การใช้พลุสารดูดความชื้นที่มีผลต่อลักษณะเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัส

The Effects of Hygroscopic Flares on Characteristics of Cloud Physics at the Cumulus Cloud Base

หนึ่งหทัย* 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 อย่างไรก็ดี การใช้พลุสารดูดความชื้นทั้งสองสูตรช่วยกระตุ้นเร่งเร้าการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำได้ดีกว่าปล่อยให้เม็ดน้ำเพิ่มขนาดเองตามธรรมชาติ

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 $CaCl_2$ 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 $CaCl_2$ 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 $CaCl_2$ 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 แต่มักจะประสบปัญหาขาดแคลนน้ำโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 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 จะเพิ่มปริมาณแกนกลั่นตัวของเม็ดน้ำ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการควบแน่น (ประเสริฐ อังสุรัตน์ และทรง กลิ่นประทุม, 2539) ทั้งนี้ สารโซเดียมคลอไรด์จะเป็นสารเคมีที่ดูดซับความชื้นแล้วมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิน้อยมาก จึงใช้ทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัวแบบสารละลายเข้มข้นเพียงอย่างเดียว แต่สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ดูดซับความชื้นแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็นตัวเร่งการไหลเวียนของอากาศภายในเมฆให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น และยังทำหน้าที่เป็นแกนกลั่นตัวแบบสารละลายเข้มข้นที่มีความไวในการดูดซับความชื้นที่ผิวสูง (สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร, 2544) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกสารเคมีทั้งสองสูตรนี้มาใช้ผลิตเป็นพลุสารดูดความชื้นมาเสริมการทำฝนด้วยสารชนิดผง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ทำให้ประสิทธิผลของการทำฝนดียิ่งขึ้น และทดสอบประสิทธิภาพพลุสารดูดความชื้นด้วยการใช้งานจริงกับเมฆคิวมูลัส โดยตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ติดตั้งบนเครื่องบินวิจัยที่ระดับฐานเมฆเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเมฆฟิสิกส์ภายในก้อนเมฆที่ระดับฐานเมฆที่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น ดังนั้น ผลการศึกษาครั้งนี้จะเป็นเครื่องมือหนึ่งในการช่วยตัดสินใจประยุกต์ใช้พลุสารดูดความชื้นแต่ละสูตรเสริมวิธีการทำฝนให้สอดคล้องกับขั้นตอนของการทำฝนตามตำราฝนหลวงพระราชทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

<u>เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์</u>

1. เครื่องบินที่ใช้

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

2. พลุสารดูดความชื้น ได้แก่ สูตรโซเดียมคลอไรด์ และ สูตรแคลเซียมออกไซด์

ภาพที่ 2 พลุสารดูดความชื้นติดตั้งบนแท่นบรรจุที่ติดตั้งบนเครื่องบิน AU-23 (หนึ่งหทัย ตันติพลับทอง, 2553)

3. เรดาร์ฝนหลวงตาคลี อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์

ภาพที่ 3 เรดาร์ตรวจวัดกลุ่มเมฆและฝน สถานีเรดาร์ฝนหลวงตาคลี (หนึ่งหทัย ตันติพลับทอง, 2553)

<u>การคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง</u> มีหลักเกณฑ์ดังนี้

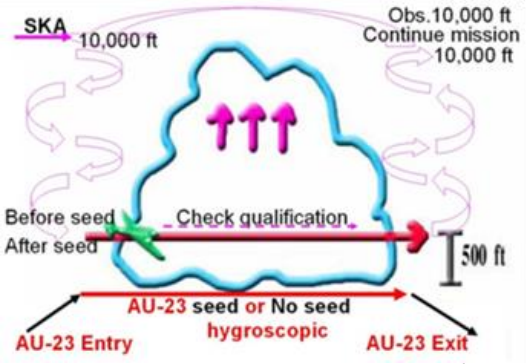
1. เป็นเมฆก้อนหรือเมฆคิวมูลัส (cumulus cloud; Cu) หรือเมฆสเตรโตคิวมูลัส (stratocumulus cloud; Sc) ที่กำลังเจริญเติบโต มีลักษณะเป็นเมฆค่อนข้างเดี่ยว ยังไม่มีฝนตกจากฐานเมฆ
2. ความสูงของยอดเมฆประมาณ 8,000 – 12,000 ฟุตจากระดับน้ำทะเลปานกลาง
3. มีค่ากระแสอากาศไหลขึ้นภายในเมฆไม่น้อยกว่า 300 ฟุตต่อนาที

4. มีค่าปริมาณน้ำภายในเมฆที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดปริมาณน้ำไม่น้อยกว่า 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5. ความกว้างของฐานเมฆก้อนหรือเมฆคิวมูลัส ตั้งแต่ 2 – 6 กิโลเมตร หรือเมฆสเตรโตคิวมูลัส ตั้งแต่ 5 – 10 กิโลเมตร

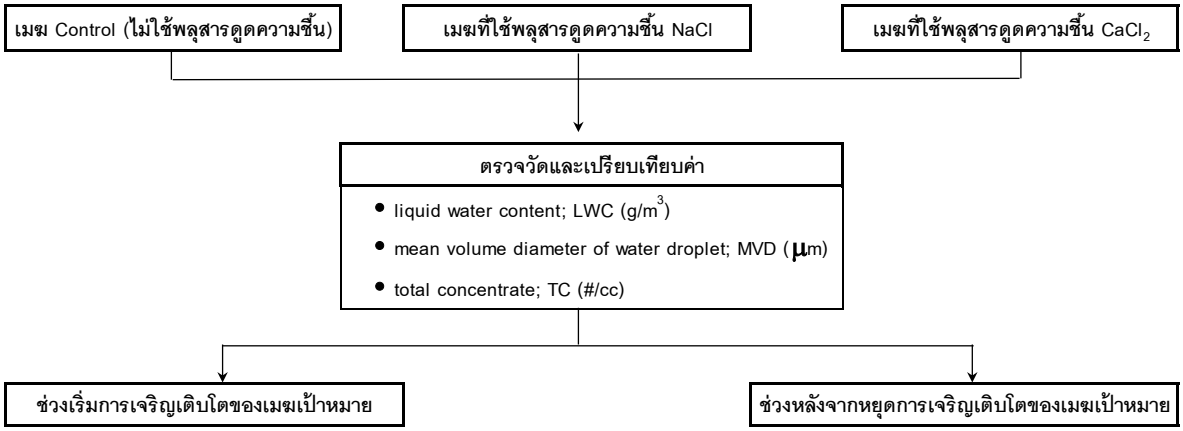
6. กลุ่มเมฆหน่วยทดลองต้องอยู่ในพื้นที่การตรวจวัดด้วยเรดาร์ฝนหลวงตาคลี อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ ในรัศมีไม่เกิน 160 กิโลเมตร

วิธีการบินวิจัย ตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆหรือเรียกว่า cloud base spectra โดยนักวิชาการบนเครื่องบิน Super King Air คัดเลือกกลุ่มเมฆจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของเมฆด้วยสายตาที่ระดับความสูง 10,000 ฟุต ทำการตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆก่อนการใช้พลุสารดูดความชื้น ตรวจสอบเงื่อนไขการคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง ตัดสินใจคัดเลือกเป็นกลุ่มเมฆทดลองเมื่อเครื่องบิน AU-23 ปล่อยควันพลุสารดูดความชื้นใต้ฐานเมฆ หลังจากเสร็จสิ้นภารกิจออกจากเมฆทดลองแล้ว จึงทำการตรวจวัดเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆหลังการใช้พลุสารดูดความชื้น



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

ซึ่งกล่าวคือ ผลของการใช้พลุก่อให้เกิดผลอย่างไรในการเจริญเติบโตของเมฆ สามารถเขียนเป็นแผนผังการเปรียบเทียบเมฆเป้าหมายที่กำลังเจริญเติบโตได้ดังนี้



ภาพที่ 5 แผนผังการเปรียบเทียบเมฆเป้าหมาย

ข้อมูลเมฆฟิสิกส์จากการตรวจวัดที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสเป็นข้อมูลทุติยภูมิก่อนและหลังการใช้พลุ สารดูดความชื้นในโครงการทดสอบประสิทธิภาพพลุสารดูดความชื้นเสริมการปฏิบัติการฝนหลวงเมฆอุ่น จำแนกหน่วยทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำแนกหน่วยทดลองของการทดสอบประสิทธิภาพพลุสารดูดความชื้น

หน่วยทดลอง	control	seed NaCl	seed $CaCl_2$
	1	3	4
	2	3	5
จำนวนรวม	3	6	9

กลุ่มเมฆที่ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น หรือ กลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) เป็นหน่วยทดลองที่เป็นตัวแทนกลุ่มเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ โดยทำการคัดเลือกกลุ่มเมฆหน่วยทดลอง control ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับกลุ่ม ที่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น จึงต้องมีการตรวจวัดตัวแทนข้อมูลช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย การปฏิบัติกับหน่วยทดลอง control มีลักษณะเช่นเดียวกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ หรือ seed NaCl และกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ หรือ seed $CaCl_2$ ทุกประการ แต่จะไม่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น เพื่อให้กลุ่มเมฆเจริญเติบโตตามธรรมชาติ เมื่อหน่วยทดลองเริ่มหยุดการเจริญเติบโต เช่น ยอดเมฆเริ่มยุบตัวลง หรือเริ่มมีฝนตก จึงจะทำการบินตรวจวัดอีกครั้งสำหรับใช้เป็นตัวแทนข้อมูลช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย เพื่อให้มีข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆธรรมชาติสำหรับเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่ใช้พลุสารดูดความชื้น

การวิเคราะห์ข้อมูลเมฆฟิสิกส์ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดอนุภาคเม็ดน้ำ (Forward Scattering Spectrometer Probe; FSSP) ได้แก่ ปริมาณน้ำ (liquid water content; LWC (g/m^3)), ขนาดของเม็ดน้ำ (mean volume diameter of water droplet; MVD (μm)) และ ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ (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

โดยหาค่าเฉลี่ยของผลต่างจากการใช้พลุสารดูดความชื้น และทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย ด้วยวิธี paired–samples t-test และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลการใช้พลุสารดูดความชื้นแต่ละชนิดด้วยวิธี independent samples t-test

1. เปรียบเทียบข้อมูลช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายด้วยวิธี paired–samples t-test

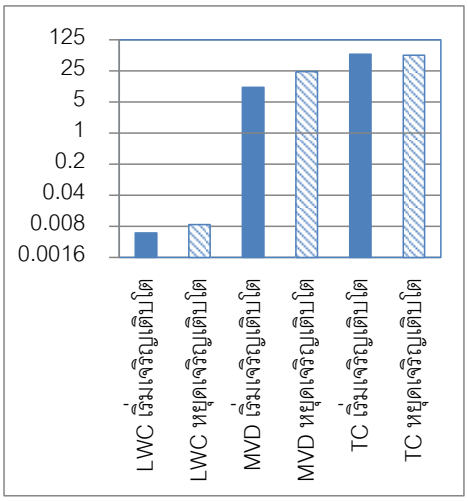
1.1 เปรียบเทียบข้อมูลเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) จำนวน 3 หน่วยทดลอง

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ กลุ่มเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) แต่จะมีการตรวจวัดคุณสมบัติของเมฆภายใต้เงื่อนไขการคัดเลือกหน่วยทดลองเช่นเดียวกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสารดูดความชื้น เพื่อให้หน่วยทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกันสำหรับนำมาใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางเมฆฟิสิกส์กับกลุ่มที่ใช้พลุสารดูดความชื้นมีค่าเฉลี่ยดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น)

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 (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) ซึ่งเป็น**กลุ่มเมฆธรรมชาติ** ที่มีกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกัน หรือกรรมวิธีของฝนในเขตร้อน (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 4, 2549) โดยอาศัยแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติ ทำให้ขนาดของเม็ดน้ำใหญ่ขึ้น และปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันขนาดของเม็ดน้ำที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำและปริมาณน้ำที่ฐานเมฆลดลง เปรียบเทียบดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired–samples t-testของเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น)

Paired Samples Test

Paired Samples Test		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Lower	95% Confidence Upper			
LWC	เริ่ม-หลังหยุดการเจริญเติบโต	-.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 (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 0.00316667 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3) ค่าเฉลี่ยเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 13.5333 ไมครอน แต่มีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลง 2.6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร (#/cc) จากการทดสอบสมมติฐานทางสถิติปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆ Control (ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้น) นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

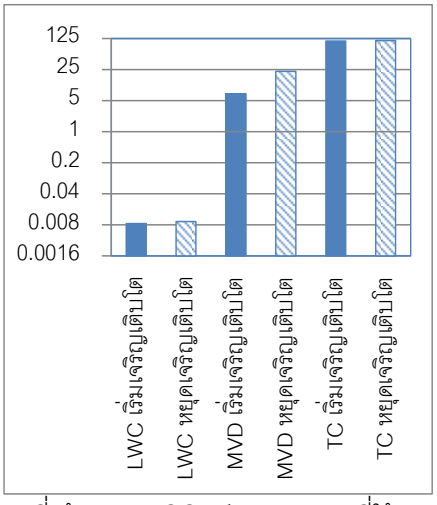
1.2 เปรียบเทียบข้อมูลเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 6 หน่วยทดลอง

ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำระหว่างช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์

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 **กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์** (NaCl) พบว่า หลังจากใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนขนาดของเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติ โดยในขณะที่เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น ไม่ได้ส่งผลกระทบทำให้ปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลงแต่อย่างใด แสดงว่า พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์เป็นแกนกลั่นตัวที่ดี ช่วยให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนกระทั่งเกิดการข้ามขั้นตอนกลายเป็นเม็ดน้ำขนาดใหญ่ โดยสูญเสียปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำน้อยมาก ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired–samples t-test ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์

Paired Samples Test

Paired Samples Test		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Lower	95% Confidence 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 **กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์** (NaCl) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 0.000955 g/m^3 ค่าเฉลี่ยเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 15.7167 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำเพิ่มขึ้น 2.75 #/cc เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

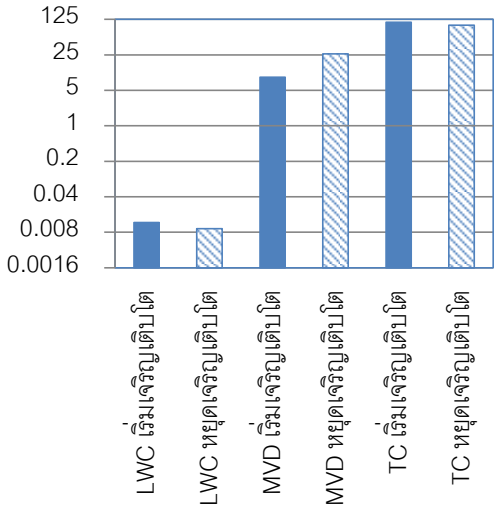
1.3 เปรียบเทียบข้อมูลกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) จำนวน 9 หน่วยทดลอง

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมาย ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ก่อนใช้กับหลังใช้พลุสารดูดความชื้นของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

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 **กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์** ($CaCl_2$) พบว่า หลังจากใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ช่วยเร่งให้เกิดกระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกัน ขนาดของเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีที่สุด ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและพลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ แต่ในขณะที่เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลทำให้ปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลงมากกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและพลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ แสดงว่า พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นได้ดี ช่วยให้กระบวนการชนกันแล้วรวมตัวกันจนกระทั่งเกิดการข้ามขั้นตอนกลายเป็นเม็ดน้ำขนาดใหญ่ได้ดีที่สุด



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

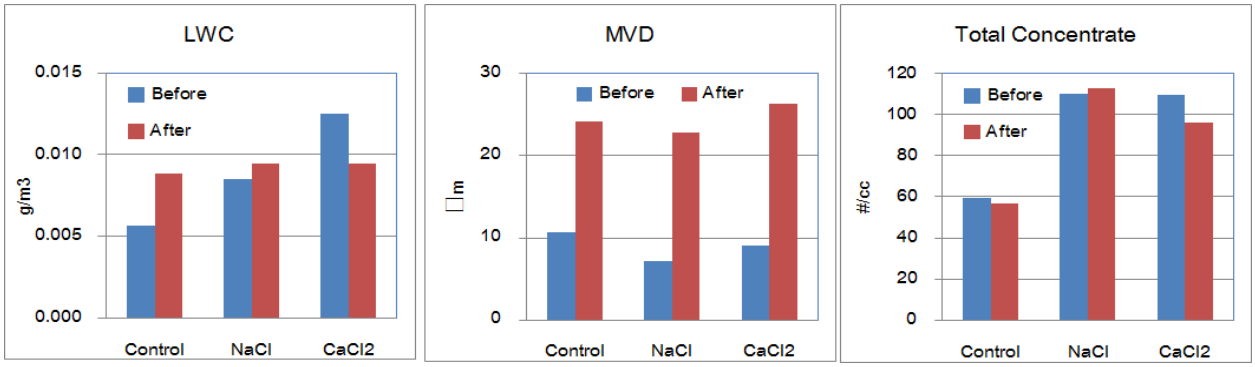
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี paired–samples t-test ของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

Paired Samples Test

Paired Samples Test		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Lower	95% Confidence 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 **กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์** ($CaCl_2$) มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำลดลง 0.00309 g/m^3 ค่าเฉลี่ยเม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น 17.2111 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลง 13.1 #/cc เนื่องจากขนาดเม็ดน้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มเมฆที่ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้นหรือเมฆธรรมชาติประมาณ 3.7 ไมครอน และขนาดเม็ดน้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มเมฆที่ใช้พลุสารดูดความชื้นโซเดียมคลอไรด์ประมาณ 1.5 ไมครอน จึงมีส่วนทำให้ปริมาณความเข้มข้นลดลงมากกว่ากลุ่มเมฆธรรมชาติและกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ปรากฏว่า ค่าเฉลี่ยขนาดของเม็ดน้ำช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) มีค่าแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ แต่ปริมาณน้ำและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายที่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น ปรากฏว่าที่ระดับฐานเมฆของกลุ่มเมฆ ที่ไม่ใช้พลุสารดูดความชื้นหรือกลุ่มเมฆธรรมชาตินั้น มีปริมาณน้ำสูงขึ้น และปริมาณน้ำสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ ในขณะที่กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์มีขนาดเม็ดน้ำใหญ่ขึ้นมากกว่ากลุ่มอื่น ส่วนกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ มีปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำขนาดเล็กมากสูงขึ้นในขณะที่กลุ่มอื่นปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำลดลง แสดงว่าพลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ดูดซับความชื้นหรือไอน้ำแล้วเกิดการเร่งการเจริญเติบโตของเม็ดน้ำข้ามขั้นตอนได้ดีกว่าแกนกลั่นตัวตามธรรมชาติและพลุสูตรโซเดียมคลอไรด์



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายของกลุ่มเมฆธรรมชาติ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ และกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

2. การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลเมฆฟิสิกส์ที่มีการใช้พลุสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธี independent samples t-test

2.1 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธี independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิสิกส์	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 ข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.2 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วย independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติกับกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิสิกส์	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 ข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆธรรมชาติ (control) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

ตารางที่ 10. ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วย independent samples t-test ระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์กับกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์

ข้อมูลเมฆฟิสิกส์	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 ข้อมูลเมฆฟิสิกส์ช่วงเริ่มการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายกับช่วงหลังจากหยุดการเจริญเติบโตของเมฆเป้าหมายระหว่างกลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับ กลุ่มเมฆที่ใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) มีค่าเฉลี่ยผลต่างของปริมาณน้ำ ขนาดของเม็ดน้ำ และปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำ ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

วิจารณ์ผล

1.1 การใช้พลุสารดูดความชื้นในการทำฝน

การดัดแปรสภาพอากาศโดยใช้พลุสารดูดความชื้น เพื่อขยายการกระจายของหยดเมฆ และเร่งกระบวนการรวมตัวกันของเม็ดน้ำ การทดลองของ Cooper และคณะ ในปี ค.ศ. 1997 โดยใช้พลุเผาไหม้ให้อนุภาคแกนกลั่นตัวของเมฆขนาดใหญ่ เพื่อให้เมฆมีการเจริญเติบโตและช่วยกระตุ้นให้แกนกลั่นตัวที่มีขนาดใหญ่ยับยั้งแกนกลั่นตัวธรรมชาติที่มีขนาดเล็ก โดยการข้ามขั้นตอนการเกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ในเมฆให้เกิดเร็วขึ้นภายในเวลา 15 นาที ถือว่าเร็วกว่าวงจรชีวิตของการเกิดเม็ดน้ำภายในเมฆคิวมูลัสตามธรรมชาติ โดยทั่วไปจะใช้ระยะเวลา 30 นาที (Bruintjes R. T.,1999) โดยพลุสารดูดความชื้นที่ผลิตใช้ในแต่ละประเทศ 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 (ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอาวุธกองทัพอากาศ, 2555)

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงลักษณะเมฆฟิสิกส์ของเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสเท่านั้น ซึ่งผลการใช้พลุสารดูดความชื้นทั้งสูตรโซเดียมคลอไรด์และสูตรแคลเซียมคลอไรด์ของประเทศไทยคล้ายคลึงกับการทดลองในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศแอฟริกาใต้ คือ สามารถเร่งกระบวนการรวมตัวกันของเม็ดน้ำ ทำให้มีเม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้น พลุเผาไหม้ให้อนุภาคของสารดูดความชื้นเป็นแกนกลั่นตัวของเมฆ ช่วยกระตุ้นให้เกิดหยดเมฆ เร่งเร้าให้เกิดการข้ามขั้นตอนกระบวนการการเกิดเมฆและกระบวนการเพิ่มขนาดเม็ดน้ำในเมฆด้วย

1.2 ข้อค้นพบเด่นจากการใช้พลุสารดูดความชื้น

พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเมฆฟิสิกส์ที่ระดับฐานเมฆคิวมูลัสหลังจากใช้พลุสารดูดความชื้นทั้งสองสูตรช่วยให้เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ดีกว่ากลุ่มเมฆที่เติบโตตามธรรมชาติ *โดยเฉพาะขนาดของเม็ดน้ำเมื่อใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์เป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะทำให้เกิดเม็ดน้ำที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ* แสดงให้เห็นว่า การใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์ทำให้เม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้นนั้น เกิดจากการรวมตัวกันและข้ามขั้นตอนจนมีเม็ดน้ำขนาดใหญ่ในเมฆเร็วขึ้นเร็วกว่าการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

พลุสารดูดความชื้นสามารถให้อนุภาคสารดูดความชื้นที่มีรัศมีของอนุภาคอยู่ระหว่าง0.1 – 1.0 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้น จึงใช้เป็นแกนกลั่นตัวของเมฆได้อย่างดี และมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารสูตรแกนกลั่นตัวของเมฆเสริมการปฏิบัติการทำฝนได้เป็นอย่างดีในขั้นตอนที่ 1 ก่อกวนหรือก่อเมฆ

เพื่อกระตุ้นและเร่งให้ไอน้ำในอากาศเกิดกระบวนการควบแน่น รวมตัวกลายเป็นหยดเมฆได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ ควรนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวางแผนปฏิบัติการฝนหลวงให้เหมาะสมกับสภาพอากาศ สภาพภูมิประเทศ รวมทั้งเครื่องบินที่ใช้การโปรยสารพลุสารดูดความชื้นด้วย

1.3 ความแตกต่างหรือสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ

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

สรุปผลการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบกับเมฆที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติที่ไม่มีการใช้พลุสารดูดความชื้น พบว่า การใช้พลุสูตรแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้เกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และช่วยให้เม็ดน้ำมีขนาดใหญ่กว่าการใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์ แต่การใช้พลุสูตรโซเดียมคลอไรด์จะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในเมฆและช่วยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำได้ดีกว่า จึงมีความเหมาะสมในการใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรแคลเซียมคลอไรด์กระตุ้นและเร่งประสิทธิภาพการเพิ่มขนาดเม็ดน้ำที่ระดับฐานเมฆ หากต้องการเพิ่มปริมาณน้ำและปริมาณความเข้มข้นของเม็ดน้ำก็ควรใช้พลุสารดูดความชื้นสูตรโซเดียมคลอไรด์ อย่างไรก็ดี การใช้พลุสารดูดความชื้นทั้งสองสูตรจะช่วยกระตุ้นเร่งเร้าการเพิ่มขนาดของเม็ดน้ำได้ดีกว่าปล่อยให้เม็ดน้ำเพิ่มขนาดเองตามธรรมชาติ

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). *สถานภาพการใช้ คุณสมบัติของสารเคมีในคณะปฏิบัติการ และความรู้ ทัศนคติในการปฏิบัติการของนักวิชาการฝนหลวง*. กรุงเทพมหานคร: สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร

ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอาวุธกองทัพอากาศ. (2555). *โครงการความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฝนหลวงสำนักฝนหลวงและการบินเกษตรกับกองทัพอากาศไทย*. กรุงเทพมหานคร: กองทัพอากาศไทย.

สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร. (2547). *เป็นฝนสู่ประชา จากบิดาของแผ่นดิน*. กรุงเทพมหานคร:สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร. (2544). *พระบิดาแห่งฝนหลวง*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

หนึ่งหทัย ตันติพลับทอง. (2553). *สรุปการปฏิบัติการเมฆฟิสิกส์โครงการวิจัยและพัฒนาพลุสารดูดความชื้นเสริมการปฏิบัติการฝนหลวงเมฆอุ่น 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.