วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีกับการปฏิบัติการฝนหลวง

ประวัติความเป็นมา

ด้วยพระมหากรุณาธิคุณ ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ในการเสด็จเยี่ยมพสกนิกรทั่วประเทศอย่างสม่ำเสมอนับแต่เสด็จขึ้นเถลิงถวัลย์ราชสมบัติตราบเท่าทุกวันนี้ ได้ทรงพบเห็นสภาวะแห้งแล้งที่เกิดขึ้นตามชนบทต่างๆสร้างความเดือดร้อนทุกข์ยากให้กับเกษตรกร/ราษฎร และภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงและความถี่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นในปี**พุทธศักราช 2497 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ได้ทรงพระราชดำริว่า น่าจะมีลู่ทางที่จะคิดค้นหาเทคนิค หรือวิธีการทางวิทยาศาสตร์ด้านดัดแปรสภาพอากาศมาช่วยให้เกิดการก่อตัว และรวมตัวของเมฆให้เกิดฝนได้** ด้วยเหตุนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาการจัดการทรัพยากรน้ำในบรรยากาศ ของ ประเทศไทย อันนำไปสู่กระบวนการพัฒนาการจัดการทรัพยากรน้ำของชาติที่ครบบริบูรณ์ตามทรัพยากรแหล่งน้ำ (แหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำในบรรยากาศ)

การพัฒนาการทรัพยากรน้ำของประเทศจะเกิดความสมบูรณ์ได้ต้องดำเนินการพัฒนาการจัดการทรัพยากรแหล่งน้ำทั้ง 3 แหล่งควบคู่กันไป เพราะแหล่งน้ำแต่ละแหล่งล้วนมีศักยภาพและขีดจำกัดด้วยกันทั้งนั้น

โครงการพระราชดำริ **“ฝนหลวง”** ได้เริ่มทดลองปฏิบัติการในท้องฟ้าครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2512 ต่อมาในปี พ.ศ. 2514 เริ่มมีการขยายผลการปฏิบัติการไปช่วยเหลือเกษตรกรและได้ดำเนินการช่วยเหลือเป็นประจำทุกๆปี จนกระทั่งถึงปีพ.ศ. 2518 รัฐบาลได้ตราพระราชกฤษฎีกาก่อตั้งสำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงขึ้น ในสังกัดสำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มีหน้าที่ปฏิบัติการฝนหลวงช่วยเหลือเกษตรกรที่ประสบภาวะแห้งแล้ง และศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำฝนหลวง ในระยะเวลาต่อมาภารกิจของสำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงมีเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และเพื่อให้การปฏิบัติงานมีความคล่องตัวยิ่งขึ้นในปี พ.ศ. 2535 คณะรัฐมนตรีเห็นชอบให้รวมสำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงกับกองบินเกษตรเข้าเป็นหน่วยงานเดียวชื่อว่า **สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร**

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 เป็นต้นมา กิจกรรมฝนหลวงได้ลงทะเบียนแจ้งกิจกรรมประจำปีต่อองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization : WMO) และได้ดำเนินการแลกเปลี่ยนเทคโนโลยี ประกอบกับได้รับการสนับสนุนจากนักวิชาการทั้งในประเทศและต่างประ เทศให้ความเห็นว่า สภาวะอากาศและภูมิประเทศของไทยมีศักยภาพสูงในการทำกิจกรรมดัดแปรสภาพอากาศ **หากมีการศึกษาวิจัย พัฒนาบุคลากร และเครื่องมืออุปกรณ์วิทยาศาสตร์ให้มากขึ้น** แล้วจะมีโอกาสประสบความสำเร็จอย่างมาก

ในปี พ.ศ. 2529 คณะผู้เชี่ยวชาญจากสหรัฐอเมริกา และข้าราชการสำนักงานปฏิบัติการฝนหลวงได้เข้าเฝ้าทูลละอองทุลีพระบาท ณ พระตำหนักทักษิณราชนิเวศน์ จังหวัดนราธิวาส และน้อมรับพระราชกระแสมีใจความสำคัญ 3 ประการ คือ

1)ทรงเน้นให้มีการพัฒนาวิธีการทำฝนหลวงไปในแนวทางและรูปแบบที่เป็นวิทยาศาสตร์มากยิ่งขึ้น

2) ทรงย้ำถึงบทบาท และความสำคัญการทำฝนหลวง ในลักษณะที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ

3) ทรงเน้นว่า สิ่งสำคัญที่ทำให้การดำเนินงานบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการฯ ได้ คือ ความร่วมมือและประสานงานกันระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

หลักการของโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริส่วนหนึ่ง คือ การพัฒนาต้องเป็นไปตามขั้นตอน ตามลำดับความจำเป็น ประหยัด และการพึ่งตนเอง สืบเนื่องจากพระราชกระแสดังกล่าวข้างต้นและผลการศึกษาประเมินความเป็นไปได้โดยคณะผู้เชี่ยวชาญสหรัฐอเมริกา ทำให้เกิดโครงการวิจัยทรัพยากรบรรยากาศประยุกต์ (The Applied Atmospheric Resources Research Program - AARRP) ขึ้น ดำเนินการวิจัยทำฝนหลวงสาธิตเหนือบริเวณลุ่มน้ำแม่ปิงตอนบน (เหนือเขื่อนภูมิพล) โดยมุ่งประเมินผลการทำฝนหลวง เพื่อพัฒนากรรมวิธีการปฏิบัติการฝนหลวงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ด้วยวิธีวางแผนปฏิบัติการทดลองและติดตามผลอย่างเป็นระบบ และใช้เครื่องมือตรวจวัดที่ทันสมัย เช่น ระบบเรดาร์ตรวจอากาศแบบดอพเพลอร์ ระบบรับภาพดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลและแบบจำลองผลตรวจอากาศชั้นบน ข้อมูลไมโครฟิสิกส์ของเมฆจากเครื่องบินตรวจอากาศ ผลการประเมินโครงการฯ ในเบื้องต้นพบว่า การปฏิบัติการทำฝนในภาคเหนือของประเทศไทย มีผลทำให้เพิ่มปริมาณน้ำฝนในระดับที่น่าพอใจ

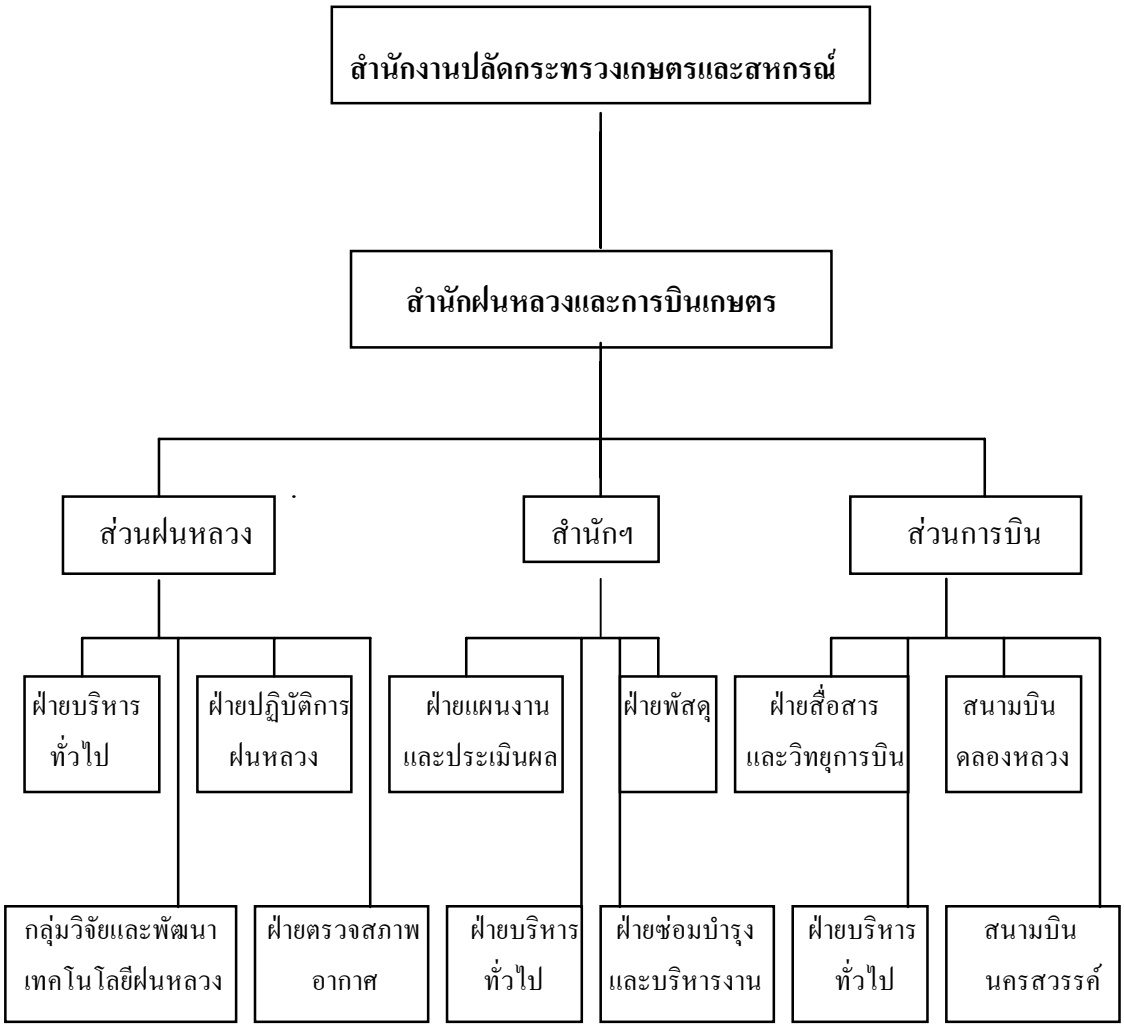
<u>โครงสร้างการบริหารงาน</u>

สำนักพัฒนาโครงสร้างส่วนราชการและอัตรากำลัง(2539) กล่าวถึง การกำหนดโครงสร้างการบริหารงาน ในการวิเคราะห์จัดทำแผนอัตรากำลัง พ.ศ. 2539 - 2540 ได้แบ่งหน่วยงานย่อยเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนฝนหลวง ส่วนการบิน และส่วนที่ขึ้นโดยตรงต่อสำนัก แสดงเป็นผังโครงสร้าง และหน้าที่ความรับผิดชอบ ดังนี้

1) ปฏิบัติการทำฝนเพื่อให้บริการแก่เกษตรและผู้ใช้น้ำทั่วไป เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำในพื้นที่การเกษตรและเขื่อนเก็บกักน้ำรวมทั้งดำเนินการพัฒนาเทคโนโลยีการทำฝน

2) ปฏิบัติการด้านการบินและสื่อสาร เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานการเกษตร

3) ปฏิบัติงานร่วมกับหรือสนับสนุนการปฏิบัติงานของหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้อง หรือได้รับมอบหมาย



โครงสร้างการบริหารงานของสำนักฝนหลวงและการบินเกษตร

ที่มา : ดัดแปลงจาก สำนักพัฒนาโครงสร้างส่วนราชการและอัตรากำลัง (2539)

ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการปฏิบัติการฝนหลวง

<u>กระบวนการเกิดเมฆและฝน</u>

เมฆ คือ กลุ่มของน้ำที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ในรูปของหยดน้ำ (water droplets) และผลึกน้ำ (ice crystals) ซึ่งในสภาพอากาศปกติ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมฆเกิดขึ้นในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 100 % จากกระบวนการทำให้อากาศเย็นตัวลง หรือกระบวนการเพิ่มปริมาณน้ำในอากาศ หรือเกิดร่วมกันทั้ง 2 กระบวนการ เมื่ออากาศเย็นตัวลงความสามารถในการรับปริมาณ ไอน้ำสูงสุดของอากาศจะลดลงที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างอากาศจะอยู่ในสถาพอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่า 100 % หรือมากกว่า (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2523; Vali, 1988)

กระบวนการที่ทำให้อากาศเย็นตัวลงเกิดจากสาเหตุ 3 ประการ คือ 1) การแผ่รังสีของกลุ่มอากาศ 2) การยกตัวเนื่องจากอากาศได้รับความร้อนและขยายตัวเคลื่อนที่สูงขึ้นด้วยตัวเอง (free convection) หรือเกิดจากอากาศถูกแรงบังคับภายนอก (forced convection) เช่น อากาศถูกความกดอากาศที่สูงกว่าผลักให้ลอยสูงขึ้น หรือถูกลมพัดให้ลอยขึ้นตามลาดเขา และ 3) อากาศร้อนชื้นเคลื่อนที่ไปบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่าตามแนวระนาบ (advection) และผสมคลุกเคล้า (mixing) กับอากาศที่เย็นกว่า (สุกิจ, 2519; Vali, 1988)

กระบวนการเพิ่มปริมาณน้ำในอากาศที่เกิดโดยธรรมชาติ เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศอุ่นและชื้นไปในบริเวณอากาศที่เย็นกว่าหรือแห้งกว่า เป็นต้นว่ามวลอากาศหรือลมจากทะเลพัดเข้าปกคลุมภาคพื้นทวีป เช่น ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (southwest monsoon) ที่พัดปกคลุมบริเวณประเทศไทยในฤดูฝน (กองภูมิอากาศ, 2529)

กลุ่มอากาศที่ยังไม่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ เมื่อลอยสูงขึ้นหรือจมตัวลงในสภาวะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับอากาศรอบข้าง จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอัตราที่ลดลง 9.8 องศาเซลเซียส ทุกความสูง 1,000 เมตร เรียกอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบอะไดอะบาติกแห้ง (dry adiabatic lapse rate) และเมื่อกลุ่มอากาศดังกล่าวลอยตัวขึ้นไปถึงระดับที่อุณหภูมิของกลุ่มอากาศเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point) จะเกิดสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ไอน้ำในกลุ่มอากาศเริ่มกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในระดับความสูงนี้เรียกว่า ระดับการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (lifting condensation level; LCL) ต่อจากระดับความสูงนี้การลอยตัวของกลุ่มอากาศมีอัตราลดลงตามความสูงแตกต่างออกไป เนื่องจากการกลั่นตัวของไอน้ำทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนแฝงของการกลั่นตัว (latent heat of condensation) ออกมาทำให้อุณหภูมิของกลุ่มอากาศสูงกว่าอากาศโดยรอบมากขึ้น อัตราการเย็นตัวลงของอากาศจึงมีค่าต่ำกว่า อะไดอะบาติกแห้ง ซึ่งอัตราเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า อัตราเปลี่ยนแปลงแบบอะได

อะบาติกอิ่มตัว (saturated adiabatic lapse rate) โดยทั่วไปมีค่าลดลง 4 ถึง 5 องศาเซลเซียส ต่อความสูงที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1,000 เมตร และในสภาวะอากาศที่ผิวดินได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลาหนึ่งจนผิวดินส่งผ่านความร้อนให้แก่อากาศ ทำให้อากาศยกตัวลอยสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงระดับที่อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ บริเวณนี้จะเกิดเมฆก่อตัวตามแนวตั้ง (cumuliform clond) ระดับความสูงของการกลั่นตัวในสภาวะนี้เรียกว่า ระดับการกลั่นตัวของกลุ่มอากาศที่พาความร้อน (convective condensation level; CCL) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2523; Ahrens, 1982; Sumner, 1988)

<u>อนุภาคแกนกลั่นตัวของเมฆกับการเกิดละอองหยดน้ำในเมฆ</u>

การอิ่มตัวของไอน้ำในบรรยากาศเป็นการปรับสภาวะให้สมดุลย์ระหว่างการระเหยกับการกลั่นตัวของไอน้ำ แต่ในธรรมชาติละอองน้ำขนาดเล็กมีการปลดปล่อยพลังงานอย่างอิสระ จึงมักไม่เกิดความสมดุลย์ในสภาวะปกติ ไอน้ำที่ไม่มีสารอื่นเจือปนจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เกือบถึง 400 เปอร์เซ็นต์ (Lutgents และ Tarbuck, 1982; Rogers, 1985) แต่ในธรรมชาติมักมีอนุภาคของสารอื่นเจือปนอยู่ และพบว่าการเปลี่ยนสถานะของน้ำเริ่มต้นบนผิวของสารเจือปนในบรรยากาศ ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ (nuclei) ทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัว (condensation nuclei) อนุภาคเหล่านี้สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศได้ระยะหนึ่งจึงเรียกว่า อนุภาคแขวนลอย (aerosol) ซึ่งอนุภาคแขวนลอยเหล่านี้มีขนาดและส่วนประกอบแตกต่างกันไป (Vali, 1988) Sumner (1988) อธิบายว่า อนุภาคแขวนลอยมีสถานะเป็นของแข็ง หรือของเหลวลอยอยู่ในบรรยากาศได้ระยะเวลาหนึ่งจนถูกลมหรือกระแสอากาศพัดขึ้นไปสูงกว่าเดิม โดยเฉลี่ยอนุภาคแขวนลอยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.1 ไมครอน (10^{-7} เมตร) Brock (1972) บรรยายว่า อนุภาคแขวนลอยมีแหล่งกำเนิดจากผิวโลกประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยฝุ่นละอองที่ลมพัดขึ้นไป 20 เปอร์เซ็นต์ ละอองน้ำทะเล 40 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคเถ้าถ่านจากไฟไหม้ป่า 10 เปอร์เซ็นต์ จากอุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่นๆ ของมนุษย์ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือ 25 เปอร์เซ็นต์มาจากปรากฏการณ์ต่อเนื่องในบรรยากาศ เช่น ขบวนการเคมีที่ใช้แสงแดดเป็นตัวกระตุ้น (photo-chemical) และขบวนการอื่นๆ

<u>การจำแนกชนิดของเมฆ</u>

Sumner (1988) จำแนกชนิดของเมฆตามพฤติกรรมการเกิดและลักษณะของเมฆออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) เมฆที่เกิดจากการพาความร้อน (convectional activity) จะเกิดเป็นเมฆก่อตัวตามแนวตั้ง (cumuliform clouds)

2) เมฆที่เกิดจากอากาศลอยตัวสูงขึ้นอย่างช้า ๆ แต่เป็นบริเวณกว้าง เช่น บริเวณแนวปะทะอากาศ จะเกิดเป็นเมฆบางเป็นแผ่น (statiform clouds) แต่อาจมีเมฆก่อตัวตามแนวตั้งเกิดขึ้นได้เช่นกัน

3) เมฆที่เกิดจากกระแสอากาศปั่นป่วน (turbulent flow) จะเกิดเมฆแผ่นบางๆ หรือเกิดเมฆระลอก (wave-clouds)

<u>กระบวนการควบแน่นในเมฆและการเกิดฝน</u>

เกษม (2526) บรรยายว่า การเกิดน้ำฟ้า (precipitation) ต้องประกอบด้วยปัจจัยที่จำเป็น 3 ประการ ได้แก่ 1) ไอน้ำในอากาศ 2) กลวิธีในการควบแน่น (mechanism of condensation) และ 3) ฝุ่นละอองในบรรยากาศ (condensation nuclei)

Vali (1988) อธิบายว่า การควบแน่น (condensation) บนอนุภาคแขวนลอยในบรรยากาศเกิดขึ้นตลอดเวลาที่บรรยากาศมีความชื้นในระดับที่สัดส่วนของการอิ่มตัวด้วยไอน้ำมีค่ามากกว่า 1 และในทางกลับกันถ้าสัดส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า 1 จะเกิดการระเหยของหยดน้ำเป็นไอสู่อากาศ อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของหยดน้ำนี้มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการอิ่มตัวด้วยไอน้ำของบรรยากาศและช่วงเวลา

กระบวนการเพิ่มขนาดของน้ำในเมฆนอกเหนือจากกระบวนการควบแน่นที่ทำให้หยดน้ำขนาดเล็กเพิ่มขนาดและจำนวนขึ้น แล้วยังต้องประกอบด้วยกระบวนการอื่นด้วย ได้แก่ 1) กระบวนการชนและรวมตัวกัน (collision-coalescence process) และ 2) กระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal growth process) (Ahrens, 1982)

1) <u>กระบวนการชนและรวมตัวกัน</u> กระบวนการชนและรวมตัวกันของหยดน้ำในเมฆเกิดในเมฆที่มีการรวมตัวกันของหยดน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง เรียกว่า เมฆอุ่น (warm clouds) สำหรับเมฆที่มีความชื้นพอเพียง การชนและรวมตัวจะขึ้นอยู่กับ ก) ขนาดของหยดน้ำที่เหมาะสม ข) ประจุไฟฟ้าในหยดน้ำรวมทั้งสนามไฟฟ้าในเมฆ ค) ความหนาของเมฆ และ ง) กระแสอากาศไหลขึ้น (updraft) ในเมฆ (Ahrens, 1982)

Rogers (1985) กล่าวว่า ขนาดของหยดน้ำในเมฆที่แตกต่างกันทำให้ความเร็วปลายในการตกลงสู่เบื้องล่างด้วยแรงดึงดูดของโลกนั้นแตกต่างกัน หยดน้ำขนาดใหญ่มีความเร็วปลายมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็ก หยดน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร มีความเร็วในการตกลงมาเท่ากับ 0.27 เมตรต่อวินาที ขณะที่หยดน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.8 มิลลิเมตร มีความเร็วในการตกลงมาถึง 9.17 เมตรต่อวินาที ดังนั้น หยดน้ำขนาดใหญ่ที่ตกลงมาเร็วกว่าจะเกิดการชนและรวมตัวกับหยดน้ำขนาดเล็กกว่าจนเกิดการเพิ่มขนาดขึ้นตามลำดับ แต่ในบางกรณีหยดน้ำอาจไม่ชนกันก็ได้ แม้ว่าจะตกลงมาในแนวเดียวกัน เนื่องจากหยดน้ำอาจลอยผ่านกันไปเพราะถูกกระแสลมผลักให้ห่างกัน หรือหยดน้ำอาจรวมตัวกันชั่วขณะแล้วกลับแยกออกเป็นขนาดเท่าเดิมหรือหยดน้ำอาจรวมกันชั่วขณะและแตกเป็นหยดน้ำเล็กๆ จำนวนมาก

นอกจากปัจจัยในเรื่องขนาดของหยดน้ำแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยให้การชนและการรวมตัวของหยดน้ำ ได้แก่ 1) หยดน้ำที่มีประจุไฟฟ้าต่างกันจะรวมตัวกันได้ดี 2) เมฆที่มีความหนามากทำให้เวลาที่หยดน้ำตกผ่านลงไปในเมฆนานพอที่จะชนกันได้มากขึ้น 3) กระแสอากาศที่ไหลขึ้น ถ้ามีรุนแรงทำให้เกิดเมฆก่อตัวหนามาก จะช่วยให้เกิดการชนของหยดน้ำจนมีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากตกลงมาชนและรวมกับหยดน้ำเล็กๆ อย่างต่อเนื่อง จนอาจมีขนาดใหญ่ถึง 5,000 ไมครอน เป็นเม็ดฝนที่ตกหนัก (Ahrens, 1982)

Vali (1988) บรรยายว่า การศึกษาฝนด้วยเครื่องเรดาร์ตรวจอากาศ พบว่ากระบวนการเกิดฝนในเมฆอุ่นเกิดขึ้นในเขตร้อนและบริเวณมหาสมุทรมากกว่าเขตหนาว หรือบริเวณตอนในของภาคพื้นทวีป

2) <u>กระบวนการจากผลึกน้ำแข็ง</u> กระบวนการจากผลึกน้ำแข็งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้เกิดน้ำฟ้า ในบริเวณเขตอบอุ่น หรือเขตหนาว กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเมฆส่วนที่อยู่ในระดับความสูงกว่าระดับเยือกแข็ง จึงเรียกเมฆชนิดนี้ว่าเมฆเย็น (cold cloud) (Ahrens, 1982)

ในห้องปฏิบัติการน้ำบริสุทธิ์ จะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำถึงลบ 40 องศาเซลเซียส แต่ในธรรมชาติบรรยากาศมีอนุภาคฝุ่นละอองเจือปนอยู่ ฝุ่นละอองบางชนิดทำหน้าที่เป็นส่วนผสมของน้ำหรือไอน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของสิ่งเจือปน (heterogeneous nucleation) เป็นผลึกน้ำแข็งในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า -40 องศาเซลเซียส อนุภาคเจือปนเหล่านี้เรียกว่าอนุภาคน้ำแข็ง (ice nuclei) ในปัจจุบันคาดว่าอนุภาคน้ำแข็งเกิดจากอนุภาคจากผิวโลกลอยขึ้นไป ได้แก่อนุภาคแร่ดินเหนียวและพวกอินทรีย์สารต่าง ๆ (Ahrens, 1982; Vali, 1988)

ในเมฆเย็นมีหยดน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสเรียกว่า หยดน้ำยิ่งยวด(supercooled droplets) อยู่ล้อมรอบผลึกน้ำแข็งจากความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่กระจาย (diffusion) ของไอน้ำจากหยดน้ำเย็นยิ่งยวดไปเกาะบนผลึกน้ำแข็ง และเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งพอกอยู่ภายนอกผลึกน้ำแข็ง จนน้ำหนักของผลึกน้ำแข็งมีมากกว่าแรงกระแสอากาศพัดขึ้น ผลึกน้ำแข็งจะเริ่มตกลงมาเกิดการชนกับหยดน้ำเย็นยิ่งยวดข้างล่าง และเคลือบเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อย ๆ เรียกว่า กระบวนการเพิ่มขนาดหรือเพิ่มขอบ (accretion หรือ riming) และเรียกน้ำฟ้านี้ว่า graupel ต่อจากนั้นผลึกน้ำแข็งอาจเกิดการชนกันและแตกตัวเป็นขนาดเล็กลง กระจายตัวออกไปทำหน้าที่เป็นอนุภาคเริ่มต้นของการชนกันต่อไป การเพิ่มขนาดจะขยายวงอย่างต่อเนื่อง เป็นปฏิกริยาลูกโซ่ (chain reaction) ตลอดจนเกิดการชนกันและรวมตัวกันระหว่างผลึกน้ำแข็ง (aggreation) จนเป็นเกล็ดหิมะหรือตกลงมาที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลเซียสจะละลายเป็นหยดน้ำฝนตกลงสู่พื้นดินในที่สุด กระบวนการทั้งหมดนี้รวมเรียกว่า กระบวนการเมฆเย็น

(cold cloud process)ซึ่งขนานนามตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่เริ่มตามลำดับเรียกว่า กระบวนการ Wegener-Bergeron-Findeisen (Ahrens, 1982; Vali, 1988)

Sumner (1988) อธิบายว่า ในบรรยากาศกระบวนการเมฆเย็นจะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงความสูงที่มีระดับอุณหภูมิ อุณหภูมิ -10 ถึง -30 องศาเซลเซียส เพราะพบอนุภาคน้ำแข็งและหยดน้ำเย็นยิ่งยวดปริมาณมากพอ ๆ กันในระดับต่ำกว่าระดับ -10 องศาเซลเซียส พบอนุภาคน้ำแข็งน้อยเกินไป และระดับที่สูงกว่าระดับ -30 องศาเซลเซียส ก็พบว่ามีหยดน้ำเย็นยิ่งยวดน้อยเกินไปเช่นกัน ทั้งสองกรณีหลังนี้จึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า สำหรับแหล่งกำเนิดของอนุภาคน้ำแข็งในบางโอกาสอาจเกิดจากอนุภาคน้ำแข็งของเมฆที่อยู่สูงกว่า เช่น เมฆซีร์รัส ร่วงหล่นลงมาสู่เมฆที่อยู่ต่ำกว่า เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเมฆเย็น

<u>เมฆก่อตัวจากการพาความร้อนและพายุฝนฟ้าคะนอง</u>

เมฆที่ก่อตัวจากการพาความร้อน (convection) เกิดจากพื้นดินบางแห่ง สามารถดูดซับพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ได้ดีกว่าบริเวณอื่น จึงมีความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผ่านความร้อนออกสู่อากาศที่อยู่ติดกับพื้นดิน อากาศบริเวณดังกล่าวจะร้อนกว่าอากาศบริเวณรอบ ๆ เกิดแรงลอยตัว ลอยสูงขึ้น กลุ่มอากาศนี้ถ้ามีความร้อนเพียงพอจะลอยตัวสูงขึ้น จนถึงระดับจุดอิ่มตัวด้วยไอน้ำของอากาศ ซึ่งเป็นระดับของการควบแน่น (condensation level) ไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ รวมตัวเป็นเมฆ ก่อตัวในแนวตั้ง (cumulus cloud) ขณะที่มีอากาศลอยตัวขึ้นบริเวณเมฆคิวมูรัส บริเวณรอบนอกอากาศจะจมตัวลงเนื่องจากการสลายตัวของหยดน้ำในเมฆที่อยู่ขอบ ๆ ของเมฆ เมื่อหยดน้ำกลับกลายเป็น ไอน้ำต้องใช้ความร้อนแฝงจำนวนหนึ่งทำให้อากาศรอบเมฆสูญเสียความร้อน เย็นตัวลง และจมตัวลงอย่างช้า เพิ่มแรงกดลงสู่เบื้องล่าง ส่งให้กลุ่มอากาศร้อนลอยขึ้นตามลำดับ

พายุฝนฟ้าคะนอง (thunderstorms storms) คือเมฆก่อตัวตามแนวตั้งที่มีขนาดใหญ่มาก ทำให้เกิดฟ้าแลบ ฟ้าผ่าหรือบางโอกาสเกิดพายุลมแรงฝนตกหนักอาจเกิดพายุลูกเห็บ พายุนี้เกิดจากการพาความร้อนที่นำอากาศอุ่นและชื้นลอยขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ ขณะที่บรรยากาศมีสภาวะไม่เสถียร (instability) จึงก่อตัวเป็นเมฆขนาดใหญ่อย่างรวดเร็วสูงถึงขอบบนของชั้นบรรยากาศ Troposphere และมีความกว้างตั้งแต่ 5 - 6 กิโลเมตรไปจนถึงกลุ่มเมฆหรือแนวเมฆที่กว้างเป็น 100 กิโลเมตร (Ahrens, 1982; Changnon, 1986; Roger, 1985) ลำดับของการพัฒนาจากเมฆคิวมูลัส จนเป็นพายุฝนฟ้าคะนองแบ่งได้เป็น 3 ช่วงระยะ แบ่งตามทิศทางและขนาดของกระแสอากาศที่ไหลตามแนวตั้ง 1) ระยะที่เป็นเมฆก่อตัวในแนวตั้ง (cumulus state) เป็นช่วงที่อากาศไหลขึ้นและเย็นตัวลง ควบแน่นและคายความร้อนแฝงออกจนเป็นการเพิ่มความเร็วของกระแสอากาศไหลขึ้น (updraft) เมฆจะเพิ่มความสูงอย่าง รวดเร็ว 2) ระยะที่เพิ่มขนาดจนเต็มที่ (mature stage) ในระยะนี้กระแสอากาศทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของหยดน้ำจนถึงระดับที่น้ำหนักของหยดน้ำหรือผลึกน้ำแข็งมากกว่าแรงลอยตัว หยดน้ำหรือผลึกน้ำแข็งจะเริ่ม

ตกลงมาเหนี่ยวนำให้อากาศรอบข้างไหลลงมาจนเกิดกระแสอากาศไหลลง (downdraft) ขณะที่ยังมีบางส่วนไหลขึ้นในระยะนี้หากมีความชื้นมากพอจะเกิดฝนตกหนัก 3) ระยะการสลายตัว (dissipating stage) สภาวะนี้เกิดขึ้นหลังจากเกิดสภาวะที่ 2 ประมาณ 15 นาที ถึงครึ่งชั่วโมง ในระยะนี้กระแสอากาศไหลลงเริ่มอ่อนแรงลง และไม่มีกระแสอากาศไหลขึ้นจึงไม่มีอากาศอุ่นและชื้นเพิ่มเข้าไปในเมฆ เมฆเริ่มสลายตัว และมีฝนตกเบาบางลง ในเมฆก้อนเดี่ยว ๆ จะใช้เวลาการเกิดทั้ง 3 ระยะนี้ ภายในเวลา 1 ชั่วโมงหรือน้อยกว่า (Ahrens, 1982; Roger, 1985)

<u>การเกิดฝนในประเทศไทย</u>

น้ำฟ้า (precipitation) คือน้ำในรูปของของเหลว รูปของของแข็ง หรือรูปของผลึก ซึ่งเกิดจากเมฆแล้วตกลงมายังพื้นดิน ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ น้ำฝน (หยดน้ำเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า 0.5 มิลลิเมตร) ฝนละออง (drizzle) (หยดน้ำที่เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร) หยดน้ำที่มีน้ำแข็งหุ้ม (glaze) เม็ดฝนน้ำแข็ง (sleet) ลูกเห็บ หิมะทั้งรูปผลึกและไม่ใช่ผลึก สำหรับประเทศไทยน้ำฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนมากได้แก่ น้ำฝนกับฝนละอองซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.02-0.25 นิ้ว (0.05-0.64 มิลลิเมตร) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2523)

Silverman และคณะ (1986) อธิบายการเกิดฝนในประเทศไทยว่า การเกิดฝนตกในรอบปี ส่วนใหญ่เกิดจากระบบเมฆที่ก่อตัวตามแนวตั้งที่เกิดจากการพาความร้อนในช่วงอิทธิพลของลมมรสุม ตะวันตกเฉียงใต้ กล่าวคือ ในช่วงเวลานี้มีสัดส่วนปริมาณฝนตกถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในภาคเหนือลงไปจนถึง 60 เปอร์เซ็นต์ในภาคใต้ จำนวนวันที่ฝนตกส่วนใหญ่เป็นวันที่มีฝนตกเล็กน้อยมีตั้งแต่ 50 เปอร์เซ็นต์ของเดือนในเดือนมิถุนายน ไปจนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของเดือนในเดือนกันยายน ส่วนในช่วงเวลาอื่นมีฝนตกจากเมฆที่เกิดจากการพาความร้อนก้อนเดี่ยว ๆ และพายุฝนฟ้าคะนองมีเกิดขึ้นมากในช่วงเวลาเปลี่ยนฤดู คิดเป็นสัดส่วนไม่มากนัก โดยมีวันที่มีพายุฝนฟ้าคะนอง 40-50 วันต่อปี ในแทบทุกพื้นที่ แต่การตกของฝนชนิดนี้แต่ละครั้งจะให้ฝนหนักกว่าฝนในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากฝนใน 2 ระบบที่กล่าวมาแล้วยังอาจมีฝนตกหนักมากจากการที่พายุหมุนเขตร้อน (tropical stroms) เคลื่อนที่มาจากทะเลจีนใต้หรือทะเลอันดามัน

Johnson (1982) บรรยายว่า อุณหภูมิที่ฐานเมฆของเมฆในประเทศไทย มีค่าประมาณ 20 องศาเซลเซียสในทุกฤดูกาลและทุกพื้นที่ ดังนั้นกระบวนการชนและรวมตัวกันของหยดน้ำในเมฆจึงมีบทบาทอย่างสำคัญในการเกิดฝนทุกครั้ง

กระบวนการทำให้เกิดฝนในประเทศไทย อาจเป็นได้ทั้ง 2 กระบวนการ กล่าวคือ ในบางวันยอดเมฆไม่สูงถึงระดับเยือกแข็ง ฝนที่เกิดจากก่อตัวขึ้นช้า ๆ จากกระบวนการกลั่นตัวแล้วชนและรวมตัว

กันของหยดน้ำในเมฆ เรียกว่า กระบวนการเมฆอุ่น แต่ในบางโอกาสหากมีสภาวะอากาศเหมาะสม กระแสอากาศพัดขึ้นอย่างรุนแรง จนการก่อตัวของเมฆเลยระดับเยือกแข็ง ในสภาวะนี้กระบวนการผลึกน้ำแข็งจะมีบทบาทอย่างสำคัญ ต่อเนื่องจากกระบวนการเมฆอุ่น ทำให้ผลึกน้ำแข็งโตขึ้นจนตกลงมาและละลายเป็นน้ำฝนในที่สุด จึงเรียกว่า กระบวนการเกิดน้ำฝนแบบผสม (mixed phase precipitation process) (Silverman และคณะ, 1986)

โดยทั่วไปฐานเมฆที่เกิดจากการพาความร้อนจะอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลเฉลี่ยปานกลาง 1 ถึง 1.5 กิโลเมตร โดยมีอุณหภูมิฐานเมฆ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส ระดับความสูงที่จะเกิดการเยือกแข็ง (freezing level) จะอยู่ที่ระดับ 5 ถึง 5.5 กิโลเมตร ระดับอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อยู่ที่ความสูง 6.5 ถึง 7.0 กิโลเมตร ขณะที่ระดับที่มีอุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส อยู่ที่ความสูง 9 ถึง 9.5 กิโลเมตร ความสูงยอดเมฆอาจสูงถึง 12 กิโลเมตร หรือมากกว่าในบางวัน (Bureau of Reclamation, 1989)

Woodley และ Rosenfeld (1991) ได้สรุปสัดส่วนของจำนวนวันที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนองเทียบกับจำนวนวันที่มีฝนตกเป็นรายเดือนในภาคเหนือของประเทศไทย ตามสถิติที่บันทึกไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 จนถึง พ.ศ.2523 พบว่ามีสัดส่วนจำนวนครั้งของฝนฟ้าคะนองต่อวันฝนตกเป็น 1.0 จนถึง 2.25 ในเดือนเมษายน และ 0.81 ถึง 1.13 ในเดือนพฤษภาคม ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงที่สุดในรอบปี แสดงว่าฝนที่ตกในเดือนเมษายน และพฤษภาคม เป็นฝนที่เกิดจากพายุฝนฟ้าคะนองแทบทั้งสิ้น

<u>สารเคมีดูดความชื้นกับการดัดแปรสภาพอากาศ</u>

Silverman และคณะ (1994) กล่าวว่าการโปรยอนุภาคสารเคมีดูดความชื้น (hygroscopic particles) เข้าไปในเมฆอุ่น (warm clouds) เป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางไมโครฟิสิกส์ของเมฆ ทำให้เพิ่มความรุนแรง และเร่งให้ขบวนการเกิดฝนให้เกิดเร็วขึ้นดังนี้

1) การโปรยสารดูดความชื้นขนาดอนุภาครัศมี 0.1 ถึง 1.0 ไมครอน บริเวณใต้ฐานเมฆ เพื่อเพิ่มปริมาณแกนกลั่นตัวของเม็ดน้ำ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการควบแน่น และเพิ่มกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติภายในเมฆ

2) การโปรยสารดูดความชื้นขนาดอนุภาครัศมี 5 ถึง 10 ไมครอน เพื่อเร่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติของเมฆ

3) การโปรยสารดูดความชื้นขนาดอนุภาครัศมี 50 ถึง 100 ไมครอน เพื่อให้เกิดการข้ามขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติและเร่งกระบวนการชนและรวมตัวกัน ให้ช่วงการเกิดฝนเร็วขึ้น

Tzivion และคณะ (1994) ได้รายงานผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโปรยสารเคมีดูดความชื้นกับเมฆอุ่นชนิดก่อตัวในแนวตั้ง (convective clouds) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-3 กิโลเมตร โดยใช้อนุภาคเกลือขนาดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

1) ขนาดของอนุภาครัศมีต่าง ๆ

6-8 ไมครอน ให้ขนาดเม็ดน้ำเล็กเกินไป

10 ไมครอน เริ่มให้ขนาดเม็ดน้ำใหญ่ขึ้น

16 ไมครอน ให้ผลตอบสนองดีที่สุด กับพื้นที่ฝนตกรวม

20-25 ไมครอน ให้ผลดีกว่าขนาด 10 ไมครอน และให้เกิดฝนตกได้เร็วกว่าขนาดเล็ก ๆ

2) ปริมาณที่เหมาะสม 450 กิโลกรัม

3) เวลาที่เหมาะสม 27-31 นาที หลังจากเมฆเริ่มก่อตัว

4) ระดับความสูงที่เหมาะสมที่ระดับฐานเมฆ

Silverman และคณะ (1994) ได้รายงานผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (HAMOD cloud model) ในการทดลองใช้อนุภาคสารดูดความชื้น 4 ชนิด ได้แก่แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ แอมโมเนียมไนเตรท และ ยูเรีย ที่มีขนาดรัศมีอนุภาค 5 10 30 และ 50 ไมครอน ในช่วงเวลาและระดับความสูงต่าง ๆ กันของเมฆก่อตัวในแนวตั้ง มีผลการศึกษาในค่าของสัดส่วนการโปรยสารเคมีต่อการไม่โปรยสารเคมี (seeded/noseeded) และให้ข้อเสนอแนะดังนี้

1) อนุภาคแคลเซียมคลอไรด์แห้งขนาดอนุภาครัศมี 50 ไมครอน ให้ผลสูงที่สุด

2) อัตราการโปรยสารเคมีจะต้องเร็ว เนื่องจากต้องการความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในทางปฏิบัติมีค่าประมาณ 75-375 กิโลกรัม/นาที ในการโปรยจากเครื่องบินที่มีความเร็ว 120 น้อต จะให้ความเข้มข้นของสารเคมี 0.0685 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3) บริเวณที่โปรยสารเคมีที่ให้ผลสูงที่สุด คือ บริเวณฐานเมฆ

4) ช่วงเวลาโปรยสารเคมีที่เหมาะสม คือ ในช่วงต้นของอายุเมฆประมาณ 5 นาที ภายหลังจากที่เมฆเริ่มก่อตัว

<u>การทำฝนเมฆอุ่น</u>

Silverman และคณะ (1994) อ้างถึง Biaswas และ Dennis (1971) รายงานการทดลองโปรยสารเคมีโซเดียมคลอไรด์ 350 ปอนด์ เป็นแนวไปตามเมฆสเตรโตคิวมูลัส ผลสังเกตพบว่ามีฝนโปรยเกิดในกลุ่มเมฆนั้นเล็กน้อย โดยไม่พบฝนตกจากเมฆอื่นๆ ในรัศมี 50 ไมล์ ผู้วิจัยให้ความเห็นว่าสารเคมีที่โปรยมีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดน้ำฟ้าในเมฆ

รายงานการทดลองในประเทศอินเดีย Murty (1989) สรุปผลการทดลองแบบสุ่ม (randomizied crossover) ในช่วงเวลา 11 ปี ด้วยการโปรยสารเคมีโซเดียมคลอไรด์ ขนาดอนุภาค 10 ไมครอน ในอัตรา 10 ถึง 30 กิโลกรัม ต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร (area seeding days) ในบริเวณที่มีเมฆปกคลุม และโปรยสารเคมี 700 ถึง 1000 กิโลกรัม ต่อก้อนเมฆ หากบริเวณทดลองมีเมฆเล็กน้อย (target-control days) ผลการประเมินผล 80 คู่ ของวิธีแรกสามารถเพิ่มปริมาณฝน 24 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองแบบที่ 2 พบว่าลดปริมาณฝนตกลง 35 เปอร์เซ็นต์ อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

Mather และ Terblanche (1992) รายงานผลการวิจัยทำฝนเมฆอุ่นในแอฟริกาใต้ โดยแฟร์สารดูดความชื้น (hygroscopic flares) ที่มีสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ โปรแตสเซี่ยมคลอไรด์ ลิเที่ยมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมออกไซด์ ด้วยการเผาแฟร์ที่ระดับใต้ฐานเมฆ จะให้อนุภาคขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จำนวน 10^{11} อนุภาคต่อแฟร์ ผลการตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ที่ได้รับการโปรยสารเคมีมีฝนตกมากกว่าเมฆที่ไม่ได้โปรยสารเคมี แต่ข้อมูลยังไม่สามารถยืนยันผลทางสถิติได้

<u>การทำฝนเมฆเย็น</u>

Silverman และคณะ (1994) กล่าวถึงการค้นพบของ Shaefer (1946) และ Vonnegut (1947) ในการใช้น้ำแข็งแห้งทำหน้าที่เป็นอนุภาคน้ำแข็งเทียมในเมฆที่มีหยดน้ำเย็นยิ่งยวด (super cooled water drops) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดน้ำแข็งเพื่อให้หยดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นน้ำฟ้าตกลงมา

Braham (1985) อ้างถึงโดย Silverman และคณะ (1994) กล่าวถึงการทำฝนในเมฆแบบผสมขึ้นอยู่กับธรรมชาติ 4 ประการ และสมมติฐาน 2 ประการ คือ

ลักษณะธรรมชาติ 4 ประการได้แก่ 1) ไอน้ำในเมฆบางชนิดไม่เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง แม้อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส 2) ความดันไอรอบผลึกน้ำแข็งมีค่าต่ำกว่าความดันไอรอบน้ำเย็นยิ่งยวดที่อุณหภูมิเท่ากัน ทำให้เกิดการพอกเพิ่มขนาดโดยการระเหยของหยดน้ำออกไปเกาะผลึกน้ำแข็ง 3) ฝนตกเกิดจากเมฆกระบวนการแบบผสมมีอยู่ทั่วไปในส่วนต่าง ๆ ของโลก 4) มีการค้นพบอนุภาคน้ำแข็งเทียมหลายชนิดเป็นต้นว่า น้ำแข็งแห้ง ซิลเวอร์ไอโอไดด์ รวมทั้งแบคทีเรียชื่อ <u>Pseudomonas Syringae</u> ซึ่งกำลังทดลองใช้อยู่ในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้ ทำหน้าที่เป็นอนุภาคน้ำแข็งในอุณหภูมิประมาณลบ 1 องศาเซลเซียส ในขณะที่สารเคมีซิลเวอร์ไอโอไดด์ต้องใช้ในอุณหภูมิต่ำกว่าลบ 4 องศาเซลเซียส

สำหรับสมมติฐาน 2 ประการได้แก่ 1) การมีอนุภาคน้ำแข็งน้อยเกินไปทำให้ประสิทธิภาพการเกิดน้ำฟ้า (precipitation efficiency : PE) มีค่าต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในพายุฝนฟ้าคะนองบนภาคพื้นดิน หยดน้ำเย็นยิ่งยวดไม่สามารถเป็นฝนได้ทั้งหมด ดังนั้นลักษณะเมฆเช่นนี้จึงเป็นเมฆที่มีศักยภาพใน

การทำฝนเมฆเย็น การทำฝนที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดน้ำฟ้าเรียกว่า การทำแบบ “static” หรือการทำฝนโดยใช้ผลกระทบทางไมโครฟิสิกส์โดยถือว่ามีผลทางพลวัตร (dynamics) ของเมฆมีผลน้อย วิธีนี้ต้องการปริมาณอนุภาคน้ำแข็งเทียมประมาณ 1-10 อนุภาคต่อ 10^{-3} ลูกบาศก์เมตรของอากาศ 2) จากการตรวจวัดอากาศ พบว่าบริเวณที่มีอากาศไหลขึ้น (updraft) ของเมฆก่อตัวแนวตั้ง (convective) จะมีหยดน้ำเย็นยิ่งยวดจำนวนมาก ถ้าสามารถทำให้หยดน้ำเหล่านี้เปลี่ยนสถานะในอัตราที่เร็วกว่าธรรมชาติจะทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนแฝงออกมา และเหนี่ยวนำแรงลอยตัวของอากาศมากขึ้น เมฆจะเพิ่มขนาดความสูงขึ้น (Oriville และ Hubbard, 1973 ให้ความเห็นว่าการสะสมของความร้อนไม่ช่วยให้เพิ่มแรงลอยตัวของอากาศเสมอไป) เมฆที่โตขึ้นนี้จะมีไอน้ำมากขึ้นและเพิ่มปริมาณน้ำฟ้ามากขึ้น วิธีการนี้เรียกว่า การทำฝนแบบพลวัตร (dynamic seeding) เพราะการโปรยสารเคมีในครั้งแรกจะช่วยในการหมุนเวียนของอากาศในเมฆ ทั้งช่วยยืดเวลากระบวนการในเมฆให้นานขึ้นด้วย (ภาพที่ 1) ในทางปฏิบัติจำนวนอนุภาคสารเคมีที่เหมาะสมมีปริมาณ 100 อนุภาคต่ออากาศ 10^{-3} ลูกบาศก์เมตร

Rosenfeld และคณะ (1994) รายงานการวิเคราะห์ลักษณะทางไมโครฟิสิกส์ของเมฆจากผลตรวจของเครื่องบินและเรดาร์ตรวจฝนชนิด S-band ในโครงการวิจัยทรัพยากรบรรยากาศประยุกต์ ซึ่งมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มตัวอย่างในภาคเหนือของประเทศไทยพบว่ามีค่าปริมาณน้ำในเมฆสูงสุดเฉลี่ย 1.28 กรัม ต่อเมฆ 1 ลูกบาศก์เมตร ค่าความเร็วของอากาศไหลขึ้นสูงสุดเฉลี่ย 5.1 เมตรต่อวินาที กลุ่มเมฆก่อตัวแนวตั้ง (convective cell) 151 กลุ่มจากการสุ่มทำฝน โดยการใช้สารเคมีซิลเวอร์ไอโอไดด์เข้าไปในเมฆ จำนวน 87 กลุ่ม กับสุ่มไม่ทำฝนแต่บินเข้าไปในเมฆโดยไม่ปล่อยสารเคมี ซิลเวอร์ไอโอไดด์ จำนวน 64 กลุ่ม จากข้อมูลผลตรวจเรดาร์ 3 มิติ (volume-scan) มาเปรียบเทียบกัน พบว่าผลการใช้สารเคมีซิลเวอร์ไอโอไดด์ทำให้พื้นที่กลุ่มฝนสูงสุด เพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มช่วงระยะเวลาการตกของฝน 14 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มปริมาณฝน 69 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณาในรูปแบบของหน่วยทดลอง (experimental unit) แล้วยังมีจำนวนหน่วยทดลองจำนวนน้อยคิดเป็น ทำฝน 7 หน่วย ไม่ทำฝน 7 หน่วย การประเมินผลจำเป็นต้องมีหน่วยให้ครบ 100 หน่วยทดลอง จึงจะถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติ

<u>การทำฝนหลวงในประเทศไทย</u>

เมธา และคณะ (ไม่ระบุปี) กล่าวว่า การทำฝนหลวงหรือฝนเทียม (artificial rain enhancement) เป็นการนำความรู้ และเทคโนโลยีในสาขาต่าง ๆ เช่น อุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา เคมี ฟิสิกส์ วิศวกรรม และอิเลคทรอนิกส์ เป็นต้น มาดัดแปลงสภาพอากาศให้เกิดฝนตกในบริเวณที่ต้องการ หรือเพิ่มปริมาณน้ำฝนให้สูงกว่าที่จะเกิดเองในธรรมชาติ การทำฝนหลวงนี้ เป็นกิจกรรมหนึ่งในงานดัดแปรสภาพอากาศ (weather modification) ซึ่งองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization : WMO)

กำหนดไว้ 11 ประเภท เช่น การลดความรุนแรงของพายุ การทำลายหมอก การหยุดขบวนการเกิดลูกเห็บ การป้องกันน้ำท่วม การเพิ่มปริมาณหิมะ เป็นต้น

วราวุธ (2539) กล่าวว่า WMO (2524) รายงานว่ามีประเทศที่มีการทดลองหรือเคยมีกิจกรรมดัดแปรสภาพอากาศ จำนวน 28 ประเทศ ประเทศที่กำลังดำเนินกิจกรรมอยู่ 18 ประเทศ สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1) การพ่นหรือโปรยสารเคมีจากเครื่องบินเข้าสู่เมฆ (cloud seeding)

2) ใช้เครื่องพ่นผงเคมีหรือควันเคมีจากพื้นดินเข้าสู่เมฆ (ground base generator)

3) ใช้จรวดหรือบอลลูนบรรจุสารเคมีให้ไประเบิดในก้อนเมฆ (cloud seeding by rocket or balloon)

สำหรับกรรมวิธีที่ใช้ในการเพิ่มปริมาณน้ำฟ้าในแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน แต่พอสรุปวิธีการที่ใกล้เคียงกันได้ 2 กลุ่มคือ

1) การเพิ่มปริมาณน้ำฟ้าจากเมฆอุ่น (warm cloud modification)

2) การเพิ่มปริมาณน้ำฟ้าจากเมฆเย็น (cloud cloud modification)

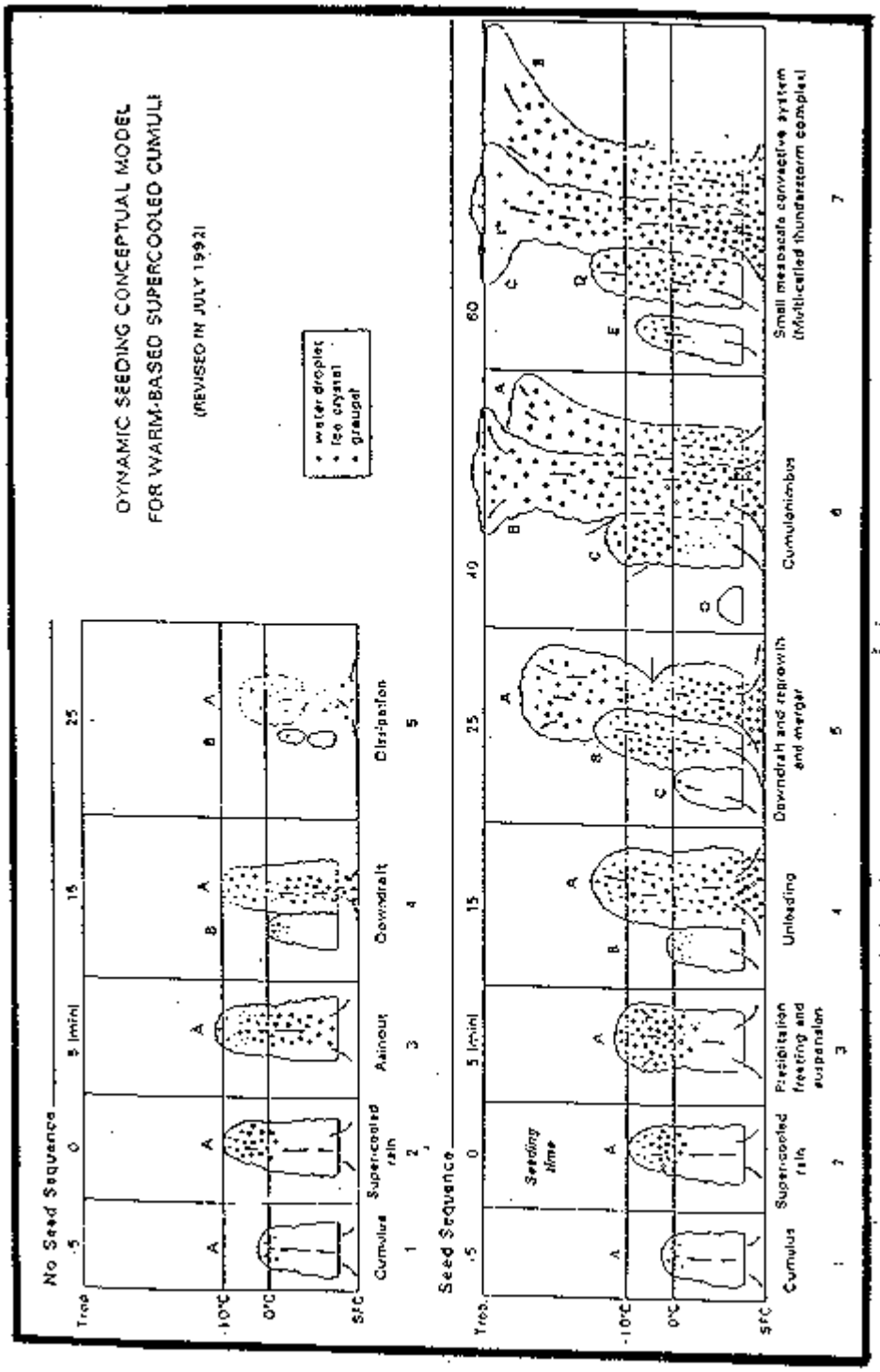
<u>กรรมวิธีการทำฝนหลวง</u>

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน กิจกรรมฝนหลวงจึงเน้นไปทางการดัดแปรสภาพอากาศจากเมฆอุ่น สภาวะอากาศที่เหมาะสมต่อการทำฝนที่สำคัญ 3 ประมาณ คือ

1) ปริมาณความชื้นในอากาศมีมาก

2) ปริมาณและคุณสมบัติของแกนกลั่นตัว (cloud condensation nuclei) มีพอเหมาะ

3) บรรยากาศไม่มีความเสถียร (unstable stability) โดยเฉพาะมีการลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศชั้นบน



ภาพที่ 1 แนวความคิดทางทฤษฎีเปรียบเทียบช่วงอายุ ความสูง และพื้นที่ของฝน ของการปฏิบัติการทำฝน (seed) กับไม่ทำฝน (no seed)

ที่มา : Silverman และคณะฯ (1994)

การเกิดฝนตกในแต่ละวันต้องเกิดจากความเหมาะสมของปัจจัยหลายประการร่วมกัน ถ้าขาดอย่างใดอย่างหนึ่ง โอกาสที่จะมีฝนก็น้อยลงไปด้วย แนวทางที่ใช้ในการพัฒนากรรมวิธีที่สำคัญ คือ วิธีการที่จะดำเนินการให้สภาวะหรือปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดฝนให้คงอยู่บริเวณเป้าหมายให้นานที่สุด โดยการตรวจวัดและศึกษาสภาพอากาศแต่ละวัน เมื่อพบโอกาสหรือปัจจัยที่เหมาะสม ก็จะนำสารเคมีเข้าไปโปรยจากเครื่องบิน เพื่อเสริมหรือกระตุ้นกระบวนการเกิดฝนให้มีมากขึ้น และให้พื้นที่ฝนตกมากขึ้น หรือบางครั้งจำเป็นต้องใช้วิธีการที่ยุ่งยากมากขึ้นในกรณีชักนำกลุ่มเมฆหรือฝนให้เลื่อนเข้าเป้าหมายที่ต้องการ (วราวุธ, 2539)

<u>เกณฑ์ความเหมาะสมของสภาพอากาศของการปฏิบัติการฝนหลวง</u>

ศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงสาธิต (2536) ได้สรุปความเหมาะสมของสภาพอากาศสำหรับการทดลองเมฆอุ่น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์กับการปฏิบัติการฝนหลวง โดยกล่าวว่าการแบ่งสภาพอากาศที่เหมาะสมออกเป็น 3 ระดับคือ เหมาะสมดี เหมาะสมปานกลาง และไม่เหมาะสม นอกจากนี้ยังแบ่งแยกช่วงฤดูกาลของประเทศไทยตอนบนไว้เป็นก่อน 16 พฤษภาคมและหลัง 15 ตุลาคม เป็นช่วงเวลาก่อนฤดูมรสุม และหลังฤดูมรสุม กับระหว่าง 16 พฤษภาคม ถึง 15 ตุลาคม เป็นช่วงฤดูมรสุม ความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความแตกต่างของตัวแปรของผลตรวจอากาศชั้นบนในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติการบินหากสภาพอากาศเหมาะสมดีก็จะเหมาะต่อการปฏิบัติการทำฝนหลวงด้วย (ตารางที่ 1)

กรรมวิธีการทำฝนหลวงในประเทศไทยที่ใช้เป็นหลักปฏิบัติอยู่ในปัจจุบัน ใช้วิธีการโปรยสารเคมีฝนหลวงจากเครื่องบิน เพื่อเร่งหรือเสริมการก่อตัวของเมฆ และทำให้กลุ่มเมฆให้เกิดเป็นฝนลงสู่ เป้าหมายที่ต้องการ นอกจากนี้ยังได้มีการค้นคว้าทดลองกรรมวิธีอื่น ๆ เช่น การยิงจรวดบรรจุสารเคมีให้ระเบิดในกลุ่มเมฆหรือพ่นสารเคมีจากยอดเขาให้ฟุ้งกระจายเข้าสู่ฐานเมฆซึ่งกำลังอยู่ในระหว่างพัฒนากรรมวิธีให้เหมาะสม

<u>อุปกรณ์และเครื่องมือ</u>

1) <u>สารเคมีฝนหลวง</u>

ในปัจจุบันสารเคมีฝนหลวง มี 8 ชนิด แบ่งตามคุณสมบัติที่เกิดแก่บรรยากาศ 3 ชนิด คือ (ตารางที่ 2)

1.1) สารเคมีที่สัมผัสกับความชื้นแล้วคายความร้อน (exothermic chemical) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บายด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมออกไซด์

1.2) สารเคมีที่สัมผัสความชื้นบรรยากาศแล้ว ทำให้สารละลายอุณหภูมิต่ำลง (endothermic chemical) ได้แก่ ยูเรีย แอมโมเนียมไนเตรท และน้ำแข็งแห้ง

ตารางที่ 1 เกณฑ์ความเหมาะสมของสภาพอากาศในการปฏิบัติการฝนหลวง

ลำดับที่	ตัวแปร	ความเหมาะสมของสภาพอากาศ		
		ดี	ปานกลาง	ไม่เหมาะสม
1	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)			
	0 - 10,000 ฟุต			
	ก)ก่อน 16 พค. & หลัง 15 ตค.	75 ขึ้นไป	74 - 65	ต่ำกว่า 65
	ข) 16 พค. - 15 ตค.	85 ขึ้นไป	84 - 75	ต่ำกว่า 75
2	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)			
	10,000-18,000 ฟุต			
	ก)ก่อน 16 พค. & หลัง 15 ตค.	70 ขึ้นไป	69 - 60	ต่ำกว่า 60
	ข) 16 พค. - 15 ตค.	80 ขึ้นไป	79 - 70	ต่ำกว่า 70
3	ความเร็วลมเฉลี่ย (น๊อต)			
	ที่ระดับ 10,000-15,000 ฟุต	ต่ำกว่า 15	15 - 25	มากกว่า 25
4	ความสูงของฐานเมฆคิวมูรัส(ฟุต)			
	ก)ก่อน 16 พค. & หลัง 15 ตค.	ต่ำกว่า 4500	4500-5000	สูงกว่า 5000
	ข) 16 พค. & 15 ตค.	ต่ำกว่า 4000	4000-4500	สูงกว่า 4500
5	ความชื้นสัมพัทธ์ที่ฐานเมฆ(%)			
	ก)ก่อน 16 พค. & หลัง 15 ตค.	80 ขึ้นไป	80 - 70	ต่ำกว่า 70
	ข) 16 พค. & 15 ตค.	90 ขึ้นไป	90 - 80	ต่ำกว่า 80
6	ดัชนีการทรงตัวของอากาศ			
	ก)Showalter Index 1/	ต่ำกว่า -.5	-.5 ถึง 2	มากกว่า 2
	ข)Lifted Index 2/	ต่ำกว่า -.5	-.5 ถึง 1	มากกว่า 1
7	โอกาสที่อุณหภูมิผิวพื้นจะถึงค่า			
	Convective temperature 3/	มี	มี	ไม่มี

หมายเหตุ : 1/ = ค่าประเมินความแตกต่างของอุณหภูมิกลุ่มอากาศที่ระดับต่ำสุดใกล้ผิวพื้นหนา 50 มิลลิบาร์ กับที่ระดับ 500 มิลลิบาร์

2/ = ค่าประเมินความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของกลุ่มอากาศที่ระดับต่ำสุดใกล้ผิวพื้น หนา 50 มิลลิบาร์ หากยกขึ้นไปที่ระดับ 500 มิลลิบาร์

3/ = อุณหภูมิที่กลุ่มอากาศใกล้ผิวพื้นลอยตัวขึ้นเนื่องจากรับความร้อนเข้าไป

ที่มา : ดัดแปลงจาก ศูนย์วิจัยปฏิบัติการฝนหลวงสาธิต ,2536

1.3) สารเคมีที่ใช้เป็นแกนการกลั่นตัว ได้แก่ เกลือแกง และสารเคมี ท.1

2) <u>เครื่องบินที่ใช้ปฏิบัติการ</u>

เนื่องจากการปฏิบัติการฝนหลวง ต้องบินขึ้นไปโปรยสารเคมีในอากาศ ในบางขั้นตอนต้องบินเข้าไปในกลุ่มเมฆ ซึ่งมีกระแสอากาศแปรปรวนเครื่องบินที่เหมาะสมควรเป็นเครื่องบินที่สามารถบรรทุกสารเคมีได้ประมาณ 1,000 - 2,000 กิโลกรัม ต่อเที่ยวบิน มีความเร็วในการบินต่ำ (ประมาณ 100 น้อต) เพื่อที่สามารถโปรยสารเคมีลงไปได้จำนวนมากต่อระยะทางที่บินให้สารเคมีในอากาศมีความ เข้มข้นพอเพียงต่อการทำปฏิกิริยาในอากาศ และสามารถเปลี่ยนทิศทางบินได้อย่างคล่องแคล่ว

เครื่องบินที่ใช้ในการทำฝนหลวงในปัจจุบัน ได้แก่ เครื่องบินของส่วนการบิน และเครื่องบินของเหล่าทัพ ตัวอย่างเช่น

เครื่องบินกาซ่า	2 เครื่องยนต์	น้ำหนักบรรทุก 1,000 กิโลกรัม ต่อเที่ยวบิน
เครื่องบินปอร์ตเตอร์	1 เครื่องยนต์	น้ำหนักบรรทุก 400 กิโลกรัม ต่อเที่ยวบิน
เครื่องบินนอร์แมด	2 เครื่องยนต์	น้ำหนักบรรทุก 400 กิโลกรัม ต่อเที่ยวบิน

3) <u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>

3.1) เครื่องมือตรวจอากาศ ได้แก่ เครื่องมือตรวจอากาศชั้นบน เรดาร์ฝนหลวง

3.2) เครื่องมือเตรียมสารเคมี ได้แก่ เครื่องบดผสมสารเคมี และรถยนต์บรรทุกสารเคมี

3.3) เครื่องมือสื่อสาร

<u>ตารางที่ 2</u> สารเคมีฝนหลวงแสดงคุณสมบัติบางประการ ที่ทำให้สารเคมีเหมาะสมในการดัดแปรสภาพอากาศ

ชื่อและสัญญาลักษณ์ของสารเคมี	ความชื้นสัมพัทธ์ระดับที่สารดูดความชื้นได้ดี(%) <u>1/</u>	ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ (ไมครอน) <u>2/</u>	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เมื่อผสมน้ำ(°ซ) <u>1/</u>	ความร้อนที่ดูดซับหรือคายออกมา (แคลลอรี่/โมล) <u>1/</u>
1. เกลือแกง (sodium chloride;NaCI)	60-70	150-250	ลดต่ำลงเล็กน้อย	น้อยมาก
2. น้ำแข็งแห้ง (dry ice, CO_2)	-	ต่ำกว่า 1 ลบ.นิ้ว	อุณหภูมิของสาร -78 °ซ	-
3. ยูเรีย (urea;$Co(NH_2)_2$)	80	425-850	ลดลง 10 องศา	+10.57
4. แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride;$CaCl_2$)	60	150-250	เพิ่ม 25 องศา	-19.0
5. แคลเซี่ยมออกไซด์ (calcium oxide;CaO)		425-850	เพิ่ม 70 องศา	-15.6
6. แคลเซียมคาร์บายด์ (calcium carbide;CaC_2)	80		เพิ่ม 50 องศา	-29.9
7. แอมโมเนียมไนเตรท (ammonium nitrate; NH_4NO_3)		425-850	ลดลง 20-30องศา	+6.30
8. เทพฤทธิ์ (ท.1)[3/]	-	250-425	-	-

ที่มา : <u>1/</u> เมธา และคณะ (ไม่ระบุปี)

<u>2/</u> ประเสริฐ และทรง (2539)

<u>3/</u> เป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นโดย ม.ร.ว.เทพฤทธิ์ เทวกุล ในปี พ.ศ.2527

ขั้นตอนการทำฝนหลวง

ฝ่ายแผนงานและติดตามผล (2538) อธิบายขั้นตอนการทำฝนหลวงว่า เพื่อเป็นหลักหรือแนวทางให้นักวิชาการได้ดำเนินการ และศึกษาวิจัยอย่างเป็นระบบ ดังนั้นในปีพ.ศ. 2516 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้ทรงกำหนดขั้นตอนของกรรมวิธีการทำฝนหลวง เพื่อให้เข้าใจง่าย 3 ขั้นตอน คือ (รายละเอียดตามตารางที่ 3)

1) ก่อกวนสภาพอากาศ

2) เลี้ยงให้อ้วน

3) โจมตี

ในแต่ละขั้นตอนแบ่งแยกตามวัตถุประสงค์ของการทำฝนให้เกิดการเพิ่มหรือเสริมกระบวนการทางธรรมชาติของการเกิดเมฆในขั้นตอนแรก ทำให้เมฆเพิ่มปริมาณมากขึ้นในขั้นที่ 2 และทำให้ฝนตกลงในเป้าหมายที่ต้องการตลอดจนขยายพื้นที่ฝนตกในขั้นตอนที่ 3

ผลงานปฏิบัติการฝนหลวง

การปฏิบัติการฝนหลวงเริ่มดำเนินการทดลองในปี พ.ศ.2512 และเริ่มปฏิบัติการฝนหลวงช่วยเหลือเกษตรกรเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ.2514 ในขณะนั้นมีคณะปฏิบัติการเพียง 1 คณะ มีวันปฏิบัติการ 119 วัน ต่อมามีความต้องการให้ช่วยเหลือมากขึ้นจึงต้องมีการเพิ่มคณะปฏิบัติการ จนถึง 8 คณะฯ และเคยเพิ่มถึง 9 คณะ ในปี พ.ศ.2536 รวมทั้งวันปฏิบัติงานภาคสนามรวมทุกคณะเพิ่มเป็น 1,771 วันในปี 2533 (ตารางที่ 4)

<u>ตารางที่ 3</u> ขั้นตอนการปฏิบัติการทำฝนเมฆอุ่นในการปฏิบัติการฝนหลวงตามภูมิภาคต่าง ๆ

ขั้นตอน	เวลา <u>1</u>/ ประมาณ (น.)	วัตถุประสงค์	การดำเนินการ	สารเคมีที่ใช้ <u>2</u>/
ก่อกวนสภาพอากาศ	09:00	1)เสริมการยกตัวของอากาศ 2) สร้างแกนอากาศ	1) โปรยอนุภาคสารเคมีประเภท exothemic [3/] 2) โปรยสารเคมีสร้างแกนอากาศบางส่วน	$CaCl_2$, CaC_2 CaO, NaCl
เลี้ยงให้อ้วน	11:00 - 13:00	เร่งหรือเสริมให้เมฆก่อตัวและก่อยอดสูงขึ้น หรือเพิ่มความหนาแน่นของไอน้ำในเมฆ	โปรยสารเคมีดูดซับความชื้นได้ดีและสารเคมีประเภท endothermic [4/] บริเวณไหล่ หรือยอดเมฆ หรือระหว่างช่องว่างระหว่างเมฆ	$NaCl,NH_4NO_3$ $CO(NH_2)_2$ CO_2 และ $CaCl_2$
โจมตีเมฆ	14:00 - 16:00	1) เร่งให้กลุ่มเมฆให้เกิดฝนตก 2) เสริมให้ฝนตกอยู่แล้วหนาแน่นขึ้น	เลือกเมฆที่มีระยะการเติบโต ยอดสูง ประมาณ 8,000 ฟุต หนาประมาณ 5,000 ฟุต และโปรยด้วยการโปรยสารเคมี endothermic	$CO(NH_2)_2$ NH_4NO_3 CO_2

ที่มา : เมธา และคณะ (ไม่ระบุปี)

<u>หมายเหตุ</u> <u>1</u>/ เวลาประมาณ การตัดสินใจปฏิบัติเวลาใดต้องตามสภาวะอากาศในแต่ละวัน

<u>2</u>/ สารเคมีส่วนใหญ่ใช้ในรูปผงละเอียดแห้งขนาดประมาณ 150-425 ไมครอน

<u>3</u>/ สารเคมี exothemic สารเคมีที่ผสมความชื้นแล้วอุณหภูมิสูงขึ้น

<u>4</u>/ สารเคมี exdothemic สารเคมีที่ผสมความชื้นแล้วอุณหภูมิลดลง

<u>ตารางที่ 4</u> สรุปวันปฏิบัติการในภาคสนามและงบประมาณที่ได้รับของส่วนฝนหลวง สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร ระหว่างปี พ.ศ. 2514-2539(ล้านบาท)

พ.ศ.	คณะ 1	คณะ 2	คณะ 3	คณะ 4	คณะ 5	คณะ 6	คณะ 7	คณะ 8	คณะ 9	รวม (วัน)	งบ ล้านบาท	งบเพิ่มเติม ล้านบาท	รวม ล้านบาท
2514	119	-	-	-	-	-	-	-	-	119	1.962	-	1.962
2515	208	-	-	-	-	-	-	-	-	208	3.306	-	3.306
2516	194	-	-	-	-	-	-	-	-	194	4.005	-	4.005
2517	170	-	-	-	-	-	-	-	-	170	8.351	-	8.351
2518	184	145	-	-	-	-	-	-	-	329	9.325	-	9.325
2519	153	139	72	-	-	-	-	-	-	364	9.477	9.900	19.377
2520	222	214	157	115	-	-	-	-	-	708	25.687	9.000	34.687
2521	149	170	90	-	-	-	-	-	-	409	30.578	1.400	31.978
2522	260	279	262	94	80	-	-	-	-	975	39.763	7.500	47.263
2523	206	214	210	139	54	-	-	-	-	823	42.285	14.001	56.286
2524	79	146	61	123	104	74	72	13	-	672	46.978	-	46.978
2525	188	263	174	174	61	53	13	-	-	926	46.387	5.000	51.387
2526	209	200	147	126	71	72	-	-	-	825	47.475	-	47.475
2527	139	181	161	50	55	48	77	-	-	711	47.140	-	47.140
2528	227	221	140	82	-	-	-	-	-	670	49.897	-	49.897
2529	233	240	201	30	-	-	-	-	-	704	43.393	-	43.393
2530	259	259	100	200	114	114	60	-	-	1221	41.138	-	41.138
2531	182	202	176	215	110	110	-	-	-	1103	39.096	6.574	45.670
2532	228	209	203	199	116	116	-	-	-	1154	43.120	5.743	48.863
2533	310	311	314	230	108	108	69	199	-	1771	47.103	0.610	47.713
2534	249	222	232	147	49	49	54	-	-	1011	50.820	4.981	55.801
2535	233	222	184	180	196	196	214	-	-	1426	57.823	32.938	90.761
2536	246	249	242	205	205	194	41	46	30	1458	169.306	62.443	231.749
2537	280	279	218	119	184	247	247	147	-	1721	185.228	75.276	260.504
2538											200.531	-	200.531
2539											221.449	-	221.440

ที่มา : ฝ่ายแผนงานและประเมินผล (2538)

<u>หมายเหตุ</u> ปี 2515-2517 มีฝนหลวงพระราชทานด้วย ปี 2518 มีการเช่าเครื่องบินจากเอกชน

ตารางที่ 4 **กำหนดปฏิบัติการฝนหลวงตามภูมิภาคต่าง ๆ ประจำปี 2540**

จังหวัด	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ระยอง/ลพบุรี	24									
2. จันทบุรี/หัวหิน	24									
3. นครสวรรค์		5								
4. พิษณุโลก/แพร่		5								
5. นครราชสีมา		15								
6. ขอนแก่น		15								
7. เชียงใหม่			20							

ที่มา : ดัดแปลงจากหนังสือสำนักฝนหลวงและการบินเกษตร ที่ กษ 0217/510 ลงวันที่ 27 มกราคม 2540
และ กษ 0217/511 ลงวันที่ 27 มกราคม 2540

<u>แผนปฏิบัติการทำฝนหลวง</u>

สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร มีแผนปฏิบัติงานทำฝนหลวงประจำปี ซึ่งกำหนดไว้ 3 แผนงาน/โครงการ (ฝ่ายแผนงานและประเมินผล, 2538) (ตารางที่ 4)ได้แก่

1) งาน/โครงการปฏิบัติการฝนหลวงเพิ่มปริมาณน้ำเหนือเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ ตามแผนงาน/โครงการกำหนดตั้งคณะปฏิบัติการจำนวน 2 คณะ กล่าวคือที่จังหวัดเชียงใหม่ 1 คณะฯ ที่จังหวัดแพร่ 1 คณะฯ เพื่อปฏิบัติการทำฝนในลุ่มรับน้ำทั้งสอง และอาจเคลื่อนย้ายไปใช้สนามบินจังหวัดใกล้เคียงได้ตามความเหมาะสม ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม ถึงกลางเดือน พฤศจิกายน ของทุกปี

2) งาน/โครงการปฏิบัติการฝนหลวง เพื่อช่วยเหลือพื้นที่เกษตรกรและอุปโภคบริโภคของเกษตรกรและราษฎร และเพิ่มปริมาณน้ำให้กับอ่าง/เขื่อนเก็บกักน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคใต้ และภาคตะวันตก แบ่งออกเป็น

2.1) แผนปฏิบัติงานภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้ตอนบน ระหว่างเดือน กุมภาพันธ์ ถึง พฤษภาคม และพฤษภาคม ถึง ปลายเดือนตุลาคม ของทุกปี โดยตั้งฐานปฏิบัติการที่จังหวัดระยอง จันทบุรี และย้ายฐานปฏิบัติการไปเป็นอำเภอหัวหิน และจังหวัดลพบุรี ตามลำดับ

2.2) แผนปฏิบัติงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งฐานปฏิบัติงานที่ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดอื่น ๆ ในภาค ระหว่างกลางเดือนมีนาคม ถึง เดือนตุลาคม ของทุกปี

3) งาน/โครงการปฏิบัติการฝนหลวงเพิ่มปริมาณน้ำในเขตลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

แผนปฏิบัติงานตั้งฐานปฏิบัติการที่จังหวัดนครสวรรค์ ระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง ปลายเดือนตุลาคม ของทุกปี

เอกสารอ้างอิง

เกษม จันทร์แก้ว. 2526. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 299น.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2523. **นิยามศัพท์อุตุนิยมวิทยา.** โรงพิมพ์กรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ. 59น.

นนทิกร กาญจนะจิตรา. 2531. **การจัดทำแบบบรรยายลักษณะงาน** (Job Description) สำนักงาน คณะกรรมการข้าราชการพลเรือน สำนักนายกรัฐมนตรี. เอกสารโรเนียว 15 น.

เมธา รัชตะปีติ วราวุธ ขันติยานันท์ และวัฒนา สุกาญจนเศรษฐ์. ไม่ระบุปี. **การทำฝนหลวงในประเทศไทย.** สำนักปฏิบัติการฝนหลวง, กรุงเทพฯ 21น.

ประเสริฐ อังสุรัตน์ และทรง กลิ่นประทุม. 2539. **สถานภาพการใช้ คุณสมบัติของสารเคมีในคณะปฏิบัติการและความรู้ ทัศนคติในการปฏิบัติการของนักวิชาการฝนหลวง.** รายงานการวิจัย ส่วนฝนหลวง สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร, กรุงเทพฯ 101น.

ฝ่ายแผนงานและประเมินผล. 2538. **แผนปฏิบัติการประจำปี 2539** ของสำนักฝนหลวง และการบินเกษตร. สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ. 36น.

วราวุธ ขันติยานันท์. 2539. **การทำฝนหลวงในประเทศไทย (ฉบับปรับปรุงใหม่ปี 2539).** เอกสาร การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการสำหรับนักปฏิบัติการฝนหลวง ระหว่างวันที่ 22-26 มกราคม 2539. โรงแรมชะอำลากูนรีสอร์ท เพชรบุรี 22น.

สุกิจ กิจเย็นทรวง. 2519. **อุตุนิยมวิทยาไดนามิคส์.** โรงพิมพ์กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ. 46น.

สำนักพัฒนาโครงสร้างส่วนราชการและอัตรากำลัง. 2539. **แผนอัตรากำลัง 3 ปี (พ.ศ.2539 - 2541) สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.** กรุงเทพฯ, 232น.

Ahrens, C.D. 1986. **Meteorology Today.** West Pubuishing Co., Minnesota,U.S.A. 514p.

Bureau of Reclamation Denver office. 1989. **Interim Seientific Report; Applied Atmospheric Resources Research Program in Thailand.** Denver, Colorado, U.S.A..135p.

Changnon, S.A. 1986. **Thnderstroms and Lightning Illinois most Awesome Weather.** Illinois State Water Survey, Department of Energy and Natural Resources, Illinois. 12

Latgens, F.K. and E.J. Tarbuck. 1982. **The Atmosphere. Prentice** Hall, INC, New Jersey, U.S.A..478p.

Mather, G.K. and D.E. Terblanche, 1992: **Cloud physics experiments which artificially produced hygroscopic nuclei.** Proc. 11th Int Confon Cloud Physics, Montreal, Canada, 1992, pp.147 - 150.

Murty, A.S.R., 1989: **An Overview of Warm cloud modification research in India.** Preprints of the Fifth WMO Sci-Cont on wea. Modit. and Appl. cloud Phys., Beijing, China, pp. 512 - 524.

Roger, R.R. 1985. **A short Course in Cloud Physics.** Pergramon Press Inc, New York, U.S.A. 235p.

Rosenfeld, D., W.L.Woodley., B.A.Silverman, C.Hartzell. W.Khantiyanan., W.Sukanjanaset, P.Sudhikoses and R.Nirel. 1994. **Testing of Dynamic Cold-Cloud Seeding conceptsing Thailand. Part II : result of analysis. The Asean workshop on a scientific plan for and Asean cooperative weather Modification project** document NO.7 Phectchaburi, Thailand 11p.

Silverman, B.A., S.A. Changnon, I.A.Flueck and S.F.lintner. 1986. **Weather Modification Assessment Kingdom of Thailand Division of Atmospheric Resources Researach,** Bureau of Reclamation, U.S. Department of the tnterior, U.S.A. 116p.

Sumner, G. 1988. **Precipitation Process and Analysis.** John Wiley & Sons. the Bath Press Bath, Avon, Great Britain. 455p.

Tzivion, S., T.Reisin and Z. Levin. 1994. **Numerical Simulation of Hygroscopic Seeding in Convective Cloud.** American Meteorology Society, 33; 252 - 267

Vali, G. 1988. **Lecture Note on the Basis Priciples of Precipitation Enhancement.** Atmospheric Water Resources Management Symposium. Febuary 10 to 19, 1988 Chiang Mai. 50p.

Woodley, W.L. and D.Rosenfeld. 1991. **Testing Dynamic Seeding in Thailand.** An Interim Report to the U.S. Bureau of Reclamation, Denver, U.S.A. 74p.