การทำนายมลพิษทางอากาศจากทางพิเศษในกรุงเทพมหานครด้วยแบบจำลองเชิงสถิติและการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

Prediction of Air Pollutants from Expressway in Bangkok using Statistical Models and Monte Carlo Simulation

นิรันดร์ คงฤทธิ์[1] และสุดจิต ครุจิต[2]

Nirun kongritti and Sudjit Karuchit

[1]สำนักวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมระบบทางพิเศษ การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

[2]สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โทร. 0 2940 1224-6 โทรสาร 0 2940 1225

E-mail: nirun_kong@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติของมลพิษทางอากาศริมทางพิเศษในกรุงเทพมหานคร ได้แก่ CO NO_2 และ O_3 กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศจากทางพิเศษโดยวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความอ่อนไหวโดยใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า มลพิษทางอากาศ มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับตัวแปรปริมาณจราจรแต่ละประเภทเป็นส่วนใหญ่ และเป็นความสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้น สมการที่ดีที่สุดในการทำนายระดับความเข้มข้นของ CO NO_2 และ O_3 ที่ได้มีค่า R^2 ในช่วง 0.444-0.797 และพบว่าตัวแปรมลพิษทางอากาศ ความเร็วลม ทิศทางลม และอุณหภูมิ จากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษในพื้นที่ใกล้เคียงสามารถช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมลพิษทางอากาศริมทางพิเศษได้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความอ่อนไหวพบว่าสมการทำนายมลพิษ NO_2 มีความไม่แน่นอนสูงกว่าการทำนาย O_3 และ CO ส่วนการวิเคราะห์ความอ่อนไหวพบว่าปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลในการทำนายค่าของ 3 มลพิษ คือ ความเร็วรถ จำนวนรถยนต์นั่ง 4 ล้อ ระดับความเข้มข้นของ NO_2 จากสถานีตรวจวัดใกล้เคียง ระยะห่างจากทางพิเศษ และอุณหภูมิ โดยกระบวนการพัฒนาแบบจำลองและการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษามลพิษทางอากาศในโครงการทางพิเศษสายอื่นๆ หรือการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโครงการลักษณะที่ใกล้เคียงกันได้

Abstract

This research is a study of statistical relationship among air pollutants, namely CO, NO_2 and O_3, nearby an expressway in Bangkok and others relevant factors. This study uses regression analysis method to develop statistical models for predicting the concentration of air pollutants from the expressway. It further analyzes the uncertainty and sensitivity of each model via the Monte Carlo simulation and proposes application examples. Results of the study show that the air pollutants correlate in the same direction with most of the traffic volume variables; and the relationships are nonlinear. The best equations for predicting the concentration of CO, NO_2, and O_3 have the coefficient of determination, R^2 in the range of 0.444-0.797. It was found that the variables from the adjacent Department of Pollution Control's monitoring station help explaining the variance of pollutant levels near the expressway. Furthermore, the results of the uncertainty and sensitivity analysis indicate that the NO_2 prediction models have higher uncertainty than the prediction models of O_3 and CO. The sensitivity analysis also identifies the

RECEIVED 13 February, 2009

ACCEPTED 5 November, 2009

co-factors that have high influence on the prediction of three pollutants; they are: vehicle speed, number of car, NO_2 concentration from nearby monitoring station, distance from the expressway, and temperature. The process of model development and analysis of this study can be applied in other expressway pollutant studies or environmental impact assessment of similar projects.

Keywords: Air Pollutants, Expressway, Statistical Models, Monte Carlo Simulation

1. บทนำ

การทำนายหรือการพยากรณ์ระดับมลพิษเป็นวิธีการหนึ่งที่นำมาใช้ในการวางแผนเพื่อลดปริมาณของมลพิษที่ปล่อยออกมาในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งการคาดการณ์หรือการพยากรณ์สามารถที่จะพัฒนาโดยอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างระดับมลพิษทางอากาศ และตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อมลพิษทางอากาศ จากการศึกษาแบบจำลองในการประเมินมลพิษทางอากาศในกรุงปรากโดยใช้แบบจำลองเกาส์เสียนสำหรับคาดการณ์ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) พบว่าปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณจราจรเพิ่มมากขึ้น [1] และจากการศึกษาการปล่อยมลพิษจากการจราจรจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของปริมาณจราจรและความเร็วรถ โดยเฉพาะ NO_x และ NO_2 จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วของรถเพิ่มขึ้นจาก 40-120 กม./ช.ม. [2, 3] และจากการศึกษาโดยใช้แบบจำลอง CALINE ทำการศึกษาปริมาณจราจรบนทางพิเศษกับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน และไฮโดรคาร์บอน พบว่าปริมาณมลพิษทางอากาศจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณจราจรบนทางพิเศษที่เพิ่มขึ้น [4, 5] ความเข้มข้นของ NO_2 มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์กับระยะห่างจากทางพิเศษโดยมีค่า r เท่ากับ -0.83 คือหากระยะห่างจากทางพิเศษเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณ NO_2 ลดลง และ PM_{10} มีความสัมพันธ์กับระยะห่างจากทางพิเศษโดยมีค่า r เท่ากับ -0.39 ในขณะที่กรมควบคุมมลพิษ [6] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของมลพิษจากถนนพบว่าความเร็วรถแต่ละประเภทมีผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีการปล่อยสูงเมื่อรถมีความเร็วต่ำ แต่ในกรณีออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อัตราการปล่อยจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงความเร็วคงที่ อัตราการปล่อยจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ และปริมาณอากาศที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในขณะที่เกิดการสันดาป นอกจากนี้ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและความเร็วลม พบว่า ความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของปริมาณมลสารอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ [7]

มลพิษทางอากาศที่เกิดจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ ส่วนใหญ่เราจะเรียกว่ามลพิษทางอากาศปฐมภูมิ (Primary Air Pollutants) และมลพิษทางอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีเราเรียกว่า สารพิษทางอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air Pollutants) โดยสารพิษทางอากาศปฐมภูมิเป็นสารมลพิษทางอากาศที่เกิดและถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิดโดยตรง มลพิษที่สำคัญได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide, SO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbonmonoxide, CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สำหรับก๊าซโอโซน (O_3) เป็นสารพิษทางอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air Pollutants) ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษปฐมภูมิด้วยกันเอง หรือปฏิกิริยาระหว่างสารมลพิษปฐมภูมิกับสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ ซึ่งมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า Photochemical Oxidation ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยานี้ขั้นแรก NO_2 จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิส (Photolysis) ทำให้เกิดอะตอมออกซิเจน (O) ซึ่งต่อมาอะตอมออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) ทำให้เกิดโอโซน (O_3) และ O_3 ก็จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) ทำให้เกิด NO_2 แล้วกลับไปเริ่มต้นปฏิกิริยาโฟโตลิซิสอีก

ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติในการคาดการณ์ความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศจากทางพิเศษในกรุงเทพมหานคร ได้แก่ ไนโตรเจน

ไดออกไซด์ (NO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และโอโซน (O_3) กับตัวแปรอุตุนิยมวิทยา ปริมาณจราจร และตัวแปรอื่น ๆ ในลักษณะของแบบจำลองความน่าจะเป็น (Probabilistic Model) โดยเลือกทางพิเศษฉลองรัชเป็นตัวแทนศึกษา และใช้ข้อมูลจากหน่วยงานหลัก 2 หน่วยงาน ได้แก่ ข้อมูลการติดตามตรวจสอบมลพิษทางอากาศ ข้อมูลปริมาณจราจรจากการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และข้อมูลมลพิษทางอากาศ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา จากกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะของแบบจำลองความน่าจะเป็น (Probabilistic Model) มีข้อดีเหนือกว่าแบบจำลองทั่วไป คือสามารถรองรับการศึกษาวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis) และความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของแบบจำลองที่ได้เพื่อทดสอบว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนของการทำนายและแบบจำลองทำงานได้ดีและถูกต้องเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภายนอกที่เป็นตัวแปรนำเข้า โดยการวิเคราะห์ดังกล่าวใช้การจำลองเหตุการณ์ด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo) ซึ่งเป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้หลักความน่าจะเป็นมาช่วยในการกำหนดค่าให้กับตัวแปรอิสระ ซึ่งมีการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาแบบจำลองในการพยากรณ์มลพิษทางอากาศน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาในลักษณะดังกล่าว ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการวางแผนการศึกษาเพื่อจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโครงการที่มีลักษณะคล้ายกันของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการศึกษามลพิษทางอากาศในกรุงเทพมหานคร และเมืองใหญ่อื่นๆ ได้อีกด้วย

2. วิธีการศึกษา

ทำการรวบรวมข้อมูลมลพิษทางอากาศและข้อมูลปริมาณจราจร จากรายงานผลการศึกษาและติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโครงการทางพิเศษฉลองรัช ของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจำนวน 6 สถานี โดยทำการตรวจวัดสถานีละ 3 วันต่อเนื่องกัน แต่ละสถานีมีระยะห่างจากทางพิเศษ (DFE) ดังนี้ สถานีที่ 1 บริเวณซอยอยู่เย็น ระยะห่าง 40 เมตร สถานีที่ 2 บริเวณคลองทรงกระเทียม ระยะห่าง 180 เมตร สถานีที่ 3 บริเวณหมู่บ้านออร์คิดวิลล่า ระยะห่าง 40 เมตร สถานีที่ 4 บริเวณหมู่บ้านธารารมณ์ ระยะห่าง 150 เมตร สถานีที่ 5 โรงเรียนสวนรัฐวิทยาคม ระยะห่าง 180 เมตร และสถานีที่ 6 บริเวณถนนโยธินพัฒนา ระยะห่าง 25 เมตร ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ได้แก่ CO NO_2 และ O_3 เป็นข้อมูลเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ส่วนข้อมูลจราจรทำการสำรวจในวันและเวลาเดียวกับการตรวจวัดมลพิษทางอากาศซึ่งประกอบด้วย ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ (CV) ปริมาณยานพาหนะรวมทุกประเภท (TF) และปริมาณยานพาหนะแยกเป็นประเภทต่างๆ 5 ประเภท ได้แก่ รถยนต์นั่ง 4 ล้อ (C) รถปิกอัพและรถตู้ (LB) รถบรรทุก 6 ล้อและรถโดยสารขนาดกลาง (HB) รถบรรทุก 10 ล้อขึ้นไปและรถโดยสารขนาดใหญ่ (HT) และรถจักรยานยนต์ (MC) เนื่องจากทางพิเศษฉลองรัชมีแนวเส้นทางขนานกับถนนประดิษฐ์มนูธรรม ดังนั้นระดับมลพิษทางอากาศจึงเป็นผลจากการจราจรจากทั้งบนทางพิเศษและถนนประดิษฐ์ มนูธรรม จึงพิจารณาพื้นที่ศึกษาเป็น 3 กรณีคือกรณีบนทางพิเศษมีข้อมูลการจราจรคือตัวแปร CV1, TF1, C1, LB1, HB1, HT1, และ MC1 กรณีถนนประดิษฐ์มนูธรรม มีข้อมูลการจราจรคือตัวแปร CV2, TF2, C2, LB2, HB2, HT2, และ MC2 และกรณีบนทางพิเศษรวมกับถนนประดิษฐ์ มนูธรรม มีข้อมูลการจราจรคือตัวแปร CV3, TF3, C3, LB3, HB3, HT3, และ MC3

นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ความเร็วลม (WS) ทิศทางลม (WD) และอุณหภูมิ (T) ที่รวบรวมจากสถานีตรวจวัดที่อยู่ใกล้พื้นที่ศึกษาคือสถานีตรวจวัดห้วยขวาง ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ มีระยะห่างจากทางพิเศษฉลองรัชประมาณ 2,500 เมตร มาประกอบการศึกษาด้วย เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแทนของระดับมลพิษในพื้นที่ใกล้เคียงที่อาจมีผลต่อระดับมลพิษริมทางพิเศษฉลองรัช โดยรวบรวมข้อมูลในวันและเวลาเดียวกันกับข้อมูลมลพิษทางอากาศและปริมาณจราจร ซึ่งข้อมูลทิศทางลมที่ได้จะนำมาปรับแก้เพื่อให้ค่าทิศทางลมสะท้อนอิทธิพลของแหล่งกำเนิดก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์และนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้

เทคนิควิธีทางสถิติทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) 2 แบบ คือการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) และการวิเคราะห์ความถดถอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression Analysis) ในการวิเคราะห์ความถดถอยทั้งสองแบบดังกล่าว จะมีวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการความถดถอย 2 วิธี ได้แก่ วิธี Backward และวิธี Stepwise และทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ตลอดจนทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) 2 วิธี คือใช้วิธี T-test (Paired Sample Test) โดยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ Sig T เท่ากับ 0.05 [8] และวิธีการเปรียบเทียบค่า MSE ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการกับค่า MSPR ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องโดยสมการที่มีค่า MSPR ใกล้เคียงกับค่า MSE มากที่สุดจะเป็นสมการที่มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดหรือมีค่าความถูกต้องมากที่สุด ต่อจากนั้นทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน และความอ่อนไหวโดยใช้โปรแกรม Crystal Ball ร่วมกับโปรแกรม Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ โดยการจำลองเหตุการณ์ด้วยวิธีมอนติคาร์โล

3. ผลการศึกษา

3.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้การวิเคราะห์ ความถดถอยเชิงพหุ ตามกรณีศึกษา 3 กรณีคือ กรณี 24 ชั่วโมง กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย โดยตัวแปรอิสระที่ใช้แบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีใช้ตัวแปรจากพื้นที่ศึกษา และกรณีใช้ตัวแปรมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษช่วยในการคาดการณ์ โดยใช้วิธี Stepwise และ Backward ในการคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการ และทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการด้วยวิธี Paired Sample Test และการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อน MSE กับค่า MSPR โดยผลการคัดเลือกสมการที่เหมาะสม ที่สุดแต่ละมลพิษตามช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าสมการในการคาดการณ์ CO มีค่า Adjusted R^2 อยู่ระหว่าง 0.441-0.621 มีตัวแปรอิสระที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามส่วนใหญ่ได้แก่ ตัวแปรยานพาหนะ ทิศทางลม ความเร็วลม ระยะห่างจากทางพิเศษ และอุณหภูมิ สมการ NO_2 มีค่า Adjusted R^2 อยู่ระหว่าง 0.583-0.797 มีตัวแปรอิสระในสมการได้แก่ ทิศทางลม ระยะห่างจาก ทางพิเศษ และตัวแปรมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ สมการ O_3 มีค่า Adjusted R^2 อยู่ระหว่าง 0.716-0.771 มีตัวแปรอิสระในสมการได้แก่ ความเร็วลม และตัวแปรมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ

3.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของสมการพิจารณาจากช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของค่าเฉลี่ยที่คำนวณจาก ค่าเฉลี่ย $\pm$ 1.96 (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) และค่า Tolerance Limit ที่ 95% (95%TL) ของข้อมูลมลพิษที่ทำนายได้จากสมการต่างๆ โดยช่วงค่าดังกล่าวแสดงถึงช่วงที่ครอบคลุมร้อยละ 95 ของค่าระดับมลพิษที่ทำนายได้ทั้งหมดและคำนวณจากค่าเฉลี่ย $\pm$ 1.96 (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งกรณีสมการ CO ทั้ง 3 ช่วงเวลาพบว่า ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.005 ppm. โดยค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.670-1.690 ppm. ในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุดเท่ากับ 0.009 ppm. โดยที่ช่วง ความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 4.852 - 4.888 ppm. และช่วง Tolerance Limit ของกรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าสูงที่สุด กล่าวได้ว่าค่าระดับ CO ส่วนใหญ่หรือร้อยละ 95 ที่เกิดขึ้นริมทางพิเศษในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าระหว่าง 3.433-6.307 ppm. คิดเป็นช่วง 95%TL เท่ากับ 2.873 ppm. ส่วนช่วงกรณี 24 ชั่วโมง และช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่า

ตารางที่ 1 สมการที่เหมาะสมที่สุดแต่ละสมการตามช่วงเวลาต่าง ๆ

ลำดับที่	สมการ	กรณี	Adjusted R^2
1	CO = 9.019 + 0.702LOG(C1) + 0.163LOG(LB1) – 0.139LOG(HT1) - 5.209E-04(MC1) + 1.451E-02(CV1) - 6.621LOG(T) - 4.215E-04 (WD) – 2.620E-02(WS) – 0.842LOG(DFE) - 1.711LOG(NO_2pcd)*	24 ชั่วโมง	0.441
2	CO = -0.663 + 1.335E-02(WD) + 2.606LOG(DFE) - 2.947LOG(NO_2pcd) + 0.832(COpcd)*	ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	0.621
3	CO = 42.418 – 27.670LOG(T) + 2.647E-04(TF1)	ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	0.564
4	NO_2 = 0.465 – 0.290LOG(T) – 0.442(NO_2pcd) + 2.625E-02LOG(SO_2pcd)* + 2.306E-02LOG(C1)	24 ชั่วโมง	0.583
5	NO_2 = 0.117 – 2.886E-02LOG(DFE) + 1.684E-04(WD) – 0.653(NO_2pcd) + 1.519E-02LOG(SO_2pcd)	ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	0.797
6	NO_2 = -0.396 + 0.286LOG(T) – 2.027E-02LOG(WD) + 0.572(NO_2pcd) - 4.251E-02LOG(COpcd) – 2.699(SO_2pcd) – 2.138(O_3pcd)*	ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	0.762
7	O_3 = 1.519E-03 + 0.272(O_3pcd) + 3.968E-05(WD) – 2.818E-03(WS) + 2.018E-03LOG(HB1)	24 ชั่วโมง	0.716
8	O_3 = 3.783E-03 + 1.24E-03(T) – 0.177(NO_2pcd) + 0.286(O_3pcd) - 7.33E-05(CV1) + 5.858E-03LOG(C1)	ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	0.771
9	O_3 = 3.623E-03 + 7.216E-03LOG(WS) + 0.274(NO_2pcd) - 1.309E-02LOG(COpcd) + 2.340E-03LOG(SO_2pcd)	ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	0.770

หมายเหตุ *ตัวแปรมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแต่ละสมการตามช่วงเวลาต่าง ๆ

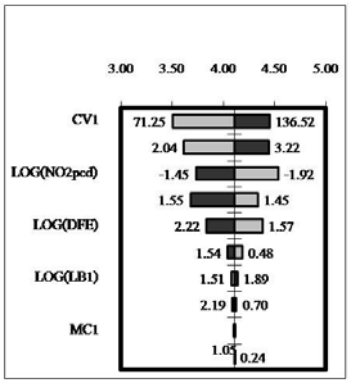
มลพิษ	หน่วย	$\bar{x}$	S.D	S.E. of $\bar{x}$	COV.	ช่วงความเชื่อมั่นของ $\bar{x}$ ที่ 95%			Tolerance Limit ที่ 95%		
						Lower	Upper	Range	Lower	Upper	Range
CO 24 ชั่วโมง	ppm.	3.92	0.660	0.007	0.168	3.906	3.934	0.027	2.626	5.214	2.587
CO ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	ppm.	4.87	0.733	9.081×10^{-3}	0.151	4.852	4.888	0.036	3.433	6.307	2.873
CO ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	ppm.	1.68	0.499	0.005	0.297	1.670	1.690	0.020	0.702	2.658	1.956
NO_2 24 ชั่วโมง	มก./ลบ.ม.	0.049	0.026	2.653×10^{-4}	0.531	0.048	0.050	0.001	-0.002	0.100	0.102
NO_2 ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	มก./ลบ.ม.	0.028	0.015	1.511×10^{-4}	0.536	0.027	0.028	0.001	-0.001	0.057	0.059
NO_2ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	มก./ลบ.ม.	0.099	0.061	2.976×10^{-4}	0.616	0.098	0.100	0.001	-0.021	0.219	0.239
O_3 24 ชั่วโมง	ppm.	0.005	0.003	2.620×10^{-5}	0.600	0.49×10^{-2}	0.005	0.1×10^{-3}	-0.001	0.011	0.012
O_3 ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า	ppm.	0.048	0.005	4.984×10^{-5}	0.104	4.790×10^{-2}	0.048	0.1×10^{-3}	0.038	0.058	0.020
O_3 ช่วงเวลาเร่งด่วนบ่าย	ppm.	0.008	0.005	4.653×10^{-5}	0.625	7.909×10^{-3}	0.008	0.2×10^{-3}	-0.002	0.018	0.020

95%TL น้อยลงตามลำดับ ซึ่งลำดับดังกล่าวนี้สอดคล้องกับลำดับของค่าความไม่แน่นอนที่ได้กล่าวไปข้างต้น กรณีสมการ NO_2 ทั้ง 3 ช่วงเวลาพบว่ากรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ $1.511x10^{-4}$ โดยช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ความเชื่อมั่นระหว่าง 0.027-0.028 มก./ลบ.ม. ในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุดคือมีค่าเท่ากับ $2.976x10^{-4}$ โดยช่วง 95% ของค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.098 - 0.100 มก./ลบ.ม. และช่วง Tolerance Limit ของกรณีช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าสูง NO_2 ส่วนใหญ่หรือร้อยละ 95 ที่เกิดขึ้นริมทางพิเศษในช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าอยู่ในช่วง 0-0.219 มก./ลบ.ม.คิดเป็นช่วง 95%TL เท่ากับ 0.239 มก./ลบ.ม. ส่วนช่วงกรณี 24 ชั่วโมงและช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่า 95%TL น้อยลงตามลำดับ

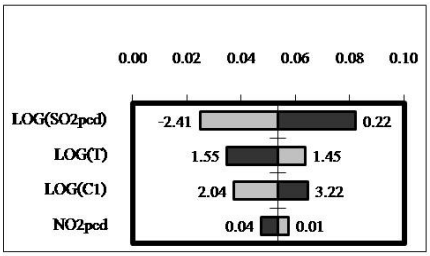
กรณีสมการ O_3 ทั้ง 3 กรณีพบว่ากรณี 24 ชั่วโมง มีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ $2.620x10^{-5}$ โดยช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง $0.49x10^{-2}$ – $0.5x10^{-2}$ ppm. ในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุดคือมีค่าเท่ากับ $4.653x10^{-5}$ และที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง $7.909x10^{-3}$ – $8.00x10^{-3}$ ppm. และช่วง Tolerance Limit ที่ 95% ของ O_3 กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและบ่ายมีค่าสูงเท่ากัน ค่าระดับ O_3 ส่วนใหญ่หรือร้อยละ 95 ที่เกิดขึ้นริมทางพิเศษในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและบ่ายมีค่าระหว่าง 0.038-0.058 และ 0.018-0.038 ppm. ตามลำดับ คิดเป็นช่วง 95%TL เท่ากับ 0.020 มก./ลบ.ม. ส่วนช่วงกรณีเวลา 24 ชั่วโมงมีค่า 95%TL น้อยที่สุด

3.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

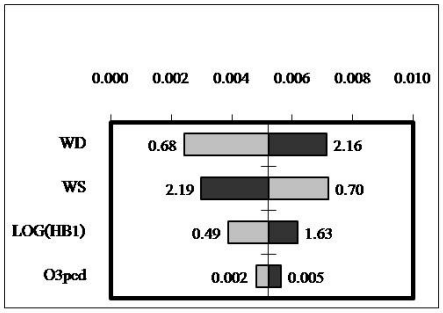
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยตัวแปรอิสระที่มีค่า r สูงแสดงว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงด้วยเช่นกัน และพิจารณาจาก Tornado Chart ซึ่งได้จากการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม Crystal Ball แสดงให้เห็นถึงตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลสูงที่มีต่อตัวแปรตาม จากการศึกษาพบว่าปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลในการทำนายค่า CO ทั้ง 3 กรณีพบว่าระดับความเข้มข้นของ CO จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้นและจะลดลงตามอุณหภูมิและระยะห่างจากทางพิเศษที่เพิ่มขึ้น โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทำนายระดับความเข้มข้นของ CO ส่วนใหญ่ได้แก่ ความเร็วรถ LOGของปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคล LOGของระดับความเข้มข้นของ NO_2 จากสถานีตรวจวัด LOGของระยะห่างจากทางพิเศษ และLOGของอุณหภูมิ ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีอิทธิพลเช่นเดียวกันแต่มีในระดับต่ำ และปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลในการทำนายค่า NO_2 ทั้ง 3 กรณีได้แก่ LOGของปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคล LOGของระยะห่างจากทางพิเศษ อุณหภูมิLOGของระดับความเข้มข้นของ SO_2 และระดับความเข้มข้นของ NO_2จากสถานีตรวจวัด โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดของทั้ง 3 กรณีคือตัวแปรระดับความเข้มข้นของมลพิษจากสถานีตรวจวัด อาจกล่าวได้ว่าระดับความเข้มข้นมลพิษจากสถานีตรวจวัดมีอิทธิพลต่อระดับความเข้มข้นของ NO_2บริเวณริมทางพิเศษสูงกว่าตัวแปรอื่นๆ และปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลในการทำนายค่า O_3 ทั้ง 3 กรณีพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทำนายระดับความเข้มข้นส่วนใหญ่คือตัวแปรอุตุนิยมวิทยาคือ ทิศทางลม ความเร็วลม อุณหภูมิ และตัวแปร LOGของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถบรรทุกขนาดเล็ก ความเร็วรถ และ LOGของระดับความเข้มข้นของ NO_2 และ CO จากสถานีตรวจวัด ในขณะที่ตัวแปรระดับความเข้มข้นของ O_3 จากสถานีตรวจวัดมีอิทธิพลต่อระดับความเข้มข้นของ O_3 บริเวณริมทางพิเศษต่ำที่สุด แต่ก็มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันคือหากระดับความเข้มข้นของ O_3 จากสถานีตรวจวัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ระดับความเข้มข้นของ O_3 บริเวณริมทางพิเศษเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่าง Tornado Chart ดังแสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 1 Tornado Chart ของตัวแปรที่ศึกษาในการพยากรณ์ CO 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2 Tornado Chart ของตัวแปรที่ศึกษาในการพยากรณ์ NO_2 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3 Tornado Chart ของตัวแปรที่ศึกษาในการพยากรณ์ O_3 24 ชั่วโมง

4. สรุปและวิจารณ์ผล

จากการดำเนินการวิจัยที่เริ่มจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุตามกรณีศึกษาต่างๆ การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความอ่อนไหวของแบบจำลองจนถึงการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้งาน สรุปว่าการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงสถิติสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศจากทางพิเศษฉลองรัช ได้แก่ CO, NO_2 และ O_3 มีค่า Adjusted R^2 อยู่ในช่วง 0.441 ถึง 0.621 ช่วง 0.583 ถึง 0.797 และช่วง 0.716 ถึง 0.771 ตามลำดับ โดยมลพิษทางอากาศดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณจราจรอย่างมีนัยสำคัญ คือหากปริมาณจราจรเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และ L. Y. Chan and Helen W. Y. Wu [9, 10] ที่พบว่า CO NO_2 SO_2 O_3 และ PM_{10} มีความสัมพันธ์ทิศทางเดียวกันกับปริมาณจราจร และการศึกษาของ Karppinen A., Kukkonen J., Elolähde T., Konttinen M., Koskentalo T. and Rantakrans E., และ Gilbert NL, Woodhouse S, Stieb DM, Brook JR.. และ ALDRIN Magne and HAFF Ingrid Hobaek., [11, 12, 13] ซึ่งพบว่า NO_2 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับปริมาณจราจรการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแต่ละมลพิษพบว่าสมการในการพยากรณ์ CO กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุด ในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุด สมการ NO_2 กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุดในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนบ่ายมีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุด และสมการ O_3 กรณี 24 ชั่วโมงมีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุดในขณะที่กรณีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้ามีค่าความไม่แน่นอนสูงที่สุด โดยค่าเฉลี่ยของความไม่แน่นอนในการทำนาย CO NO_2 และ O_3 มีค่าเท่ากับ 0.028 ppm. 0.001 มก./ลบ.ม. และ 0.133×10^{-3} ppm. ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนจากการทำนายมลพิษแต่ละประเภทพบว่าแบบจำลองที่ได้จากการศึกษานี้ทำนายมลพิษ NO_2 ด้วยความไม่แน่นอนสูงกว่าการทำนาย O_3 และ CO ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากตัวแปรอิสระในแต่ละสมการมีจำนวนและชนิดแตกต่างกันและมีความแปรปรวนของข้อมูลของตัวแปรมากน้อยแตกต่างกันด้วย แต่อย่างไรก็ดีจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของความไม่แน่นอนของทั้ง 3 มลพิษมีค่าน้อยมาก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสมการที่ได้จากการศึกษานี้มีความแน่นอนสูง การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแต่ละมลพิษพบว่าปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลในการทำนายค่า CO ได้แก่ ความเร็วรถ LOGของปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคล LOGของระดับความเข้มข้นของ NO_2 จากสถานีตรวจวัด LOGของ

ระยะห่างจากทางพิเศษ และLOGของอุณหภูมิ สมการ NO_2 ได้แก่ LOGของปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคล LOGของระยะห่างจากทางพิเศษ อุณหภูมิ LOGของระดับความเข้มข้นของSO_2 และระดับความเข้มข้นของ NO_2จากสถานีตรวจวัด โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดของทั้ง 3 กรณีคือตัวแปรระดับความเข้มข้นของมลพิษจากสถานีตรวจวัด และสมการ O_3 ได้แก่ ตัวแปรอุตุนิยมวิทยาซึ่งประกอบด้วย ทิศทางลม ความเร็วลม อุณหภูมิ และตัวแปร LOGของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถบรรทุกขนาดเล็ก ความเร็วรถ และLOGของระดับความเข้มข้นของ NO_2และ CO จากสถานีตรวจวัด และจากการตรวจสอบปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าของ 3 มลพิษส่วนใหญ่คือตัวแปรความเร็วรถ LOG ของปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคล LOG ของระดับความเข้มข้นของ NO_2 จากสถานีตรวจวัด LOG ของระยะห่างจากทางพิเศษ และLOG ของอุณหภูมิ ซึ่งจากการสังเกตพบว่าตัวแปรปริมาณจราจรมีอิทธิพลต่อการคาดการณ์ระดับความเข้มข้นของมลพิษทั้ง 3 คือ LOG ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ในขณะที่ LOG ของรถบรรทุกจะมีอิทธิพลต่อระดับความเข้มข้นของ CO และ O_3 และระดับความเข้มข้นของมลพิษจากสถานีตรวจวัดส่วนใหญ่มีอิทธิพลต่อระดับความเข้มข้นของมลพิษบริเวณริมทางพิเศษโดยหากมีระดับเพิ่มขึ้นจะทำให้ระดับความเข้มข้นของมลพิษริมทางพิเศษเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะ O_3 ซึ่งเป็นสารพิษทางอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air Pollutants) ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจากปฏิกิริยาเคมี ระหว่างสารมลพิษปฐมภูมิด้วยกันเองหรือปฏิกิริยาระหว่างสารมลพิษปฐมภูมิกับสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการวางแผนการศึกษาเพื่อจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโครงการที่มีลักษณะคล้ายกันของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการศึกษามลพิษทางอากาศในกรุงเทพมหานคร และเมืองใหญ่อื่นๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Brechler, J., (2000). Model Assessment of Air Pollution in Prague. Dept.of Meteorology and Env.Protection, Faculty of Math and Phys., Charles University.

[2] Mäkelä K., Kanner H., and Laurikko J., (1996). Road traffic exhaust gas emissions in Finland-LIISA 95 calculation software. (in Finnish). VTT Communities and Infrastructure, Transport Research, Research Notes 1772, Technical Research Center of Finland, Espoo, 45pp. + App. 51pp.

[3] Karppinen A., Kukkonen J., Elolähde T., Konttinen M., Koskentalo T., and Rantakrans E., (2000). A modeling system for predicting urban air pollution: model description and application in the Helsinki metropolitan area. Atmospheric Environment 34, 3723-3733.

[4] การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (2549). ร่างรายงานการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการทางด่วนสายทางพิเศษศรีรัช-ดาวคะนอง. มกราคม 2549

[5] Mirjam C. Roorda-Knape, Nicole A. H. Janssen, Jeroen J. De Hartog, Patricia H.N. Van Vliet, Hendrik Harssema and Bert Brunekreef., (1998). Air Pollution from Traffic in City Districts Near Major Motorways. Department of Environmental Sciences, Environment and Occupation Health Unit, University of Wageninge, Netherlands.

[6] กรมควบคุมมลพิษ, (2543). ฐานข้อมูลแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศและเสียงในประเทศไทย พ.ศ. 2543. ฉบับหลัก. กรุงเทพมหานคร.

[7] Rene Val R. T., (1996). Empirical Analysis On the Relationship Between Air Pollution and Traffic Flow Parameters. MSCE: http://www.up-ncts.org,ph/thes_abs /teodoro.html

[8] Yadav, A.K., Sharan, M., (1996). Statistical evaluation of sigma schemes estimating dispersion in low wind condition. Atmospheric Environment 30 (14), 2595-2606.

[9] การทางพิเศษแห่งประเทศไทยม, (2546). รายงานการศึกษาและติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของทางพิเศษในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.

[10] L. Y. Chan and Helen W. Y. Wu, (1992). Micro-environmental Field Measurement of Traffic Air Pollution in HONG KONG. Intl.Conf.Env.Protection & Control Technology (42EPCT).

[11] Karppinen A., Kukkonen J., Elolähde T., Konttinen M., Koskentalo T. and Rantakrans E., (2000). A Modelling System for Predicting Urban Air Pollution : Model Description and Application in the Helsinki Metropolitan Area. Journal Atmospheric Environment 34 (2000): 3723-3733.

[12] Nicolas L. Gillbert, Sandy Woodhouse, David M. Stieb, and Jeffrey R. Brook., (2003). Ambient nitrogen dioxide and distance from a major highway. The Science of the Total Environment 312, 43-46.

[13] ALDRIN Magne and HAFF Ingrid Hobaek., (2005). Generalised additive modeling of air pollution, taffic volume and meteorology. Atmospheric Environment 39, 2145-2155.