

## ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สัมพันธ์ต่อการเกิดปัญหา มลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่

ชาคริต ไชติอมรศักดิ์<sup>1,2\*</sup> และดวงนภา ลากใหญ่<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์ภูมิภาคเพื่อการศึกษาด้านภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม และ <sup>2</sup>ภาควิชาภูมิศาสตร์  
คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

\*E-mail: chakrit.c@cmu.ac.th

รับบทความ: 20 เมษายน 2561 แก้ไขบทความ: 8 สิงหาคม 2561 ยอมรับตีพิมพ์: 31 ตุลาคม 2561

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สัมพันธ์ต่อปัญหาหมอกพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาซึ่งประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด ทิศทางและ ความเร็วลม ความกดอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ กับความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) ช่วงปี ค.ศ. 1998–2012 โดยวิธีทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์คือการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ผลการศึกษาพบว่าในช่วงที่เกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศอุณหภูมิสูงสุดรายวันมีความสัมพันธ์เชิงบวกในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดรายวันมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM10 ส่วนค่าความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และจำนวนวันฝนตกในช่วงฤดูปัญหาหมอกควันพบว่ามีความสัมพันธ์กับช่วงที่ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM10 มีค่าต่ำ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและทิศทางลมพบว่าช่วงที่ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM10 เกินค่ามาตรฐานมีความสัมพันธ์กับช่วงวันที่ความเร็วลมมีค่าต่ำ โดยความเร็วลมต่ำส่งผลต่อศักยภาพในการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศ ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดเชียงใหม่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะทำให้ความเร็วลมต่ำเอื้อต่อการสะสมของมลพิษภายในแอ่ง ในขณะที่ทิศทางลมพบว่าช่วงวันที่ค่าฝุ่น PM10 เกินมาตรฐาน ลมที่พัดส่วนใหญ่มาจากทิศใต้-ทิศตะวันตกของตัวเมืองเชียงใหม่ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่สูงและเป็นพื้นที่ที่มีการเผาชีวมวลจำนวนมาก ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดเชียงใหม่ ลมจึงสามารถพัดพาเอามลพิษจากบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดมลพิษมากดังกล่าวเข้าสู่แอ่งเชียงใหม่ นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าช่วงที่ความเข้มข้นของ PM10 มีค่าสูงมักเป็นช่วงที่มีความกดอากาศสูงแผ่มาปกคลุมจังหวัดเชียงใหม่

**คำสำคัญ:** ความสัมพันธ์ ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา มลพิษทางอากาศ เชียงใหม่

## Meteorological Factors Related to Air Pollution in Chiang Mai Province

Chakrit Chotamonsak<sup>1,2\*</sup> and Duangnapha Lapyai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Regional Center for Climate and Environmental Studies (RCCES) and <sup>2</sup>Department of Geography,  
Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

\*E-mail: chakrit.c@cmu.ac.th

Received: 20 April 2018 Revised: 8 August 2018 Accepted: 31 October 2018

### Abstract

This study aimed to study the meteorological factors related to air pollution in Chiang Mai province. The meteorological factors including rainfall, maximum and minimum temperature, wind speed and direction, sea level pressure and relative humidity were analyzed with the concentration of particulate matter less than 10 microns in diameter (PM10) during haze season (January–April) of the year 1998–2012. The statistical methods used in this study were linear regression and principal component analysis. The results showed that during the peak air pollution, the daily maximum temperature was positively correlated while the daily minimum temperature was negatively correlated with the PM10 concentration. Relative humidity, rainfall, and the number of rainy days were found to be negatively correlated with PM10 concentrations. The events that the concentration of PM10 beyond the national standard level were associated with the weak wind speed events. The topography of Chiang Mai was the basin characterized, which made the weak wind suitable for reduction dispersion potential and accumulation of pollutants within the basin. The wind direction that related to the above PM10 standard mostly blew from the south–west of Chiang Mai, where has been the highland and the large biomass burned area. Together with Chiang Mai topography, the wind could blow the pollutants from the burned area and accumulate in the basin. In addition, the results showed that high PM10 concentration events usually dominate when the high pressure had covered Chiang Mai province.

**Keywords:** Related, Meteorological factors, Air pollution, Chiang Mai

### บทนำ

จังหวัดเชียงใหม่เป็นพื้นที่ที่มีความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่อง-

จากตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ที่ประกอบด้วยภูเขาสลับซับซ้อนและเป็นแอ่งกระทะ มีสภาพทางอุตุนิยมวิทยาที่ซับซ้อนและมักประสบปัญหา

เกี่ยวกับมลพิษทางอากาศอยู่เป็นประจำ (Kreasuwan et al., 2008; 2009) โดยเฉพาะปัญหาหมอกพิษทางอากาศจากหมอกควันไฟป่าที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่เป็นอย่างมาก โดยช่วงที่เกิดปัญหาหมอกควันมักพบว่ามีความถี่เกี่ยวกับทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด เข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาลเพิ่มขึ้นและสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Rayanakorn et al., 2007) นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพแก่ประชาชนทั้งระยะสั้นและเรื้อรัง เนื่องจากฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยเฉพาะขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) สามารถสูดหายใจเข้าไปได้จนถึงระดับเซลล์ถุงลมปอดและสารมลพิษบางชนิดที่มากับฝุ่นขนาดเล็กสามารถทำลายดีเอ็นเอของเซลล์ถุงลมปอดได้ (Vinitchakumnuen et al., 2007) ทำให้ผู้ที่สูดฝุ่นละอองขนาดเล็กมีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งโดยเฉพาะมะเร็งปอดได้ (Pope et al., 2002) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอากาศในพื้นที่ ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านแหล่งกำเนิดควัน ปัจจัยด้านสภาพภูมิประเทศ และปัจจัยด้านสภาพทางอุตุนิยมวิทยา เนื่องจากช่วงเดือนมกราคม-เมษายน จังหวัดเชียงใหม่มักมีการเผาชีวมวลจำนวนมาก และช่วงดังกล่าวอากาศมักมีเสถียรภาพ (air stability) และเกิดอุณหภูมิผกผัน (temperature inversion) ทั้งอุณหภูมิผกผันที่พื้นผิว (surface inversion) และอุณหภูมิผกผันที่ระดับสูง (aloft inversion) ส่งผลให้การแพร่กระจายของมลพิษในแนวตั้งเกิดขึ้นยาก ทำให้เกิดการสะสมความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กที่บริเวณผิวพื้นและในแอ่ง (Kreasuwan et al., 2008; Whiteman, 2000, 2004; Silcox, 2012; Zhong et al., 2004) จากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้น ปัจจัยทาง

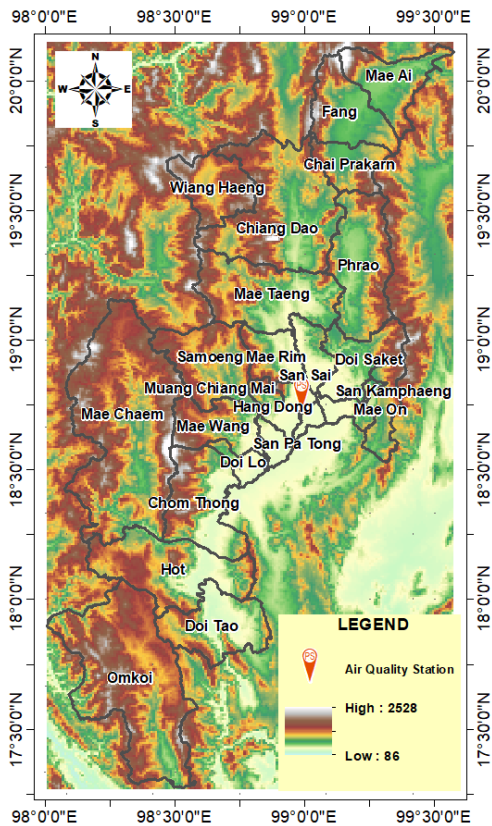
ภูมิประเทศ เป็นปัจจัยคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนปัจจัยด้านแหล่งกำเนิดควัน สามารถควบคุมหรือลดจำนวนได้ เมื่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีกฎเกณฑ์ ข้อบังคับ และบทลงโทษที่ชัดเจน ขณะที่ปัจจัยด้านสภาพทางอุตุนิยมวิทยา เป็นปัจจัยเดียวที่ไม่สามารถควบคุมได้ สภาพอากาศได้รับอิทธิพลจากปัญหาภาวะโลกร้อนทำให้เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและแปรปรวนแตกต่างกันไปในแต่ละฤดูกาล (Dawson et al., 2009; Jacob and Winner, 2009; Pasch et al., 2011) ดังนั้นการทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยากับปัญหาหมอกพิษทางอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อนำองค์ความรู้จากการศึกษาวิจัยมาใช้เป็นประโยชน์ในการวางแผนรับมือ ป้องกัน และควบคุมมลพิษทางอากาศ เพื่อสุขภาพที่ดีของประชาชนในพื้นที่

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. พื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงใหม่

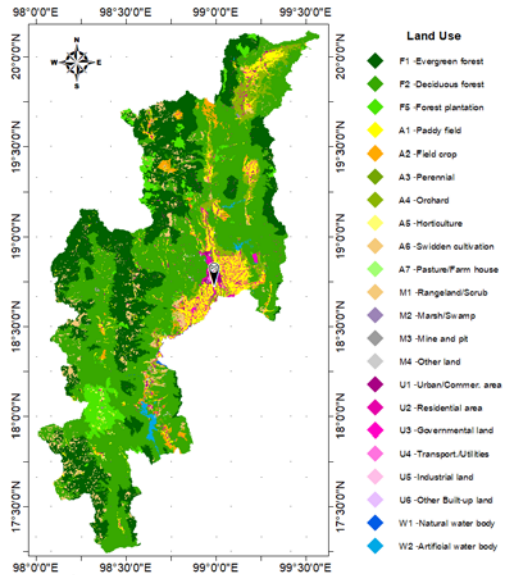
1.1 ลักษณะภูมิประเทศ และการใช้ที่ดิน: จังหวัดเชียงใหม่มีภูมิประเทศแบบที่สูงและภูเขาสลับกับหุบเขาหรือแอ่งที่ราบระหว่างภูเขาติดต่อกัน มีระดับความสูงของภูมิประเทศแตกต่างกันมาก ตั้งแต่ประมาณ 100–2,500 เมตร (ภาพที่ 1) ระดับความสูงที่แตกต่างส่งผลต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินที่หลากหลาย (ภาพที่ 2) ส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 80 เป็นการใช้ที่ดินประเภทป่าและการเกษตร พื้นที่ป่า ประกอบด้วย ป่าผลัดใบ ป่าไม่ผลัดใบ ป่าปลูก ส่วนพื้นที่เกษตร ประกอบด้วย พื้นที่นา พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล พืชสวน ไร่หมุนเวียนทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนสำหรับการใช้ที่ดินประเภทป่าผลัดใบและพื้นที่เกษตร จะมีโอกาสเกิดเชื้อเพลิงจำนวนมากที่สุด

เนื่องจากการใช้ที่ดินทั้งสองประเภทก่อให้เกิดชีว-  
มวลจำนวนมากในช่วงฤดูแล้ง (มีนาคม-เมษายน)  
โดยเฉพาะพืชอายุสั้นประเภทข้าวโพดเลี้ยงสัตว์  
ที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมากในอำเภอแม่แจ่ม  
เชียงใหม่ ดอยเต่า พัว มีแนวโน้มขยายพื้นที่  
เพาะปลูกอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549-  
2553 พบว่า มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์  
เพิ่มขึ้น (หน่วยไร่) เป็น 89,909 126,378 130,725  
152,232, และ 179,859 (Dontree et al., 2014)



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงระดับความสูงเชิงตัวเลข  
(DEM) ของจังหวัดเชียงใหม่ ความละเอียด  
จุดภาพ 30 เมตร

ที่มา: Aster Global Digital Elevation Model



ภาพที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินจังหวัดเชียงใหม่  
ที่มา: ศูนย์ภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสาร-  
สนเทศ (ภาคเหนือ)

1.2 ภูมิอากาศ: จังหวัดเชียงใหม่มี  
สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน 3 ฤดู คือ ฤดูฝน  
ฤดูหนาว และฤดูร้อน โดยฤดูฝนจะเริ่มประมาณ  
กลางเดือนพฤษภาคมและสิ้นสุดในเดือนกันยายน  
หรือต้นเดือนตุลาคม ฤดูหนาวเป็นฤดูของมรสุม  
ตะวันออกเฉียงเหนือ เริ่มประมาณกลางเดือน  
ตุลาคมและสิ้นสุดประมาณเดือนกุมภาพันธ์ ช่วง  
ฤดูหนาวของจังหวัดในภาคเหนือมีลักษณะเด่น  
ชัดกว่าภาคอื่น เพราะอยู่ในแนวเคลื่อนที่ของ  
อากาศหนาวเย็นที่เคลื่อนที่จากเขตความกด  
อากาศสูงในไซบีเรียและผ่านประเทศจีน ส่วนฤดู  
ร้อนเริ่มต้นประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์และไป  
สิ้นสุดประมาณกลางเดือนพฤษภาคม ในเดือน  
กุมภาพันธ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเริ่มอ่อน  
กำลังลง ทำให้ลมตะวันออกเฉียงใต้จากทะเลจีน  
มีกำลังแรงขึ้นเป็นผลให้เกิดพายุฤดูร้อนขึ้นใน  
เป็นครั้งคราว (Chotamonsak and Lapyai, 2014)

ในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงต้นเดือนเมษายนของเกือบทุกปีสภาพอากาศในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ค่อนข้างแห้งแล้งเอื้อต่อการเกิดไฟป่า ประกอบกับช่วงเวลาดังกล่าวมีการเตรียมพื้นที่เพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรก่อนฤดูฝนเริ่มต้น (Dontree et al., 2014) ทำให้จังหวัดเชียงใหม่ประสบปัญหาหมอกพิษทางอากาศเป็นประจำทุกปี

## 2. ข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณฝน (rainfall) อุณหภูมิสูงสุด (maximum temperature, TMAX) อุณหภูมิต่ำสุด (minimum temperature, TMIN) ความเร็วลม (wind speed, WSPD) ทิศทางลม (wind direction, WDIR) ความกดอากาศที่ระดับน้ำทะเล (sea level pressure, SLP) และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) ส่วนข้อมูลมลพิษทางอากาศใช้ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) เฉลี่ยรายวัน ณ สถานีตรวจวัดศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งตั้งอยู่ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่ เป็นตัวแทนสภาพปัญหาหมอกพิษทางอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูล PM10 ครอบคลุมช่วงเวลาของการศึกษา คือ ปี ค.ศ. 1998–2012 และได้ตรวจสอบคุณภาพข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์แล้วพบว่าไม่มีข้อมูลสูญหาย (missing data) ไม่เกินร้อยละ 5 ต่อปี นอกจากนี้มีข้อมูลจุดความร้อน (hotspots) ปี ค.ศ. 2001–2012 จากดาวเทียม Terra และ Aqua เซนเซอร์ MODIS ซึ่งเป็นข้อมูลเผยแพร่จากองค์กร NASA

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาเทียบกับความเข้มข้นของ PM10 ด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis, PCA) สำหรับวิธี PCA เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรโดยไม่มีการแบ่งกลุ่มตัวแปรตามหรือตัวแปรอิสระ แต่สนใจเพียงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เท่านั้น และใช้ความแปรปรวนของตัวแปรเดิมมาสร้างตัวแปรใหม่ ซึ่งวิธีการนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูลและลดขนาดเมทริกซ์ของตัวแปรให้เล็กลง (Piansangsan, 2014) และเป็นเทคนิควิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อตัดตัวแปรที่มีความสำคัญน้อยออกไป โดยไม่ทำให้สูญเสียข้อมูลสำคัญ วิธี PCA จะกำหนดให้ PC1 เป็น linear combination แรก ที่มีรายละเอียดจากตัวแปรมากที่สุด หรือสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ดีที่สุด ส่วน PC2 เป็น linear combination ที่สอง สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ดีรองลงมา โดยที่ PC1 และ PC2 เป็นอิสระต่อกัน ส่วน PC3 PC4 PC5 ... PC8 ใช้หลักการคล้ายกับ PC1 และ PC2 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA นี้สามารถอธิบายได้ว่า ใน 7 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยามีตัวแปรใดบ้างที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนของการศึกษาปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น PM10 ในจังหวัดเชียงใหม่ สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก มีรายละเอียดดังนี้

(1) วิเคราะห์ component loading ของ PC1–PC8 เพื่อตรวจสอบว่า PM10 เป็นสมาชิกขององค์ประกอบใดบ้าง

(2) เมื่อ PM10 เป็นสมาชิกมากกว่า 1 องค์ประกอบ ให้หมุนแกนปัจจัย (factor rotation) ด้วยวิธี orthogonal rotation เพื่อให้ค่า factor loading ของตัวแปรมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนสามารถจัดกลุ่มให้ตัวแปรได้ โดยที่แต่ละปัจจัยยังคงเป็นอิสระต่อกัน

(3) นำผลลัพธ์จากการหมุนแกนปัจจัยมาพิจารณา โดยองค์ประกอบที่มีความสำคัญจะต้องมีค่าความแปรปรวนลดลงอย่างรวดเร็ว และค่าความแปรปรวนต้องมากกว่า 1 ในขั้นนี้ทำให้ขนาดของเมทริกซ์ลดลงเหลือเพียงองค์ประกอบหลักสำคัญเท่านั้น

(4) นำองค์ประกอบหลักสำคัญที่เหลืออยู่ เช่น PC1 และ PC2 มาหมุนแกนปัจจัยอีกครั้ง เพื่อหาค่า component loading ของ PC1 และ PC2

(5) หลักการตีความผลลัพธ์ของ component loading คือ PC1 มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับ PC2 และ PC2 มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับ PC3 แต่ PC1 มีความสัมพันธ์แบบผันตรงกับ PC3

ในกรณีปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยาบางปัจจัย ได้แก่ ทิศทางลม และความกดอากาศ ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA ได้ จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากการจัดกลุ่มข้อมูล การแจกแจงความถี่ และอนุกรมเวลา

### ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากเมทริกซ์ของกราฟการกระจายในตัวแปรแต่ละคู่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน และทดสอบช่วงความเชื่อมั่นทางสถิติ (significant test) ระหว่างข้อมูลความเข้มข้น PM10 และข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาทั้ง 7 ตัวแปร ดังแสดงรายละเอียดใน

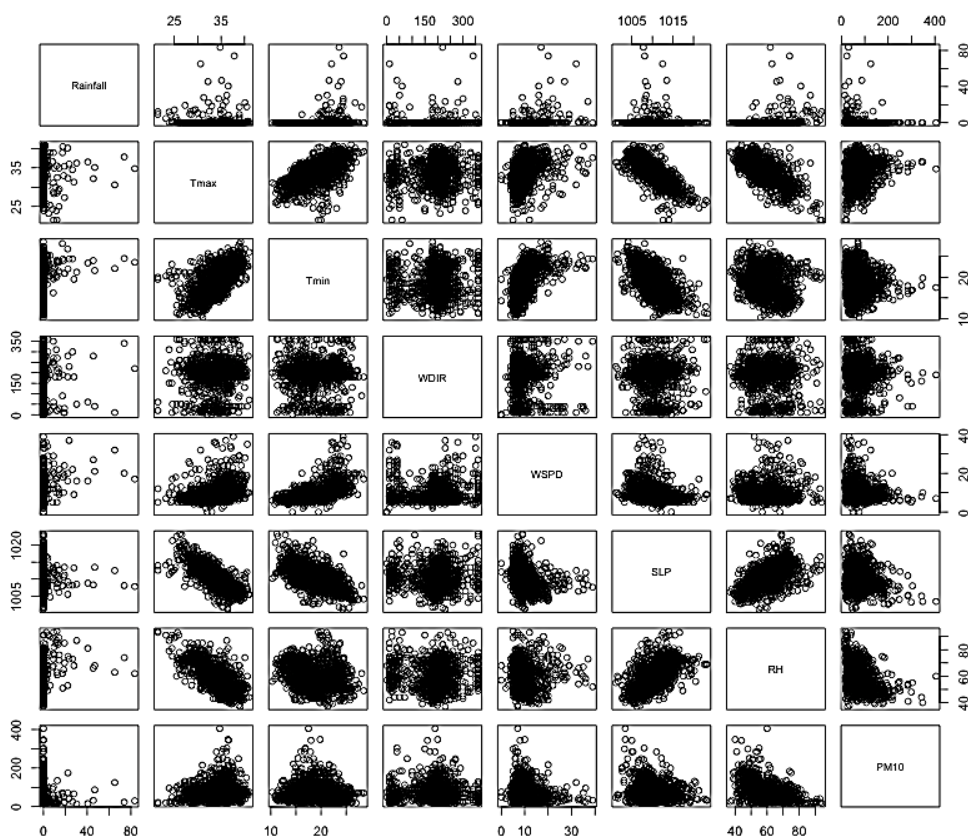
ตาราง 1 และภาพที่ 3 พบว่า อุณหภูมิสูงสุดรายวัน (TMAX) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้น PM10 ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นของ PM10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม ในขณะที่ตัวแปรอื่น ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (rainfall) อุณหภูมิต่ำสุด (TMIN) ความเร็วลม (WSPD) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และความกดอากาศ (SLP) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้น PM10 ซึ่งหมายความว่าถ้าปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม อุณหภูมิต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ หรือความกดอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของ PM10 ลดลง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างทิศทางลม (WDIR) กับความเข้มข้น PM10 มีค่าค่อนข้างต่ำมาก และไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยากับความเข้มข้น PM10 ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัย แต่ยังไม่ชัดเจนเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในทุกปัจจัยไม่สูงมากนัก ดังนั้นเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยชัดเจนมากขึ้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยวิธีการหาองค์ประกอบหลัก เพื่อให้ค่า factor loading เพิ่มขึ้นและลดขนาดเมทริกซ์ลดลง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก โดยพิจารณาจาก component loading ของ PC1-PC8 (ตาราง 2) พบว่า PM10 เป็นสมาชิกขององค์ประกอบมากกว่า 1 องค์ประกอบ จึงหมุนแกนปัจจัย (Factor rotation) ด้วยวิธี orthogonal rotation ผลการหมุนแกนปัจจัย (ภาพที่ 4) พบว่า ค่าความเข้มข้น PM10 ที่สถานีตรวจวัดศูนย์ราช-

ตาราง 1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM10 และตัวแปรทางด้านอุตุนิยมวิทยา

Chiang Mai Station	Rainfall	Tmax	Tmin	WDIR	WSPD	SLP	RH
Cor.	-0.098	0.215	0.076	0.002	-0.158	-0.184	-0.431
Sig. Test	.0000	.000	.009	.765	0.000	.000	.000

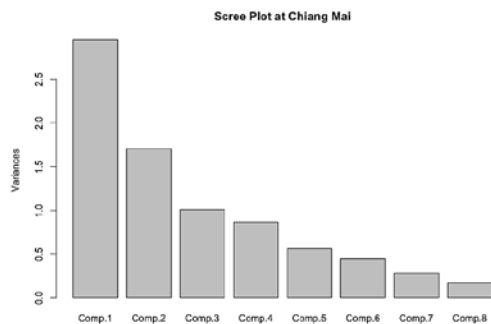


ภาพที่ 3 เมทริกซ์ของกราฟการกระจายระหว่างฝุ่น PM10 และตัวแปรทางด้านอุตุนิยมวิทยา

ตาราง 2 ค่า component loading ของตัวแปรทางด้านอุตุนิยมวิทยาและความเข้มข้น PM10

Factors	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Rainfall		0.463	-0.209	0.749	-0.410			
Tmax	0.534				-0.176	-0.153	0.165	-0.788
Tmin	0.428	0.345		-0.161	0.118	0.533	0.555	0.255
WDIR			0.963	0.256				
WSPD	0.287	0.494			0.646	-0.431	-0.259	
SLP	-0.504				0.283	-0.310	0.721	-0.205
RH	-0.412	0.408			0.145	0.549	-0.271	-0.515
PM10	0.155	-0.497	-0.157	0.575	0.515	0.319		

การจังหวัดเชียงใหม่มีเพียง 2 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ (PC1 PC2 หรือ Comp1 Comp2) หลังจากนั้นได้หมุนแกนปัจจัยเฉพาะ 2 องค์ประกอบหลัก คือ PC1 และ PC2



ภาพที่ 4 Scree plot ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ จังหวัดเชียงใหม่

การหมุนแกนปัจจัยทำให้ตัวแปรความเข้มข้น PM10 เป็นสมาชิกเฉพาะใน PC1 และ PC2 (ตาราง 3) สามารถอธิบายได้ว่า ในภาพรวมขององค์ประกอบหลักที่ 1 และ 2 สามารถนำมาอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้คิดเป็นร้อยละ 58.2 โดยองค์ประกอบหลักที่ 1 หรือ PC1 เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เนื่องจากสามารถอธิบายหรือตีความแปรปรวนของตัวแปรได้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 36.9 ส่วนองค์ประกอบหลักที่ 2 หรือ PC2 เป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมา สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ คิดเป็นร้อยละ 21.3 และเมื่อพิจารณาเฉพาะค่า component loading ของตัวแปรความเข้มข้น PM10 ในองค์ประกอบหลัก PC1 และ PC2 สามารถตีความหมายได้ดังนี้

องค์ประกอบหลัก PC1 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญต่อความแปรปรวนของ PM10 ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด และความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ตัวแปรอุณหภูมิสูงสุดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ

ค่า PM10 ส่วนตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า PM10 ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงสุดรายวันสูงขึ้น หรือความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ล้วนเป็นปัจจัยและเงื่อนไขที่ส่งผลให้ความเข้มข้น PM10 มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนองค์ประกอบหลัก PC2 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับ PC1 พบว่า ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญต่อความแปรปรวนของ PM10 ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด ความเร็วลม โดยที่ 3 ตัวแปรข้างต้นล้วนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า PM10 ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้น หรืออุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น หรือความเร็วลมเพิ่มขึ้น ล้วนเป็นปัจจัยและเงื่อนไขที่ส่งผลให้ความเข้มข้น PM10 มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการหาองค์ประกอบหลักของ PC1 และ PC2 พบว่า ตัวแปรความกดอากาศมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น PM10 ก่อนข้างต่ำและทิศทางการเคลื่อนที่ของลมไม่ชัดเจน ส่วนตัวแปรทิศทางลมไม่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น PM10

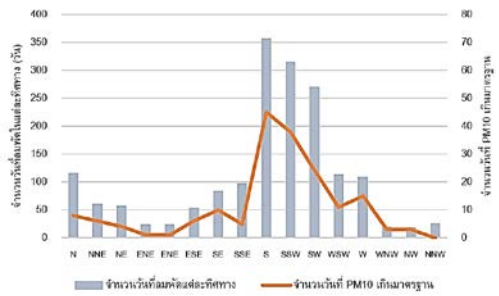
ตาราง 3 ค่า component loading สำหรับองค์ประกอบ PC1 และ PC2 หลังหมุนแกน

Variables	Chiang Mai Station	
	PC1	PC2
Rainfall	-0.172	0.432
Tmax	0.514	0.167
Tmin	0.223	0.502
WDIR		
WSPD		0.570
SLP	-0.239	-0.199
RH	-0.553	0.175
PM10	0.365	-0.371
%Total variance	36.9%	21.3%
Cumulative % variance	36.9%	58.2%

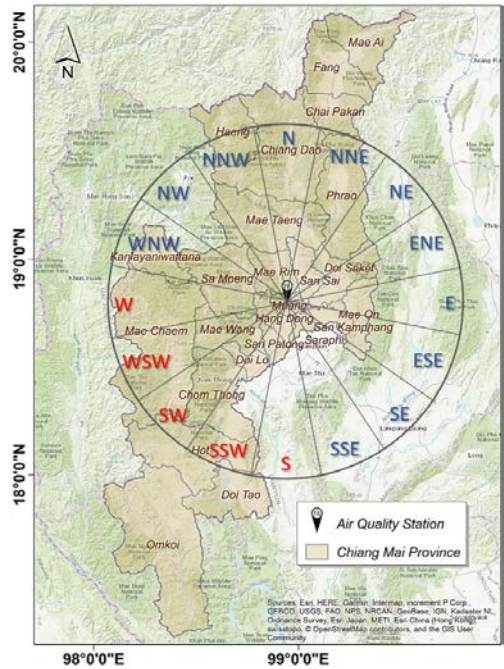


แม้ว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะพบว่า ตัวแปรทิศทางลมและความกดอากาศไม่มีความสัมพันธ์กับความแปรปรวนของความเข้มข้น PM10 หรือสัมพันธ์กันน้อยค่อนข้างต่ำ แต่การทบทวนวรรณกรรมกลับพบว่า ทั้งสองตัวแปรนี้ยังคงเป็นปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สัมพันธ์ต่อความเข้มข้น PM10 งานวิจัยครั้งนี้จึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองกับความเข้มข้น PM10 โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มข้อมูล การแจกแจงความถี่ และอนุกรมเวลา ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลทิศทางลมกับความเข้มข้น PM10 (ภาพที่ 5) พบว่า ลมที่พัดมาจากทิศใต้-ทิศตะวันตก (S SSW SW WSW W) สัมพันธ์กับวันที่ค่าความเข้มข้น PM10 ของจังหวัดเชียงใหม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน (มากกว่า 120 ไมโครกรัม) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาทำเลที่ตั้งของสถานีตรวจวัดศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ร่วมกับลักษณะทางภูมิศาสตร์ (ภาพที่ 6) พบว่า ลมที่พัดเข้าสู่สถานีตรวจวัดมาจากทิศตะวันตก-ใต้ พื้นที่ที่เหนือลมครอบคลุมอำเภอหางดง สันป่าตอง แม่วาง ดอยหล่อ จอมทอง ฮอด ดอยเต่า อมก๋อย และแม่แจ่ม ซึ่งพื้นที่เหล่านี้ล้วนมีลักษณะทางกายภาพเป็นภูเขาหรือที่สูง ประกอบกับมีสิ่งปกคลุมดินประเภทป่าไม้ผลัดใบและพื้นที่เพาะปลูกพืชเป็นจำนวนมาก ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราการเผาชีวมวลสูง ลมที่พัดพามาจากบริเวณนี้จึงสัมพันธ์กับวันที่ค่าความเข้มข้น PM10 สูงเกินมาตรฐาน

ส่วนทางด้านข้อมูลความกดอากาศ พบว่า ในช่วงที่จังหวัดเชียงใหม่ประสบปัญหาหมอกพิษทางอากาศสัมพันธ์กับช่วงที่ความกดอากาศสูงมากกว่า 1000 hPa ปกคลุมจังหวัดเชียงใหม่ (ภาพที่ 7) ซึ่งความกดอากาศสูงนี้ได้ยับยั้งศักยภาพการลอยขึ้นของอากาศบริเวณผิวพื้นส่งผลให้มล-



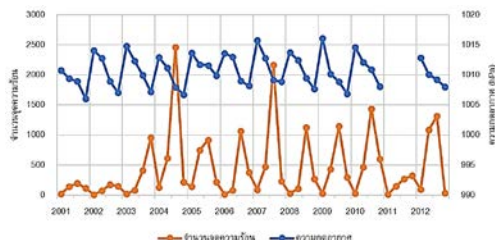
ภาพที่ 5 ทิศทางลมในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน ค.ศ.1998-2012



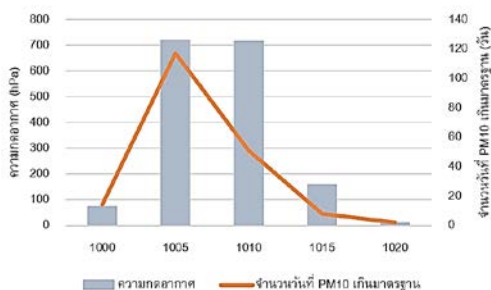
ภาพที่ 6 แผนที่ทิศทางลม (wind direction)

พิษบริเวณผิวพื้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาข้อมูลกราฟการแจกแจงความถี่ของความกดอากาศตั้งแต่มกราคม-เมษายน ปี ค.ศ. 1998-2012 (ยกเว้น ปี ค.ศ. 2011 ไม่มีข้อมูล) ตามภาพที่ 8 พบว่า ช่วงความกดอากาศ ประมาณ 1010±5 hPa สัมพันธ์กับวันที่ความเข้มข้น PM10 เกินมาตรฐาน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับหลาย ๆ ปัจจัย ทั้งจำนวนจุดความร้อนที่มีมากในช่วงฤดูแล้ง ประ-

กอบกับความกดอากาศสูงจากจีนแผ่ลงมาปกคลุมภาคเหนือตอนบน ทำให้ความกดอากาศสูงเอื้อต่อการสะสมของมลพิษบริเวณพื้นผิวโลก มลพิษจึงไม่สามารถแพร่กระจายในแนวตั้งได้



ภาพที่ 7 จำนวนจุดความร้อนรายเดือนและค่าเฉลี่ยความกดอากาศรายเดือนของจังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 8 ความกดอากาศในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน ค.ศ.1998-2012

### อภิปรายผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาต่อการเกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า ปัจจัยอุณหภูมิสูงสุดแปรผันตรงกับมลพิษทางอากาศ ส่วนปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน อุณหภูมิต่ำสุด และความเร็วลมแปรผกผันกับมลพิษทางอากาศ โดยช่วงฤดูหมอกควันอุณหภูมิสูงสุดในเวลากลางวันมีผลต่อศักยภาพการเผาไหม้ของชีวมวล ยิ่งอุณหภูมิอากาศสูง อากาศจะแห้ง ทำให้ชีวมวลแห้งและมี

ศักยภาพการเผาไหม้สูง อัตราการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจึงเพิ่มขึ้นตาม แต่ถ้าช่วงเวลาดังกล่าวสภาพอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ชีวมวลจะชื้นมาก ทำให้ศักยภาพการเผาไหม้ชีวมวลและอัตราการปลดปล่อยมลพิษสู่บรรยากาศลดลงตาม สอดคล้องกับ Schoennagel et al. (2004) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเชื้อเพลิงกับดัชนีศักยภาพการเผาไหม้ (Haines index, HI) โดยจำแนกความชื้นของเชื้อเพลิงเป็น 3 ระดับคือ ชื้นต่ำ (8%) ชื้นปานกลาง (28%) และชื้นสูง (36%) ผลการศึกษาพบว่า ความชื้นของเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์เชิงลบกับศักยภาพการเผาไหม้ เชื้อเพลิงความชื้นสูง ค่า HI = 3.7 เชื้อเพลิงความชื้นปานกลาง ค่า HI = 4.2 และเชื้อเพลิงความชื้นต่ำ ค่า HI = 5.7 ส่วนทางด้านปัจจัยปริมาณฝน เมื่อฝนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มลพิษทางอากาศลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jacob and Winner (2009) ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนจะช่วยลดความเข้มข้นของมลพิษที่บริเวณพื้นผิวโลก เนื่องจากฝนตกจะชะล้างมลพิษในอากาศลงสู่พื้น ส่วนปัจจัยอุณหภูมิในเวลากลางคืนและความเร็วลมมีผลต่อศักยภาพการฟุ้งกระจายของมลพิษในแนวตั้งและแนวราบ เมื่ออุณหภูมิกลางคืนลดลงประกอบกับความเร็วลมต่ำจะทำให้อัตราการระบายมลพิษลดลง มลพิษจึงสะสมที่บริเวณพื้นผิวเป็นจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเกิดอุณหภูมิผกผันของ Whiteman (2000) ที่อธิบายว่า อุณหภูมิผกผันที่ผิวพื้น (surface inversion) จะเกิดขึ้นในเวลากลางคืนที่อุณหภูมิเหนือพื้นดินเย็นลงเร็วมาก ๆ แต่อุณหภูมิที่อยู่เหนือขึ้นไปยังคงอุ่นกว่า และลมสงบ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้อากาศที่พื้นผิวและอากาศเหนือพื้นผิวไม่สามารถถูกลูกเคล้ากันได้ นอกจากปัจจัยทาง

อุตุนิยมวิทยาที่กล่าวมาข้างต้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการจัดกลุ่มข้อมูล แจกแจงความถี่ และอนุกรมเวลา ยังพบว่ามียุทธศาสตร์ทางลมและความกดอากาศที่สัมพันธ์กับปัญหาหมอกพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ โดยทิศทางลมที่สัมพันธ์กับวันที่คุณภาพอากาศเกินมาตรฐาน คือลมที่พัดมาจากทิศใต้-ตะวันตก เมื่อวิเคราะห์เชิงพื้นที่เชื่อมโยงกับการศึกษาของ Dontree et al. (2014) พบว่า พื้นที่บริเวณทิศใต้-ตะวันตกของจังหวัดเชียงใหม่ มีการใช้ที่ดินเป็นป่าผลัดใบและพื้นที่เกษตรอายุสั้น ทำให้มีอัตราการเผาชีวมวลจำนวนมากในช่วงก่อนฤดูฝน ทั้งการเผาชีวมวลในป่าผลัดใบเพื่อหาของป่า และเผาชีวมวลในพื้นที่เกษตรเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก ส่วนปัจจัยความกดอากาศ ในประเด็นนี้อาจต้องศึกษารายละเอียดต่อไป เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมของ Aguado (2013) พบว่า ความกดอากาศสูงสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้น PM10 เพิ่มขึ้น แต่กรณีจังหวัดเชียงใหม่กลับพบว่า วันที่ช่วงความกดอากาศ ประมาณ  $1010 \pm 5$  hPa เท่านั้น ที่แสดงให้เห็นชัดว่าสัมพันธ์กับวันที่ความเข้มข้น PM10 เกินมาตรฐาน ในเบื้องต้นงานครั้งนี้ได้พบสาเหตุหนึ่งที่อาจเกี่ยวข้องคือ ช่วงเวลาเกิดเหตุการณ์ใน 2 ปัจจัยไม่สัมพันธ์กัน เนื่องจากความกดอากาศสูงมากกว่า 1010 hPa มักเกิดขึ้นก่อน (มกราคม-กุมภาพันธ์) ที่จะเผาชีวมวล (มีนาคม-เมษายน) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความกดอากาศสูงและความเข้มข้น PM10 เพิ่มขึ้นจึงไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในประเด็นนี้อาจได้รับข้อสรุปที่ชัดเจนมากขึ้นในอนาคต สืบเนื่องจากการออกมาตรการควบคุมวันห้ามเผา และบังคับใช้มาตรการนี้ตั้งแต่ ปีพ.ศ. 2556 เป็นต้นมา ซึ่งแต่ละปีจะกำหนดวันห้ามเผาแตกต่างกัน บางปี

ตรงกันช่วงความกดอากาศสูงกำลังอ่อน บางปีตรงกับช่วงความกดอากาศกำลังแรง ดังนั้นในอนาคตควรมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยากับความเข้มข้น PM10 โดยเฉพาะปัจจัยความกดอากาศ โดยเปรียบเทียบความรุนแรงของปัญหาหมอกพิษทางอากาศก่อนและหลังมาตรการห้ามเผา เพื่อผลิตข้อมูลสนับสนุนการวางแผนลดปัญหาหมอกพิษทางอากาศให้สอดคล้องกับบริบทของจังหวัดเชียงใหม่

### สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยากับความเข้มข้น PM10 ที่สถานีตรวจวัดศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากเมตริกซ์ของกราฟการกระจายในตัวแปรแต่ละคู่ และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน พบว่า ปัจจัยอุณหภูมิสูงสุดรายวันมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้น PM10 ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และความกดอากาศ มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้น PM10 โดยที่ทุกปัจจัยยังมีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ไม่สูงมากนัก และข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบกลุ่ม เมื่อผลการวิเคราะห์เบื้องต้นได้ข้อสรุปว่าข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบกลุ่ม วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) จึงนำมาใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยากับความเข้มข้น PM10 ในลำดับต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า องค์ประกอบหลักที่ 1 มีปัจจัยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สามารถนำมาอธิบายสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM10 ได้เป็นอย่างดี โดยที่อุณหภูมิสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความ

เข้มข้น PM10 เพิ่มขึ้นตาม ขณะที่ปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ให้ผลตรงกันข้ามเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้น PM10 ลดลง ส่วนองค์ประกอบหลักที่ 2 มีปัจจัยปริมาณฝน อุณหภูมิต่ำสุด และความเร็วลม ที่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้น PM10 ได้ โดยที่ปริมาณฝนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น และความเร็วลมเพิ่มขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ความเข้มข้น PM10 ลดลง สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ PCA สามารถสรุปได้ว่า มีปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา 5 ปัจจัย ที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจนกับปัญหามลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ ส่วนปัจจัยทิศทางลมและความกดอากาศที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการ PCA ยังคงมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำ แต่เมื่อนำทั้ง 2 ปัจจัยมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการจัดกลุ่มข้อมูล การแจกแจงความถี่ และอนุกรมเวลา พบว่า ลมที่พัดมาจากทิศใต้-ทิศตะวันตก สัมพันธ์กับวันที่ค่าความเข้มข้น PM10 ของจังหวัดเชียงใหม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนปัจจัยความกดอากาศ พบว่า ช่วงความกดอากาศ ประมาณ  $1010 \pm 5$  hPa สัมพันธ์กับวันที่ความเข้มข้น PM10 เกินมาตรฐาน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการนักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2556 และได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลตรวจสภาพภูมิอากาศรายวันจากกรมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลตรวจวัดคุณภาพอากาศจากกรมควบคุมมลพิษ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- Aguado, E., and Burt, J. E. (2013). **Understanding Weather & Climate**. 6th ed. New York: Pearson.
- Chotamonsak, C., and Lapyai, D. (2014). **Final Report "Changes in Temperature and Precipitation Extremes in Northern Thailand"**. Chiang Mai: Faculty of Social Science, Chiang Mai University. (in Thai)
- Dawson, J. P., Racherla, P. N., Lynn, B. H., Adams, P. J., and Pandis, S. N. (2009). Impacts of climate change on regional and urban air quality in the eastern United States: Role of meteorology. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres** 114: 11.
- Dontree, S., Saravisutra, A., Pichipajja, P., Pinkantayong, P., and Noysuya, S. (2014). **Final Report: Spatial Clustering of Burned Areas for Open Field Burning Surveillance and Prevention: Case Studies of Chiang Mai, Lamphun and Mae Hong Son Provinces**. Thai Universities for Healthy Public Policies, Thai Health Promotion Foundation. (in Thai)
- Jacob, D. J., and Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. **Atmospheric Environment** 43(1): 51-63.
- Kreasuwan, J., Chotamonsak, C., Wiranwetachayan, O., and Ratjiranukool, P. (2008). **Final report: Simulation of Particulate matter in Chiang Mai – Lamphun basin**.

- Bangkok: National Research Council of Thailand. (in Thai)
- Kreasuwan, J., Chotamonsak, C., Wiranwetachayan, O., and Ratjiranukool, P. (2009). **Final report: Pirot project for developing of air quality early warning system in Chiang Mai – Lamphun basin: Sub-project2- Weather Analysis and Air Pollution Warning.** Bangkok: The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Pasch, A. N., MacDonald, C. P., Gilliam, R. C., Knoderer, C. A., and Roberts, P. T. (2011). Meteorological characteristics associated with PM<sub>2.5</sub> air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study. **Atmospheric Environment** 45(39): 7026–7035.
- Piansangsan, L. (2014). **Principle Component Analysis.** Retrieved from <https://www.gotoknow.org/posts/566063>, January 15, 2018. (in Thai)
- Pope, C. A., Burnett, R. T., and Thun, M. J. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Jama—Journal of the American Medical Association** 287(9): 1132–1141.
- Rayanakorn, M., Chantara, S., Wangkarn, S., Tengcharoenkul, U., Kitsawatpaibul, P., Chanta, P., Chaisri, I., Sangbun, D., and Sangchan, W. (2007). **Final report: Analysis for Air Pollutants in Airborne Particulates in Chiang Mai and Lamphun Provinces.** Bangkok: The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Schoennagel, T., Veblen, T. T., and Romme, W. H. (2004). The Interaction of fire, fuels, and climate across Rocky Mountain forests. **BioScience** 54(7): 661-676.
- Silcox, G. D., Kelly, K. E., Crosman, E. T., Whiteman, C. D., and Allen, B. L. (2012). Wintertime PM (2.5) concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley. **Atmospheric Environment** 46: 17–24.
- Vinitketkumnuen, U., Chewonarin, T., Taneyhill, K., and Chunrum, N. (2007). **Final Report: Oxidative Damage to DNA from Alveolar Lung Cell Lines by Air-borne particulate Matter PM 2.5 & PM 10 extractable from Chiang Mai and Lamphun.** Bangkok: The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Whiteman, C. D. (2000). **Mountain Meteorology: Fundamental and Applications.** New York: Oxford University.
- Whiteman, C. D., Pospichal, B., Eisenbach, S., Weihs, P., Clements, C. B., Steinacker, R., Mursch-Radlgruber, E., and Dorninger, M. (2004). Inversion breakup in small Rocky Mountain and alpine basins. **Journal of Applied Meteorology** 43(8): 1069–1082.