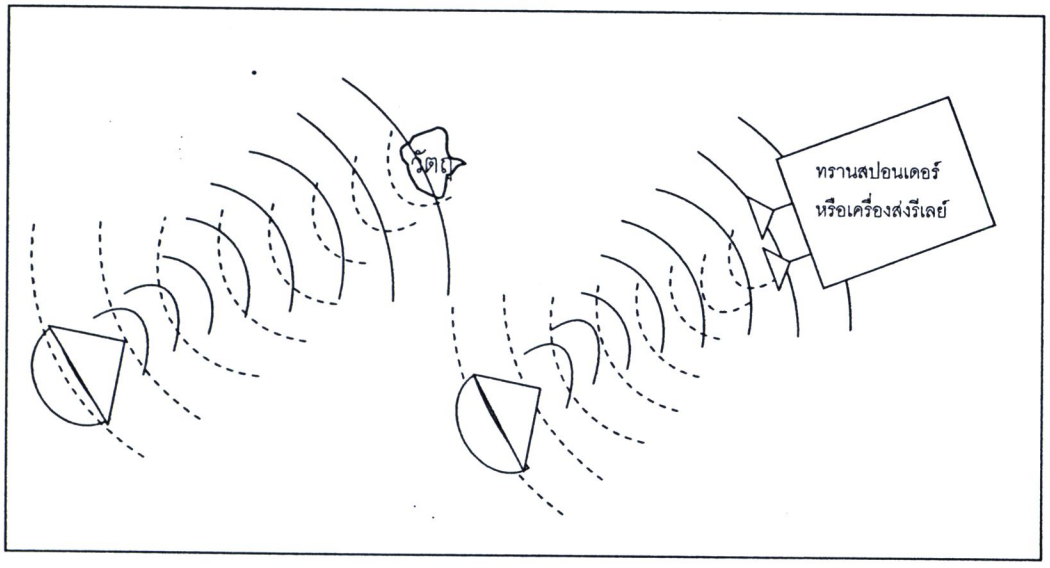
3) ชนิดของเรดาร์

การจำแนกชนิดของเรดาร์สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(1) เรดาร์ปฐมภูมิ (Primary radar) และ เรดาร์ทุติยภูมิ (secondary radar)

- เรดาร์ปฐมภูมิ (Primary radar) เป็นเรดาร์ที่สัญญาณจะสะท้อนจากวัตถุไปยังเครื่องรับโดยตรง (ภาพที่ 2.7)

- เรดาร์ทุติยภูมิ (Secondary radar) เป็นเรดาร์ที่สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับไม่ได้เกิดจากการสะท้อนจากวัตถุโดยตรง (ภาพที่ 2.7) แต่เกิดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในวัตถุซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องส่งรีเลย์ (Relay transmitter) หรือทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ ในบางกรณีการส่งคลื่นไปในบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งเมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุทำให้สัญญาณที่สะท้อนกลับไม่แรงพอ จึงต้องใช้ตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ติดไปกับวัตถุเพื่อให้สัญญาณที่สะท้อนกลับนั้นแรงพอ

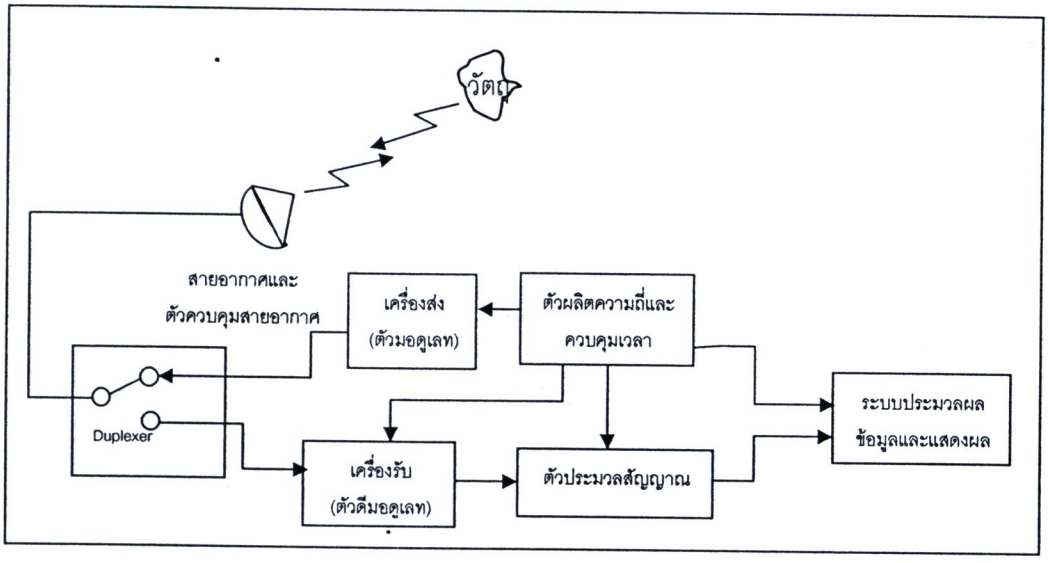


ภาพที่ 2.7 เรดาร์ปฐมภูมิ (ซ้าย) เรดาร์ทุติยภูมิ (ขวา)

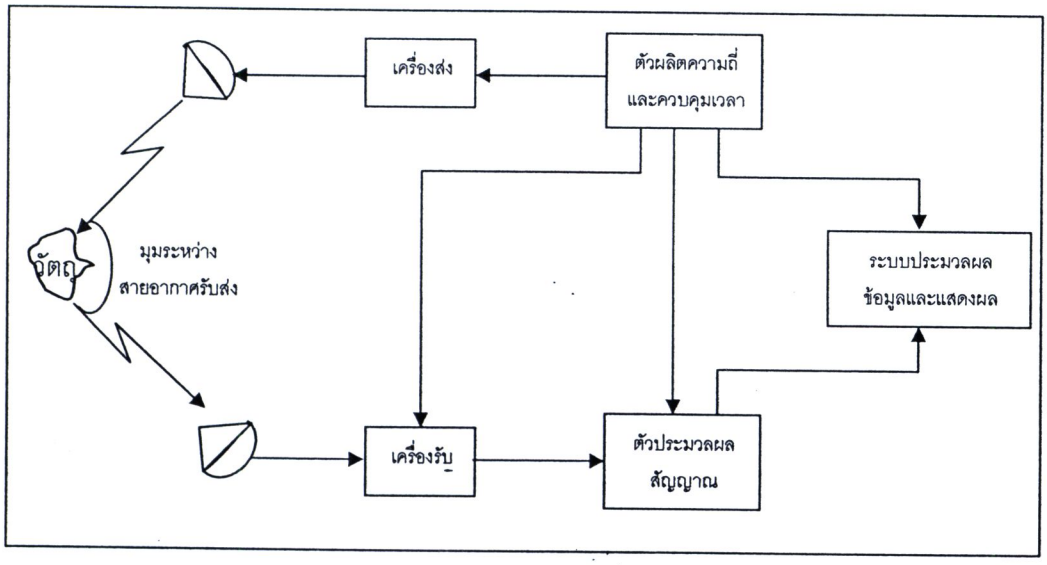
(2) เรดาร์ที่ใช้สายส่งร่วมกันและแยกกัน (Monostatic radar and bistatic radar)

- เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ-ส่งร่วมกัน (Monostatic radar) (ภาพที่ 2.8) โดยมีสวิตช์อัตโนมัติเรียกว่า ดูเพล็กเซอร์ (Duplexer) ทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณรับ-ส่งไม่ให้ปนกัน เรดาร์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ระบบนี้เพื่อการประหยัดสายอากาศ

- เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ-ส่งแยกกัน (Bistatic radar) เรดาร์ระบบนี้ใช้สายอากาศดังแสดงในภาพที่ 2.9 ปกติเรดาร์ชนิดนี้มักจะใช้กับคลื่นต่อเนื่อง (CW: Continuous wave) หรือคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (FMCW: Frequency-modulated continuous wave)



ภาพที่ 2.8 เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ – ส่งสัญญาณร่วมกัน (Monostatic radar)



ภาพที่ 2.9 เรดาร์ที่ใช้สายอากาศรับ – ส่งสัญญาณแยกกัน (Bistatic radar)

4) ลักษณะการส่งสัญญาณเรดาร์

ลักษณะการส่งสัญญาณคลื่นเรดาร์ที่ใช้ในกิจกรรมประเภทเรดาร์อุตุนิยมวิทยา เรดาร์ขนส่ง เรดาร์ทหาร จะมีลักษณะการส่งสัญญาณเรดาร์ ดังนี้

- Pulse radar
- CW radar
- FM-CW radar
- Pulse Doppler radar

5) ช่วงความถี่ของคลื่นเรดาร์

ระบบเรดาร์ใช้ช่วงคลื่นความถี่ประมาณ 220 MHz ถึง 35 GHz ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดคลื่น ความยาวช่วงคลื่นและช่วงความถี่ของคลื่นเรดาร์

ชนิดคลื่น (Band)	ความถี่ (GHz)	ช่วงความยาวคลื่น (cm)	ตัวอย่างที่ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยา	
			ความถี่ (GHz)	ช่วงความยาวคลื่น (cm)
UHF	0.3-1.0	30-100	0.42	71
L	1.0-2.0	15-30	1.3	23
S	2.0-4.0	7.5-15	2.8	10.7
C	4.0-8.0	3.75-7.5	5.5	5.5
X	8.0-12.0	2.5-3.75	9.4	3.2
Kn	12.0-27.0	1.67-2.5	15.5	1.94
K	18.0-27.0	1.11-1.67	24	1.25
Ka	27.0-40.0	0.75-1.11	35	0.86

ที่มา: ประเสริฐและสมมาตร (2542)

การใช้งานระบบเรดาร์ในแต่ละช่วงความถี่โดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้ (Merrill I. Skolink (1988:7))

HF ใช้กับเรดาร์จับวัตถุที่เคลื่อนที่ตามแนวเส้นขอบฟ้า เช่น เครื่องบิน ขีปนาวุธ และเรือ รวมไปถึงการวัดในระยะไกลแต่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดน้อย เรียกว่า Over-the horizon (OTH) radar มักจะใช้วัดในมหาสมุทร

L วัดการเคลื่อนที่ในระยะไกลและควบคุมการจราจร สามารถวัดสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

S วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้ สามารถวัดได้ในสภาพอากาศที่มีฝนตกหนักหรือมีหิมะ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

C	วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้และตรวจหาวัตถุระยะไกลได้ดี สามารถวัดสภาพอากาศที่มีฝนตกน้อยหรือปานกลาง
X	วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้ในสภาพอากาศแจ่มใส และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อมีฝน
K	ใช้วัดการระเหยของน้ำ (ความถี่น้อยมาก)
Kn และ Ka	ตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ในระยะใกล้ ใช้ได้ในทุกสภาพอากาศ ใช้กับภาพถ่ายดาวเทียมที่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดสูง

6) สมการเรดาร์

สมการเรดาร์เกี่ยวข้องกับระยะทางของเรดาร์ คุณลักษณะของเครื่องส่ง เครื่องรับ สายอากาศ วัตถุที่ต้องการวัด และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งสมการเรดาร์ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในการกำหนดระยะทางที่ไกลที่สุดที่เรดาร์สามารถวัดได้ แต่ยังเป็นตัวช่วยให้เข้าใจระบบการทำงานของเรดาร์ และยังเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบเรดาร์อีกด้วย สมการเรดาร์สามารถพิจารณาในรูปแบบอย่างง่ายประกอบด้วย

(1) ค่าความหนาแน่นของกำลังงานของเรดาร์ (Power density) หรือกำลังงาน ที่ตกกระทบวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนระนาบมีค่าเท่ากับค่ากำลังงานที่เรดาร์ใช้ส่งคลื่นหารด้วยพื้นที่ของบีมในระยะทางตรงตำแหน่งที่วัตถุที่วัดอยู่ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยพื้นที่ของบีมใดๆ เป็นพื้นที่ของทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางหารด้วยอัตราการขยายของสายอากาศ ค่าความหนาแน่นกำลังงานเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P/A_F = \frac{P_T}{4\pi R_T^2 / G_T} \quad \ldots (1)$$

เมื่อ P/A_F = ความหนาแน่นของกำลังงานของเรดาร์ (W/m^2)

(P แทนกำลังของคลื่นเรดาร์ (W), A_F แทนพื้นที่บนระนาบ (Effective area: m^2)

P_T = กำลังของเครื่องส่ง (w)

R_T = ระยะทางจากเครื่องส่งไปยังเป้าหมาย (m)

$4\pi R_T^2$ = พื้นที่ผิวของทรงกลมรัศมี R_T (m^2)

G_T = อัตราขยายของเครื่องส่ง

(2) ค่าความหนาแน่นกำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุ (Target reflection power density) ในการแพร่กระจายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางใดๆ ค่าพลังงานที่สะท้อนกลับโดยการเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นที่ส่งไปกระทบกับพื้นผิววัตถุ โดยลักษณะและทิศทางของคลื่นที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับลักษณะ ตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของวัตถุนั้นๆ (ภาพที่ 2.11) และเรียกพลังงานที่สะท้อนกลับนี้ว่า การสะท้อนกลับ (Backscatter)

ค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนาแน่นของกำลังงานของเรดาร์ และสมบัติในการสะท้อนของวัตถุที่เรียกว่า ภาคตัดขวางในการสะท้อนของวัตถุ (Radar cross-section, RCS) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{Tgt} = \frac{P}{A_F}\sigma = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2}\sigma \quad \ldots (2)$$

เมื่อ P_{Tgt} = ประสิทธิภาพกำลังงานที่สะท้อนของวัตถุในทิศทางของเรดาร์(W)

σ = ค่า Radar cross-section (RCS) ของวัตถุ (m^2)

(3) ค่าหนาแน่นของกำลังงานที่สะท้อนกลับ (Backscatter propagation) เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของวัตถุด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุกับพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางจากวัตถุไปยังเรดาร์ หาได้จากสมการดังนี้

$$P / A_B = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2}\sigma \Big/ \frac{1}{4\pi R_R^2} \quad \ldots (3)$$

เมื่อ P/A_B = ความหนาแน่นของกำลังงานที่สะท้อนกลับจากวัตถุไปยังสายอากาศทางด้านรับ (Backscatter power density: W/m^2)

R_R = ระยะทางจากวัตถุไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ (m)

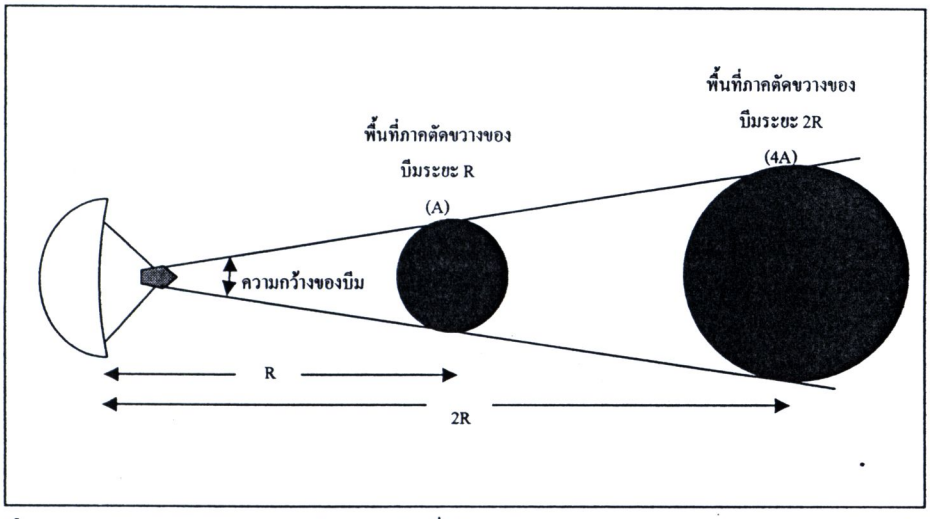
(4) ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna gain) อัตราขยายของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านการส่งกำลังของคลื่นเรดาร์ ส่วนลักษณะพื้นที่ผิวของวัตถุที่สามารถให้ค่าสะท้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Effective area) จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านรับ ดังนั้นสายอากาศทุกชนิดจึงต้องพิจารณาค่าทั้งสองไปพร้อมๆ กัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งการส่งและรับ ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$G = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \quad \ldots (4)$$

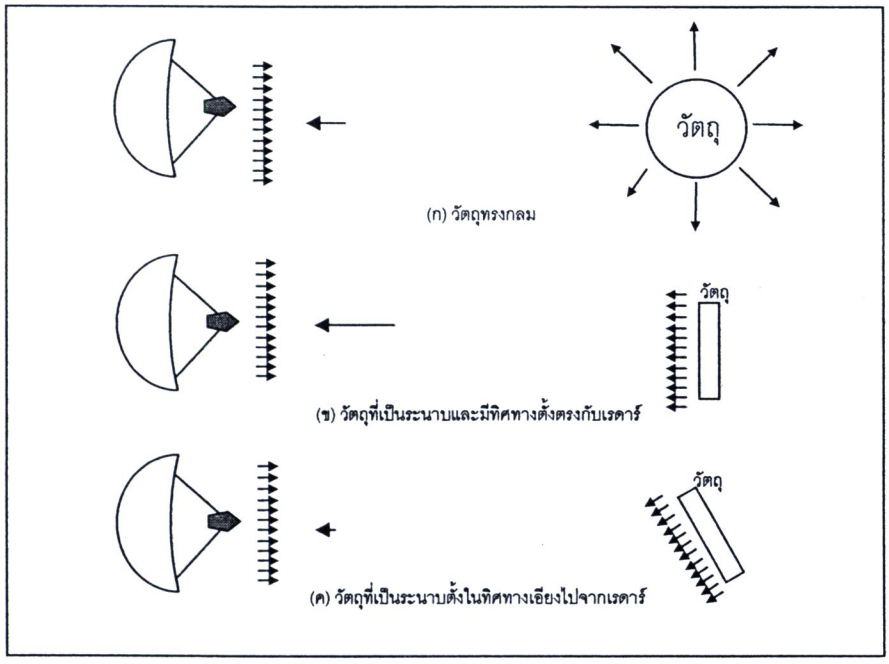
เมื่อ G = อัตราการขยายของสายอากาศ

A_E = พื้นที่ผิวประสิทธิผล (Effective area) (m^2)

λ = ความยาวช่วงคลื่นของเรดาร์ (m)



ภาพที่ 2.10 ระยะทางและความกว้างของบีมที่ใช้หาค่าความหนาแน่นของกำลังงานของเรดาร์
ที่มา: พรพรรณ์ (2541)



ภาพที่ 2.11 ค่าภาคตัดขวางในการสะท้อนของวัตถุ (RCS) ขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทางการวางตัว
ที่มา: พรพรรณ์ (2541)

7) เรดาร์แบบดอปเพลอร์

เนื่องจากการส่งคลื่นจากสายอากาศทำให้คลื่นเรดาร์แผ่กระจายไปในบรรยากาศทุกทิศทาง ถ้าต้องการวัดระยะทางจะต้องมีการเข้ารหัส (Coded) หรือทำเครื่องหมาย (Marked) เพื่อเป็นตัวระบุค่าสัญญาณของคลื่นตกกระทบหรือสัญญาณของคลื่นสะท้อนเมื่อคลื่นสะท้อนไปยังสายอากาศซึ่งมีการเข้ารหัสในการส่งคลื่นมี 2 วิธี คือ การส่งคลื่นความถี่สูงแบบพัลส์และจับเวลาในการส่งและรับสัญญาณสะท้อนกลับที่เรียกว่า พัลส์เรดาร์ (Pulsed radar) และการเปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่นความถี่สูงด้วยอัตราที่แน่นอนแล้วเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณที่ส่งกับที่สะท้อนกลับเรียกว่า การควบหรือการมอดูเลตคลื่นความถี่ต่อเนื่องในระบบเรดาร์ (FM-CW radar: Frequency-modulated continuous wave) ซึ่งคลื่นที่ส่งออกไปจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องเรียกว่า เรดาร์แบบดอปเพลอร์ (Doppler radar) ใช้ในการตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ หรือติดตั้งเรดาร์ไปกับวัตถุที่เคลื่อนที่โดยอาศัยปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) กล่าวคือ ถ้าวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาจุดปล่อยสัญญาณ ความถี่ของสัญญาณที่สะท้อนกลับจะสูงกว่าเดิม และถ้าวัตถุเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อยสัญญาณ ความถี่ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะต่ำกว่าสัญญาณเดิม

ดังนั้น ถ้าทราบความเร็วที่วัตถุเคลื่อนที่และความถี่ที่ใช้ในการส่งคลื่นเทียบกับความเร็วที่คลื่นวิทยุเดินทาง จะสามารถหาความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณสะท้อนกลับ เรียกว่า การเปลี่ยนความถี่ดอปเพลอร์ (Doppler shift frequency) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \qquad \ldots (5)$$

เมื่อ f_d = ความถี่ดอปเพลอร์
f_0 = ความถี่ที่ใช้ส่งคลื่น
v = ความเร็วของวัตถุ
c = ความเร็วของคลื่นวิทยุ

8) การใช้เรดาร์ตรวจวัดฝน

ระบบเรดาร์ที่ใช้ตรวจวัดข้อมูลในบรรยากาศสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Atmospheric radar) และเรดาร์สำรวจอากาศ (Weather radar) ซึ่งเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศจะใช้วัดสัญญาณการสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศที่สภาวะอากาศปกติ แต่เรดาร์สำรวจอากาศจะใช้วัดฝนเป็นหลัก ซึ่งนำเรดาร์ดังกล่าวมาใช้การศึกษาครั้งนี้

เรดาร์สำรวจอากาศที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นเรดาร์แบบดอปเพลอร์ โดยเมื่อขนาดของหยาดน้ำฟ้า มีขนาดเล็กกว่าความยาวช่วงคลื่นของเรดาร์ ค่าความหนาแน่นของกำลังงานในการสะท้อนของคลื่นก็จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าปัจจัยการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ (Radar reflectivity factor, Z) เรดาร์ตรวจอากาศจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและการเคลื่อนตัวของฝน เป็นประโยชน์ต่อการพยากรณ์ระยะสั้นใช้ในระบบการเตือนภัยและการระบายน้ำ เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการนำค่าความสัมพันธ์อย่างง่าย ระหว่างสภาพการสะท้อน (Z) กับค่าความเข้มของฝน (R) ในแบบจำลองอย่างง่ายดังนี้

$$Z = AR^b \qquad \ldots (6)$$

ซึ่งค่าของความสัมพันธ์เหล่านี้มีค่าอีกมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อการคาดหมายปริมาณฝน เพราะถ้าหากใช้ความสัมพันธ์สำหรับพายุฝนฟ้าคะนอง ก็ไม่สามารถให้ค่าคะเนที่ดีต่อฝนชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศอีกด้วยปัจจุบันยังเป็นขั้นตอนของการปรับค่า Z จากค่า R ในความเป็นจริงจำเป็นต้องประเมินค่า R จากค่า Z ซึ่งเป็นการกลับด้านของสมการ ค่า a และ b จะต้องเปลี่ยนไป

2.6 เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจทำฝน

การปฏิบัติการฝนหลวงเป็นการเสริมกระบวนการเกิดฝนตามธรรมชาติ ดังนั้นในสภาพธรรมชาติจะต้องมีสภาวะอากาศที่เหมาะสมพอควรที่จะทำการเพิ่มฝนในกลุ่มเมฆได้ ซึ่งประเสริฐ และคณะ (2545) อธิบายว่าสภาวะอากาศนี้เกิดจาก 2 ส่วน ประกอบกัน คือ การเคลื่อนที่เข้าหากันของมวลอากาศต่างชนิดกัน เช่นมวลอากาศจากพื้นทวีป หรือมวลอากาศจากมหาสมุทรมาพบกัน ทำให้เกิดสภาวะอากาศไม่เสถียรภาพจึงทำให้มวลอากาศที่มีความชื้นสูงลอยสูงขึ้นพร้อมกับลดอุณหภูมิลงแล้วกลั่นตัวเป็นเมฆ สำหรับอากาศที่ได้รับความร้อนจากผิวดินและลอยสูงขึ้น เมื่อได้ความชื้นที่มีในอากาศในแนวระนาบช่วยเสริมจะทำให้กระบวนการเกิดเมฆฝนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจทำฝนอาจแบ่งได้ 2 ประการคือ

1) ศักยภาพของอากาศ ที่จะทำให้ฝนตกในช่วงฤดูกาลต่างๆ ในรอบปี โดยสภาพธรรมชาติแล้วมีบางเดือนเท่านั้นที่มีสภาพอากาศเหมาะสมที่ฝนจะตก และในแต่ละฤดูกาลตัวการที่ทำให้ฝนตก ก็มีลักษณะต่างกันออกไป ซึ่งอาจแบ่งได้ดังนี้

(1) ในฤดูแล้ง (พฤศจิกายน ถึงกุมภาพันธ์) ในช่วงฤดูนี้มีโอกาสฝนตกในประเทศไทยตอนบนน้อยมาก แต่อาจจะมีบ้างจากเหตุการณ์ดังนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

- ความกดอากาศสูง ที่แผ่ลงมากระทบกับหย่อมความกดอากาศต่ำเนื่องจากความร้อน (AH+HL)
- การพัดสอบเข้าหากันของลมใต้ กับลมตะวันออกเฉียงใต้ (CON, S+SE wind)
- คลื่นกระแสอากาศตะวันตก (WT)
- ลมใต้หรือลมตะวันออกเฉียงใต้ (SE wind)

(2) ในช่วงเปลี่ยนฤดู (ก่อนมรสุม) (มีนาคม ถึงพฤษภาคม) ในเดือนมีนาคมและเมษายนมีโอกาสฝนตกมากขึ้น จากลักษณะอากาศที่คล้ายกันกับ (1) ซึ่งประกอบด้วย AH +HL, CON, S+SE wind, WT และ SE wind แต่ในช่วงต้นเดือนพฤษภาคมจะเริ่มมีพายุหมุนเขตร้อน (TS) ในทะเลอันดามันและร่องมรสุม (ITCZ) เริ่มปรากฏในบริเวณภาคกลาง ซึ่งทำให้ฝนตกมากขึ้น

(3) ช่วงฤดูฝน (มิถุนายน ถึงตุลาคม) ในช่วงนี้ฝนส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของความกดอากาศต่ำ (L) เนื่องจากการคายความร้อนของแผ่นดิน พายุหมุนเขตร้อน (TS) ในทะเลอันดามันและร่องมรสุม (ITCZ) ซึ่งเหตุการณ์ทั้ง 3 ชนิดนี้ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน สำหรับในช่วงเดือนตุลาคม อาจจะเริ่มมีอิทธิพลของความกดอากาศสูง (H) เข้ามามีอิทธิพล ซึ่งจะมีฝนตกในวันแรกๆ ที่ ความกดอากาศสูงลงมา

โอกาสที่จะเกิดสภาวะอากาศเหล่านี้ อาจมีความแตกต่างกันไปในแต่ละปี แต่ก็มีขอบเขตจำกัดของจำนวนความถี่ที่มีโอกาสเกิดได้

2) เกณฑ์ความเหมาะสมของสภาพอากาศในรอบวัน ในแต่ละวันสภาพอากาศอาจเอื้ออำนวยในการปฏิบัติการทำฝนแตกต่างกันออกไป สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร ได้จำแนกเกณฑ์ความเหมาะสมในแต่ละวันออกเป็น 2 ช่วง เนื่องจากฤดูกาลต่างกัน กล่าวคือ ในช่วงก่อน 16 พฤษภาคม และหลัง 16 ตุลาคม กับช่วงระหว่าง 15 พฤษภาคม ถึง 15 ตุลาคม โดยพิจารณาจากความชื้น ความเร็วลม และดัชนีเสถียรภาพของอากาศ (รายละเอียดตามตารางที่ 2.4)

2.7 เกณฑ์ที่ใช้ในการไม่ปฏิบัติการทำฝน

การไม่ปฏิบัติการทำฝนมีสาเหตุที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่

1) สภาพอากาศในช่วงเวลานั้นมีศักยภาพน้อย โดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่กล่าวมาแล้ว

2) เนื่องจากฝนอาจทำความเสียหายให้แก่ พืชผลทางการเกษตร ในกรณีที่มีข้อเสนอจากเกษตรกรให้หยุดการปฏิบัติการเหนือพื้นที่เหล่านั้น ได้แก่

- ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวข้าวนาปรัง และนาปีของแต่ละจังหวัด

- ช่วงเวลามะขามหวานของจังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดใกล้เคียงกำลังออกดอก
- ช่วงเวลาที่หอมหัวใหญ่ และกระเทียมในภาคเหนืออยู่ใกล้ระยะเก็บเกี่ยว
- ช่วงเวลาออกดอกของทุเรียนในภาคตะวันออก
- ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
- ช่วงเวลาที่เกิดอุทกภัยในพื้นที่เป้าหมาย และใกล้เคียง

3) เนื่องจากฝนอาจทำให้เกิดการเสียหายต่อกิจกรรม เศรษฐกิจ และสังคมของประชาชน เช่น
   - งานประเพณีของคนส่วนใหญ่ในแต่ละพื้นที่ หรือจังหวัด
   - การก่อสร้างสาธารณะประโยชน์ต่างๆ เช่น ถนน ไฟฟ้า ประปา ฯลฯ

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์ความเหมาะสมของสภาพอากาศในการปฏิบัติการฝนหลวง

ลำดับ	ตัวแปร	ความเหมาะสมของสภาพอากาศ		
		ดี	ปานกลาง	ไม่เหมาะสม
1	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์) 0-10,000 ฟุต			
	ก) ก่อน 16 พ.ค. & หลัง 15 ต.ค.	75 ขึ้นไป	74-65	ต่ำกว่า 65
	ข) 16 พ.ค. – 15 ต.ค.	85 ขึ้นไป	84-75	ต่ำกว่า 75
2	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์) 10,000-18,000 ฟุต			
	ก) ก่อน 16 พ.ค. & หลัง 15 ต.ค.	70 ขึ้นไป	69-60	ต่ำกว่า 60
	ข) 16 พ.ค. – 15 ต.ค.	80 ขึ้นไป	79-70	ต่ำกว่า 70
3	ความเร็วลมเฉลี่ย (น๊อต) ที่ระดับ 10,000 – 15,000 ฟุต	ต่ำกว่า 15	15-25	มากกว่า 25
4	ความสูงฐานเมฆคิวมูลัส (ฟุต)			
	ก) ก่อน 16 พ.ค. & หลัง 15 ต.ค.	ต่ำกว่า 4,500	4,500-5,000	สูงกว่า 5,000
	ข) 16 พ.ค. – 15 ต.ค.	ต่ำกว่า 4,000	4,000-4,500	สูงกว่า 4,500
5	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ฐานเมฆ (เปอร์เซ็นต์)			
	ก) ก่อน 16 พ.ค. & หลัง 15 ต.ค.	80 ขึ้นไป	80-70	ต่ำกว่า 70
	ข) 16 พ.ค. – 15 ต.ค.	90 ขึ้นไป	90-80	ต่ำกว่า 80
6	ดัชนีการทรงตัวของอากาศ			
	ก) Showalter Index 1/	ต่ำกว่า –0.5 ถึง 2	-0.5 ถึง 2	มากกว่า 2
	ข) Lifted Index 2/	ต่ำกว่า –0.5	-0.5 ถึง 1	มากกว่า 1
7	โอกาสที่อุณหภูมิผิวพื้นจะถึงค่า (Convective Temperature) 3/	มี	มี	ไม่มี

ที่มา: ดัดแปลงจากศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงสาธิต, 2536

หมายเหตุ 1/ = ค่าประเมินความแตกต่างของอุณหภูมิกลุ่มอากาศที่ระดับต่ำสุดใกล้ผิวพื้นหนา 50 มิลลิบาร์ กับที่ระดับ 500 มิลลิบาร์

2/ = ค่าประเมินความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของกลุ่มอากาศที่ระดับต่ำสุดใกล้ผิวพื้นหนา 50 มิลลิบาร์ หรือยกขึ้นไปที่ระดับ 500 มิลลิบาร์

3/ = อุณหภูมิที่กลุ่มอากาศใกล้ผิวพื้นลอยตัวขึ้นเนื่องจากได้รับความร้อน

2.8 การประเมินปริมาณน้ำฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนบนพื้นดิน

การประเมินปริมาณน้ำฝนมีความจำเป็นต้องอาศัยเครือข่ายสถานีให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา โดยในการกำหนดความหนาแน่นเครือข่ายสถานีวัดน้ำฝน อาศัยเกณฑ์ขององค์กรอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization) (1981) ได้กล่าวถึงเกณฑ์ความหนาแน่นน้อยสุดมาตรฐานที่แนะนำแสดงดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ความหนาแน่นน้อยสุดของเครือข่ายสถานีวัดน้ำฝน

ลักษณะพื้นที่	ช่วงความหนาแน่นที่เสนอแนะ กรณีเงื่อนไขปกติ พื้นที่ (ตร.กม.)ต่อสถานี	ช่วงความหนาแน่นที่เสนอแนะ กรณีเงื่อนไขเป็นไปได้ยาก (1) พื้นที่ (ตร.กม.)ต่อสถานี
1. พื้นที่ราบเขตอบอุ่น เขตเมดิเตอร์เรเนียน และเขตร้อนชื้น	600-900	900-3,000
2. พื้นที่ภูเขาของเขตอบอุ่น เขตเมดิเตอร์เรเนียน และเขตร้อนชื้น	100-250	250-1,000 (4)
พื้นที่เป็นเกาะมีภูเขาขนาดเล็กกระจายอยู่ มีลักษณะน้ำฝนผันแปรเป็นอย่างมาก	25	
3. เขตแห้งแล้งและขั้วโลก (2)	1,500-10,000 (3)	-

หมายเหตุ: (1) การเลือกตัวเลขสุดท้ายในช่วง ควรเลือกในกรณีที่พื้นที่อยู่ในเงื่อนไขที่เป็นไปได้ยาก
(2) ไม่พิจารณารวมถึงพื้นที่ทะเลทรายขนาดใหญ่
(3) ขึ้นกับสภาพความเหมาะสม
(4) ในกรณีเงื่อนไขเป็นไปได้ยาก อาจขยายได้ถึง 2,000 ตร.กม.

ในการศึกษาข้อมูลน้ำฝนเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์กับข้อมูลปริมาณการไหลของน้ำท่า สำหรับการพยากรณ์หรือการวิเคราะห์สมดุลน้ำ ควรพิจารณาสถานีวัดน้ำฝนร่วมกับโครงข่ายสถานีวัดน้ำท่า ควรตั้งสถานีวัดน้ำฝนอย่างน้อย 2 จุดต่อสถานีวัดน้ำท่า 1 จุด สถานีหนึ่งควรอยู่ใกล้สถานีวัดน้ำท่าและอีกสถานีหนึ่งอยู่ตอนบนของพื้นที่ระบายน้ำ กรณีที่สถานีวัดน้ำท่าอยู่หุบเขาลึกและแคบ สถานีวัดน้ำฝนที่สอดคล้องควรอยู่ห่างออกไปแทน

2.9 ระบบปลูกพืชในเขตภูมิอากาศเกษตร

1) ระบบการปลูกพืชในเขตภูมิอากาศเกษตรของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

สถาบันวิจัยการทำฟาร์ม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2535) ได้ทำการได้ทำการแบ่งระบบการปลูกพืชในเขตภูมิอากาศเกษตรของภาตตะวันออกเฉียงเหนือไว้ 3เขตภูมิอากาศเกษตร

(1) เขตที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือหรือที่ราบสูงตามแนวฝั่งแม่น้ำโขง (Mekhong Plateau) ประกอบด้วย 7 จังหวัดได้แก่ เลย อุดรธานี หนองคาย สกลนคร นครพนม มุกดาหารและอุบลราชธานี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีลักษณะภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าเขตร้อน (Tropical Savannah Climate) ได้รับอิทธิพลของมรสุมตามฤดูกาลในช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์จะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือทำให้มีอากาศหนาวและแห้งแล้ง ซึ่งพัดมาจากบริเวณตอนบนของทวีปเอเชียปกคลุมไปทั่วทั้งภาคโดยเฉพาะที่เขตบริเวณแม่น้ำโขงซึ่งได้รับลมเต็มที่จะมีอากาศหนาวเย็นกว่าเขตอื่นๆ ของภาค ส่วนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายนจะพัดเอาอากาศชื้นและอบอุ่นจากมหาสมุทรอินเดียเข้ามาแต่เนื่องจากมีเทือกเขาเพชรบูรณ์และเทือกเขาดงพญาเย็นขวางกั้นประกอบกับอยู่ห่างไกลทะเลเมื่อเทียบกับเขตอื่น ๆ ของภาค ดังนั้นฝนที่เกิดจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ตกในเขตนี้จึงค่อนข้างน้อยจะมีฝนบ้างก็เฉพาะแห่ง เฉพาะตำบล ไม่ตกทั่วไป ฝนที่ตกในเขตนี้จึงค่อนข้างน้อยจะมีฝนบ้างก็เฉพาะแห่ง เฉพาะตำบล ไม่ตกทั่วไป ฝนที่ตกในเขตนี้และมีปริมาณมากขึ้นเป็นฝนอันเนื่องมาจากพายุดีเปรสชั่นซึ่งเคลื่อนเข้ามาทางทะเลจีนใต้ ปริมาณฝนเฉลี่ยของเขตพื้นที่ตามแนวริมฝั่งแม่น้ำโขงจะอยู่ระหว่าง 1,200-2,300 มิลลิเมตร โดยเฉพาะพื้นที่ของจังหวัดนครพนมและมุกดาหาร จะมีปริมาณฝนตกสูงสุดของภาคสำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 30 องศาเซลเซียส และเฉลี่ยต่ำสุด 21 องศาเซลเซียส จังหวัดที่มีอุณหภูมิต่ำลงและหนาวที่สุดได้แก่จังหวัดเลย ในช่วงฤดูหนาวบางปีจะลดต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเขตนี้มีปริมาณฝนตกที่มากที่สุดของเขตและยังมากกว่าภาคกลางและภาคเหนือของประเทศไทยอีกด้วย แต่เขตนี้ก็ยังชื่อว่าเป็นเขตที่ค่อนข้างจะแห้งแล้งมากกว่าภาคอื่นๆ เพราะเนื่องจากเหตุผลหลายประการ ประการสำคัญที่สุดคือพื้นที่ภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงดินส่วนมากเป็นหินตะกอนในระดับไม่ลึกนักไม่สามารถเก็บกับน้ำไว้ได้มากเมื่อหมดฝนหรือฝนทิ้งช่วงจะขาดความชุ่มชื้นมากและเป็นไปอย่างรวดและในฤดูร้อนก็จะร้อนมากเพราะตั้งลึกห่างจากทะเลและมีภูเขากั้นอยู่รอบด้านลมทะเลไม่สามารถเข้าถึงได้

ฝน (Rainfall)

เขตนี้เป็นเขตที่อยู่ติดแนวเขตลำน้ำโขงอยู่ห่างไกลจากทะเลและยังมีเทือกเขาเพชรบูรณ์และเทือกเขาดงพญาเย็นอยู่ทางทิศตะวันตกเทือกเขาสันกำแพงและเทือกเขาพนมดงรักอยู่ทาง

ใต้เป็นเครื่องกีดขวางลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นฝนที่ตกในเขตนี้อันเนื่องจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จึงมีปริมาณไม่มากนักจะมีฝนตกก็เป็นฝนเฉพาะแห่ง ฝนส่วนใหญ่ที่ตกในเขตนี้เกิดจากพายุดีเปรสชั่นซึ่งเคลื่อนมาทางทะเลจีนใต้ทางอ่าวตังเกี๋ยผ่านเวียดนามเข้ามาจนถึงภาคนี้ และเนื่องจากเขตนี้เป็นเขตที่อยู่ริมสุดของประเทศได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชั่นอย่างเต็มที่และรุนแรงกว่าเขตอื่นๆ จึงมีปริมาณฝนค่อนข้างสูง ฤดูฝนของเขตนี้จะเริ่มช้ากว่าเขตภาคกลางของประเทศไทย คือจะเริ่มหลังจากกลางเดือนพฤษภาคมเป็นต้นไปและสิ้นสุดประมาณเดือนตุลาคม ปริมาณฝนเฉลี่ยของทั้งเขต 1,599.7 มิลลิเมตร จังหวัดที่มีปริมาณฝนรายปีสูงสุด ได้แก่ จังหวัดนครพนม 2,294.6 มิลลิเมตร และจังหวัดเลยมีปริมาณฝนรายปีต่ำสุดเพียง 1,244.5 มิลลิเมตร จังหวัดที่มีปริมาณฝนต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทั้งเขตนอกจากจังหวัดเลย คือจังหวัดอุดรธานี

อุณหภูมิ (Temperature)

เขตนี้เป็นเขตที่อยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดินห่างจากทะเลมากและมีภูเขาอยู่รอบด้านลมทะเลไม่สามารถจะเข้าถึงได้และประกอบกับเป็นเขตที่อยู่ต้นทางที่จะได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจึงทำให้เขตนี้มีอุณหภูมิค่อนข้างร้อนและหนาวมาก แต่อย่างไรก็ตามแม่น้ำโขงซึ่งอยู่เป็นแนวเขตแดนตั้งแต่เหนือสุดมายังด้านตะวันออกก็มีส่วนช่วงให้เกิดความชุ่มชื้นให้เขตนี้ได้บ้าง อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของทั้งเขต 32.9 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายนและต่ำสุด 22.1 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคม ในช่วงปี 2519-2548 อุณหภูมิต่ำสุดที่เคยวัดได้ 14.6 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคม ที่จังหวัดเลย และอุณหภูมิสูงสุด 36.7 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายนที่จังหวัดมุกดาหารเช่นเดียวกัน

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

เนื่องจากเขตนี้ตั้งลึกเข้ามาในแผ่นดินห่างจากทะเลค่อนข้างมากและอยู่ด้านลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือทำให้มีอากาศค่อนข้างหนาวเย็นมากโดยเฉพาะตอนเหนือของเขตแต่เขตนี้พื้นที่ตลอดแนวเขตติดต่อกับแม่น้ำโขงและพื้นที่ป่าไม้ก็ยังเหลืออยู่มากพอสมควร ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ลดต่ำลงมากนัก แม้ในฤดูแล้งก็ตาม ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุด ทั้งเขตอยู่ระหว่าง 95-41 เปอร์เซ็นต์ โดยความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่เดือนกันยายนและต่ำสุดเดือนมีนาคม ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่ำสุดที่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ มี 4 เดือนคือ ธันวาคม-เมษายน ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ มีประมาณ 8 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม-ธันวาคม

เขตที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือหรือที่ราบสูงตามแนวฝั่งแม่น้ำโขง มีพื้นที่รวมกันทั้งหมด 45.4 ล้านไร่ พื้นที่ทำการเกษตร 18.5 ล้านไร่ หรือ 40.7 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ป่าไม้ 8.7 ล้านไร่ (19.2 เปอร์เซ็นต์) จังหวัดที่มีพื้นที่ทำการเกษตรมากที่สุด ได้แก่ จังหวัดอุบลราชธานี โดยมีพื้นที่ทำการเกษตร

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

5.0 ล้านไร่ จังหวัดมุกดาหารมีพื้นที่ทำการเกษตรน้อยที่สุด โดยมีพื้นที่ 5.3 แสนไร่ จังหวัดที่มีพื้นที่ป่าไม้มากที่สุด ได้แก่ จังหวัดอุบลราชธานี โดยมีพื้นที่ป่าไม้ 2.4 ล้านไร่ พืชและระบบการปลูกพืช ของเขตที่ราบสูงตามแนวฝั่งแม่น้ำโขง มี ดังนี้คือ

- **ข้าวนาปี** เกษตรกรในพื้นที่นี้จะปลูกทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้า โดยการปลูกส่วนใหญ่จะใช้วิธีปักดำ ส่วนวิธีหว่านจะมีบ้างไม่มากนัก พื้นที่ปลูกข้าวเหนียวจะมีมากเกือบ 10 เท่า ของพื้นที่ปลูกข้าวเจ้า โดยมีพื้นที่ปลูกข้าวเหนียวทั้งหมดประมาณ 10.4 ล้านไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 353 กิโลกรัมต่อไร่ โดยวิธีปักดำ ส่วนวิธีหว่านประมาณ 24,000 ไร่ ผลผลิต 293 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดอุบลราชธานีมีพื้นที่ปลูกข้าวมากที่สุดประมาณ 4.0 ล้านไร่ ผลผลิต 331 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดนี้มีพื้นที่ปลูกข้าวเหนียวน้อยที่สุด 398,000 ไร่ แต่ผลผลิตสูงที่สุด 475 กิโลกรัมต่อไร่
- **ข้าวเจ้า** มีพื้นที่ปลูกรวมกันทั้งเขตประมาณ 1,763,000 ไร่ ผลผลิต 353 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรส่วนใหญ่จะเริ่มปลูกข้าว (ต้นกล้า) ประมาณเดือน พฤษภาคม-มิถุนายน และเก็บเกี่ยวประมาณเดือนธันวาคม
- **มันสำปะหลัง** มันสำปะหลังยังคงเป็นพืชสำคัญรองจากข้าวเพราะเป็นพืชที่เหมาะสมทางด้านกายภาพ ชีวภาพ เศรษฐกิจและสังคมของเกษตรกรมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 1.10 ล้านไร่ ผลผลิต 2,085 กิโลกรัมต่อไร่ หนองคายมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังมากที่สุด 309,000 ไร่ ผลผลิต 2,057 กิโลกรัมต่อไร่ อุดรธานีให้ผลผลิตสูงสุด 2,577 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรนิยมปลูกมันสำปะหลัง 2 ช่วง คือ ช่วงต้นฝน (เมษายน-พฤษภาคม) และช่วงปลายฝน (ตุลาคม-พฤศจิกายน) และเก็บเกี่ยวเมื่ออายุประมาณ 8-12 เดือน
- **ข้าวโพด** ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดต่างๆในเขตนี้เพียง 3 จังหวัด ได้แก่ เลย อุดรธานี และอุบลราชธานี มีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 1.72 ล้านไร่ เกษตรกรยังนิยมปลูกระบบการปลูกพืช ข้าวโพด-ข้าวโพด หรือ ข้าวโพดเพียงพืชเดียวบางครั้งยังมีพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง ถั่งลิสง ถั่วเขียว ปลูกเป็นพืชที่ 2 ตามข้าวโพดอีกด้วย ผลผลิตข้าวโพดที่ปลูกเป็นพืชแรกประมาณ 405 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนข้าวโพดพืชที่สอง ได้ผลผลิต 387 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมปลูกข้าวโพดต้นฤดู(เมษายน-พฤษภาคม) เมื่อมีฝนเพียงพอต่อการไถพรวนเมื่อเก็บข้าวโพดพืชแรก (กรกฎาคม-สิงหาคม) ก็ไถพรวนปลูกพืชที่ 2 ต่อไปจังหวัดเลย ปลูกข้าวโพดมากที่สุด 924,000 ไร่ ผลผลิตประมาณ 416 กิโลกรัมต่อไร่
- **อ้อย** มีพื้นที่ปลูกค่อนข้างมากใน 3 จังหวัดของเขตนี้ ได้แก่ อุดรธานี สกลนครและมุกดาหาร มีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 412,000ไร่ ผลผลิต 9,237 กก.ไร่ ผลผลิต 8,000กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกอ้อยต้นฝนประมาณเดือนเมษายน-พฤษภาคม
- **ปอแก้ว** เป็นพืชที่สำคัญพืชหนึ่งมีพื้นที่ปลูกทุกจังหวัดของเขตนี้ โดยมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 216,000 ไร่ ผลผลิต 240 กิโลกรัมต่อไร่ อุบลราชธานี มีพื้นที่ปลูกมาที่สุด 83,000 ไร่

ผลผลิต 250 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรจะปลูกปอแก้วต้นฤดูฝน (มีนาคม-เมษายน) และเก็บเกี่ยวปลายฤดูฝน (กันยายน-ตุลาคม) ปอแก้วนอกจากจะปลูกเดี่ยวแล้วเกษตรกรยังปลูกเป็นพืชก่อนข้าวอีกด้วย

- **ปอกระเจา** มีพื้นที่ปลูกในจังหวัดต่างๆของเขตดังนี้ ได้แก่ หนองคาย อุดรธานี นครพนมและสกลนคร โดยมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ68,000 ไร่ ผลผลิต 250 กิโลกรัมต่อไร่สกลนครมีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 43,000 ไร่ ผลผลิต 245 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรจะปลูกปอกระเจาต้นฤดูฝนประมาณเดือนเมษายน แล้วเก็บเกี่ยวประมาณเดือนกันยายน

- **ฝ้าย** มีเพียง 4 จังหวัดของเขตนี้ มีพื้นที่ปลูกฝ้าย ได้แก่ จังหวัดเลย หนองคาย อุดรธานี และสกลนคร โดยมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 47,000 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ย136 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดเลยและอุดรธานี มีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 28,000 และ 16,000 ไร่ ตามลำดับ ผลผลิตประมาณ 225 กิโลกรัมต่อไร่ และ 219 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรจะปลูกฝ้ายประมาณเดือนกรกฎาคมและเก็บเกี่ยวราวเดือนพฤศจิกายน

(2) <u>เขตที่สูงตอนกลางและที่ต่ำทางทิศใต้ (Central highland and Southern lowland)</u> ประกอบด้วย 7 จังหวัด ได้แก่ กาฬสินธุ์ มหาสารคาม ร้อยเอ็ด ยโสธร ศรีสะเกษ สุรินทร์และบุรีรัมย์ มีภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าเขตร้อน (Tropical Savannah Climate) มีฤดูแล้ง และฤดูฝนแตกต่างกันเห็นได้อย่างชัดเจน มีปริมาณฝนตกเฉลี่ยของเขตอยู่ระหว่าง 1,000-1,400 มิลลิเมตร เขตนี้จะอยู่ตอนกลางและตอนใต้ของภาค และเนื่องจากมีทิวเขาเป็นกำแพงกั้นกระแสอากาศชุ่มชื้นของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งเป็นสิ่งที่มาของฝนทั้งสองด้าน ดังนั้นบริเวณของเขตนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าต้นปลายลม ทำให้มีปริมาณฝนน้อยเมื่อเทียบกับเขตบริเวณริมแม่น้ำโขงในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ จะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้มีอากาศหนาวปกคลุมไปทั่วทั้งเขต แต่ยังหนาวน้อยกว่าตอนบนของภาคซึ่งได้รับอิทธิพลของลมหนาวนี้อย่างเต็มที่

ฝน (Rainfall)

ตามที่ได้กล่าวแล้วภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีทิวเขาเป็นกำแพงขวางกั้นกระแสอากาศที่ชุ่มชื้นและมีไอน้ำจากทะเลซึ่งเป็นสิ่งที่มาของฝนทั้งสองด้าน ดังนั้นบริเวณที่อยู่หลังทิวเขานี้ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าทางต้นปลายลม ซึ่งเป็นบริเวณส่วนใหญ่ของเขตนี้ตั้งแต่บุรีรัมย์ขึ้นไปจนถึงจังหวัดมหาสารคาม เป็นบริเวณที่มีฝนตกค่อนข้างน้อยประมาณ 1,100-1,200 มิลลิเมตรต่อปี ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของทั้งเขตต่ำกว่าเขตที่กล่าวแล้วเป็นอย่างมาก โดยมีประมาณ 1,364.3 มิลลิเมตร ปริมาณฝนราย

เดือนที่สูงกว่า 100 มิลลิเมตร มีประมาณ 6 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และปริมาณฝนสูงกว่า 200 มิลลิเมตรมีประมาณ 2 เดือน คือเดือนสิงหาคมและกันยายน

อุณหภูมิ (Temperature)

เขตนี้เป็นเขตที่อยู่ห่างจากทะเลค่อนข้างมากประกอบกับมีภูเขาขวางอยู่รอบด้านอิทธิพลของลมทะเลที่จะเข้ามาถึงเขตนี้จึงไม่มีทำให้อากาศในฤดูร้อนจึงค่อนข้างร้อนจัด ส่วนในฤดูหนาวมวลอากาศที่หนาวเย็นของลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ได้ลดความหนาวเย็นลงบ้างแล้ว หลังจากผ่านเขตพื้นที่บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขงทำให้อากาศไม่หนาวเย็นเท่ากับเขตบริเวณตอนเหนือของภาคและเขตริมฝั่งแม่น้ำโขง อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยทั้งภาค 32.8 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายนและต่ำสุด 21.6 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคมอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 32.8 องศาเซลเซียส ที่จังหวัดบุรีรัมย์ในเดือนเมษายน อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 22.1 องศาเซลเซียส ที่จังหวัดบุรีรัมย์ ในเดือนมกราคม

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

เนื่องจากเขตนี้ห่างจากทะเลน้อยลงเมื่อเทียบกับเขตที่กล่าวมาแล้ว แต่เนื่องจากมีภูเขาล้อมรอบทั้งด้านตะวันตกและด้านใต้อิทธิพลจากลมทะเลและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จึงมีน้อยมากประกอบกับห่างจากแม่น้ำโขงและป่าไม้มีน้อยมากจึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของเขตนี้ต่ำกว่าเขตริมฝั่งแม่น้ำโขง ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุดของทั้งเขตอยู่ระหว่าง 95-41 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่เดือนกันยายนและต่ำสุดเดือนเมษายน ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่ำสุดน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ มี 5 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงพฤษภาคม ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ มี 7 เดือน คือตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนพฤศจิกายน

เขตที่สูงตอนกลางและที่ต่ำทางทิศใต้มีพื้นที่ทั้งหมด 32.5 ล้านไร่ พื้นที่ทำการเกษตร 20.9 ล้านไร่ หรือ 64.3 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ป่าไม้ 2.0 ล้านไร่ จังหวัดที่มีพื้นที่ทำการเกษตรมากที่สุด ได้แก่จังหวัดบุรีรัมย์ โดยมีพื้นที่ 4.0 ไร่ และจังหวัดที่มีพื้นที่ทำการเกษตรน้อยที่สุด ได้แก่จังหวัดยโสธร มีพื้นที่ 1.7 ล้านไร่ จังหวัดที่มีพื้นที่ป่าไม้มากที่สุด ได้แก่ ศรีสะเกษ 5.0 แสนไร่ พืชและระบบการปลูกพืช ของเขตเขตที่สูงตอนกลางและที่ต่ำทางทิศใต้ มี ดังนี้คือ

- **ข้าวนาปี** เขตนี้เป็นแหล่งปลูกข้าวที่สำคัญของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ปลูกรวมกันทั้งข้าวเหนียวและข้าวจ้าวประมาณ 14.03 ล้านไร่ ผลผลิตโดยเฉลี่ย 335 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดบุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปีมากที่สุด 3.3 , 3.0 และ 2.7 ล้านไร่ ตามลำดับ ข้าวที่ปลูกส่วนใหญ่ใช้วิธีปักดำ เริ่มปลูก (ตกกล้า)ประมาณเดือนพฤษภาคม ถึงมิถุนายน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

- **มันสำปะหลัง** เป็นพืชที่ปลูกมากรองจากพื้นที่ปลูกข้าวโดยมีพื้นพื้นที่ปลูกประมาณ 1.1 ล้านไร่ ผลผลิตโดยเฉลี่ย 2,084 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดกาฬสินธุ์ บุรีรัมย์และมหาสารคาม มีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 272,000, 237,000 และ 182,000 ไร่ ตามลำดับ เกษตรกรจะนิยมปลูกมันสำปะหลัง 2 ช่วง คือ ต้นฝน (เมษายน-พฤษภาคม) และปลายฝน (ตุลาคม-พฤศจิกายน) และเก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่ออายุประมาณ 8-12 เดือน

- **ข้าวโพด** เป็นพืชที่มีปลูกมากเพียงสองจังหวัด ได้แก่ ศรีสะเกษ และกาฬสินธุ์ มีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 137,000 ไร่ ผลผลิตประมาณ 471 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดศรีสะเกษมีพื้นที่มากที่สุด 129,000 ไร่ ผลผลิต 604 กิโลกรัมต่อไร่ และส่วนใหญ่จะปลูกที่อำเภอกันทรลักษณ์ ศรีรัตนะ และขุนหาญ ปัจจุบันเกษตรกรยังปลูกระบบการปลูกพืช ข้าวโพด-ข้าวโพด โดยปลูกพืชแรกประมาณเดือนเมษายน-พฤษภาคมและพืชที่สองประมาณเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ข้าวโพดปลูกพืชแรกมักจะเสียหายจากฝนทิ้งช่วงในเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม เป็นประจำ

- **ปอแก้ว** เป็นพืชที่มีพื้นที่ปลูกมากเป็นอันดับสามรองจากข้าวและมันสำปะหลังโดยมีปลูกทุกจังหวัดในเขตที่มีพื้นที่รวมกันประมาณ 115,000 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 208 กิโลกรัมต่อไร่ ปลูกมากที่สุดในจังหวัดศรีสะเกษ และสุรินทร์ โดยมีพื้นที่ปลูก 55,000 และ 49,000 ไร่ ตามลำดับ ปอแก้วส่วนใหญ่จะปลูกในสภาพไร่ประมาณ มีนาคม-เมษายน และเก็บเกี่ยวในเดือนกันยายน-ตุลาคม แต่มีส่วนน้อยเกษตรกรปลูกปอแก้วเป็นพืชก่อนปลูกข้าว เช่นที่จังหวัดกาฬสินธุ์และมหาสารคาม เป็นต้น

- **อ้อย** ในเขตนี้มีเพียงสองจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกอ้อยค่อนข้างมาก ได้แก่ กาฬสินธุ์ และบุรีรัมย์ โดยมีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 61,000 ไร่ ผลผลิต 9,668 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้งสองจังหวัดมีพื้นที่ปลูกใกล้เคียงกันแต่ผลผลิตของอ้อยที่กาฬสินธุ์สูงกว่าโดยได้ผลผลิต 12,138 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรจะนิยมปลูกอ้อยในระยะต้นฝนประมาณเดือนพฤษภาคม-มิถุนายน

- **ยางพารา** เขตนี้นับว่ามีพื้นที่ปลูกยางพารามากที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีพื้นที่ปลูกรวมกันถึง 23,500 ไร่ ปลูกมากที่สุดที่จังหวัดบุรีรัมย์ อำเภอบ้านกรวดละหานทรายสตึกและโนนสุวรรณ มีพื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 8,000 ไร่ บางส่วนสามารถกรีดน้ำยางได้แล้ว

(3) เขตที่สูงด้านตะวันตก (Western Highland) ประกอบด้วย 3 จังหวัด ได้แก่ ขอนแก่น ชัยภูมิและนครราชสีมา เขตนี้ติดต่อกับภาคกลางของประเทศแต่มีเทือกเขาเพชรบูรณ์กั้นเป็นเขตแดนทางด้านตะวันตกและเทือกเขาสันกำแพงกั้นเป็นเขตแดนทางด้านใต้เพราะเทือกเขาทั้งสองนี้จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ภูมิอากาศของเขตนี้แตกต่างจากภาคกลางเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะเทือกเขาทั้งสองนี้จะเป็นเครื่องกีดขวางทางลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งจะนำฝนมาตกในเขตนี้และจะทำให้มีฝนตกทางด้านตะวันตกและด้านใต้ของภูเขาคือเขตของภาคกลางเสียเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในฤดูหนาวแนวเขาทั้งสองนี้จะทำให้มีฝนตกทางด้านเครื่องกีดขวางทางลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งจะนำฝน

มาตกในเขตนี้และทำให้มีฝนตกทางด้านตะวันตกและด้านใต้ของภูเขาคือเขตของภาคกลางเสียส่วนใหญ่ ส่วนเขตนี้จะเกิดเขตเงาฝน (Rain Shadow) ทำให้มีฝนตกน้อยโดยทั่วไป ส่วนในฤดูหนาวแนวเขาทั้งสองนี้เช่นกันที่จะเป็นตัวขวางกั้นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจากประเทศจีน ซึ่งนำเอามวลอากาศเย็นและแห้งเข้ามาในประเทศไทย ทำให้ภาคกลางมีอากาศหนาวเย็นน้อยกว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือหรือเขตนี้ค่อนข้างมากประกอบกับสภาพพื้นที่เป็นที่สูงทางด้านตะวันตก และลาดต่ำลงทางด้านตะวันออก ปริมาณฝนตกมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเขตอื่นๆ และลักษณะผิวพื้นดินโดยทั่วไปเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนใต้ผิวดินระดับไม่ลึกนักเป็นหินตะกอน หรือหินทรายการสูญเสียน้ำเป็นไปอย่างรวดเร็วเมื่อฝนทิ้งช่วง หรือเมื่อหมดฤดูฝนทำให้เขตนี้มีอากาศร้อนอุณหภูมิค่อนข้างสูงในฤดูร้อน และมักเกิดความแห้งแล้งอย่างรุนแรง โดยทั่วไปแม้ในฤดูเพาะปลูก

ฝน (Rainfall)

เนื่องจากเขตนี้มีทิวเขาเป็นกำแพงกั้นกระแสอากาศจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ บริเวณที่อยู่หลังทิวเขาที่เรียกว่า ด้านปลายลมหรือเขตเงาฝน (Rain Shadow) ตั้งแต่จังหวัดนครราชสีมา ขอนแก่น และชัยภูมิ เป็นบริเวณที่มีฝนตกน้อยที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ฝนที่ได้รับส่วนใหญ่เนื่องจากพายุดีเปรสชั่น ซึ่งเคลื่อนเข้ามาทางทะเลจีนใต้ทางอ่าวตังเกี๋ยผ่านเวียดนามเข้ามาจนถึงเขตนี้ แต่เขตนี้อยู่ลึกเข้ามาจากบริเวณผ่านของพายุดีเปรสชั่นทำให้ได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชั่นน้อย ปริมาณฝนรวมรายปีต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเขตต่างๆ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีปริมาณฝนรวมเพียง 1,104.9 มิลลิเมตร แม้ปริมาณฝนรายเดือนที่สูงกว่า 100 มิลลิเมตร จะมีถึง 6 เดือนก็ตามแต่ก็ค่อนข้างต่ำ ส่วนปริมาณฝนรายเดือนที่สูงกว่า 200 มิลลิเมตรเพียง 1 เดือน คือในเดือนกันยายน ขอนแก่นมีปริมาณฝนรวมรายปีสูงสุด 1,232.8 มิลลิเมตร และสถานีนครราชสีมา มีปริมาณฝนรวมรายปีต่ำสุด 1,019.4 มิลลิเมตร เดือนมิถุนายน กรกฎาคม ตลอดจนสิงหาคม มักเกิดฝนทิ้งช่วงเป็นประจำและสิงหาคมเป็นเดือนที่มีปริมาณฝนตกสูงสุด

อุณหภูมิ (Temperature)

เขตนี้เป็นเขตที่ตั้งอยู่ใกล้ทะเลมากกว่าเขตอื่นของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่เนื่องจากมีแนวเขาขวางกั้นทั้งทางด้านใต้และด้านตะวันตกและเป็นเขตที่อยู่ในบริเวณเงาฝนที่มีฝนตกน้อย ประกอบกับดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนทราย การสูญเสียน้ำจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อหมดฤดูฝนทำให้เขตนี้ค่อนข้างจะมีอากาศร้อนมากในฤดูร้อนและเนื่องจากอยู่ปลายลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเมื่อเทียบกับเขตทั้งสองของภาคจึงทำให้อากาศไม่หนาวเย็นมากนัก อุณหภูมิสูงสุดทั้งภาคประมาณ 33.0 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายนและเฉลี่ยต่ำสุด 22.6 องศาเซลเซียส ในเดือนมกราคม อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่จังหวัดชัยภูมิ 32.8 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายน และเฉลี่ยต่ำสุด 22.2 องศาเซลเซียส ในเดือนธันวาคม ที่จังหวัดนครราชสีมา ในช่วงปี 2519-2548 อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่เคยวัดได้ 17.3 องศา

เซลเซียส ที่จังหวัดนครราชสีมา ในเดือนมกราคม และอุณหภูมิสูงสุด 31.5 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายน

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของเขตนี้อยู่ในเขตพื้นที่เงาฝน (Rain Shadow) มีปริมาณฝนน้อยที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบกับดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนทรายและพื้นที่ลาดเอียงลงสู่ด้านตะวันออกของภาคทำให้ฤดูแล้งเมื่อหมดฝนแล้วอุณหภูมิจะร้อนขึ้นมากอย่างรวดเร็ว ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของเขตนี้ต่ำกว่าเขตต่างๆ ของภาคนี้ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุดของทั้งเขตอยู่ระหว่าง 94-38 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่เดือนกันยายนและต่ำสุดเดือนมีนาคม ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ มีเพียง 3 เดือนคือ สิงหาคมถึงตุลาคม

เขตที่สูงด้านตะวันตก มีพื้นที่รวมกันทั้งหมด 27.7 ล้านไร่ พื้นที่ทำการเกษตร 17.8 ล้านไร่ หรือ 64.5 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ป่าไม้ 4.2 ล้านไร่ จังหวัดที่มีพื้นที่ทำการเกษตรมากที่สุด ได้แก่ นครราชสีมา โดยมีพื้นที่ทำการเกษตร 8.4 ล้านไร่ ส่วนจังหวัดชัยภูมิมีพื้นที่ทำการเกษตรน้อยที่สุด 3.4 ล้านไร่จังหวัดที่มีพื้นที่ป่าไม้มากที่สุด ได้แก่ จังหวัดชัยภูมิ โดยมีพื้นที่ป่าไม้ 2.0 ล้านไร่ โดยข้าวนับเป็นพืชสำคัญและส่วนใหญ่จะปลูกเพียงพืชเดียว ในแต่ละปีพืชที่สำคัญถัดไปได้แก่ มันสำปะหลัง ปอแก้ว และข้าวโพด ดังมีรายละเอียดดังนี้

- **ข้าวนาปี** ข้าวนับเป็นพืชที่สำคัญดังได้กล่าวมาแล้ว เกษตรกรจะเริ่มปลูกข้าว (ตกกล้า) ตั้งแต่เดือนมิถุนายน เมื่อมีฝนเพียงพอแต่บางปีเมื่อมีฝนปริมาณน้อยและแปรปรวนเกษตรกรก็ต้องปลูกล่าออกไป ข้าวนาปีของเกษตรกรจะมีทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้า วิธีการปลูกมีทั้งปักดำ หว่านข้าวแห้งและหยอด พื้นที่ปลูกข้าวนาปี ซึ่งเป็นข้าวเหนียวมีประมาณ 5.4 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ 332.0 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนวิธีหว่านและหยอดซึ่งมีพื้นที่ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีปักดำ ให้ผลผลิตประมาณ 264 และ 247 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ นครราชสีมามีพื้นที่ปลูกข้าวนาปีมากที่สุดประมาณ 3.4 ล้านไร่ ผลผลิต 318 กิโลกรัมต่อไร่
- **มันสำปะหลัง** มันสำปะหลังนับเป็นพืชสำคัญของเขตนี้รองจากข้าวเนื่องจากมีปัญหาเรื่องดิน ฟ้า อากาศ โดยเฉพาะส่วนใหญ่อยู่ในเขตเงาฝน มีฝนตกน้อยและแปรปรวนมันสำปะหลังจึงเป็นพืชที่เหมาะสม เกษตรกรจะปลูกมันสำปะหลัง 2 ช่วงคือช่วงต้นฝน (เม.ย.-พ.ค.) และช่วงปลายฝน (ต.ค.-พ.ย.) พื้นที่ปลูกทั้งหมดของเขตนี้ประมาณ 2.3 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ 1,965 กิโลกรัมต่อไร่ นครราชสีมามีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 1.73 ล้านไร่ ผลผลิต 2,125 กิโลกรัมต่อไร่ ขอนแก่นมีพื้นที่ปลูกน้อยที่สุดและให้ผลผลิตต่ำสุดประมาณ 1,661 กิโลกรัมต่อไร่

- **ข้าวโพด** ในอดีตที่ผ่านมาเกษตรกรในเขตนี้มักจะปลูกข้าวโพดและตามข้าวโพดอีกครั้งหนึ่ง โดยเฉพาะในจังหวัดนครราชสีมา แต่ปัจจุบันเนื่องจากความแปรปรวนของลม ฟ้า อากาศ ทำให้การปลูกข้าวโพด 2 ครั้งมีความเสี่ยงมากขึ้นหรือแม้จะปลูกเพียงครั้งเดียวตอนต้นฤดู ทั้งนี้เกษตรกรจะปลูกข้าวโพดเมื่อมีฝนในเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม และเก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม และปลูกข้าวโพดอีกครั้งหนึ่งเก็บเกี่ยวตอนปลายฝนพื้นที่ปลูกข้าวโพดของเขตรวมกันประมาณ 1.3 ล้านไร่ ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวโพดพืชแรก 374 กิโลกรัมต่อไร่ และข้าวโพดพืชที่สอง ประมาณ 364 กิโลกรัมต่อไร่ จังหวัดนครราชสีมามีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 1,012,000 ไร่ โดยเฉพาะที่อำเภอปากช่อง ด่านขุนทดและปักธงชัย นอกจากข้าวโพด-ข้าวโพด ที่เกษตรกรปลูก ข้าวโพด-ข้าวฟ่าง ยังเป็นระบบการปลูกพืชที่เกษตรกรในจังหวัดนครราชสีมาปลูกโดยเฉพาะที่ อ.โนนไทย และด่านขุนทด โดยมีพื้นที่ปลูกประมาณ 14,000 ไร่ ผลผลิต 269 กิโลกรัมต่อไร่

- **อ้อย** ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาพื้นที่ปลูกอ้อยของเขตนี้หรือในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ๆ ปลูกข้าวโพดมาก่อนทั้งนี้เพราะอ้อยเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดีกว่าข้าวโพด ราคาผลผลิตมั่นคง เพราะมีราคาประกันและมีโรงงานหีบอ้อยตั้งขึ้นหลายแห่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พื้นที่ปลูกอ้อยของทั้งเขตประมาณ 5 แสนไร่ ผลผลิตประมาณ 10.1 ตัน/ไร่ นครราชสีมา และขอนแก่น มีพื้นที่ปลูกอ้อยค่อนข้างสูงประมาณ 2.0 แสนไร่ ในแต่ละจังหวัด และนครราชสีมามีผลผลิตสูงสุดประมาณ 13.0 ตัน/ไร่ ส่วนใหญ่เกษตรกรจะปลูกอ้อยต้นฝนประมาณเดือนพฤษภาคม

- **ถั่วเหลือง** ถั่วเหลืองเป็นพืชที่ปลูกทั้งในเขตชลประทานและเขตน้ำฝนไม่สามารถแยกพื้นที่ได้อย่างชัดเจน เกษตรกรที่ปลูกถั่วเหลืองในเขตชลประทานส่วนใหญ่จะปลูกตามข้าว และที่ปลูกในเขตน้ำฝนจะปลูกเป็นพืชเดี่ยวและปลูกแซมในแปลงไม้ผลโดยปลูกประมาณเดือนกรกฎาคมและเก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายนส่วนที่ปลูกเป็นพืชหลังข้าวจะปลูกในเดือนธันวาคมถึงมกราคม พื้นที่ปลูกรวมกันทั้งเขตประมาณ 36,000 ไร่ ผลผลิต 150 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้ง 3 จังหวัด มีพื้นที่ปลูกใกล้เคียงกัน แต่ที่ชัยภูมิให้ผลผลิตต่ำสุดประมาณ 122 กิโลกรัมต่อไร่

- **ถั่วลิสง** ถั่วลิสงก็เช่นเดียวกับถั่วเหลืองปลูกทั้งในสภาพน้ำฝนและชลประทานโดยในสภาพน้ำฝน เกษตรกรจะปลูกเป็นพืชเดี่ยวหรือปลูกแซมในแปลงไม้ผลในเขตชลประทานจะปลูกตามข้าวในฤดูแล้งพื้นที่ปลูกรวมกันทั้งเขตประมาณ 29,000 ไร่ ผลผลิตประมาณ 217 กิโลกรัมต่อไร่ (ฝักแห้ง) จังหวัดนครราชสีมา ปลูกมากที่สุด 14,500 ไร่ ผลผลิต 254 กิโลกรัมต่อไร่ สภาพน้ำฝนเกษตรกรจะปลูกต้นเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน ส่วนที่ปลูกในฤดูแล้งเขตชลประทานจะปลูกเดือนธันวาคมถึงมกราคม

- **ปอแก้ว** ปอแก้วเป็นพืชสำคัญอีกพืชหนึ่ง เกษตรกรส่วนใหญ่มักปลูกเป็นพืชเดี่ยวต้นฝนรายเดือนมีนาคมถึงเมษายน และเก็บเกี่ยวปลายฝน (ก.ย.-ต.ค.) แต่เกษตรกรสามารถปลูกปอแก้วเป็นพืชก่อนข้าวได้ พื้นที่ปลูกรวมกันประมาณ 2 แสนไร่ ผลผลิตประมาณ 237 กิโลกรัมต่อไร่

2.10 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การประเมินผลกระทบของฝนหลวงต่อการกระจายฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำ

ประเสริฐและคณะ (2545) ได้ทำการประเมินผลกระทบของฝนหลวงต่อการกระจายฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่กวง จังหวัดเชียงใหม่ คณะทำงานศึกษาเรื่องการกระจายฝนจากการทำฝนหลวงในลุ่มน้ำแม่กวง ได้มีการดำเนินงานเบื้องต้นตั้งแต่ปี 2544 แล้วดำเนินการต่อในปี 2545 ช่วงเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม มีการทดลองทำฝนแบบสุ่ม (ทำฝนและไม่ทำฝน) ผลการประเมินทำให้ทราบว่าฝนหลวงสามารถกระจายฝนในลุ่มน้ำได้ดี จากข้อมูลฝนตกรายวัน ในช่วงปฏิบัติการปี 2545 มีฝนตกบริเวณอ่างเก็บน้ำ มากกว่าบริเวณอื่นในพื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณฝนสะสมรายเดือนของปี 2544 และ ปี 2545 ซึ่งเป็นช่วงเวลาการทำฝนมีฝนมากกว่าปีน้ำน้อย (2536) และค่าเฉลี่ย ส่วนปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างของปี 2544 และ 2545 ในช่วงเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม มีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำในปีน้ำมาก กล่าวได้ว่าเป็นผลกระทบของการทำฝนหลวง ในส่วนของความแม่นตรงนั้น จากการวิเคราะห์ตำแหน่งฝนตกในพื้นที่ลุ่มน้ำพบว่ามีฝนตกในพื้นที่บินทำฝน ร้อยละ 87.63 ในปี 2544 และร้อยละ 68.09 ในปี 2545 นอกจากนี้ในเดือนสิงหาคมของทั้ง 2 ปี มีฝนตกในพื้นที่เป้าหมายประมาณร้อยละ 90 จากการประเมินทางสถิติของอัตราส่วนฝนโดยใช้วิธีอัตราส่วนทบซ้ำ (Double ratio ,DR) พบว่าในช่วงเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม 2545 มีค่า DR ระหว่างการทำฝน (Seeded) กับการไม่ทำฝน (Non seeded) โดยใช้พื้นที่เปรียบเทียบ (Control, c) ร่วมทำอัตราส่วนเพื่อลดความลำเอียง พบว่า DR ของทั้ง 2 เดือนมีค่า 2.70 และ 1.43 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าการทำฝนทำให้ฝนเฉลี่ยสูงกว่าการไม่ทำฝนร้อยละ 170 และ 43 ตามลำดับ ในส่วนของการประเมินความชุ่มชื้นของลุ่มน้ำ โดยใช้ดัชนีความแห้งแล้งในฤดูมรสุม (GMI) พบว่าปี 2544 และ 2545 ช่วงเดือนมิถุนายนถึงกันยายน มีค่า GMI สูงกว่าปีเปรียบเทียบอื่นๆ กล่าวได้ว่าการทำฝนหลวงในลุ่มน้ำมีส่วนช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นในลุ่มน้ำได้

2) การพัฒนาเกณฑ์การตัดสินใจทำฝน

วีระศักดิ์ และคณะ (2549) ได้ทำการวิเคราะห์เกณฑ์การตัดสินใจในการปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝนเพื่อการทำฝนให้แก่ผู้ใช้น้ำในลุ่มน้ำของประเทศไทยตอนบน พิจารณาจากความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝนและความเหมาะสมในการทำฝน ด้านความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน พิจารณาจาก 3 เกณฑ์ ประกอบด้วย

1) เกณฑ์การตัดสินใจด้านระบบการปลูกพืช โดยกำหนดค่าคะแนน 3 สำหรับพื้นที่ที่ต้องการน้ำสำหรับปลูกพืชมาก คะแนนเท่ากับ 2 สำหรับพื้นที่ที่ต้องการน้ำสำหรับปลูกพืชปานกลาง และคะแนนเท่ากับ 1 สำหรับพื้นที่ที่ต้องการน้ำสำหรับปลูกพืชน้อย

2) เกณฑ์การตัดสินใจด้านภูมิอากาศ พิจารณาจากจำนวนวันที่ฝนตกหรือโอกาสในการทำฝนโดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ค่าคะแนนเท่ากับ 3 เมื่อมีโอกาสทำฝนในรอบเดือนมาก คือจำนวนวันฝน

ตกเฉลี่ย มากกว่า 10 วัน ค่าคะแนนเท่ากับ 2 เมื่อโอกาสทำฝนในรอบเดือนปานกลาง คือจำนวนวันฝนตกเฉลี่ย 6-10 วัน และค่าคะแนนเท่ากับ 1 เมื่อโอกาสทำฝนในรอบเดือนน้อย คือจำนวนวันฝนตกเฉลี่ย 1-5 วัน

3) เกณฑ์การตัดสินใจด้านสภาวะอากาศ พิจารณาค่าดัชนีความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศในซีกโลกใต้ (MEI นำมาแบ่งการคาดหมายด้านสภาวะอากาศเป็น 3 ระดับ โดยพิจารณาจากความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน ได้แก่ สภาวะอากาศในซีกโลกใต้เป็นแบบเย็น (COLD ENSO ,LaNiNa)) จะมีความจำเป็นในการทำฝนน้อย มีค่าคะแนนเท่ากับ 1 สภาวะอากาศในซีกโลกใต้เป็นแบบปกติ (MEDIUM ENSO) จะมีความจำเป็นในการทำฝนปานกลาง มีค่าคะแนนเท่ากับ 2 สภาวะอากาศในซีกโลกใต้เป็นแบบอุ่น (WARM ENSO) จะมีความจำเป็นในการทำฝนมาก มีค่าคะแนนเท่ากับ 3

และเมื่อรวมค่าคะแนนอยู่ระหว่าง 3-4 แสดงว่ามีความจำเป็นน้อยในการทำฝน 5-6 แสดงว่ามีความจำเป็นในการทำฝน 7-9 แสดงว่ามีความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน

ด้านความเหมาะสมในการทำฝนมีเกณฑ์ในการพิจารณา 3 เกณฑ์ ประกอบด้วย ชนิดของสภาวะอากาศในรอบวัน แบบจำลองสภาวะอากาศชั้นบน และแบบจำลองพิจารณาจากเรดาร์การตรวจวัดเมฆฝน โดยสรุปการกำหนดค่าคะแนนเกณฑ์ความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน

1) ชนิดของสภาวะอากาศในรอบวัน เมื่อพิจารณาค่าดัชนีสภาวะอากาศรายวัน (Synoptic Index; SYNI) นำมาทำการแบ่งระดับความเหมาะสมในการทำฝน เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ค่า SYNI 2-4 มีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย มีค่าคะแนนเท่ากับ 1 ค่า SYNI 5-7 มีความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง มีค่าคะแนนเท่ากับ 2 และค่า SYNI 8-10 มีความเหมาะสมในการทำฝนมาก มีค่าคะแนนเท่ากับ 3

2) แบบจำลองสภาวะอากาศชั้นบน เมื่อทำการคำนวณปริมาณน้ำฝนที่ได้ นำมาแบ่งระดับความเหมาะสมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรหรือครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่าร้อยละ 10 มีความเหมาะสมน้อย มีค่าคะแนนเท่ากับ 1 ปริมาณน้ำฝนระหว่าง 10-30 มิลลิเมตรหรือครอบคลุมพื้นที่ระหว่างร้อยละ 10-50 มีความเหมาะสมปานกลาง มีค่าคะแนนเท่ากับ 2 และปริมาณน้ำฝนมากกว่า 30 มิลลิเมตร หรือครอบคลุมพื้นที่มากกว่าร้อยละ 50 มีความเหมาะสมมาก มีค่าคะแนนเท่ากับ 3

3)แบบจำลองพิจารณาจากเรดาร์ตรวจวัดเมฆฝน จำแนกความเหมาะสมในการทำฝนจากเรดาร์การตรวจวัดเมฆฝนออกเป็น 3 ระดับ โดยพิจารณาจากปริมาณเมฆบนท้องฟ้าดังนี้ ผลตรวจเรดาร์พบว่าไม่มีเมฆทั้งวัน แสดงว่ามีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย มีค่าระดับคะแนนเท่ากับ 1 มีเมฆช่วงบ่ายแสดงว่ามีความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง มีค่าระดับคะแนนเท่ากับ 2 มีเมฆช่วงเช้าและพบเมฆคิวมิวโลนิมบัส (CB) แสดงว่ามีความเหมาะสมในการทำฝนมาก มีค่าระดับคะแนนเท่ากับ 3 คะแนน

และเมื่อรวมค่าคะแนนอยู่ระหว่าง 3-4 คะแนน มีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย คะแนน 5-6 คะแนน มีความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง คะแนน 7-9 คะแนน มีความเหมาะสมในการทำฝนมาก

จากเกณฑ์ความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน และเกณฑ์ความเหมาะสมในการทำฝน ในการปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝนเพื่อการทำฝนให้แก่ผู้ใช้น้ำในลุ่มน้ำของประเทศไทยตอนบนข้างต้น ได้นำมาทำการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจในการปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝนเพื่อการทำฝนให้แก่ผู้ใช้น้ำในลุ่มน้ำของประเทศไทยตอนบน โดยกำหนดเกณฑ์ดังนี้

1) มีความจำเป็นน้อยที่ต้องทำฝน แต่มีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย ตัดสินใจไม่ปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นน้อยที่ต้องทำฝน ความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง ตัดสินใจไม่ปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นน้อยที่ต้องทำฝน ความเหมาะสมมากในการทำฝน ตัดสินใจไม่ปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน

2) มีความจำเป็นในการทำฝน แต่มีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย ตัดสินใจไม่ปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นในการทำฝน ความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง ตัดสินใจปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นในการทำฝน ความเหมาะสมมากในการทำฝน ตัดสินใจปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน

3) มีความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน แต่มีความเหมาะสมในการทำฝนน้อย ตัดสินใจปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน ความเหมาะสมในการทำฝนปานกลาง ตัดสินใจปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน มีความจำเป็นเร่งด่วนในการทำฝน ความเหมาะสมมากในการทำฝน ตัดสินใจปฏิบัติการเพิ่มเติมน้ำฝน

และจากการศึกษาของวีระศักดิ์ และคณะ (2549) นี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลการตรวจอากาศขั้นบนได้แก่

(1) ปริมาณน้ำฟ้า (Precipitation Water; Pw) หน่วยเป็นเซนติเมตร

(2) ระดับความสูงที่เกิดจากการกลั่นตัวของกลุ่มอากาศ (ค่าความสูงของเมฆคิวมูลัส) โดยเกิดจากการพาความร้อนอย่างเดียวจากพื้นผิว (Convective Condensation Level; CCL)

(3) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity; RH)

(4) ความเร็วลม (Wind speed; Ws) หน่วยเป็นน็อต

(5) ดัชนีเสถียรภาพ Sholwalter Index (SI) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำนายความเสถียรของบรรยากาศ หมายถึงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ระดับ 500 มิลลิบาร์กับอุณหภูมิที่กลุ่มอากาศยกตัวจากระดับ 850 มิลลิบาร์แบบอะเดียบาติคแห้งจนอิ่มตัวโดยกระบวนการอะเดียบาติคที่ระดับ 500 มิลลิบาร์ ค่าลบแสดงความไม่ทรงตัวหรือไม่เสถียรของกลุ่มอากาศในขณะที่ค่าบวกแสดงถึงความทรงตัวหรือความเสถียรของกลุ่มอากาศ

(6) ดัชนีเสถียรภาพ The Lifted Index (LI) เป็นค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ระดับ 500 มิลลิบาร์กับค่าของกลุ่มอากาศที่อุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณกับอุณหภูมิจุดน้ำค้างเฉลี่ยจากผิวพื้นจนถึงระดับ 850 มิลลิบาร์ ถูกยกตัวขึ้นแบบอะเดียบาติคแห้ง (DALR) จนอิ่มตัวแล้วตามด้วยกระบวนการอะเดียบาติคอิ่มตัว (SALR) ไปที่ระดับ 500 มิลลิบาร์ ค่าบวกแสดงถึงสภาวะเสถียร ถ้าค่าอยู่ระหว่าง LI<SI<-1 องศาเซลเซียส แสดงถึงความไม่มีเสถียรของบรรยากาศและสามารถทำนายว่าจะเกิดพายุฝนฟ้าคะนองรุนแรง

(7) ดัชนีเสถียรภาพ K Index เป็นค่าที่แสดงโอกาสที่จะสามารถเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง เมื่อค่า K Index เพิ่มขึ้น จะมีโอกาสเกิดมวลอากาศพายุฝนฟ้าคะนองได้

(8) ค่าพลังงานการยกตัวของอากาศ (Cape1, Cape2)

เมื่อนำตัวแปรที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ซึ่งเป็นวิธีศึกษาเกี่ยวกับการหาฟังก์ชันหรือรูปแบบความสัมพันธ์ เพื่อใช้ในการทำนายค่าของตัวแปรที่ต้องการศึกษา ซึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (dependent variable) แทนด้วย Y ดังนี้

$Y_{(UP\text{-}NE)}$ = ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน (ปี 2543-2548)

$Y_{(\%UP\text{-}NE)}$ = ร้อยละพื้นที่ครอบคลุมสถานีที่มีฝนตกบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน (ปี 2543-2548)

$Y_{(LO\text{-}NE)}$ = ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง (ปี 2543-2548)

$Y_{(\%LO\text{-}NE)}$ = ร้อยละของสถานีที่มีฝนตกบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง (ปี 2543-2548)

ในการวิเคราะห์ได้ใช้ข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนจาก 4 สถานีได้แก่ สถานีของฝนหลวงศูนย์พิมาย จังหวัดนครราชสีมา ศูนย์อมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์ดอนเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และศูนย์ระยอง พิจารณาในช่วงฤดูฝน (ระหว่างวันที่ 16 พ.ค. – 15 ต.ค.) และนอกช่วงฤดูฝน (ก่อน 16 พ.ค. และหลัง 15 ต.ค.) ตั้งแต่ปี พ.ศ.2542-2548 โดยทำการสุ่มตัวอย่างตามวิธีของ Arkin (1974) พบว่าขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนที่ระดับความเชื่อมั่น 0.02 ในช่วงฤดูฝน มีจำนวน 72 ตัวอย่าง และนอกฤดูฝนจำนวน 68 ตัวอย่าง และใช้การวิเคราะห์ Multiple Regression แบบ stepwise method ซึ่งเป็นวิธีคัดเลือกตัวแปรต้นในเส้นถดถอยโดยคัดตัวแปรต้นเข้าในเส้นถดถอยทีละตัว (Forward) และคัดออกทีละตัว (Backward) เพื่อคัดเลือกตัวแปรที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณน้ำฝนในระดับภูมิภาค ได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

ในช่วงฤดูฝน

$Y_{(UP\text{-}NE)} = -14.430+1.406\ X_{KI}$

$Y_{(\%UP\text{-}NE)} = -2.282+0.819\ X_{RHAb}$

$Y_{(LO\text{-}NE)} = -1.087+0.077\ X_{RHAb}$

$Y_{(\%LO\text{-}NE)} = -112.897+1.653\ X_{RHlo} +0.027\ X_{Cape2}+0.05\ X_{CCL}$

นอกช่วงฤดูฝน

$Y_{(UP\text{-}NE)} = -12.806-7.107\ X_{Pw} +0.003\ X_{CCL} -0.001\ X_{RHccl} +0.895\ X_{RHlo} -0.072\ X_{RHAb} +0.028\ X_{Ws} +1.735\ X_{SI} -3.363\ X_{LI} -0.972\ X_{KI} +0.0001\ X_{Cape1}-0.004\ X_{Cape2}$

$Y_{(\%UP\text{-}NE)} = -150.167-95.275\ X_{Pw} +0.013\ X_{CCL} -0.021\ X_{RHccl} +8.623\ X_{RHlo} +0.409\ X_{RHAb} +0.113\ X_{Ws} +12.504\ X_{SI} -13.198\ X_{LI} -3.028\ X_{KI} -0.074\ X_{Cape1}+0.0001\ X_{Cape2}$)

$Y_{(LO\text{-}NE)} = -89.778-0.783\ X_{Pw} +0.004\ X_{CCL} -0.003\ X_{RHccl} +1.497\ X_{RHlo} -0.085\ X_{RHAb} -0.028\ X_{Ws} +3.138\ X_{SI} -3.508\ X_{LI} -0.963\ X_{KI} -0.037\ X_{Cape1}+0.022\ X_{Cape2}$

$Y_{(\%LO\text{-}NE)} = -448.7 +10.049\ X_{Pw} +0.027\ X_{CCL}+0.001\ X_{RHccl} +7.554X_{RHlo} -1.438\ X_{RHAb} -0.120\ X_{Ws} +13.014\ X_{SI}-9.420\ X_{LI} -5.548\ X_{KI} - 0.046\ X_{Cape1} +0.044X_{Cape2}$