

การใช้พลุสารดูดความชื้นที่มีผลต่อลักษณะเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัส

The Effects of Hygroscopic Flares on Characteristics of Cloud Physics

at the Cumulus Cloud Base

หนึ่งทัย* ตันติพลับทอง

Nuenghatai* Tantiplubthong

กรมฝนหลวงและการบินเกษตร

Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรโซเดียมคลอไรด์ และสูตรแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อลักษณะเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัส โดยตรวจวัดกลุ่มเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ และกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ได้แก่ ปริมาณน้ำ ขนาดและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี paired samples t-test และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธี independent samples t-test จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) พบว่า หลังการใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์เม็ดน้ำที่ฐานเมฆมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีขนาดเม็ดน้ำที่ใหญ่กว่าการใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ แต่การใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำและเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำได้ดีกว่าทั้งกลุ่มเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติและกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ จึงมีความเหมาะสมในการใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์กระตุ้นและเร่งประสิทธิภาพการเพิ่มขนาดเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆ หากต้องการเพิ่มปริมาณน้ำและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำก็ควรใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม การใช้พลุสารดูดความชื้นทั้งสองสูตรช่วยกระตุ้นเร่งรัดการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำได้ดีกว่าปล่อยให้เม็ดน้ำเพิ่มขนาดเองตามธรรมชาติ

คำสำคัญ : พลุสารดูดความชื้น เมฆฟิสิกส์ ฐานเมฆคิวมูลัส

Abstract

The purpose of this study was to investigate cloud physics properties at cumulus cloud base that were seeded with NaCl and CaCl₂ hygroscopic flares compare with non-seeded cloud. Liquid water content, drop size distribution and concentration at cloud base were analyzed using paired samples t-test and independent samples t-test. The comparative study results with natural cloud found that CaCl₂ seeded cloud showed statistically significant increase cloud drop size and the size also bigger than NaCl seeded cloud. However, NaCl seeded cloud showed much more liquid water content and droplet concentration compare with other two categories. It is a physically realistic result that CaCl₂ can initiate and accelerate the process on precipitation growth while NaCl is suitable for produce liquid water content and cloud drop concentration.

Key words : Hygroscopic flares, Cloud physics, Cumulus cloud base

*Corresponding author. E-mail : nuengt@hotmail.com

บทนำ

น้ำเป็นส่วนสำคัญในชีวิตประจำวันจำเป็นต่อการดำรงชีพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในโลก และมีการใช้ประโยชน์ของน้ำเพื่อการเกษตร อุตสาหกรรม และอื่น ๆ ทรัพยากรน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการทำการเกษตร จึงมีความพยายามเก็บกักน้ำเพื่อการเกษตร เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ และฝาย เป็นต้น สำหรับประเทศไทยพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมมีความต้องการใช้น้ำเพื่อการผลิตสินค้าทางการเกษตร แต่มักประสบปัญหาขาดแคลนน้ำโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จึงก่อเกิดโครงการพระราชดำริฝนหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ.2498 เป็นการจัดการทรัพยากรน้ำในบรรยากาศ ได้แก่ เมฆ และฝน มีการศึกษาค้นคว้างานวิจัยจากตำราต่างประเทศ และทดลองดัดแปรสภาพอากาศ เพื่อให้ก้อนเมฆบนท้องฟ้าตกลงมาเป็นฝนในพื้นที่ประสบภัยแล้งนำไปสู่การแก้ไขปัญหาภัยพิบัติอื่น ๆ เช่น ปัญหาหมอกควัน ไฟป่า และการช่วยผลักดันน้ำเค็ม เป็นต้น (สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร, 2547) ปัจจุบันกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้มีความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวงกับกองทัพอากาศ โดยการศึกษาวิจัยการผลิตพลุสารดูดความชื้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่จากต่างประเทศมาใช้ในการผลิตพลุสารดูดความชื้นเผาไหม้ให้สารฝนหลวงออกมาเป็นควัน (pyrotechnic flare) จำนวน 2 สูตร ได้แก่ สูตรโซเดียมคลอไรด์ และสูตรแคลเซียมคลอไรด์ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอาวุธกองทัพอากาศ, 2555)

การทำฝนหลวงเป็นการดัดแปรสภาพอากาศเพื่อให้เกิดฝนที่มีการใช้สารเคมีกระตุ้นและเร่งให้เกิดเมฆจนกระทั่งตกเป็นฝนลงสู่พื้นที่เป้าหมาย ซึ่งการทำฝนหลวงเป็นส่วนหนึ่งของการจัดการทรัพยากรน้ำของแต่ละภูมิภาค โดยเฉพาะการจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อการเกษตร อันเป็นภารกิจหลักของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร กระบวนการสำคัญของการเกิดเมฆโดยธรรมชาติเริ่มต้นจากกระบวนการควบแน่น (condensation) ของไอน้ำหรือความชื้นในอากาศที่มาจับเกาะบนพื้นผิวละอองลอย (aerosol) ชนิดที่เป็นแกนกลั่นตัว (cloud condensation nuclei) ที่มีอยู่ทั่วไปและแขวนลอยอยู่ในอากาศดูดซับความชื้น (Hygroscopic) แล้วควบแน่นเป็นหยดเมฆ (cloud droplet) และรวมตัวกันเป็นเมฆจนสามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา ขนาดอนุภาคที่พบตามธรรมชาติจะเป็นอนุภาคที่มีรัศมี 0.1 – 1.0 ไมครอน จะเพิ่มปริมาณแกนกลั่นตัวของเมฆน้ำ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการควบแน่น (ประเสริฐ อังสุรัตน์ และทรง กลิ่นประทุม, 2539) ทั้งนี้ สารโซเดียมคลอไรด์จะเป็นสารเคมีที่ดูดซับความชื้นแล้วมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิน้อยมาก จึงใช้ทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัวแบบสารละลายเข้มข้นเพียงอย่างเดียว แต่สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ดูดซับความชื้นแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นตัวเร่งการไหลเวียนของอากาศภายในเมฆให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น และยังทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัวแบบสารละลายเข้มข้นที่มีความไวในการดูดซับความชื้นที่ผิวสูง (สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร, 2544) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกสารเคมีทั้งสองสูตรนี้มาใช้ผลิตเป็นพลุสารดูดความชื้นมาเสริมการทำฝนด้วยสารชนิดผง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ทำให้ประสิทธิผลของการทำฝนดียิ่งขึ้น และทดสอบประสิทธิภาพพลุสารดูดความชื้นด้วยการใช้งานจริงกับเมฆคิวมูลัส โดยตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ติดตั้งบนเครื่องบินวิจัยที่ระดับฐานเมฆเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเมฆฟิสิกส์ภายในก้อนเมฆที่ระดับฐานเมฆที่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น ดังนั้น ผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นเครื่องมือหนึ่งในการช่วยตัดสินใจประยุกต์ใช้พลุสารดูดความชื้นแต่ละสูตรเสริมวิธีการทำฝนให้สอดคล้องกับขั้นตอนของการทำฝนตามตำราฝนหลวงพระราชทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องบินที่ใช้



AU-23 & Super King Air 350

ภาพที่ 1a (ซ้าย) เครื่องบิน AU-23 ของกองทัพอากาศ และภาพที่ 1b (ขวา) เครื่องบิน Super King Air 350 ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร (หนึ่งหทัย ดันติพลับทอง, 2553)

2. พลุสารดูความชื้น ได้แก่ สูตรโซเดียมคลอไรด์ และ สูตรแคลเซียมออกไซด์



ภาพที่ 2 พลุสารดูความชื้นติดตั้งบนแท่นบรรจุที่ติดตั้งบนเครื่องบิน AU-23 (หนึ่งหทัย ดันติพลับทอง, 2553)

3. เรดาร์ฝนหลวงตาคลี อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์



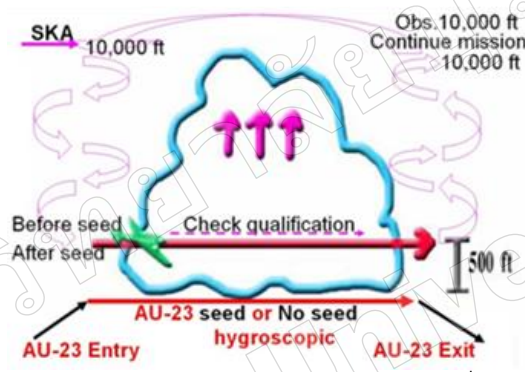
ภาพที่ 3 เรดาร์ตรวจวัดกลุ่มเมฆและฝน สถานีเรดาร์ฝนหลวงตาคลี (หนึ่งหทัย ดันติพลับทอง, 2553)

การคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง มีหลักเกณฑ์ดังนี้

1. เป็นเมฆก้อนหรือเมฆคิวมูลัส (cumulus cloud; Cu) หรือเมฆสเตรโตคิวมูลัส (stratocumulus cloud; Sc) ที่กำลังเจริญเติบโต มีลักษณะเป็นเมฆค่อนข้างเดี่ยว ยังไม่มีฝนตกจากฐานเมฆ
2. ความสูงของยอดเมฆประมาณ 8,000 – 12,000 ฟุตจากระดับน้ำทะเลปานกลาง
3. มีค่ากระแสอากาศไหลขึ้นภายในเมฆไม่น้อยกว่า 300 ฟุตต่อนาที

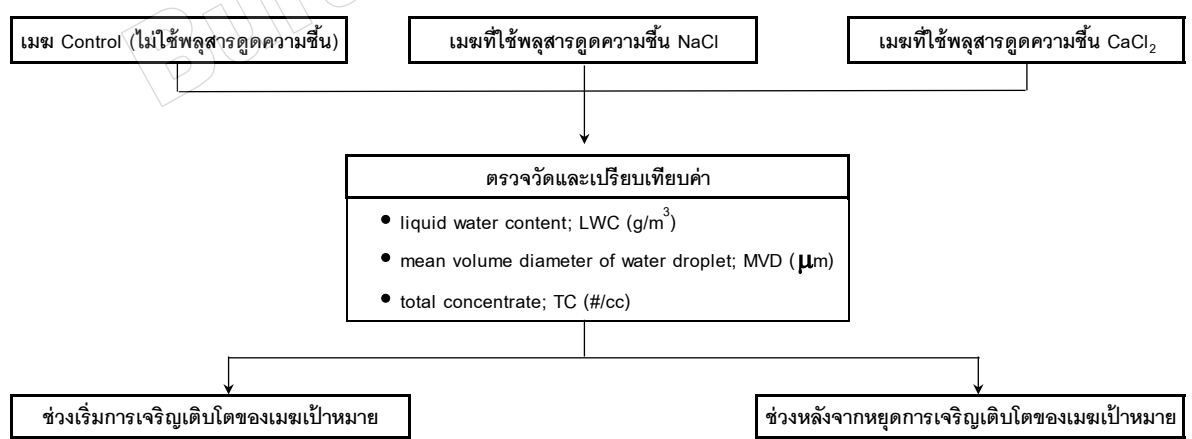
4. มีค่าปริมาณน้ำภายในเมฆที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดปริมาณน้ำไม่น้อยกว่า 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
5. ความกว้างของฐานเมฆก่อนหรือเมฆคิวมูลัส ตั้งแต่ 2 – 6 กิโลเมตร หรือเมฆสเตรโตคิวมูลัส ตั้งแต่ 5 – 10 กิโลเมตร
6. กลุ่มเมฆหน่วยทดลองต้องอยู่ในพื้นที่การตรวจวัดด้วยเรดาร์ฝนหลวงตาคลี อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ ในรัศมีไม่เกิน 160 กิโลเมตร

วิธีการบินวิจัย ตรวจวัดเมฆพิลิกัสที่ระดับฐานเมฆหรือเรียกว่า cloud base spectra โดยนักวิชาการบนเครื่องบิน Super King Air คัดเลือกกลุ่มเมฆจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของเมฆด้วยสายตาที่ระดับความสูง 10,000 ฟุต ทำการตรวจวัดเมฆพิลิกัสที่ระดับฐานเมฆก่อนการให้พลูสารดูดความชื้น ตรวจสอบเงื่อนไขการคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง ตัดสินใจคัดเลือกเป็นกลุ่มเมฆทดลองเมื่อเครื่องบิน AU-23 ปล่อยควันพลูสารดูดความชื้นได้ฐานเมฆหลังจากเสร็จสิ้นภารกิจออกจากเมฆทดลองแล้ว จึงทำการตรวจวัดเมฆพิลิกัสที่ระดับฐานเมฆหลังการให้พลูสารดูดความชื้น



ภาพที่ 4 cloud base spectra for hygroscopic flare seeding (หนึ่งหทัย ตันติพลับทอง, 2553)

ซึ่งกล่าวคือ ผลของการใช้พลูก่อให้เกิดผลอย่างไรในการเจริญเติบโตของเมฆ สามารถเขียนเป็นแผนผังการเปรียบเทียบเมฆเป้าหมายที่กำลังเจริญเติบโตได้ดังนี้



ภาพที่ 5 แผนผังการเปรียบเทียบเมฆเป้าหมาย

ข้อมูลเมฆฟิสิกส์จากการตรวจวัดที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสเป็นข้อมูลทุติยภูมิก่อนและหลังการใช้พลู สารดูดความชื้นในโครงการทดสอบประสิทธิภาพพลูสารดูดความชื้นเสริมการปฏิบัติการฝนหลวงเมฆอุ่น จำแนกหน่วยทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำแนกหน่วยทดลองของการทดสอบประสิทธิภาพพลูสารดูดความชื้น

หน่วยทดลอง	control	seed NaCl	seed CaCl ₂
	1	3	4
	2	3	5
จำนวนรวม	3	6	9

กลุ่มเมฆที่ไม่ใช้พลูสารดูดความชื้น หรือ กลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) เป็นหน่วยทดลองที่เป็นตัวแทนกลุ่มเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ โดยทำการคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง control ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับกลุ่ม ที่มีการใช้พลูสารดูดความชื้น จึงต้องมีการตรวจวัดตัวแทนข้อมูลช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย การปฏิบัติกับหน่วยทดลอง control มีลักษณะเช่นเดียวกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลูสูตรโซเดียมคลอไรด์ หรือ seed NaCl และกลุ่มเมฆที่ใช้พลูสูตรแคลเซียมคลอไรด์ หรือ seed CaCl₂ ทุกประการ แต่จะไม่มีการใช้พลูสารดูดความชื้น เพื่อให้กลุ่มเมฆเจริญเติบโตตามธรรมชาติ เมื่อหน่วยทดลองเริ่มหยุดการเจริญเติบโต เช่น ยอดเมฆเริ่มยุบตัวลง หรือเริ่มมีฝนตก จึงจะทำการบินตรวจวัดอีกครั้งสำหรับใช้เป็นตัวแทนข้อมูลช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย เพื่อให้มีข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆธรรมชาติสำหรับเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่ใช้พลูสารดูดความชื้น

การวิเคราะห์ข้อมูลเมฆฟิสิกส์ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดอนุภาคเม็ดน้ำ (Forward Scattering Spectrometer Probe; FSSP) ได้แก่ ปริมาณน้ำ (liquid water content; LWC (g/m³)), ขนาดของเม็ดน้ำ (mean volume diameter of water droplet; MVD (μm)) และ ปริมาณ ความเข้มข้นของเม็ดน้ำ (total concentrate; TC (#/cc)) วิเคราะห์ข้อมูลเมฆฟิสิกส์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ดังนี้

1. เปรียบเทียบระหว่างช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายด้วยวิธี paired-samples t-test เพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีความสัมพันธ์กัน
2. เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี independent samples t-test เพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม ที่เป็นอิสระต่อกัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการวิจัย

โดยหาค่าเฉลี่ยของผลต่างจากการใช้พลูสารดูดความชื้น และทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย ด้วยวิธี paired-samples t-test และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลการใช้พลูสารดูดความชื้นแต่ละชนิดด้วยวิธี independent samples t-test

1. เปรียบเทียบข้อมูลช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายด้วยวิธี paired-samples t-test

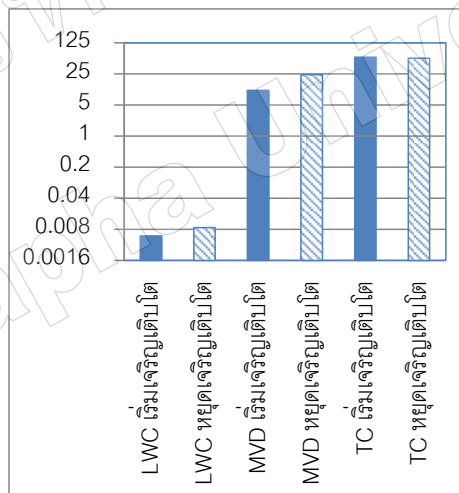
1.1 เปรียบเทียบข้อมูลเมฆ Control (ไม่ใช้พลูสารดูดความชื้น) จำนวน 3 หน่วยทดลอง

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ กลุ่มเมฆ Control (ไม่ใช้พลาสมา) แต่จะมีการตรวจวัดคุณสมบัติของเมฆภายใต้เงื่อนไขการคัดเลือกหน่วยทดลองเช่นเดียวกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลาสมาความเข้มข้น เพื่อให้หน่วยทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกันสำหรับนำมาใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางเมฆฟิสิกส์กับกลุ่มที่ใช้พลาสมาความเข้มข้นมีค่าเฉลี่ยดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆ Control (ไม่ใช้พลาสมาความเข้มข้น)

ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	
liquid water content; LWC (g/m^3)	เริ่มเจริญเติบโต	0.0056733
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	0.0088400
mean volume diameter of water droplet; MVD (μm)	เริ่มเจริญเติบโต	10.667
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	24.200
total concentrate; TC (#/cc)	เริ่มเจริญเติบโต	59.400
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	56.800

จากการวิเคราะห์ข้อมูล เมฆ Control (ไม่ใช้พลาสมาความเข้มข้น) ซึ่งเป็นกลุ่มเมฆธรรมชาติ ที่มีกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกัน หรือกรรมวิธีของฝนในเขตร้อน (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 4, 2549) โดยอาศัยแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติ ทำให้ขนาดของเม็ดน้ำใหญ่ขึ้น และปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในขณะที่เดียวกันขนาดของเม็ดน้ำที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำและปริมาณน้ำที่ฐานเมฆลดลง เปรียบเทียบดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆ Control (ไม่ใช้พลาสมาความเข้มข้น)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired-samples t-test ของเมฆ Control (ไม่ใช่พลาสมาความชื้น)

Paired Samples Test

Paired Samples Test	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence				
				Lower	Upper			
LWC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-0.00316667	.00281726	.00162654	-.01016512	.00383179	-1.947	2	.191
MVD เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-13.5333	13.5964	7.8499	-47.3088	20.2421	-1.724	2	.227
TC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	2.6000	2.9698	2.1000	-24.0830	29.2830	1.238	1	.433

เมฆ Control (ไม่ใช่พลาสมาความชื้น) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 0.00316667 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m³) ค่าเฉลี่ยเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 13.5333 ไมครอน แต่มีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลง 2.6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (#/cc) จากการทดสอบสมมติฐานทางสถิติปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆ Control (ไม่ใช่พลาสมาความชื้น) นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

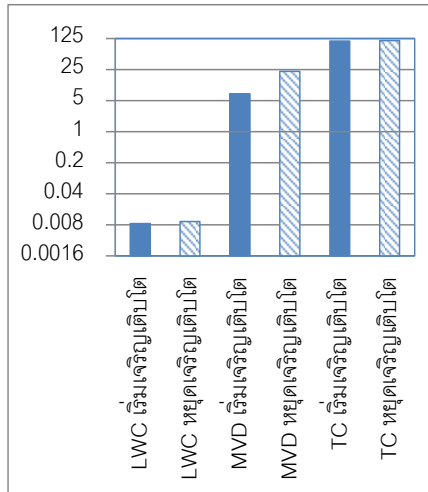
1.2 เปรียบเทียบข้อมูลเมฆที่ใช้พลาสมาโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 6 หน่วยทดลอง

ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำระหว่างช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้พลาสมาโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลาสมาโซเดียมคลอไรด์

ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	
liquid water content; LWC (g/m ³)	เริ่มเจริญเติบโต	0.0084983
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	0.0094533
mean volume diameter of water droplet; MVD (µm)	เริ่มเจริญเติบโต	7.133
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	22.850
total concentrate; TC (#/cc)	เริ่มเจริญเติบโต	109.983
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	112.733

จากการวิเคราะห์ข้อมูล กลุ่มเมฆที่ใช้พลาสมาโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) พบว่า หลังจากใช้พลาสมาโซเดียมคลอไรด์ช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนขนาดของเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติ โดยในขณะที่เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลงแต่อย่างใด แสดงว่า พลาสมาโซเดียมคลอไรด์เป็นแกนกลั่นตัวที่ดี ช่วยให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนกระทั่งเกิดการข้ามขั้นตอนกลายเป็นเม็ดน้ำขนาดใหญ่ โดยสูญเสียปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำน้อยมาก ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired-samples t-test ของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรโซเดียมคลอไรด์

Paired Samples Test

Paired Samples Test	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence				
				Lower	Upper			
LWC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-.00095500	.00312084	.00127408	-.00423013	.00232013	-.750	5	.487
MVD เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-15.7167	17.1614	7.0061	-33.7265	2.2931	-2.243	5	.075
TC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-2.7500	6.9221	2.8259	-10.0143	4.5143	-.973	5	.375

จากการศึกษาพบว่า กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 0.000955 g/m³ ค่าเฉลี่ยเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 15.7167 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำเพิ่มขึ้น 2.75 #/cc เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรโซเดียมคลอไรด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

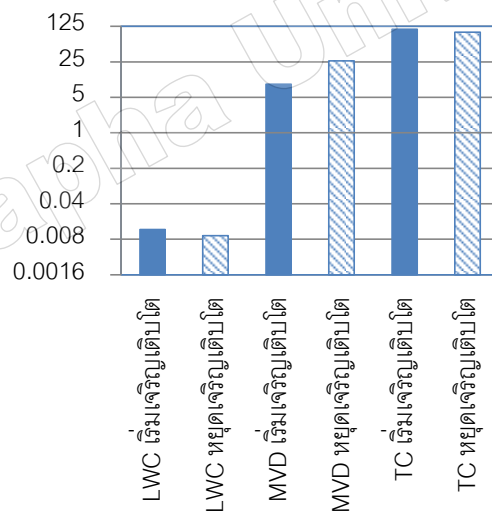
1.3 เปรียบเทียบข้อมูลกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) จำนวน 9 หน่วยทดลอง

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูอูตรแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ก่อนใช้กับหลังใช้ฟลูสตรูดความชื้นของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสตรูแคลเซียมคลอไรด์

ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	
liquid water content; LWC (g/m^3)	เริ่มเจริญเติบโต	0.0125289
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	0.0094389
mean volume diameter of water droplet; MVD (μm)	เริ่มเจริญเติบโต	9.067
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	26.278
total concentrate; TC (#/cc)	เริ่มเจริญเติบโต	109.489
	หลังจากหยุดการเจริญเติบโต	96.389

จากการวิเคราะห์ข้อมูล กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสตรูแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) พบว่า หลังจากใช้ฟลูสตรูแคลเซียมคลอไรด์ช่วยเร่งให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกัน ขนาดของเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีที่สุด ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและฟลูสตรูโซเดียมคลอไรด์ แต่ในขณะที่เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลทำให้ปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลงมากกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและฟลูสตรูโซเดียมคลอไรด์ แสดงว่า ฟลูสตรูแคลเซียมคลอไรด์มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นได้ดี ช่วยให้กระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนกระทั่งเกิดการข้ามขั้นตอนกลายเป็นเม็ดน้ำขนาดใหญ่ได้ดีที่สุด



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสตรูแคลเซียมคลอไรด์

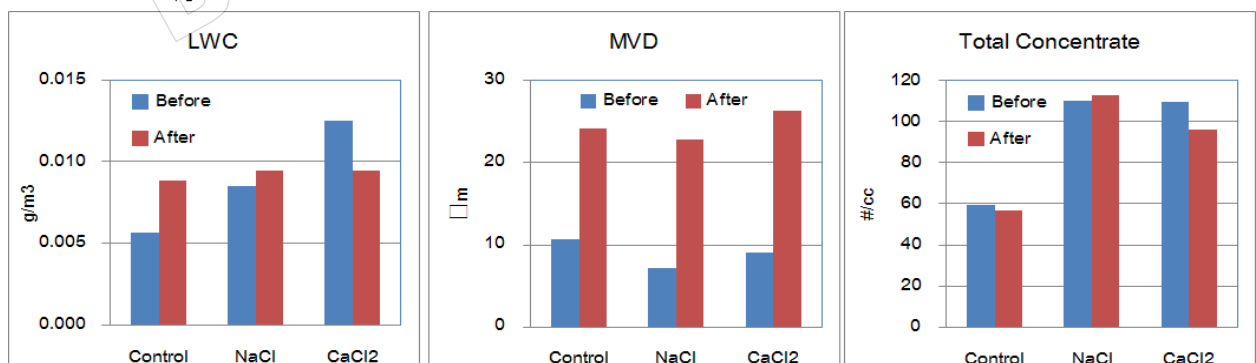
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired-samples t-test ของกลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์

Paired Samples Test

Paired Samples Test	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence				
				Lower	Upper			
LWC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	.00309000	.00740541	.00246847	-.00260230	.00878230	1.252	8	.246
MVD เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-17.2111	14.8863	4.9621	-28.6537	-5.7685	-3.469	8	.008
TC เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	13.1000	34.0663	11.3554	-13.0857	39.2857	1.154	8	.282

สำหรับ กลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำลดลง 0.00309 g/m^3 ค่าเฉลี่ยเม็ต้น้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 17.2111 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ต้น้ำลดลง 13.1 \#/cc เนื่องจากขนาดเม็ต้น้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มเมฆที่ไม่ใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นหรือเมฆธรรมชาติประมาณ 3.7 ไมครอน และขนาดเม็ต้น้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นโซเดียมคลอไรด์ประมาณ 1.5 ไมครอน จึงมีส่วนทำให้ปริมาณความเข้มข้นลดลงมากกว่ากลุ่มเมฆธรรมชาติและกลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นสูตรโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยขนาดของเม็ต้น้ำช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) มีค่าแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ แต่ปริมาณน้ำและปริมาณความเข้มข้นของเม็ต้น้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายที่มีการใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้น ปรากฏว่าที่ระดับฐานเมฆของกลุ่มเมฆ ที่ไม่ใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นหรือกลุ่มเมฆธรรมชาติ นั้น มีปริมาณน้ำสูงขึ้น และปริมาณน้ำสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ ในขณะที่กลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์มีขนาดเม็ต้น้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มอื่น ส่วนกลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์โซเดียมคลอไรด์ มีปริมาณความเข้มข้นของเม็ต้น้ำขนาดเล็กมากสูงขึ้นในขณะที่กลุ่มอื่นปริมาณความเข้มข้นของเม็ต้น้ำลดลง แสดงว่าพอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์ดูดซับความชื้นหรือไอน้ำแล้วเกิดการเร่งการเจริญเติบโตของเม็ต้น้ำข้ามขั้นตอนได้ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและพอลิเมอร์โซเดียมคลอไรด์



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆธรรมชาติ กลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์โซเดียมคลอไรด์ และกลุ่มเมฆที่ใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์

2. การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิลิกส์ที่มีการใช้ฟลูออโรคาร์บอนความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธี independent samples t-test

2.1 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติกับกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนโซเดียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิลิกส์	Mean Difference	Std. Error Difference	t	Sig. (2-tailed)
ปริมาณน้ำ (g/m ³)	-0.00221167	0.00214763	-1.030	0.337
ขนาดเม็ดน้ำ (μm)	2.1833	11.4714	0.190	0.854
ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ (#/cc)	5.3500	5.2535	1.018	0.348

ผลการทดสอบทางสถิติพบว่า ข้อมูลเมฆฟิลิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.2 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วย independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติกับกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนแคลเซียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิลิกส์	Mean Difference	Std. Error Difference	t	Sig. (2-tailed)
ปริมาณน้ำ (g/m ³)	-0.00625667	0.00449491	-1.392	0.194
ขนาดเม็ดน้ำ (μm)	3.6778	9.7583	0.377	0.714
ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ (#/cc)	-10.5000	25.1198	-0.418	0.686

ผลการทดสอบทางสถิติพบว่า ข้อมูลเมฆฟิลิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูออโรคาร์บอนแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)

ตารางที่ 10. ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วย independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสุตรโซเดียมคลอไรด์กับกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสุตรแคลเซียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิลิกส์	Mean Difference	Std. Error Difference	t	Sig. (2-tailed)
ปริมาณน้ำ (g/m ³)	-0.00404500	0.00322722	-1.253	0.244
ขนาดเม็ดน้ำ (μm)	1.4944	8.3274	0.179	0.694
ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ (#/cc)	-15.8500	14.2653	-1.111	0.113

ผลการทดสอบทางสถิติพบว่า ข้อมูลเมฆฟิลิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสุตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้ฟลูสุตรแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

วิจารณ์ผล

1.1 การใช้ฟลูสารดูดความชื้นในการทำฝน

การดัดแปรสภาพอากาศโดยใช้ฟลูสารดูดความชื้น เพื่อขยายการกระจายของหยดเมฆ และเร่งกระบวนการรวมตัวกันของเม็ดน้ำ การทดลองของ Cooper และคณะ ในปี ค.ศ. 1997 โดยใช้ฟลูเผาไหม้ให้อนุภาคแกนกลั่นตัวของเมฆขนาดใหญ่ เพื่อให้เมฆมีการเจริญเติบโตและช่วยกระตุ้นให้แกนกลั่นตัวที่มีขนาดใหญ่ยับยั้งแกนกลั่นตัวธรรมชาติที่มีขนาดเล็ก โดยการข้ามขั้นตอนการเกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ในเมฆให้เกิดเร็วขึ้นภายในเวลา 15 นาที ถือว่าเร็วกว่าวงจรชีวิตของการเกิดเม็ดน้ำภายในเมฆคิวมูลัสตามธรรมชาติ โดยทั่วไปจะใช้ระยะเวลา 30 นาที (Bruitjes R. T., 1999) โดยฟลูสารดูดความชื้นที่ผลิตใช้ในแต่ละประเทศ จะมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันไป ประเทศแอฟริกาใต้มีขนาดประมาณ 0.3 - 0.5 ไมครอน ประเทศอินโดนีเซียมีขนาด 0.7 - 2.1 ไมครอน (Haryanto, U., Goenawan R. D. and Harsanti D., 2013) และประเทศไทยขนาด 0.7 ไมครอน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาาระบบอาวุธกองทัพอากาศ, 2555)

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงลักษณะเมฆฟิลิกส์ของเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสเท่านั้น ซึ่งผลการใช้ฟลูสารดูดความชื้นทั้งฟลูโซเดียมคลอไรด์และฟลูแคลเซียมคลอไรด์ของประเทศไทยคล้ายคลึงกับการทดลองในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศแอฟริกาใต้ คือ สามารถเร่งกระบวนการรวมตัวกันของเม็ดน้ำ ทำให้มีเม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้น ฟลูเผาไหม้ให้อนุภาคของสารดูดความชื้นเป็นแกนกลั่นตัวของเมฆ ช่วยกระตุ้นให้เกิดหยดเมฆ เร่งเข้าให้เกิดการข้ามขั้นตอนกระบวนการการเกิดเมฆและกระบวนการเพิ่มขนาดเม็ดน้ำในเมฆด้วย

1.2 ข้อค้นพบเด่นจากการใช้ฟลูสารดูดความชื้น

พบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะเมฆฟิลิกส์ที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสหลังจากใช้ฟลูสารดูดความชื้นทั้งสองสูตรช่วยให้เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีกว่ากลุ่มเมฆที่เติบโตตามธรรมชาติ โดยเฉพาะขนาดของเม็ดน้ำเมื่อใช้ฟลูสารดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะทำให้เกิดเม็ดน้ำที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า การใช้ฟลูสารดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์ทำให้เม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้นนั้น เกิดจากการรวมตัวกันและข้ามขั้นตอนจนมีเม็ดน้ำขนาดใหญ่ในเมฆเร็วขึ้นเร็วกว่าการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ฟลูสารดูดความชื้นสามารถให้อนุภาคสารดูดความชื้นที่มีรัศมีของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.1 - 1.0 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้น จึงใช้เป็นแกนกลั่นตัวของเมฆได้อย่างดี และมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารสูตรแกนกลั่นตัวของเมฆเสริมการปฏิบัติการทำฝนได้เป็นอย่างดีในขั้นตอนที่ 1 ก่อนวนหรือก่อนเมฆ

เพื่อกระตุ้นและเร่งให้อิอน้ำในอากาศเกิดกระบวนการควบแน่น รวมตัวกลายเป็นหยดเมฆได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ ควรนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวางแผนปฏิบัติการฝนหลวงให้เหมาะสมกับสภาพอากาศ สภาพภูมิประเทศ รวมทั้งเครื่องบินที่ใช้การโปรยสารพอลิเมอร์ดูดความชื้นด้วย

1.3 ความแตกต่างหรือสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ

สารดูดความชื้นที่ได้จากการเผาไหม้พลูทั้งสองสูตรนั้น มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.7 ไมครอน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอาวุธกองทัพอากาศ, 2555) จึงมีขนาดไม่แตกต่างจากแกนกลั่นตัวธรรมชาติที่มีรัศมีประมาณ 0.1 – 1 ไมครอน จึงมีคุณสมบัติของขนาดอนุภาคในการเป็นแกนกลั่นตัวเช่นเดียวกับแกนกลั่นตัวธรรมชาติ ยังมีผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง (Medina et al., 1989) พบว่า แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดความชื้นที่มีประสิทธิภาพที่สุด ช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของเม็ดน้ำ และข้ามขั้นตอนการเกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ในเมฆได้จริง เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเมฆธรรมชาติ

สรุปผลการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบกับเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติที่ไม่มีการใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้น พบว่า การใช้พอลิเมอร์แคลเซียมคลอไรด์จะทำให้เกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และช่วยให้เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่กว่าการใช้พอลิเมอร์โซเดียมคลอไรด์ แต่การใช้พอลิเมอร์โซเดียมคลอไรด์จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในเมฆและช่วยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำได้ดีกว่า จึงมีความเหมาะสมในการใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์กระตุ้นและเร่งประสิทธิภาพการเพิ่มขนาดเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆ หากต้องการเพิ่มปริมาณน้ำและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำก็ควรใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นสูตรโซเดียมคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม การใช้พอลิเมอร์ดูดความชื้นทั้งสองสูตรจะช่วยกระตุ้นเร่งเร้าการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำได้ดีกว่าปล่อยให้เม็ดน้ำเพิ่มขนาดเองตามธรรมชาติ

เอกสารอ้างอิง

- โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. (2549). สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เล่มที่ 4/เรื่องที่ 5/ปรากฏการณ์ของอากาศ/การเกิดฝน. วันที่สืบค้นข้อมูล 9 มกราคม 2557, เข้าถึงได้จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=4&chap=5&page=t4-5-infodetail16.html>
- ประเสริฐ อังสุรัตน์ และทรง กลิ่นประทุม. (2539). สภาพอากาศการใช้คุณสมบัติของสารเคมีในขณะปฏิบัติการ และความรู้ทัศนคติในการปฏิบัติการของนักวิชาการฝนหลวง. กรุงเทพมหานคร: สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอาวุธกองทัพอากาศ. (2555). โครงการความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวง สำนักฝนหลวงและการบินเกษตรกับกองทัพอากาศไทย. กรุงเทพมหานคร: กองทัพอากาศไทย.
- สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร. (2547). เป็นฝนสู่ประชา จากบิดาของแผ่นดิน. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร. (2544). พระบิดาแห่งฝนหลวง. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- หนึ่งหทัย ตันติพลับทอง. (2553). สรุปการปฏิบัติการเมฆฟิสิกส์โครงการวิจัยและพัฒนาพอลิเมอร์ดูดความชื้นเสริมการปฏิบัติการฝนหลวงเมฆอุ่น ปี 2553. กรุงเทพมหานคร: สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร.

- Bruintjes R. T. (1999). *A Review of Cloud Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects*. Boulder, Colorado: The National Center for Atmospheric Research (NCAR). Retrieved from <http://caos.iisc.ernet.in/cloudseed.pdf>
- Haryanto, U., Goenawan R. D. and Harsanti D. (2013). *The Development of Hygroscopic Cloud Seeding Flare In Indonesia: Evaluation and Measurement of Distribution Particles. An actualization*. Jakarta, Indonesia: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Retrieved from http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Haryanto_Indonesia_paper_1.pdf
- Medina J. G., Rasmussen R. M., Dennis A. S. and Silverman, B. A. (1989). *Applied Atmospheric Resources Research Program in Thailand*. Interim Scientific Report Submitted to the U.S. Agency for International Development Under Participating Agency Service Agreement No. ANE-0337-P-12-0821-00, 134pp. Denver: Bureau of Reclamation.

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University