การทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกด้วยตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลัก

Prediction of Daily Maximum Concentration of Ground Level Ozone with Principal Component Regression Model

สมเกียรติ พันธ์ศิริ และ กิดาการ สายธนู*
ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
Somkiat Phansiri and Kidakan Saithanu*
Department of Mathematics, Faculty of Science, Burapha University.

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักในการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกจากปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย ข้อมูลสำหรับการศึกษาเป็นข้อมูลเกี่ยวกับสภาพมลพิษทางอากาศและสภาพทางอุตุนิยมวิทยาซึ่งเก็บที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในเขตภาคตะวันออกของประเทศไทยตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2006 - 2010 ดัชนีสมรรถนะของตัวแบบจะพิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนซึ่งคำนวณจากชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบซึ่งเป็นข้อมูลใน ปี ค.ศ. 2006 - 2009 และชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบซึ่งเป็นข้อมูลของ ปี ค.ศ. 2010 ผลการวิจัยพบว่ามีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก 5 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิและการแผ่รังสีดวงอาทิตย์, ก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรคาร์บอน, ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน (PM_{10}), ความดัน และปริมาณน้ำฝน นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีสมรรถนะที่คำนวณจากชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบและชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบให้ค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

คำสำคัญ : ตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลัก การวิเคราะห์ปัจจัย ก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

Abstract

The purpose of this research is to build the principal component regression model for predicting the daily maximum concentration of ground level ozone from air pollutant and meteorological factors by factor analysis method. Data for study is related to air pollutant and meteorological conditions collecting at eastern air quality stations of Thailand since 2006 to 2010. The performance index of model was considered from the error between the training data set (using data from 2006 - 2009) and the validation data set (using data in 2010). The research results indicated there were five influential variables to predict the daily maximum concentration of ground level ozone: Temperature and solar radiation, Methane and hydrocarbon, PM10, Pressure and Rain. Furthermore, for the performance index of the training data set and the validation data set gave the values of mean bias error approached to zero.

Keyword : Principal component regression model, Factor analysis, ground level ozone

***Corresponding author.** E-mail: ksaithan@buu.ac.th

บทนำ

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในเขตชุมชนเมือง ซึ่งเป็นเขตที่มีการจราจรหนาแน่น เนื่องจากมลพิษทางอากาศก่อให้เกิดผลกระทบทั้งด้านกลิ่นและความรำคาญ ตลอดจนผลกระทบด้านสุขภาพอนามัยที่เกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจ และปอด ดังนั้นการติดตามเฝ้าระวังปริมาณมลพิษในบรรยากาศจึงเป็นภารกิจหนึ่งที่มีความสำคัญมาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) กรมควบคุมมลพิษ (The Pollution Control Department) เป็นหน่วยงานที่ทำการตรวจวัดคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยจะทำการตรวจวัดมลพิษทางอากาศที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เป็นฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน เช่น PM_{10}, สารตะกั่ว (Pb) และค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก (O_3) เป็นต้น

สถาบันวิจัยเพื่อพัฒนาแห่งประเทศไทย (2549) กล่าวว่าจากการตรวจวัดคุณภาพอากาศตั้งแต่ปีพ.ศ. 2536 จนถึงปัจจุบันพบว่าคุณภาพอากาศในประเทศไทยมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของสารมลพิษส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานยกเว้น PM_{10} และก๊าซโอโซน สำหรับสถานการณ์มลพิษทางอากาศในประเทศไทยนั้นพบว่าปัญหาของก๊าซโอโซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากก๊าซโอโซนเป็นสารมลพิษทุติยภูมิซึ่งเกิดจาก (1) ปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปลดปล่อยออกมาจากไอเสียรถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีความร้อนของแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Sousa *et al*., 2007) และ (2) ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิ (Temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) และความเร็วลม (Wind velocity) เป็นต้น

ก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. ก๊าซโอโซนที่ดี (Good ozone) เป็นก๊าซโอโซนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศที่เรียกว่า “สตราโทสเฟียร์ (Stratosphere)” อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 35-80 กิโลเมตร ซึ่งมีประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตอย่างมากเนื่องจากทำหน้าที่ในการกรองรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation) ที่ส่องผ่านมายังโลกซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2. ก๊าซโอโซนที่ไม่ดี (Bad ozone) หรือก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก (Ground level ozone) เป็นก๊าซโอโซนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศที่เรียกว่า “โทรโพสเฟียร์ (Troposphere)” อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 0-10 กิโลเมตร ซึ่งใช้สำหรับหายใจจึงเป็นโทษต่อสิ่งมีชีวิต

ถ้าก๊าซโอโซนมีค่าปริมาณความเข้มข้นสูง จะสามารถทำปฏิกิริยากับอวัยวะภายในร่างกายได้จึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพเมื่อมนุษย์หายใจเข้าไปโดยไปทำลายปอด แม้ว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดอาการเจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก เจ็บคอ ระคายเคืองคอได้ ก๊าซโอโซนจึงเป็นโทษต่อโรคระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด เป็นต้น นอกจากนั้นก๊าซโอโซนยังทำให้ภูมิคุ้มกันของร่างกายที่จะต่อสู้กับโรคติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจลดลงอีกด้วย ดังนั้นผลกระทบต่อร่างกายเนื่องจากก๊าซโอโซนจึงขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซโอโซนที่ร่างกายจะได้รับ (Environment Protection Agency, 2003) สำหรับประเทศไทยค่ามาตรฐานของค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ซึ่งคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 28 ปี พ.ศ. 2550 กำหนดไว้จะต้องไม่เกิน 0.10 ส่วนในล้านส่วน (Part per million) หรือไม่เกิน 0.20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m3) (สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2554)

กรมควบคุมมลพิษมีการตรวจวัดค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกโดยสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศซึ่งพบว่าประเทศไทยมีค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานในสถานที่ที่มีประชากรอยู่อย่างหนาแน่นและมีการจราจรคับคั่งรวมถึงเขตโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) อีกทั้งยังไม่มีมาตรการใดๆ ที่จะลดค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ จึงทำให้เกิดความวิตกกังวลต่อผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับประชากรทั้งด้านสุขภาพ ชุมชน และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการควบคุมมลพิษในการเกิดก๊าซโอโซนไม่ใช่เรื่องง่าย และกลไกในการเกิดก๊าซโอโซนยังมีความสัมพันธ์กันกับปัจจัยหลายปัจจัยทั้งปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ซึ่งมีผู้ให้ความสนใจศึกษาและวิจัยปัจจัยทั้งสองนี้โดยใช้วิธีการเชิงสถิติในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการสร้างตัวแบบเกี่ยวกับค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกอยู่มากทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ อาทิเช่น

ศิรพงศ์ สุขทวี (2546) ศึกษาสหสัมพันธ์และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ที่มหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยใช้ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ

ของสถานีตรวจวัดคุณภาพทางอากาศในปี พ.ศ. 2539 - 2545 ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซโอโซนเฉลี่ยรายชั่วโมงในวันที่ผ่านมา ค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เฉลี่ยรายชั่วโมง ความเร็วลม อุณหภูมิ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ณ เวลา 10.00 น. ค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนตริกออกไซด์เฉลี่ยรายชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยรายชั่วโมง และความเร็วลม ณ เวลา 9.00 น. ผลการศึกษาพบว่าค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซโอโซนเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซโอโซนเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ธนิกานต์ ลาภาพิพัฒน์ (2549) ศึกษาการหาค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ณ ปัจจุบันและค่าย้อนหลังที่เกิดจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ในเขตกรุงเทพมหานครและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซโอโซนกับสารตั้งต้นและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความดัน ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ โดยเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 5 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 - 2005 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศทั้งหมด 11 สถานี จากที่ต่างๆในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งแบ่งเป็น 3 สถานี ได้แก่ สถานีริมถนน 3 สถานี สถานีในเมือง 5 สถานี และสถานีชานเมือง 3 สถานี ผลการศึกษาพบว่าการเกิดของก๊าซโอโซนมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และปริมาณสารตั้งต้นที่เกิดจากการทำกิจกรรมของมนุษย์

Wahab and Alawi (2002) สร้างตัวแบบเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกด้วยข่ายงานระบบประสาท (Neural networks) โดยใช้ตัวแปรเงื่อนไขทางอุตุนิยมวิทยาและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ ซึ่งเก็บข้อมูลที่ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยคูเวต เมืองคัลดิยา (Khaldiya) ประเทศคูเวต ผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมากกับการเกิดของก๊าซโอโซน ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซนอนมีเทนไฮโดรคาร์บอน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์

Wang, Lu, Wang and Leung (2003) สร้างตัวแบบข่ายงานระบบประสาทเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกซึ่งเก็บข้อมูลจากสถานี 3 สถานีที่ประเทศฮ่องกง ในปี ค.ศ. 1999 และปี ค.ศ. 2000 นอกจากนี้ยังได้สร้างตัวแบบข่ายงานระบบประสาทแบบ ARBF (Adaptive radial basis function) และข่ายงานระบบประสาทแบบ RBF (Radial basis function) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงซึ่งเก็บได้ที่บริเวณเมือง Tsuen Wan ในปี ค.ศ. 2000 ผลการศึกษาพบว่าตัวแบบข่ายงานระบบประสาทแบบ ARBF สามารถทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกได้แม่นยำกว่าตัวแบบข่ายงานระบบประสาทแบบ RBF เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจริงในทุกช่วงเวลา

Sousa, Martins, Alvim-Ferraz and Pereira (2007) ใช้วิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal component analysis: PCA) เพื่อลดจำนวนตัวแปรอิสระซึ่งมีอยู่หลายตัวที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกจากนั้นจึงนำตัวแปรอิสระที่ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักมาสร้างตัวแบบเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression: MLR) โดยเรียกตัวแบบนี้ว่า “ตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลัก (Principal component regression model: PCR)” และวิธีข่ายงานระบบประสาทเทียมแบบเชื่อมโยงไปข้างหน้า (Feedforward artificial neural networks: FANN) โดยเรียกตัวแบบนี้ว่า “ตัวแบบข่ายงานระบบประสาทเทียมแบบเชื่อมโยงไปข้างหน้าที่มีอินพุทเป็นส่วนประกอบหลัก (Feedforward artificial neural network based on principal component: PC-FANN) แล้วทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวแบบทั้งสองด้วยค่าดัชนีสมรรถนะ (Performance indix) ซึ่งวัดได้จาก 3 ค่าดังนี้ (1) ค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias error: MBE) (2) ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error: MAE) และ (3) ค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared error: RMSE) สำหรับการเก็บตัวอย่างนั้นจัดเก็บจากสถานที่ที่มีการจราจรหนาแน่นบริเวณมหาวิทยาลัย Oporto ประเทศโปรตุเกส โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ ไนโตรเจนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ผลการศึกษาพบว่าตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักและตัวแบบข่ายงานระบบประสาทเทียมแบบเชื่อมโยงไปข้างหน้าที่ใช้ส่วนประกอบหลักเป็นอินพุทใช้ปรับปรุงการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนได้ดีขึ้น เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักช่วยลดความซับซ้อนของตัวแบบและช่วยแก้ปัญหาการมีพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Multicollinearity)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

2. เพื่อสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่ใช้ทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกด้วยปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

สมมุติฐานของการวิจัย

ค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากปัจจัย 2 ปัจจัย คือ

1. ปัจจัยมลพิษทางอากาศประกอบด้วย 9 ตัวแปร ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO), ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x), ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซนอนมีเทนไฮโดรคาร์บอน (NMHC), ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน (PM_{10})

2. ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาประกอบด้วย 7 ตัวแปร ได้แก่ ความดัน (Pressure), อุณหภูมิ (Temperature), ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity), ความเร็วลม (Wind velocity), ทิศทางลม (Wind direction), การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation) และปริมาณน้ำฝน (Rain)

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทนำพบว่าการสร้างตัวแบบเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกจะใช้ตัวแบบข่ายงานระบบประสาท (Neural networks model) และตัวแบบการถดถอย (Regression model) ระหว่างค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกและปัจจัยที่มีผลต่อค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ได้แก่ ปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแบบการถดถอยเนื่องจากอยู่บนพื้นฐานของข้อสมมุติเชิงสถิติ (Statistical assumptions) ในขณะที่ตัวแบบข่ายงานระบบประสาทไม่จำเป็นต้องมีข้อสมมุติเชิงสถิติใดๆ

สำหรับการเลือกตัวแปรอิสระ (Independent variables) ที่ใช้สร้างตัวแบบเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกมีทั้งหมด 16 ตัวแปร ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์, ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์, ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์, ก๊าซมีเทน, ก๊าซนอนมีเทนไฮโดรคาร์บอน, ก๊าซไฮโดรคาร์บอน, ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, PM_{10}, ความดัน, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, ทิศทางลม, การแผ่รังสีดวงอาทิตย์และปริมาณน้ำฝน ผู้วิจัยจะใช้การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal component analysis: PCA) ในการดึงปัจจัย (Factor extraction) โดยปัจจัยใหม่ที่สร้างขึ้นด้วยการวิเคราะห์ปัจจัยนี้จะเป็นตัวแปรตัวใหม่ที่ไม่ทำให้เกิดปัญหาการมีพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อสมมุติเชิงสถิติสำหรับการสร้างตัวแบบการถดถอย ดังนั้นตัวแบบการถดถอยที่สร้างขึ้นจะมีตัวแปรอิสระเป็นส่วนประกอบหลัก (Principal component) และจะเรียกตัวแบบการถดถอยที่สร้างขึ้นนี้ว่า “ตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลัก”

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้จากกรมควบคุมมลพิษซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่ประกาศพื้นที่เขตควบคุมมลพิษ กำหนดมาตรฐานควบคุมมลพิษจากแหล่งกำเนิด ตรวจสอบและตรวจวัดมลพิษ รวมทั้งกำหนดประเภทของแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องควบคุมเพื่อจัดทำนโยบายและแผนงานประสานงานในการลดปัญหา รวมถึงเสนอมาตรการในการป้องกันมลพิษ กรมควบคุมมลพิษมีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศและสถานีเก็บรวมรวบข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาทั้งหมด 69 สถานีโดยทำการตรวจวัดแบบรายชั่วโมง (Real time) ผู้วิจัยได้เลือกสถานีตรวจวัด 2 สถานี ในเขตภาคตะวันออก คือสถานีตรวจวัดจังหวัดชลบุรีและสถานีตรวจวัดจังหวัดระยอง เนื่องจากเป็นจังหวัดในภาคตะวันออกที่มีประชากรอยู่อย่างหนาแน่นอีกทั้งยังเป็นเขตอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยมลพิษเพื่อใช้ศึกษาและวิจัยในครั้งนี้

การจัดการข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเพื่อนำไปใช้ในการสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่ใช้ทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก (O_3) แบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบ (Training data set) ซึ่งเป็นข้อมูลในปี ค.ศ. 2006 - 2009 มีทั้งหมด 2,276 ค่า และชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Validation data set) ซึ่งเป็นข้อมูลในปี ค.ศ. 2010 มีทั้งหมด 339 ค่า

การวิเคราะห์ข้อมูล

ตัวแปรตามที่ใช้ในการวิจัยคือ

- O_3 แทนค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิจัยคือ

- CO แทนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
- NO แทนก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์
- NO_2 แทนก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

- NO_x แทนก๊าซไนโตรเจนออกไซด์
- CH_4 แทนก๊าซมีเทน
- NMHC แทนก๊าซนอนมีเทนไฮโดรคาร์บอน
- HC แทนก๊าซไฮโดรคาร์บอน
- SO_2 แทนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- PM_{10} แทนฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน
- Pressure แทนความดัน
- Temp แทนอุณหภูมิ
- RH แทนความชื้นสัมพัทธ์
- WV แทนความเร็วลม
- WD แทนทิศทางลม
- SR แทนการแผ่รังสีดวงอาทิตย์
- Rain แทนปริมาณน้ำฝน

1. วิเคราะห์ข้อมูลจากชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบที่มีทั้งหมด 2,276 ค่า เพื่อสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักดังนี้

1.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

พิจารณาจากการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation) ดังนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยมลพิษทางอากาศ ได้แก่ CO, NO, NO_2, NO_x, CH_4, NMHC, HC, SO_2 และ PM_{10}
- ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ Pressure, Temp, RH, WV, WD, SR และRain
- ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา
- ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยมลพิษทางอากาศและ O_3
- ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและ O_3

1.2 การวิเคราะห์ปัจจัย

ทำการวิเคราะห์ปัจจัยโดยรวมตัวแปรอิสระ (16 ตัว) ให้อยู่ในปัจจัยเดียวกันเพื่อนำมาสร้างเป็นตัวแปรอิสระใหม่ กระบวนการนี้เป็นการลดจำนวนตัวแปรอิสระที่จะนำมาวิเคราะห์ให้น้อยลงอีกทั้งยังเป็นการขจัดปัญหาการเกิดพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระอีกด้วย สำหรับวิธีการดึงปัจจัยนั้นจะใช้การดึงปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก

1.3 การสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลัก

นำตัวแปรอิสระใหม่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.2 มาสร้างสมการการถดถอยส่วนประกอบหลักเพื่อทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

1.4 การหาค่าดัชนีสมรรถนะ (Performance index) ของตัวแบบ

นำตัวแปรอิสระใหม่ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.2 มาแทนค่าลงในตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.3 เพื่อพยากรณ์ค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก จากนั้นคำนวณหาค่าดัชนีสมรรถนะของตัวแบบซึ่งหาได้จากค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias error: MBE) ดังนี้

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)$$

โดยที่ Y_i คือค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกที่เก็บได้จริง

$\hat{Y}_i$ คือค่าพยากรณ์หรือค่าทำนายของค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

2. วิเคราะห์ข้อมูลจากชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบที่มีทั้งหมด 339 ค่าโดยนำตัวแปรอิสระใหม่ที่ได้จากการรวมปัจจัยจากขั้นตอนที่ 1.2 มาแทนค่าลงในตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักจากขั้นตอนที่ 1.3 จะได้ค่าพยากรณ์ของค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกและหาค่าดัชนีสมรรถนะของตัวแบบจากขั้นตอนที่ 1.4

ผลการทดลอง

1. จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักได้ผลดังนี้

1.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยโดยพิจารณาจากค่า *P*-value ของการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 พบว่า

- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 9 ตัวของปัจจัยมลพิษทางอากาศมีความสัมพันธ์กันทุกคู่ยกเว้นคู่ของ NMHC และ PM10 ไม่มีความสัมพันธ์กัน
- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 7 ตัวของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยามีความสัมพันธ์กันหลายคู่ยกเว้น (1) คู่ของ Pressure และ Temp (2) คู่ของ Pressure และ WV (3) คู่ของ Pressure และ Rain (4) คู่ของ Temp และ WD (5) คู่ของ WV และ WD (6) คู่ของ WD และ SR และ (7) คู่ของ WD และ Rain
- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 9 ตัวของปัจจัยมลพิษทางอากาศและตัวแปรทั้ง 7 ตัวของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

ส่วนใหญ่ไม่มีความสัมพันธ์กัน อาทิเช่น คู่ของ HC และ Rain, คู่ของ SO_2 และ Temp, คู่ของ NO_2 และ RH เป็นต้น

- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 9 ตัวของปัจจัยมลพิษทางอากาศและ O_3 มีความสัมพันธ์กัน ทุกตัวยกเว้น SO_2

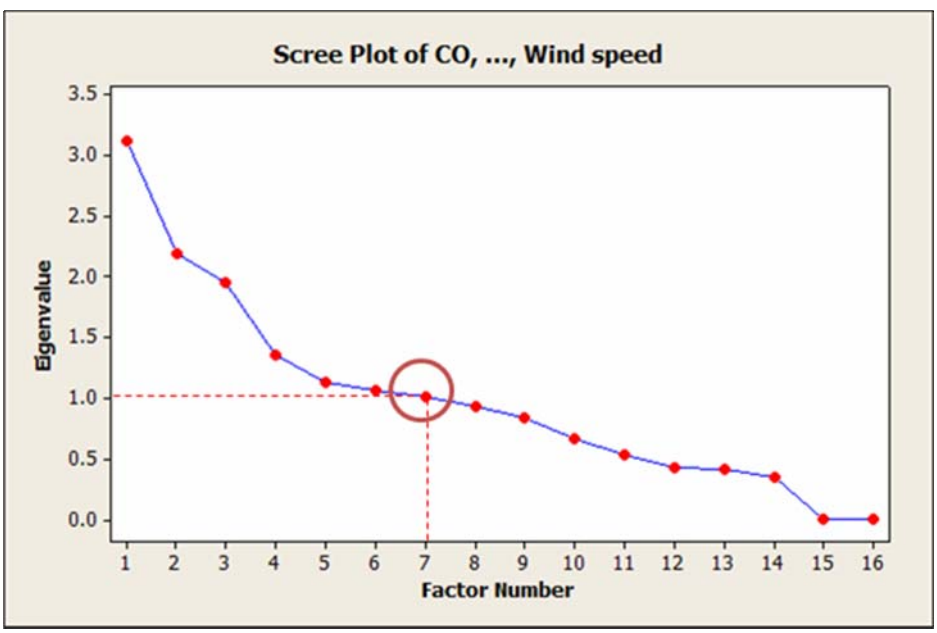
- ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 7 ตัวของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและ O_3 มีความสัมพันธ์กัน 4 ตัว ได้แก่ Pressure, Temp, RH และ WV ส่วนตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับ O_3 ได้แก่ WD, RH และ Rain

1.2 จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบในการดึงปัจจัยจะให้ค่าเฉพาะ (Eigenvalues) สัดส่วน (Proportion) และสัดส่วนสะสม (Cumulative proportion) ของความแปรผัน (Variation) ของแต่ละส่วนประกอบหลัก (Principal component) ดังตารางที่ 1

ส่วนการกำหนดจำนวนปัจจัยที่จะใช้ในการสร้างตัวแปรอิสระใหม่ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กันในการสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักจะใช้เกณฑ์ของ Kaiser (Kaiser's criterion) โดยพิจารณาจาก Scree plot ที่มีค่าเฉพาะมากกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1 (Velicer & Jackson, 1990) และเปอร์เซนต์ของสัดส่วนความแปรผันสะสมของส่วนประกอบหลักที่มีค่ามากกว่า 70%

ตารางที่ 1 ค่าเฉพาะ สัดส่วนความแปรผัน และสัดส่วนความแปรผันสะสมของแต่ละส่วนประกอบหลัก

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8
Eigenvalues	3.0993	2.1250	1.9744	1.4039	1.2051	1.0609	0.9582	0.9424
Proportion	0.1940	0.1330	0.1230	0.0880	0.0750	0.0660	0.0600	0.0590
Cumulative	0.1940	0.3270	0.4500	0.5380	0.6130	0.6790	0.7390	0.7980
	PC 9	PC 10	PC 11	PC 12	PC 13	PC 14	PC 15	PC 16
Eigenvalues	0.8026	0.6653	0.5594	0.4386	0.4192	0.3384	0.0038	0.0034
Proportion	0.0500	0.0420	0.0350	0.0270	0.0260	0.0210	0.0000	0.0000
Cumulative	0.8480	0.8900	0.9250	0.9520	0.9780	1.0000	1.0000	1.0000



ภาพที่ 1 Scree plot สำหรับการพิจารณาจำนวนปัจจัย

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1 พบว่าค่าเฉพาะที่มีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1 มีทั้งหมด 7 และ 8 ปัจจัยซึ่งสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้ 73.9% และ 79.8% ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 และเมื่อทำการหมุนปัจจัย (Factor rotation) ด้วยวิธี Varimax เพื่อช่วยให้การรวมกลุ่มของตัวแปรอิสระใหม่ดังตารางที่ 2 พบว่าการสร้างปัจจัยโดยใช้ 7 ปัจจัยสามารถอธิบายความหมายได้ง่ายและชัดเจนมากกว่าการใช้ 8 ปัจจัย ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้ 7 ปัจจัย ซึ่งให้ค่าการให้น้ำหนัก (Loading) ของข้อมูลทั้ง 7 ปัจจัย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการให้น้ำหนักของข้อมูลทั้ง 7 ปัจจัย

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
CO	0.100	0.072	−0.196	−0.679	−0.220	0.144	0.098
NO	0.692	−0.223	0.143	0.349	−0.040	0.187	−0.130
NO_2	0.747	0.179	−0.282	−0.375	−0.136	−0.110	0.137
NO_x	0.936	0.036	−0.156	−0.132	−0.126	0.006	0.048
SO_2	0.462	0.066	0.064	−0.182	0.062	0.429	−0.005
HC	0.180	0.053	−0.848	−0.152	−0.321	−0.018	−0.025
CH_4	0.048	0.083	−0.844	−0.113	0.483	0.021	0.004
NMHC	0.156	−0.025	−0.037	−0.046	−0.939	−0.036	−0.034
PM_{10}	0.103	0.012	−0.028	−0.826	0.138	−0.027	−0.085
Pressure	0.104	0.104	0.045	0.061	0.034	0.855	0.121
Rain	−0.037	0.195	0.005	0.021	−0.045	−0.075	−0.857
Rh	0.149	0.685	0.075	0.427	0.136	0.056	−0.126
Temp	−0.021	−0.736	0.062	0.063	−0.164	−0.023	0.237
SR	0.039	−0.797	0.038	0.217	0.140	−0.058	−0.001
WD	0.327	0.221	0.354	0.263	0.067	−0.509	0.238
WV	0.058	−0.475	0.377	−0.001	0.202	0.079	−0.287

จากตารางที่ 2 สามารถรวมกลุ่มของตัวแปรอิสระใหม่เป็น 7 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 แสดงถึง ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

ปัจจัยที่ 2 แสดงถึง อุณหภูมิและการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Temp&SR)

ปัจจัยที่ 3 แสดงถึง ก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรคาร์บอน (CH_4&HC)

ปัจจัยที่ 4 แสดงถึง ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน (PM_{10})

ปัจจัยที่ 5 แสดงถึง ก๊าซนอนมีเทนไฮโดรคาร์บอน (NMHC)

ปัจจัยที่ 6 แสดงถึง ความดัน (Pressure)

ปัจจัยที่ 7 แสดงถึง ปริมาณน้ำฝน (Rain)

1.3 ในการสร้างตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักระหว่าง O_3 และตัวแปรอิสระซึ่งเป็นตัวแปรอิสระใหม่ที่ได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยในขั้นตอนที่ 1.2 ทั้ง 7 ตัว ได้แก่ NO_x, Temp&SR, CH_4&HC, PM_{10}, NMHC, Pressure และ Rain ด้วยวิธี Stepwise เพื่อให้เป็นไปตามข้อสมมุติเชิงสถิติของการถดถอยผู้วิจัยได้แปลงค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกเป็นค่าลอการิทึมของค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ($LogO_3$) ซึ่งจะได้ตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักคือ

$$\widehat{LogO_3} = 38.4-1.84Temp\&SR-6.25CH_4\&HC-12.3PM_{10}-7.34Pressure+1.87Rain$$

1.4 ค่าดัชนีสมรรถนะของตัวแบบซึ่งคำนวณจากชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ยเป็น 0.0001539 (MBE = 0.0001539)

2. สำหรับตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่สร้างขึ้นโดยใช้ชุดของข้อมูลในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจะให้ค่าดัชนีสมรรถนะคือ ค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ยเป็น –0.006017 (MBE = –0.006017)

สรุปและอภิปรายผล

1. จากตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่ใช้ทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก เป็นงานวิจัยที่นำทฤษฎีทางสถิติมาประยุกต์กับข้อมูลจริงซึ่งผลการวิจัยทำให้ทราบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก ได้แก่ อุณหภูมิและการแผ่รังสีดวงอาทิตย์, ก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรคาร์บอน, ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 16 ไมครอน (PM_{10}), ความดันและปริมาณน้ำฝน จึงได้ตัวแบบการถดถอยส่วนประกอบหลักที่ใช้ทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก คือ

$$\widehat{LogO_3} = 38.4\text{-}1.84Temp\&SR\text{-}6.25CH_4\&HC\text{-}12.3PM_{10}\text{-}7.34Pressure+1.87Rain$$

2. เมื่อพิจารณาค่าดัชนีสมรรถนะระหว่างตัวแบบส่วนประกอบหลักของชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบและชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ยใกล้เคียงกับศูนย์นั่นคือตัวแบบที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลก

3. จากผลการวิจัยที่ได้จะนำไปเผยแพร่ให้กับกรมควบคุมมลพิษใช้เป็นแนวทางในการป้องกันเบื้องต้นเมื่อพบว่ามีค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดรายวันของก๊าซโอโซนที่ระดับพื้นผิวโลกสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อชุมชน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมควบคุมมลพิษที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ศึกษาวิจัยนี้ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2554

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2551). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2550. วันที่ค้นข้อมูล 10 สิงหาคม 2554, เข้าถึงได้จาก http://www.pcd.go.th/count/mgtdl.cfm?FileName=Report50.pdf

ธนิกานต์ ลาภาพิพัฒน์. (2549). *ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโอโซนกับสารตั้งต้นและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิล.

สถาบันวิจัยเพื่อพัฒนาแห่งประเทศไทย. (2549). โครงการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2554). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 28 (พ.ศ. 2550) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป. วันที่ค้นข้อมูล 25 ตุลาคม 2554, เข้าถึงได้จาก http://www.legalbase.ptit.org/Law.asp?lid=3956

ศิรพงศ์ สุขทวี. (2546). *การประเมินความเข้มข้นของโอโซนบริเวณสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ มหาวิทยาลัยรามคำแหงโดยใช้วิธี Multiple Linear Regression*.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

Abdul-Wahab, S.A. & Alawi, S.M. (2002). Assessment and prediction of tropospheric ozone concentration levels using artificial neural networks. *Environment Modelling & Software, 17*, 219-228.

Environmental Protection Agency. (2003). Ozone—good up high bad nearby. Washington, DC : Greenwood Press.

Sousa, S.I.V., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M. & Pereira, M.C. (2007). Multiple linear regression and artifical neural networks based on principal components to predict ozone concentrations. *Environmental Modelling & Software, 22*, 1141-1149.

Velicer, W.F. & Jackson, D.N. (1990). Component Analysis Versus Common Factor-Analysis-Some Further Observations. *Multivariate Behavioral Research, 25*(1), 97-114.

Wang, W., Lu, W., Wang, X.A. & Leung, Y.T. (2003). Prediction of maximum daily ozone level using combined neural network and statistical characteristics. *Environment international, 29*, 555-562.