

นิพนธ์ต้นฉบับ

ผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากไฟป่า และการเผาชีวมวลต่อลักษณะ
ของฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

**Effect of forest fire and biomass-burning aerosols on rainfall characteristics
in the Upper-Northern Thailand**

วินัส ต่วนเครือ^{1*}นิพนธ์ ตั้งธรรม²Venus Tuankrua^{1*}Nipon Tangtham²¹ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

² ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Forestry Research Center, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: ffor.venus@gmail.com

รับต้นฉบับ 2 พฤษภาคม 2557

รับลงพิมพ์ 13 มิถุนายน 2557

ABSTRACT

Biomass burning in the northern Thailand probably provides strong input of aerosols into the atmosphere, with potential effects on cloud and rainfall, over an entire burning season. This research was focus on effect of biomass burning aerosols on clouds and rainfall using multiple regression analysis and AOT for indicating aerosol concentrations from satellite MODIS (Terra / Aqua) and AERONET station since 2003-2012. The results indicated that average AOT of the Northern Thailand showed the highest value in pre-monsoon season especially in March with 0.5 unitless and decreased in June to July. It corresponded with hotspot data were mostly occurring in pre-monsoon season. Furthermore, almost all of the aerosols that were found during monsoon season as the big particles, caused by salt spray combine with water vapor. In the other hand, almost all of the aerosols during pre-monsoon were the small particles which come from the black carbon caused by biomass burning. There was high positive relationship with rainfall with cloud water content (CWC) and cloud fraction (CF), but it was found that were negative relationship with aerosol optical thickness (AOT) and hotspot (HP). There was moderate relationship between rainfall amount with AOT, cloud fraction (CF), cloud water content (CWC) and hotspot (HP) in all provinces of the northern Thailand. It was noticed that in any year there were the high biomass burning aerosols which caused rain later than usual about 1-2 months.

Keywords: Biomass burning aerosols, Cloud, Rainfall, Upper-Northern Thailand

บทคัดย่อ

การเผาไหม้มวลชีวภาพทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุหลักของละอองลอยในบรรยากาศ (aerosols) มากขึ้นซึ่งอาจมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝน โดยเฉพาะในช่วงฤดูกลางฝน งานการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่ต่อเนื่อง และปริมาณน้ำฝนในบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม MODIS (Terra/Aqua) และข้อมูลจากสถานี AERONET ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003-2012 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในบรรยากาศ (AOT) มีค่าสูงสุดในฤดูก่อนมรสุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเดือนมีนาคมบริเวณจังหวัดเชียงราย พะเยาและแพร่ (เฉลี่ยประมาณ 0.5) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจุดความร้อนจากการเผาไหม้ (hotspot) และลดลงในเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงฤดูฝนจะพบอนุภาคละอองลอยขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่แต่ในช่วงฤดูก่อนมรสุมกับพบละอองลอยอนุภาคขนาดเล็กเกือบทั้งหมดซึ่งมาจากเขม่าควันไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ในช่วงนั้น ทั้งนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำฝน (R) มีความสัมพันธ์มากกับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) และปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) และจุดความร้อน (HP) ในทิศทางตรงกันข้ามของทุกจังหวัด การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแสดงให้เห็นว่าละอองลอยในบรรยากาศมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณน้ำฝนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้พบข้อสังเกตว่าในปีใดที่มีการเผาไหม้สูงซึ่งทำให้เกิดละอองลอยในบรรยากาศมากอาจส่งผลทำให้ฝนเริ่มตกช้ากว่าปกติประมาณ 1-2 เดือน

คำสำคัญ: ละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวภาพ, เมฆ, ปริมาณน้ำฝน, ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

คำนำ

การปล่อยมลพิษขึ้นสู่บรรยากาศจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจของมนุษย์ หลังปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วง 150 ปี ที่ผ่านมามีผลกระทบต่อระบบภูมิอากาศของโลก มลพิษดังกล่าวที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซเรือนกระจกและละอองลอยในบรรยากาศ (aerosols) โดย Haywood and Boucher (2000) ให้ความหมายของละอองลอย (aerosol) หมายถึงอนุภาคทั้งของแข็ง และของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศที่มีขนาดตั้งแต่ 0.001 ถึง 0.1 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามการเกิดได้แก่ ละอองลอยปฐมภูมิ (Primary aerosols) คือละอองลอยที่เกิดจากการปล่อยจากแหล่งกำเนิดโดยตรงเช่น เถ้าถ่านที่เกิดจากการกระทำของโรงงานอุตสาหกรรม อนุภาคเกลือทะเลที่มากจากการปลดปล่อยจากพื้นมหาสมุทร และฝุ่นดินที่เกิดจากการกระทำโดยลมบนพื้นดิน และละอองลอยทุติยภูมิ (secondary aerosols) คือละอองลอยที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของก๊าซในบรรยากาศเช่น ละอองลอยประเภทซัลเฟตที่เกิด

จากการปล่อยก๊าซซัลไฟด์โดยสิ่งมีชีวิตในทะเล และก๊าซซัลเฟอร์โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากซากพืชและซากสัตว์ Ackermann (1998) แบ่งละอองลอยออกเป็นละอองลอยที่ไม่ละลายน้ำเช่น เถ้าและละอองลอยที่ละลายน้ำได้ (water soluble) เช่น เกลือ (sea salts) ซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพันธ์เพิ่มขึ้น การที่ปริมาณของละอองลอยในบรรยากาศเพิ่มขึ้นส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบภูมิอากาศทั้งในด้านอุณหภูมิ สมดุลพลังงาน และปริมาณฝน ความรุนแรงของผลดังกล่าวขึ้นกับชนิดและปริมาณของละอองลอยในบรรยากาศ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ สำหรับบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นบริเวณที่มีการปล่อยละอองลอยในบรรยากาศ ขึ้นสู่บรรยากาศค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของโลก ทั้งนี้ เนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมและการเผาไหม้ชีวมวลต่างๆอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่งผลต่อเศรษฐกิจและสังคม เช่น กรณีควันไฟที่จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อเดือนมีนาคมปีพ.ศ. 2550 และ พ.ศ. 2555 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบภูมิอากาศของประเทศไทย

ในปัจจุบันองค์ความรู้เกี่ยวกับละอองลอยในบรรยากาศ ตลอดจนผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศต่อสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยยังมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะ หรือรูปแบบของละอองลอยในบรรยากาศบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยในอดีตโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม MODIS เพื่อวิเคราะห์ความแปรผันเชิงปริมาณ ชนิดและการกระจายเชิงพื้นที่ รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณละอองลอยในบรรยากาศกับเมฆ และปริมาณน้ำฝนเพื่อศึกษาผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

อุปกรณ์ และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้เลือกพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ตัวแทนแหล่งปล่อยละอองลอยจากไฟป่าและการเผาผลาญชีวมวลเนื่องจากมีรายงานปัญหาหมอกควันในช่วง 5-10 ปีที่ผ่านมาอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในช่วงฤดูก่อนมรสุม หรือฤดูร้อนส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงการเกิดเมฆ และฝนจนเกิดภาวะแห้งแล้งรุนแรงขึ้นได้ โดยงานวิจัยนี้กำหนดพื้นที่ศึกษาอยู่ระหว่างลองจิจูด 98 องศาตะวันออกไปจนถึงลองจิจูด 101 องศาตะวันออก และละติจูดที่ 17.5 องศาเหนือไปจนถึงละติจูดที่ 20 องศาเหนือ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 9 จังหวัดภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยได้แก่ จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงราย เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง พะเยา แพร่ น่าน และอุตรดิตถ์

การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูล และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต ได้แก่

1. ข้อมูลดัชนีละอองลอยในบรรยากาศรายวัน และรายเดือนจากภาพถ่ายจากดาวเทียม (Terra/ Aqua) MODIS คือ ค่าการสลายตัวของแสงจากละอองลอยในบรรยากาศ (Aerosol Optical Thickness; AOT) ตั้งแต่

พ.ศ. 2546 ถึง 2555 (ค.ศ. 2003-2012) โดยแปลงข้อมูลจากระบบพิกัดภูมิศาสตร์ GCS_WGS_1984 ซึ่งเป็นแสดงผลแบบละติจูด และลองจิจูด (ขนาด 0.5×0.5 องศา) เป็นระบบพิกัดภูมิศาสตร์ UTM: WGS_1984_UTM_Zone_47N ใช้โปรแกรม ARCGIS 9.3

2. ข้อมูลดัชนีละอองลอยในบรรยากาศรายวัน และรายเดือนจากสถานีภาคพื้นดิน (AERONET station) ในจังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ ค่าความขุ่นมัวของอากาศอันเนื่องมาจากละอองลอย (aerosol optical depth; AOD) และการแจกแจงขนาดของละอองลอยในบรรยากาศ (aerosol particle size distribution) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึง 2555 (ค.ศ. 2007-2012)

3. ข้อมูลตำแหน่งและจำนวนครั้งที่เกิดไฟป่า และการเผาผลาญชีวมวลรายวันจากภาพถ่ายดาวเทียม (Terra/ Aqua) MODIS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึง 2555 (ค.ศ. 2003-2012)

4. ข้อมูลสัดส่วนของเมฆ (cloud fraction; CF) ปริมาณน้ำในเมฆ (cloud water content; CWC) และปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) รายวัน จากภาพถ่ายดาวเทียม TRMM ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึง 2555

5. ข้อมูลฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) จากสถานีตรวจวัดข้อมูลมลพิษอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 ถึง 2555 (ค.ศ. 2005-2012)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ลักษณะ และความแปรผัน ของละอองลอยในอากาศทั้งปริมาณ และขนาดของละอองลอยในบรรยากาศเชิงพื้นที่ และเชิงเวลาโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ

1.1 วิเคราะห์ความแปรผันของปริมาณของละอองลอยในบรรยากาศเชิงพื้นที่ และตามฤดูกาลจากภาพถ่ายดาวเทียม MODIS (Terra/Aqua) โดยใช้ค่าการสลายตัวของแสงจากละอองลอยในบรรยากาศ (Aerosol Optical Thickness; AOT) เป็นตัวบ่งชี้ความเข้มข้นของปริมาณละอองลอยในบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน และตามฤดูกาลโดยแบ่งออกเป็นช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน-มกราคม) ฤดูร้อนมรสุม (กุมภาพันธ์-เมษายน) และฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม)

1.2 วิเคราะห์ขนาดละอองลอยในบรรยากาศ จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (AERONET station) ของสถานีจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้ตัวแปรการแจกแจง ขนาดของละอองลอยในบรรยากาศ (aerosol particle size distribution) โดยนำข้อมูลแบ่งออกเป็น ละอองลอยขนาดเล็ก (fine mode เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมครอน และละอองลอยขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ไมครอน (course mode) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของละอองลอยแต่ละประเภทเพื่อจำแนกชนิดของละอองลอยในบรรยากาศที่พบในบริเวณภาคเหนือตอนบน

2. วิเคราะห์ตำแหน่งและจำนวนจุดความร้อน (hotspot) จากการประมวลชีวภาพจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม MODIS เพื่อทราบการกระจาย และหาความสัมพันธ์ของละอองลอยในบรรยากาศกับปริมาณการเกิดไฟป่าในแต่ละช่วงเวลาเพื่อทราบแหล่งที่มาของ

ละอองลอยในบรรยากาศ

3. วิเคราะห์ความแปรผันของเมฆและปริมาณน้ำฝนรายวัน และรายเดือน โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม MODIS และ TRMM ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึง 2555 (ค.ศ. 2003-2012) ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (clouds water content; CWC) เมฆปกคลุมท้องฟ้า หรือ สัดส่วนเมฆในท้องฟ้า (cloud cover or cloud fraction) และปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) และจำแนกข้อมูลละอองลอย เมฆ และปริมาณน้ำฝนออกเป็น วันที่มีละอองลอยในบรรยากาศปกติ (non-hazy day) และวันที่มีการเผาหรือปล่อยละอองลอยอย่างเข้มข้น (polluted day) โดยเลือกวันที่มีจุดความร้อน (hotspot) ปรากฏขึ้น และวันที่มีฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) เกินค่ามาตรฐาน (มากกว่า 120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น (Table 1)

Table 1 Criteria of aerosol classification (based on Hotspot and PM_{10} data)

Factors	Criteria of aerosol classification	
	Normal day (Non-hazy day)	Burning day (Polluted day)
1) Hotspot number	Disappear	Appear
2) PM_{10}	< 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	> 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

4. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยละอองลอยในอากาศ เมฆ และปริมาณน้ำฝนโดยใช้สหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple correlations) เพื่อทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำฝน และทิศทางความสัมพันธ์

5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติของละอองลอยในอากาศ กับเมฆ และปริมาณน้ำฝน เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับคาดการณ์ผลกระทบจากละอองลอยในอากาศต่อปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) ดังแนวคิดต่อไปนี้

$$R = f \{AOT, APS, Hot, CF, CWC\}$$

เมื่อ AOT = Aerosol Optical Thickness (ไม่มีหน่วย)
 APS = Aerosol Particle Size (%)
 R = Rainfall amount (มิลลิเมตร)
 Hot = Hot spot (จุด)
 CF = Cloud fraction (ไม่มีหน่วย)
 CWC = Cloud water content (กรัม/ตารางเซนติเมตร)

ผลและวิจารณ์

การรายงานผลการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่ 1) การแปรผันเชิงพื้นที่และตามฤดูกาลของละอองลอยในอากาศ 2) การแปรผันของเมฆและปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือตอนบน และ 3) ความสัมพันธ์ของละอองลอยในอากาศ กับเมฆ และปริมาณน้ำฝน รวมถึงการคาดการณ์ผลกระทบของละอองลอยต่อปริมาณน้ำฝนรายละเอียดดังต่อไปนี้

การแปรผันเชิงพื้นที่และตามฤดูกาลของละอองลอยในอากาศบริเวณภาคเหนือตอนบน

การศึกษานี้ใช้ค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสง ซึ่งเป็นสมบัติเชิงแสงของละอองลอยในอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และความหนาแน่นของละอองลอย เมื่ออินทิเกรตค่าสัมประสิทธิ์การสัวลงของแสงที่ระดับความสูงต่างๆ ของชั้นบรรยากาศตั้งแต่ชั้นต่ำสุดคือติดกับพื้นโลกขึ้นไปจนถึงบรรยากาศชั้นบนสุด (top of atmosphere; TOA) ค่าความหนาของละอองลอยในอากาศที่มีผลต่อการมองเห็น (optical thickness) ละอองน้ำในบรรยากาศทำให้เมฆมีรูปแบบต่างๆ กัน และการดูดกลืนแสง การกระเจิงแสงแตกต่างกัน ค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศอื่นๆ ที่ไม่ใช่เมฆ (noncloud aerosols) ซึ่งเป็นคำจำกัดความของ “ค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ” (Aerosol Optical Thickness, AOT) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ข้อมูลค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม Terra/Aqua MODIS เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึง 2555 (ค.ศ. 2003-2012) เป็นตัวแปรบ่งชี้ความหนาแน่นของละอองลอยในอากาศ ถ้า AOT มีค่าสูง หมายถึงมีความหนาแน่นของละอองลอยในอากาศมาก การลดทอนของแสงเป็นไปได้มาก ซึ่งพบว่า AOT มีการแปรผันไปตามฤดูกาล และเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่ขึ้นกับปริมาณละอองลอยที่ถูกปล่อย และสภาพอากาศในบริเวณนั้น

การแปรผันเชิงพื้นที่ของละอองลอยในอากาศบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

ผลการศึกษาลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอยในอากาศบริเวณภาคเหนือตอนบนพบว่าค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) เฉลี่ยรายปีประมาณ 0.25 ซึ่งอยู่ในระดับน้อย แต่จะพบมากในเดือนมีนาคมเฉลี่ยประมาณ 0.63 แสดงว่าท้องฟ้ามีความขุ่นมัวมาก สอดคล้องกับค่าฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) ในเดือนมีนาคมเฉลี่ยมากกว่า 120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เกินมาตรฐาน) โดยในช่วงนี้พบว่าเป็นฤดูการเผาป่า และเผาซากพืชเกษตรอีกด้วย

เมื่อสังเกตลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของละอองลอยพบว่า บริเวณจังหวัดแพร่มีละอองลอยในอากาศเฉลี่ยทั้งปีมากที่สุด โดยมีค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) เท่ากับ 0.32 และพบว่าจังหวัดเชียงใหม่มีละอองลอยเฉลี่ยทั้งปีน้อยที่สุด (AOT=0.18) แต่เมื่อพิจารณาค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศรายเดือนแล้ว พบว่าละอองลอยเฉลี่ยรายเดือนมีปริมาณสูงสุดในเดือนมีนาคมในทุกจังหวัด โดยเฉพาะจังหวัดเชียงรายมีค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศมากที่สุด (AOT=0.79) และยังพบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่ละอองลอยในอากาศเฉลี่ยรายเดือนมีนาคมมีปริมาณน้อยที่สุด (AOT=0.47) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณจังหวัดเชียงราย พะเยาและแพร่ในช่วงตั้งแต่ปลายเดือนกุมภาพันธ์และมกราคมนั้นมีการเก็บเกี่ยวข้าวโพด หรือ อ้อย และเผาตอซังข้าวโพดเพื่อเตรียมพื้นที่เพื่อปลูกในรอบต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีปริมาณละอองลอยเฉลี่ยรายเดือนน้อยที่สุดในเดือนกรกฎาคม

การแปรผันตามฤดูกาลของละอองลอยในอากาศบริเวณภาคเหนือตอนบน

ผลการศึกษาพบว่า AOT มีค่าสูงในช่วงฤดูก่อนมรสุม (เดือนกุมภาพันธ์-เมษายน) เฉลี่ยทั้งภูมิภาคมีค่า

ประมาณ 0.491 มีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมโดยเฉพาะบริเวณจังหวัดเชียงราย พะเยาและแพร่เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่มีแนวความกดอากาศต่ำปกคลุมบริเวณภาคเหนือตอนบนทำให้อากาศร้อนเหนือพื้นผิวโลกยกตัวสูงขึ้นละอองลอยในอากาศจึงถูกพาขึ้นไปแขวนลอยในชั้นบรรยากาศชั้นล่างทำให้เกิดหมอกแดด (haze) ส่วนในช่วงฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม-ตุลาคม) ค่า AOT มีค่าน้อยลงค่าเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 0.186 ทั้งนี้เนื่องจากฝนที่ตกลงมาชะล้างเอาฝุ่นละอองลงมาด้วยจึงตรวจวัดได้น้อยลง ส่วนในช่วงฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายน-มกราคม) ค่า AOT เฉลี่ยทั้งปีมีค่าประมาณ 0.118 ซึ่งค่า AOT สูงสุดจะปรากฏในช่วงฤดูก่อนมรสุมมากที่สุดโดยเฉพาะบริเวณจังหวัดเชียงรายมีค่าประมาณ 0.79 แต่กลับพบว่าในช่วงฤดูหนาวก่อนหน้ามีค่า AOT น้อยกว่าในช่วงฤดูฝน

การแจกแจงขนาดของละอองลอยในอากาศ (Aerosol particle size distribution)

การวิเคราะห์การแจกแจงขนาดของละอองลอยในอากาศโดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดภาคสนามของสถานี AERONET ของจังหวัดเชียงใหม่ตั้งแต่ พ.ศ. 2550 ถึง 2555 (ค.ศ. 2007-2012) โดยพบว่าค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยทั้งหมด (total AOD) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยขนาดเล็ก (fine mode) และค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยทั้งหมด (total AOD) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยขนาดใหญ่ (coarse mode) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปริมาณละอองลอยทั้งหมดในช่วงก่อนฤดูมรสุมเป็นละอองลอยขนาดเล็ก และในทางกลับกันปริมาณละอองลอยทั้งหมดในช่วงฤดูฝนเป็นปริมาณละอองลอยขนาดใหญ่ จึงสรุปได้ว่า (Table 2) ละอองลอยขนาดเล็กมีอิทธิพลในช่วงฤดูก่อนมรสุม และละอองลอยขนาดใหญ่มีอิทธิพลมากในช่วงฤดูฝน

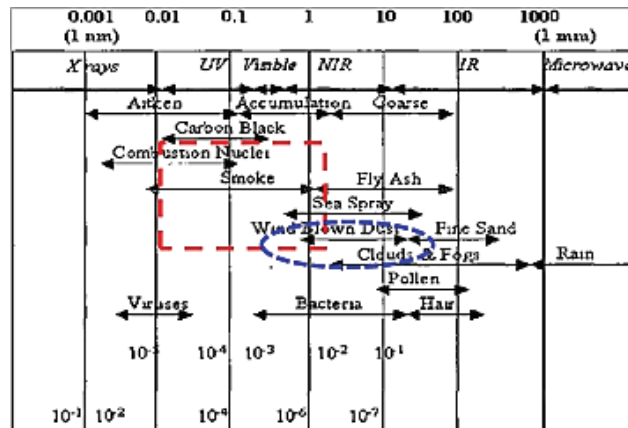
Table 2 Fine mode AOT and coarse mode AOT in different seasons.

Year	Fine Mode AOT			Coarse Mode AOT		
	Pre-Monsoon	Rainy season	Winter season	Pre-Monsoon	Rainy season	Winter season
2008	0.666	0.153	0.293	0.097	0.329	0.051
2009	0.763	0.128	0.333	0.103	0.230	0.050
2010	0.832	0.142	0.294	0.110	0.260	0.049
2011	0.519	0.132	0.344	0.069	0.199	0.039
2012	1.088	0.178	0.211	0.074	0.184	0.035

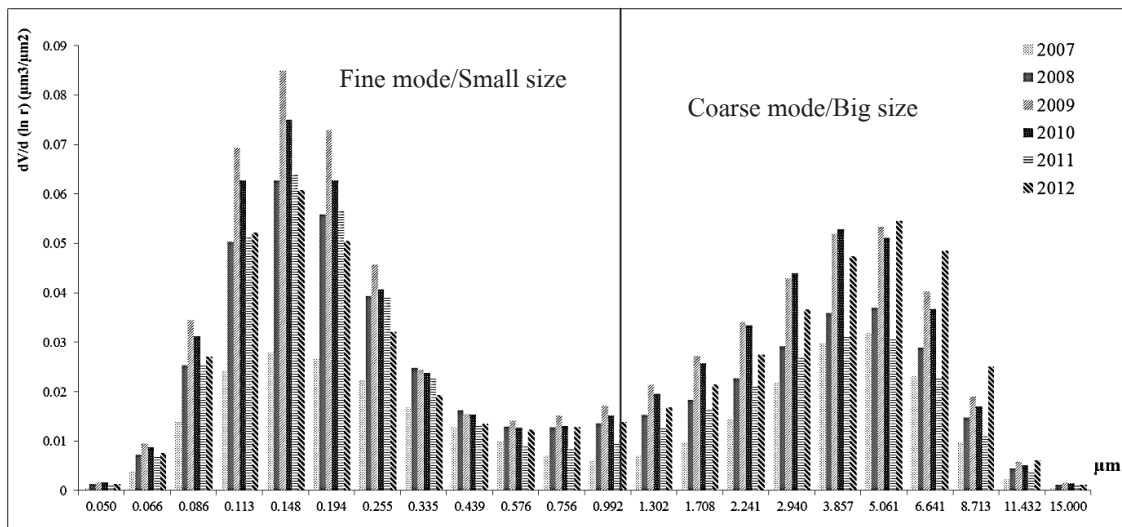
การจำแนกชนิด และแหล่งที่มาของละอองลอยในอากาศ

การกระจายขนาดของละอองลอยในอากาศเฉลี่ยทั้งปีในภาคเหนือตอนบน (Figure 1b) มีลักษณะการกระจายแบบ bimodal คือมียอดกราฟสูงสุด 2 จุดอย่างชัดเจนคือ แสดงยอดสูงสุดของละอองลอยขนาดเล็ก (fine mode) ขนาดอนุภาคประมาณ 0.14 ไมโครเมตร และยอดสูงสุดของละอองลอยขนาดใหญ่ (coarse mode) มีขนาดอนุภาคประมาณ 5.0 ไมโครเมตร มีรูปแบบการกระจายของละอองลอยใกล้เคียงกับการศึกษาของ Gautam *et al.* (2012) ที่ศึกษาลักษณะละอองลอยใน

แถบอินโดจีนช่วงก่อนฤดูมรสุมมีการกระจายละอองขนาดเล็กจากชุมชนเมือง และการเผาในพื้นที่เกษตร นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพการกระจายขนาดของอนุภาคละอองลอยของ Jaenicke (1993) พบว่าละอองลอยขนาดเล็กในจังหวัดเชียงใหม่ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.08-0.5 ไมโครเมตร มีขนาดใกล้เคียงกับเขม่าดำ (Black carbon) หรือควันไฟ (smoke) และละอองขนาดใหญ่ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1.3-8.7 ไมโครเมตรนั้นสามารถเป็นละอองลอยจากละอองเกลือ ขี้เถ้าลอย ละอองเกสร ฝุ่นทรายขนาดเล็ก และเมฆ หมอก (Figure 1a)



(a) Aerosol size distribution by Jaenicke (1993)



(b) Annual mean aerosol optical depths (AOD) over AERONET station from 2007 to 2012

Figure 1 Comparing aerosol size distribution by Jaenicke (1993) and aerosol particles size distribution observed over AERONET station during 2007 to 2012.

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดตามองค์ประกอบทางเคมีจากการศึกษาของ Li *et al.* (2013) อธิบายว่าองค์ประกอบเบื้องต้นที่มาจากดิน เช่น Ca^{2+} , Na^+ and Mg^{2+} มักพบในละอองลอยแบบหยาบหรือละอองลอยขนาดใหญ่ (Figure 3) และยังพบว่า K^+ ถูกพบอย่างเด่นชัดในละอองลอยขนาดเล็กและถูกปล่อยมาจากการเผาไหม้ชีวมวล แหล่งที่มาของโปแตสเซียมในน้ำฝน คือฝุ่นละอองจากเกลือทะเล การเผาไหม้ของสิ่งมีชีวิตและ

กระบวนการผลิตปุ๋ย O'Neill and Pownceby (1993) กล่าวว่าในน้ำทะเลมีปริมาณโปแตสเซียม 0.39 g dm^{-3} มากเป็นอันดับที่ 4 ของแคตไอออนที่มีอยู่ในน้ำทะเล Berner and Berner (1996) กล่าวว่าแหล่งที่มาของโปแตสเซียมในบรรยากาศบริเวณเหนือพื้นดินมาจาก 5 แหล่งด้วยกันคือ 1) การละลายของฝุ่น 2) ปุ๋ยที่มีส่วนผสมของโปแตสเซียมซึ่งปนเปื้อนอยู่ในดิน 3) เกสรดอกไม้ และ เมล็ดพันธุ์พืช 4) biogenic aerosols และ

5) การเกิดไฟฟ้าซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของพื้นที่ในเขตร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาความสอดคล้องกันกับ Figure 1b และ Figure 2 พบว่าละอองลอยขนาดเล็กซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 0.08-0.5 ไมครอนมีองค์ประกอบหลักเป็น K^+ ที่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งมาจากการเผาไหม้ชีวมวลและ

อาจเป็นสารประกอบพวก SO_4^{2-} สามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศประมาณ 5-12 วัน และกระจายไปได้ไกลได้ถึง 1,000 กิโลเมตร หรือสารประกอบ NH_4^+ สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศ 6 วัน และลอยไปได้ไกลถึง 5,000 กิโลเมตร ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหิน หรือน้ำมันเชื้อเพลิง

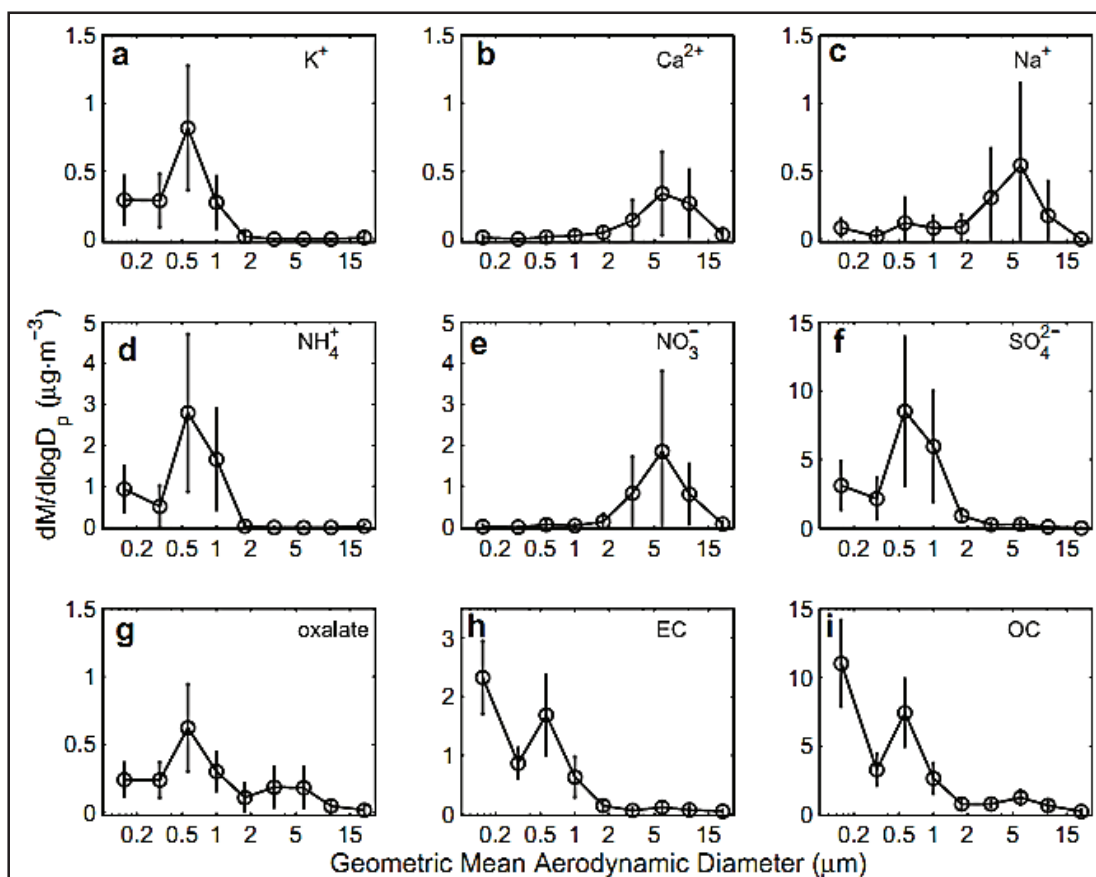


Figure 2 The average size distributions of different species.

Source: Li *et al.* (2013)

การวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดจุดความร้อน (hotspot) จากไฟฟ้า และการเผาไหม้ชีวมวล

จากข้อมูลจำนวนการเผาไหม้ชีวมวลบริเวณภาคเหนือตอนบนตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003-2012 พบว่าจำนวนครั้งของการเผาไหม้ชีวมวลบริเวณภาคเหนือตอนบนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีพบมากที่สุดที่จังหวัดเชียงใหม่ และ

จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยเฉพาะเดือนมีนาคมเนื่องจากมีไฟฟ้าเกิดขึ้นมากในช่วงนี้รวมทั้งการเผาซากผลผลิตในพื้นที่เกษตรเช่น คอซังข้าวโพด ซากอ้อย เป็นต้น แต่ในปี ค.ศ. 2011 ในทุกจังหวัดกลับมีจำนวนลดลงอย่างมากอาจเป็นเพราะมีโครงการรณรงค์ลดการเผาเพื่อลดหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน (Table 3)

Table 3 Average monthly hotspot (HP) during 2003 to 2012 in the different provinces.

Province	average monthly hotspot (HP) during 2003 to 2012											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mae Hong Son	14	235	1472	589	5	1	1	0	0	1	1	8
Chiang Mai	58	421	1227	356	7	1	0	1	1	1	5	46
Lamphun	49	201	136	12	2	1	1	1	1	1	1	8
Chiang Rai	81	286	797	263	6	1	1	1	2	1	5	59
Lampang	68	294	337	58	3	2	1	1	1	1	4	22
Phayao	36	108	226	79	4	1	1	0	0	1	1	18
Phrae	27	158	317	89	5	1	1	0	1	1	3	33
Nan	17	241	1352	331	5	1	0	0	1	0	3	7
Uttaradit	58	139	211	74	10	1	1	1	1	2	20	77
Northern Thailand	45	231	675	206	5	1	1	1	1	1	5	31

การแปรผันของเมฆและปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือตอนบน

การแปรผันของบางลักษณะของเมฆ และฝนในภาคเหนือตอนบนโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม MODIS และ TRMM ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003-2012 ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (clouds water content; CWC) เมฆปกคลุมท้องฟ้า หรือสัดส่วนเมฆในท้องฟ้า (cloud cover or cloud fraction) และปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) มีรายละเอียดมีดังนี้

ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (clouds water content; CWC)

ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ ในหน่วยของ [กรัม/ตารางเมตร] เป็นปริมาณน้ำของเหลวระหว่างสองจุดในบรรยากาศหรือต่อหน่วยพื้นที่ ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนพบว่าปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆพบมากที่สุดในเดือนสิงหาคมเฉลี่ยประมาณ 196 กรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยพบปริมาณสูงที่สุดบริเวณจังหวัดพะเยา และแพร่ และในเดือนธันวาคมมีปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆน้อยที่สุดเฉลี่ยประมาณ 90.1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเฉพาะจังหวัดลำปาง (Table 4a) โดยปริมาณน้ำในเมฆมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณน้ำฝน ซึ่งปริมาณน้ำในเมฆจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

ความเข้มข้นของเม็ดน้ำในเมฆ (droplet concentration) ความหนาแน่นของของเหลวในเมฆ (density of liquid water) ขนาดของเม็ดน้ำในเมฆ และชนิดของเมฆ

เมฆปกคลุมท้องฟ้า หรือสัดส่วนเมฆในท้องฟ้า (cloud cover or cloud fraction)

เมฆทั้งหมดที่มองเห็นชัดด้วยตาซึ่งปกคลุมท้องฟ้าอยู่บางส่วน มีค่าตั้งแต่ 0-1 พบว่าเมฆปกคลุมท้องฟ้าในภาคเหนือตอนบนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 0.71 หรือ 71% ของพื้นที่ท้องฟ้าในเดือนมิถุนายน โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดอุตรดิตถ์ และพบว่ามีเมฆปกคลุมท้องฟ้าน้อยที่สุดในเดือนมกราคมประมาณ 0.12 หรือ 12% โดยเฉพาะในจังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ และลำพูน (Table 4b)

ปริมาณฝน (rainfall amount)

ปริมาณฝนที่ตกสะสมในช่วงเวลาที่กำหนด (วันหรือเดือน) วัดเป็นความสูงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยในภาคเหนือตอนบนพบว่าปริมาณน้ำฝนสูงสุดในเดือนสิงหาคมประมาณ 300 มิลลิเมตร โดยเฉพาะจังหวัดพะเยา และแพร่ และพบปริมาณน้ำฝนต่ำสุดในเดือนธันวาคม โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดลำพูน และลำปาง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำในเมฆ (Table 4c)

Table 4 Average monthly cloud water content (CWC), average monthly cloud fraction (CF) and average monthly rainfall (RF) during 2003 to 2012 analyzed bound on MODIS and TRMM data.

Province	(a) Cloud water content (CWC); g/cm ²											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mae Hong Son	149.7	112.8	98.9	153.4	168.0	175.4	195.7	196.1	162.5	148.8	165.6	89.0
Chiang Mai	130.2	104.8	103.2	193.8	200.2	182.9	208.2	208.8	190.7	196.0	125.3	100.7
Lamphun	156.4	146.2	109.5	192.5	211.8	165.6	164.0	175.8	198.8	189.2	166.3	80.1
Chiang Rai	145.8	83.2	124.7	119.8	173.8	186.1	192.5	202.3	196.9	140.6	116.7	82.3
Lampang	80.5	108.4	112.5	114.5	179.6	143.7	166.7	183.6	174.2	195.6	106.5	71.9
Phayao	150.1	87.6	95.4	136.7	194.0	192.0	210.5	225.7	235.3	158.6	124.9	103.6
Phrae	101.6	98.9	161.9	105.4	172.2	168.7	207.9	220.1	212.8	165.0	147.2	86.6
Nan	115.5	135.1	95.5	125.6	191.6	156.1	168.7	178.9	186.9	190.7	118.2	113.6
Uttharadit	78.7	76.6	119.9	141.7	163.4	154.7	151.6	172.8	170.1	205.5	102.4	82.7

Province	(b) Cloud fraction (CF)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mae Hong Son	0.12	0.10	0.26	0.46	0.62	0.68	0.68	0.68	0.64	0.43	0.22	0.16
Chiang Mai	0.12	0.13	0.27	0.43	0.62	0.68	0.68	0.68	0.63	0.48	0.28	0.20
Lamphun	0.12	0.15	0.28	0.51	0.68	0.72	0.70	0.68	0.64	0.49	0.28	0.21
Chiang Rai	0.20	0.28	0.44	0.62	0.68	0.68	0.69	0.67	0.59	0.44	0.26	0.19
Lampang	0.20	0.32	0.44	0.61	0.70	0.72	0.68	0.68	0.61	0.47	0.27	0.19
Phayao	0.18	0.23	0.39	0.53	0.64	0.71	0.69	0.68	0.60	0.45	0.26	0.21
Phrae	0.23	0.25	0.40	0.59	0.68	0.68	0.70	0.68	0.61	0.49	0.29	0.24
Nan	0.16	0.20	0.32	0.50	0.65	0.73	0.69	0.67	0.64	0.49	0.29	0.21
Uttharadit	0.21	0.29	0.39	0.64	0.71	0.75	0.68	0.67	0.63	0.54	0.33	0.22

Province	(c) Rainfall amount (RF)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mae Hong Son	11.57	3.29	29.84	74.70	236.39	285.16	326.79	344.10	301.84	166.24	32.03	10.42
Chiang Mai	12.70	5.17	34.68	90.73	229.83	224.41	262.00	288.77	299.22	146.65	28.87	10.97
Lamphun	9.03	5.52	35.22	82.35	228.08	208.86	204.95	253.10	290.43	137.77	27.92	8.82
Chiang Rai	16.31	12.31	53.75	145.05	226.27	222.17	281.51	351.05	302.81	98.28	24.78	11.35
Lampang	11.27	11.21	40.75	110.62	235.38	238.83	219.80	268.72	308.34	119.13	21.02	9.25
Phayao	17.60	12.59	51.80	134.63	240.76	209.55	323.12	353.51	336.08	138.51	31.85	15.05
Phrae	17.50	11.23	53.79	133.26	232.62	203.90	288.47	345.16	325.92	131.63	29.92	11.44
Nan	10.64	8.43	41.03	104.65	232.00	182.86	203.48	254.99	304.79	128.46	27.42	10.31
Uttharadit	10.96	10.27	39.84	107.64	242.38	203.21	195.71	240.92	303.30	115.50	23.99	9.68

ความสัมพันธ์ของละอองลอยในอากาศ เมฆ และ ปริมาณน้ำฝน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างละอองลอย เมฆ และฝนโดยใช้ค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) เมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) ปริมาณน้ำฝน (R) และ จำนวนจุดความร้อน (HP) โดยอาศัยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple correlation) และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) รายละเอียดมีดังนี้

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ละอองลอยในอากาศ เมฆ และปริมาณน้ำฝนโดยใช้สหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple correlation)

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ เป็นการศึกษา ระดับ หรือขนาดของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง ตัวแปรสองตัวแปรว่ามีมากน้อยเพียงใด จากสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; r) (Cohen, 1988) แสดงให้เห็นว่าในทุกจังหวัดพบว่าปริมาณน้ำฝน (R) มีความสัมพันธ์มากกับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) และปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) และจุดความร้อน (HP) ในทิศทางตรงกันข้าม (Table 5) นอกจากนี้พบว่าบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำพูน และ อุตรดิตถ์ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) ส่วนบริเวณเชียงราย ลำปาง พะเยา แพร่ และน่านพบว่า ปริมาณน้ำฝน (R) มีความสัมพันธ์มากที่สุดกับปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) นอกจากนี้พบว่าในเกือบทุกจังหวัดค่าการสัวลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) มีความสัมพันธ์มากกว่า 0.7 ไปในทิศทางเดียวกันกับจุดความร้อน (HP)

Table 5 Correlation between Aerosol Optical Thickness (AOT), cloud fraction (CF), rainfall, cloud water content (CWC) and hotspot (HP) during 2003 to 2012.

Province	Factors	Cloud Fraction	Rainfall	CWC	AOT	Hotspot	N
Chiang Mai	Cloud fraction	1	.474**	.382**	-.117	-.216*	120
	Rainfall	.474**	1	.471**	-.354**	-.385**	120
	CWC	.382**	.471**	1	-.125	-.254**	116
	AOT	-.117	-.354**	-.125	1	.724**	120
	Hotspot	-.216*	-.385**	-.254**	.724**	1	120
Mae Hong Son	Cloud fraction	1	.508**	.224*	-0.133	-0.152	120
	Rainfall	.508**	1	.320**	-.471**	-.349**	120
	CWC	.224*	.320**	1	-.229*	-.214*	114
	AOT	-0.133	-.471**	-.229*	1	.733**	120
	Hotspot	-0.152	-.349**	-.214*	.733**	1	120
Chiang Rai	Cloud fraction	1	.417**	.325**	.026	-.098	120
	Rainfall	.417**	1	.599**	-.331**	-.355**	120
	CWC	.325**	.599**	1	-.266**	-.296**	118
	AOT	.026	-.331**	-.266**	1	.803**	120
	Hotspot	-.098	-.355**	-.296**	.803**	1	120

Table 5 (continued)

Province	Factors	Cloud Fraction	Rainfall	CWC	AOT	Hotspot	N
Lamphun	Cloud fraction	1	.456**	.183	-.061	-.317**	120
	Rainfall	.456**	1	.284**	-.324**	-.429**	120
	CWC	.183	.284**	1	-.058	-.235*	109
	AOT	-.061	-.324**	-.058	1	.441**	120
	Hotspot	-.317**	-.429**	-.235*	.441**	1	120
Lampang	Cloud fraction	1	.399**	.329**	-.017	-.155	120
	Rainfall	.399**	1	.548**	-.389**	-.443**	120
	CWC	.329**	.548**	1	-.174	-.244**	115
	AOT	-.017	-.389**	-.174	1	.654**	120
	Hotspot	-.155	-.443**	-.244**	.654**	1	120
Phayao	Cloud fraction	1	.463**	.348**	.021	-.153	120
	Rainfall	.463**	1	.639**	-.261**	-.402**	120
	CWC	.348**	.639**	1	-.317**	-.497**	118
	AOT	.021	-.261**	-.317**	1	.713**	120
	Hotspot	-.153	-.402**	-.497**	.713**	1	120
Phrae	Cloud fraction	1	.437**	.286**	-.152	-.157	120
	Rainfall	.437**	1	.528**	-.413**	-.406**	120
	CWC	.286**	.528**	1	-.320**	-.196*	115
	AOT	-.152	-.413**	-.320**	1	.728**	120
	Hotspot	-.157	-.406**	-.196*	.728**	1	120
Nan	Cloud fraction	1	.430**	.307**	-.119	-.132	120
	Rainfall	.430**	1	.454**	-.362**	-.284**	120
	CWC	.307**	.454**	1	-.294**	-.337**	114
	AOT	-.119	-.362**	-.294**	1	.783**	120
	Hotspot	-.132	-.284**	-.337**	.783**	1	120
Uttharadit	Cloud fraction	1	.359**	.181	-.061	-.268**	120
	Rainfall	.359**	1	.353**	-.418**	-.511**	120
	CWC	.181	.353**	1	-.109	-.237*	112
	AOT	-.061	-.418**	-.109	1	.731**	120
	Hotspot	-.268**	-.511**	-.237*	.731**	1	120

Remarks: ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

นอกจากนี้พบข้อสังเกตที่สำคัญคือ ในปีที่มีจุดความร้อนจากการเผาชีวมวล (hotspot) และมี AOT สูง (เช่นใน ปีค.ศ. 2004 และ 2007) พบว่าบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยฝนจะเริ่มตกในปลาย

เดือนเมษายนหรือเดือนพฤษภาคม แต่ถ้าในปีนั้นมีจุดความร้อนจากการเผาชีวมวล (hotspot) และมี AOT เล็กน้อย (เช่นใน ปีค.ศ. 2003 และ 2011) จะสังเกตได้ว่าฝนจะเริ่มตกตั้งแต่ปลายเดือนกุมภาพันธ์หรือ

ต้นเดือนมีนาคม จึงอาจกล่าวได้ว่าในปีใดที่มีการเผาชีวมวลซึ่งทำให้เกิดละอองลอยในบรรยากาศมากน่าจะส่งผลทำให้ฝนเริ่มตกช้ากว่าปกติประมาณ 1-2 เดือน

สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยละอองลอยในอากาศเมฆ และปริมาณน้ำฝนโดยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis)

ผลจากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบ stepwise เพื่อเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยสำหรับคาดการณ์ผลกระทบจากปัจจัยละอองลอย และเมฆนั้นพบว่า ในเกือบทุกจังหวัด ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ และปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้ามีอิทธิพลทำให้น้ำฝนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นปัจจัยที่สนับสนุนให้มีหยดน้ำในเมฆมากขึ้นรวมทั้งเพิ่มการสะท้อน

แสง แต่ในทางกลับกันละอองลอยมีผลทำให้ปริมาณน้ำฝนลดลง ยกเว้นในจังหวัดพะเยาซึ่งเป็นพื้นที่ที่พบค่า AOT สูงเป็นอันดับต้นของภาคเหนือตอนบนทั้งนี้อาจเป็นเพราะปัจจัยอื่นๆ เช่น สภาพอากาศมีอิทธิพลมากกว่าและโดยทั่วไปในทุกจังหวัดสมการรีเกรสชันที่ได้สามารถอธิบายว่าความแปรปรวนของปัจจัยละอองลอย และปัจจัยเมฆสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนได้ในระดับปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่ามีความเป็นไปได้ที่เมื่อละอองลอยเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ปริมาณน้ำฝนในปีนั้นลดลงประมาณ 10.78 ± 29.73 มิลลิเมตรซึ่งสังเกตได้ว่าในจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีแนวโน้มว่าจะมีปริมาณน้ำฝนลดลงมากที่สุด (Table 6)

Table 6 Relationship between aerosols, clouds and rainfall using multiple regressions.

Province	Equations (relationships)	r
Mae Hong Son	$R = 124.92 - 297.323AOT + 167.671CF$	0.636
Chiang Mai	$R = 41.086 + 0.469CWC - 171.315AOT + 105.994CF$	0.625
Chiang Rai	$R = -7.269 + 0.873CWC - 111.503AOT + 106.352CF$	0.675
Phrae	$R = 35.112 + 0.016CWC - 169.391AOT + 107.556CF$	0.643
Phayao	$R = -47.78 + 0.958CWC + 107.89CF$	0.688
Uttaradit	$R = 91.034 + 0.325CWC - 219.898AOT + 86.67CF$	0.578
Nan	$R = 33.678 + 0.480CWC - 108.367AOT + 97.083CF$	0.580
Lampang	$R = 24.988 + 0.765CWC - 185.200AOT + 86.136CF$	0.665
Lamphun	$R = 77.378 + 0.100CWC - 195.406AOT + 117.317CF$	0.537

สรุป

การศึกษาผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากไฟฟ้า และการเผาชีวมวลต่อลักษณะของฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแปรผันของละอองลอยในบรรยากาศ (aerosol) โดยใช้ค่าการสัณฐานของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม Terra/Aqua MODIS เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 ถึง 2012 พบว่า ค่าการสัณฐานของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) ทั้งภาคเหนือตอนบนมีเฉลี่ยค่าสูงสุด

ประมาณ 0.491 ในช่วงฤดูก่อนมรสุมโดยเฉพาะในเดือนมีนาคมบริเวณจังหวัดเชียงราย พะเยาและแพร่สอดคล้องกับจำนวนจุดความร้อนจากการเผาชีวมวล (hotspot) บริเวณภาคเหนือตอนบนพบมากที่สุดในเดือนมีนาคมเฉลี่ยประมาณ 675 จุด ซึ่งละอองลอยในบรรยากาศที่พบในช่วงฤดูก่อนมรสุมนี้มีความเป็นไปได้ที่มาจากจากการเผาชีวมวล

2. ละอองลอยในบรรยากาศขนาดเล็กมีอิทธิพลอย่างมากในช่วงฤดูก่อนมรสุม และละอองลอยขนาดใหญ่มีอิทธิพลมากในช่วงฤดูฝน และยังพบว่าอนุภาคละอองลอยที่พบในช่วงฤดูก่อนมรสุมมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับอนุภาคที่มาจากควันไฟ หรือเขม่าดำ (0.08-0.5

ไมโครเมตร) จึงมีความเป็นไปได้ที่อนุภาคละอองลอยในบรรยากาศในช่วงนี้เป็นละอองลอยที่มาจากการเผาไหม้ถ่าน

3. การวิเคราะห์ความแปรผันของเมฆ และปริมาณน้ำฝนในภาคเหนือตอนบนพบว่าปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) มีปริมาณสูงที่สุดในเดือนสิงหาคมเฉลี่ยประมาณ 196 กรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดพะเยา และแพร่ และพบในเดือนธันวาคมมีน้อยที่สุดเฉลี่ยประมาณ 90.1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนของภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยที่มีค่าสูงสุดในเดือนสิงหาคมประมาณ 300 มิลลิเมตร แต่สัดส่วนเมฆในท้องฟ้า (CF) ในภาคเหนือตอนบนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในเดือนมิถุนายนประมาณ 0.71 หรือ 71% ของพื้นที่ท้องฟ้า

4. จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝน กับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) ปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) ค่าการสลับลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) และจุดความร้อนจากการเผาไหม้ถ่าน (HP) พบว่า ในทุกจังหวัดปริมาณน้ำฝน (R) มีความสัมพันธ์มากกับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า (CF) และปริมาณน้ำที่เป็นของเหลวในเมฆ (CWC) ในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.284$ ถึง 0.639) และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่าการสลับลงของแสงจากละอองลอยในอากาศ (AOT) และจุดความร้อน (HP) ในทิศทางตรงกันข้าม ($r = -0.261$ ถึง -0.511)

5. จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณพบว่าความแปรปรวนของปัจจัยละอองลอยและปัจจัยเมฆสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนได้ในระดับปานกลาง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของละอองลอยในบรรยากาศมีผลทำให้ปริมาณน้ำฝนลดลง และการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในเมฆ และสัดส่วนของเมฆในท้องฟ้าจะทำให้ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับปานกลาง

คำนิยม

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้มอบทุนวิจัยสนับสนุน

จากทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2555 ภายใต้โครงการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2555 และขอขอบคุณ ศ.ดร.นิพนธ์ ตั้งจรัสกร ที่ท่านเป็นนักวิจัยที่ปรึกษาในโครงการนี้ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำในการวางแผนแนวทางการวิจัย การคิดวิเคราะห์ ตีความผลลัพธ์ และเขียนบทความตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

REFERENCES

- Ackermann, J. 1998. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosols: a numerical study, **J. Atmos. Ocean. Tech.** 15, 1043–1050.
- Berner, E.K. and R.A. Berner. 1996. **Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles**. Prentice Hall, New Jersey.
- Cohen, J. 1988. **Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.)**. Hillsdale, Lawrence Earlbaum Associates. New Jersey.
- Gautam, R., N. C. Hsu, T. F. Eck, B. N. Holben, S. Janjai, T. Jantarach, S.-C. Tsay and W. K. Lau. 2012. Characterization of aerosols over the Indochina peninsula from satellite-surface observations during biomass burning pre-monsoon season, **Atmos. Environ.**, doi:10.1016/j.atmosenv. 2012.05.038, in press.
- Haywood, J. M. and O. Boucher. 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review, **Rev. Geophys.** 38, 513–543.
- Jaenicke, R. 1993. Tropospheric aerosols in Aerosol-Cloud-Climate Interactions.

- P.V. Hobbs, **Academic Press**, San Diego.
- Li, C., S.-C. Tsay, N.C. Hsu, J.Y. Kim, S.G. Howell, B.J. Huebert, Q. Ji, M.-J. Jeong, S.-H. Wang, R.A. Hansell and S.W. Bell. 2013. Characteristics and composition of atmospheric aerosols in Phimai, Central Thailand during BASE-ASIA. **Atmospheric Environment** 78, 60-71.
- O'Neill, HSC and MI., Pownceby. 1993. Thermodynamic data from redox reactions at high temperatures. I. An experimental and theoretical assessment of the electrochemical method using stabilized zirconia electrolytes, with revised values for the Fe-“FeO”, Co-CoO, Ni-NiO and Cu-Cu₂O oxygen buffers, and new data for the W-WO₂ buffer. **Mineralogy and Petrology** 114 (3) 296-314.
-