



การประยุกต์การวิเคราะห์อนุกรมเวลาและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
เพื่อประเมินฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนในกรุงเทพมหานคร
Application of Time Series Analysis and Geographic Information
Systems for Particulate Matter Less Than or Equal to 10 Microns
in Diameter (PM10) Assessment in Bangkok

สัญญา พันธุ์พิทยุตม์¹ และ จินตนา อมรสงวนสิน^{2*}

¹ คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ กรุงเทพฯ 10240

² คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ กรุงเทพฯ 10240

*Corresponding Author, E-mail: jintana_forest@yahoo.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. และจังหวัดใกล้เคียง วิเคราะห์และประเมินการแพร่กระจายรวมทั้งกำหนดพื้นที่เสี่ยงของ PM10 ใน กทม. โดยใช้ข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ 31 สถานี ตั้งแต่ปี 2540 - 2557 ประเมินค่าข้อมูลสูญหายในเดือนที่ไม่มีผลการตรวจวัด จากนั้นพยากรณ์ค่าเฉลี่ยรายเดือนของปี 2558 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยรายปีเพื่อนำไปประมวลผลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ สุดท้ายจึงวิเคราะห์ขนาดพื้นที่และจำนวนผู้ที่อาจได้รับผลกระทบใน กทม. โดยแบ่งระดับพื้นที่เสี่ยงเป็น 5 ระดับ ผลการวิจัยพบว่า ค่า PM10 เฉลี่ยปี 2558 ใน กทม. มีค่าอยู่ในช่วง $15.5 - 80.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปีไม่เกิน $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) โดยพบค่าสูงสุดที่สถานีสวนป่าวิภาวดี ดินแดง สถานีโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ และสถานีสำนักงานเขตพระโขนง ตามลำดับ สำหรับขนาดพื้นที่เสี่ยงพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของ กทม. (ร้อยละ 80.14) มีความเสี่ยงปานกลาง ส่วนพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุดมีขนาด 30.673 km^2 (ร้อยละ 1.95) และเมื่อวิเคราะห์จำนวนผู้ที่อาจได้รับผลกระทบพบว่า ในพื้นที่เสี่ยงสูง (ค่า PM10 เฉลี่ยรายปีสูงกว่ามาตรฐาน) มีผู้ที่อาจได้รับผลกระทบจำนวน 156,175 คน ส่วนในพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุดมีผู้ที่อาจได้รับผลกระทบจำนวน 17,262 คน การวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีการทำให้เรียบด้วยเทคนิคเอกซ์โพเนนเชียลสามารถนำมาใช้พยากรณ์ค่าปริมาณ PM10 เฉลี่ยรายเดือนได้ดี โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) อยู่ในช่วง 10.5 - 21.82 นอกจากนี้ เทคนิคการประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ยังสามารถนำมาใช้

ประมาณค่าความเข้มข้นของ PM10 ในบริเวณที่ไม่มีผลการตรวจวัดได้ ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผน ตัดสินใจ และแก้ไขปัญหา PM10 ได้ดียิ่งขึ้น

ABSTRACT

The study aims to forecast the particulate matter less than or equal to 10 microns in diameter (PM10) in 31 stations in Bangkok and surrounding provinces. The data of monthly average PM10 from 1997 to 2014, were analyzed to evaluate the dispersion of PM10 and demarcate the risk areas in Bangkok. The estimated data imputation technique was applied to represent the non-measurement data. The monthly average PM10 in 2015 was predicted using time series analysis technique. The calculated yearly average PM10 was analyzed in Geographic Information Systems (GIS) using data interpolation technique to classify five levels of risk areas, and then the size of areas. The number of affected people were analyzed by the overlay technique. The result showed that the 2015 yearly average PM10 was between 15.5 to 80.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest value was found at the station of Vibhavadi Forest Park Din Daeng, Chulalongkorn Hospital, and Phra Khanong District Office, respectively. For the size of risk areas in Bangkok, most of the areas (80.14%) were classified within moderate risk level and the highest risk area (1.95%) was 30.673 km^2 . For the analysis of the number of affected people, 156,175 people would be affected in high risk areas (the annual average PM10 exceeding standard) and 17,262 persons were in the highest risk areas. This study showed that the Time Series Analysis is a good technique to forecast the monthly average PM10. The Mean Absolute Percentage Errors (MAPE) was in the range of 10.5 to 21.82. In addition, GIS could be used to estimate the concentration of PM10 in the non-measurement data area. The results of the study could support the planning, decision making on effective prevention and air pollution management.

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน การวิเคราะห์อนุกรมเวลา ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
การประมาณค่าข้อมูลสูญหาย การประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่
ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

Keywords: PM10, Time Series Analysis, GIS, Imputation, Data Interpolation, MAPE

1. บทนำ

องค์การอนามัยโลก (WHO) รายงานการสำรวจมลพิษทางอากาศในช่วงปี 2553 - 2557 ในเกือบ 1,600 เมือง จาก 91 ประเทศทั่วโลก พบว่าคนเมืองทั่ว

โลกกว่าครึ่งหนึ่งอาศัยอยู่ในเมืองที่มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเกินกว่ามาตรฐานของ WHO ถึง 2.5 เท่า และมีประชากรเมืองเพียง 12 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่อาศัยในเมืองที่คุณภาพอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยสาเหตุหลักของมลพิษทางอากาศมาจากการปล่อย

ไอเสียจากยานพาหนะและโรงงาน นอกจากนี้ยังมาจากการปล่อยมลพิษจากอาคารบ้านเรือนด้วย (Breyer, 2014) เช่นเดียวกับในภูมิภาคอาเซียนที่ยังคงประสบปัญหามลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะหมอกควันข้ามแดน อันเกิดจากไฟป่าและการเผาป่าที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งในภาพรวมของเมืองใหญ่ในอาเซียนมีปริมาณ PM10 ที่ตรวจวัดส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้น เวียดนามซึ่งมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐานของประเทศ (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2556) ไม่ต่างจากรายงานขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD) ที่แสดงให้เห็นว่า ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ปริมาณ PM10 ของเมืองในอาเซียนได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากความพยายามดำเนินการมาตรการควบคุมมลพิษทางอากาศ แต่ยังคงพบค่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพอากาศขององค์การอนามัยโลก ถึงแม้อัตราการเกิดมลพิษทางอากาศในเขตเมืองในภูมิภาคอาเซียนจะต่ำกว่าในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนและอินเดียก็ตาม นอกจากนี้ OECD ยังได้ประมาณการค่าใช้จ่ายโดยรวมของมลพิษทางอากาศต่อเศรษฐกิจท้องถิ่นและระดับชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในปี 2553 ประเทศอินโดนีเซียมีค่าใช้จ่ายเกือบ 50 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ในประเทศไทยกว่า 27 พันล้านเหรียญสหรัฐ และในเวียดนามกว่า 20 พันล้านเหรียญสหรัฐ (OECD, 2014) โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) ได้คาดการณ์ว่ามลพิษทางอากาศทำให้ผู้คนมากกว่า 149,000 คนเสียชีวิตก่อนวัยอันควรเป็นประจำทุกปี เพิ่มขึ้น 130% จากปี 2547 (UNEP, 2014)

สำหรับ กทม. ก็ถูกจัดให้เป็นพื้นที่หนึ่งที่มีประสบปัญหามลพิษทางอากาศ อันเนื่องมาจากการเป็นเมืองหลวงของประเทศที่มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างจำนวนมากเพื่อ

รองรับการขยายตัวของเมือง ประกอบกับจำนวนรถยนต์จดทะเบียนสะสม ณ สิ้นปี 2558 ที่มีถึง 9,018,594 คัน (กรมการขนส่งทางบก, 2559) เหล่านี้ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในพื้นที่ กทม. ส่งผลต่อเนื่องกับสุขภาพอนามัยทั้งทางร่างกายและจิตใจของประชาชน

อย่างไรก็ตาม การดำเนินการมาตรการลดปัญหามลพิษทางอากาศในพื้นที่ กทม. เพื่อให้คุณภาพอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน รวมทั้งมีการติดตามตรวจสอบคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่อง แต่สถานการณ์คุณภาพอากาศของ กทม. ยังคงมีปัญหา โดยเฉพาะ PM10 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ดัชนีคุณภาพอากาศที่สำคัญในพื้นที่ กทม. แหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จากการจราจร และฝุ่นละอองจากฝุ่นดินที่ฟุ้งขึ้นมาจากพื้นถนนเป็นหลัก และอาจพบฝุ่นละอองที่มาจากการก่อสร้างอยู่บ้าง ในบริเวณที่มีโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัย หรือระบบขนส่งมวลชน (สำนักสิ่งแวดล้อม, 2556)

การติดตามตรวจสอบ PM10 จึงนับว่ามีความสำคัญมากสำหรับการวางแผน ควบคุม ป้องกัน และแก้ไขมลพิษทางอากาศให้ประสบผลสำเร็จในอนาคต ซึ่งหน่วยงานภาครัฐโดยกรมควบคุมมลพิษและ กทม. ก็ได้ดำเนินการติดตามตรวจสอบคุณภาพอากาศในพื้นที่ กทม. โดยใช้สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศซึ่งตั้งกระจายในหลายพื้นที่ของ กทม. แต่เนื่องจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบถาวรต้องใช้งบประมาณในการก่อสร้างและเดินระบบค่อนข้างสูง จึงเป็นปัญหาและข้อจำกัดในการติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศให้ครอบคลุมทุกพื้นที่เขตของ กทม. การวิจัยนี้จึงนำเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) มาใช้ในการพยากรณ์ค่า PM10 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. ปี 2558 และประยุกต์

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Systems: GIS) ในการประมาณค่าการแพร่กระจายของ PM10 ในบรรยากาศ เพื่อประเมินพื้นที่เสี่ยงและจำนวนผู้ที่อาจได้รับผลกระทบจากมลพิษดังกล่าว ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดแนวทางการจัดการมลพิษทางอากาศที่เหมาะสมต่อไป

ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สนับสนุนแนวคิดการวิจัยครั้งนี้ซึ่งได้แก่ ธัญญรัตน์และสุเพชร (2557) ได้ประยุกต์ GIS ประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) วิเคราะห์การแพร่กระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศทั่วไปจากค่าเฉลี่ย 12 เดือน (Moving Average) ในปี 2556 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ 9 สถานี มีการจัดระดับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัย 5 ระดับ และใช้เทคนิคการซ้อนทับข้อมูล (Overlay) วิเคราะห์จำนวนชุมชนที่ได้รับผลกระทบในระดับความเสี่ยงต่างๆ นอกจากนี้ Wisit (2015) ได้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลขของความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและการประเมิน Hazard Index ใน กทม. โดยสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของ BTEX และ 1,3 - Butadiene ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดคุณภาพอากาศในเขต กทม. ระหว่างปี 2551 - 2556 ทำการประเมินค่าความเข้มข้นของสารมลพิษเชิงพื้นที่ โดยทำการเปรียบเทียบกัน 3 วิธีคือ Ordinary Kriging, IDW และ spline เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุด การทำ Cross Validation และการทดสอบทางสถิติโดยรวมแสดงให้เห็นว่า IDW เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด อีกทั้งธนิธย์ (2554) ยังได้ประยุกต์ภูมิสารสนเทศเพื่อการประเมินคุณภาพอากาศ กรณีศึกษาจังหวัดชลบุรี โดยจัดทำแผนที่แบบจำลองคุณภาพอากาศ (Air Quality Index: AQI) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคุณภาพอากาศกับการกระจายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซโอโซน (O₃) และ PM10 โดยนำค่าก๊าซที่ได้แต่ละประเภทมาประมาณค่าเฉลี่ยเพื่อแสดงในรูปของแผนที่การกระจายตัวของก๊าซ และนำมาหาความสัมพันธ์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุและแสดงผลในรูปแบบแผนที่ เช่นเดียวกับงานวิจัยของวีรญา (2547) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับ GIS เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อภาวะมลพิษทางอากาศในเขต กทม. โดยการนำ GIS การวิเคราะห์หอนุกรมเวลา และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณมาบูรณาการกัน เพื่อศึกษามลพิษ 3 ประเภท ได้แก่ CO NO₂ และ SO₂ โดยนำเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่มาใช้ ซึ่งสามารถคาดการณ์ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซมลพิษในแต่ละพื้นที่ที่ไม่มีการตรวจวัดคุณภาพอากาศได้ ผลจากการประมาณค่าเชิงพื้นที่จะได้ผลลัพธ์แบ่งเป็นช่วงความเข้มข้นของก๊าซมลพิษแต่ละชนิด

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1.1 ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือน ระหว่างปี 2540 - 2557 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. และจังหวัดใกล้เคียง 31 สถานี (ดังตารางที่ 4) จำแนกเป็นสถานีใน กทม. 20 สถานี (เป็นของกรมควบคุมมลพิษ 16 สถานี และเป็นของ กทม. 4 สถานี) และเป็นสถานีในจังหวัดใกล้เคียงซึ่งเป็นของกรมควบคุมมลพิษ 11 สถานี ประกอบด้วย จังหวัดสมุทรปราการ 5 สถานี จังหวัดนนทบุรี 2 สถานี จังหวัดสมุทรสาคร 2 สถานี จังหวัดปทุมธานี 1 สถานี และจังหวัดฉะเชิงเทรา 1 สถานี (กรมควบคุมมลพิษ, 2558; สำนักสิ่งแวดล้อม, 2558) ทั้งนี้ข้อมูลที่รวบรวมได้แต่ละสถานีมีจำนวนข้อมูลและปีไม่เท่ากัน

2.1.2 สถิติจำนวนประชากรและบ้านใน กทม. จำแนกตามรายเขต ณ เดือนธันวาคม 2557 (สำนักบริหารการทะเบียน, 2557)

2.1.3 ข้อมูลเชิงพื้นที่ ได้แก่ ขอบเขตการปกครอง ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและอาคาร (สำนักผังเมือง, 2556) และตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2558; สำนักสิ่งแวดล้อม, 2558)

2.2 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนที่จัดเก็บ ตั้งแต่ปี 2540 - 2557 ถือเป็นข้อมูลอนุกรมเวลา (Time Series Data) เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีการบันทึกหรือเก็บรวบรวมในช่วงเวลาที่มีระยะห่างเท่าๆ กัน และต่อเนื่องกันตามช่วงเวลาที่ต้องการ ดังนั้น ข้อมูลอนุกรมเวลาจึงเป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนไปตามกาลเวลา (ในกรณีที่ข้อมูลช่วงใดช่วงหนึ่งขาดหายไป เราสามารถใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เข้าไปสร้างทดแทนข้อมูลสูญหายได้) (กัลยา, 2552; ระพีพรรณ, 2550)

การเตรียมข้อมูลค่า PM10 ให้สามารถใช้พยากรณ์ค่าในปี 2558 จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะว่าหากมีข้อมูลบางส่วนเป็นค่าว่าง (Null) หรือมีค่าสูญหาย จะไม่สามารถพยากรณ์ค่าด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาได้ จึงต้องประมาณค่าที่สูญหายโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ย (Mean Method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการเข้าใจและคำนวณ แต่ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนที่นำมาใช้มีแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง การประมาณค่าข้อมูลสูญหายโดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ไม่สูญหายทั้งหมดหรือค่าเฉลี่ยของข้อมูลในปีนั้นๆ จะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนจากความ เป็นจริงสูง ดังนั้น จึงปรับใช้วิธีค่าเฉลี่ยโดยกำหนดหลักเกณฑ์ในการพิจารณา คือ

1. คำนวณหาค่าข้อมูลที่สูญหายโดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนของเดือนนั้นๆ ในปีก่อนหน้าที่มีข้อมูลและปีถัดไปที่มีข้อมูลของสถานีสถานีตรวจวัดนั้นๆ

2. ในกรณีที่ไม่มีข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนของเดือนนั้นๆ ในปีก่อนหน้าของสถานีสถานีตรวจวัดนั้นๆ จะใช้ข้อมูลของเดือนนั้นๆ ในปีก่อนหน้านั้นแทน

3. ในกรณีที่ไม่มีข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนของเดือนนั้นๆ ในปีถัดไปของสถานีสถานีตรวจวัดนั้นๆ จะใช้ข้อมูลของเดือนนั้นๆ ในถัดๆ ไปแทน

4. หากไม่สามารถนำข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนของเดือนนั้นๆ ในปีก่อนหน้านั้นและปีถัดๆ ไปของสถานีสถานีตรวจวัดนั้นๆ มาใช้ได้เนื่องจากไม่มีการตรวจวัด จะใช้ข้อมูลของเดือนนั้นๆ ในปีก่อนหน้านั้นหรือปีถัดๆ ไปของสถานีสถานีตรวจวัดนั้นๆ เพียงค่าเดียวแทน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 การวิเคราะห์อนุกรมเวลา

คือการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือเป็นฟังก์ชันกับเวลา (วินัส, 2543) สาเหตุที่มีการนำข้อมูลอนุกรมเวลามาใช้พยากรณ์ข้อมูลในอนาคต เนื่องจากมีการเก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่อดีตต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ทำให้รู้ถึงรูปแบบหรือพฤติกรรมของข้อมูล รวมทั้งแนวโน้มของข้อมูลที่กำลังสนใจและต้องการพยากรณ์ โดยมีสมมติฐานที่ว่าข้อมูลที่จะพยากรณ์ในอนาคตย่อมมีรูปแบบหรือพฤติกรรมเช่นเดียวกับข้อมูลในอดีตนั่นเอง (ระพีพรรณ, 2550)

สำหรับการศึกษาความเคลื่อนไหวของข้อมูลอนุกรมเวลาซึ่งได้แก่ ข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือนในแต่ละสถานีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ตั้งแต่ปี 2540 - 2557 เป็นการพิจารณาในเบื้องต้นว่าอนุกรมเวลา มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด มีส่วนประกอบของอนุกรม

เวลา คือ แนวโน้ม ฤดูกาล วัฏจักร หรือเหตุการณ์ที่ผิดปกติหรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลา (Bowerman and O'Connell, 1993 อ้างถึงใน วรางคณา, 2556)

ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลที่จัดเตรียมไว้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาเพื่อพยากรณ์ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนในแต่ละสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศปี 2558 ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows เทคนิค Winter (Triple Exponential Smoothing) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีแนวโน้มและมีอิทธิพลของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง (กัลยา, 2552)

2.3.2 การวิเคราะห์ค่า PM10 เฉลี่ยรายปี

นำข้อมูล PM10 เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2540 - 2558 ของทุกสถานี มาหาค่าเฉลี่ยรายปีในแต่ละสถานี ซึ่งจะได้ค่า PM10 เฉลี่ยรายปี (Annual Average) เพื่อศึกษาแนวโน้มของ PM10 ในแต่ละปี โดยจะนำค่า PM10 เฉลี่ยปี 2558 เข้าสู่ขั้นตอนการประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่ต่อไป

2.3.3 การประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์

พิจารณาจากค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) เนื่องจากการวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เทียบกับค่าข้อมูลจริงโดยไม่พิจารณาเครื่องหมาย จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเปรียบเทียบอนุกรมเวลาหลายชุดเมื่อใช้วิธีการพยากรณ์เดียวกัน หรือเปรียบเทียบหลายวิธีเมื่อใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาชุดเดียวกัน (ประสพชัย, 2553) โดยที่ค่า MAPE ยิ่งน้อย หมายถึงการพยากรณ์ยิ่งแม่นยำ มีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์

MAPE (%)	ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ (Forecasting Power)
<10	การพยากรณ์ที่แม่นยำสูง (Highly Accurate Forecasting)
10-20	การพยากรณ์ที่ดี (Good Forecasting)
20-50	การพยากรณ์ที่พอสมเหตุสมผล (Reasonable Forecasting)
>50	การพยากรณ์ที่ไม่แม่นยำ (Weak and Inaccurate Forecasting)

แหล่งที่มา: Lewis, 1982 อ้างถึงใน Wang and Hsu, 2008

2.3.4 การประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่

ในการจัดเก็บข้อมูลในภาคสนามไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ทุกบริเวณ จึงจำเป็นต้องประมาณค่าข้อมูลของส่วนที่ขาดไป โดยใช้หลักการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Interpolation) เช่น การทำแผนที่ภูมิประเทศ การวัดข้อมูลความสูงและความลึก การวัดเป็นจุดตำแหน่ง การหาความหนาแน่นของประชากร แนวโน้มการกระจายตัวของโรคพืช สภาพภูมิอากาศ จำเป็นต้องสร้างข้อมูลเป็นพื้นที่ที่ต้องนำผลประมาณการนี้ไปสร้างข้อมูลอื่นต่อไป ซึ่งหลักการสร้างข้อมูลสามารถนำข้อมูลข้างเคียงมาหาค่าเฉลี่ยของระยะทางจากจุดหลายๆ จุดที่อยู่รอบและสัมพันธ์กัน (แก้วและคณะ, 2555) การประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่จึงเป็นการพยากรณ์ คาดการณ์ หรือทำนายค่าให้กับจุดภาพ (Pixel) ในข้อมูลประเภทแรสเตอร์ (Raster) จากข้อมูลจุดตัวอย่างที่มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยวิธีการนี้สามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าที่ไม่ทราบจากจุดใดๆ ทางภูมิศาสตร์ได้ ไม่ว่าจะเป็นความสูง ปริมาณน้ำฝน การกระจายตัวของสารเคมี ระดับเสียงรบกวน และอื่นๆ (สุเพชร, 2555)

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลค่า PM10 เฉลี่ยปี 2558 ของทุกสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ นำเข้าสู่โปรแกรม

ArcGIS for Desktop โดยเชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับพิกัดตำแหน่งทั้ง 31 สถานี เพื่อคาดการณ์การกระจายตัวของ PM10 จากสถานีตรวจวัดที่ทราบค่าให้กับบริเวณที่ไม่มีสถานีตรวจวัดโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าด้วยวิธีการ Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ด้วยค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก โดยตำแหน่งสถานีจะมีอิทธิพลในทางผกผันกับระยะทางสำหรับการกำหนดค่า PM10 ของแต่ละกริด (Cell) กล่าวคือ ตำแหน่งสถานีที่อยู่ใกล้กว่าจะมีค่าความสำคัญหรืออิทธิพลในการกำหนดค่า PM10 ของกริด (Cell) นั้นๆ มากกว่าตำแหน่งสถานีที่อยู่ไกลออกไป (กรมแผนที่ทหาร, 2555) ค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางจากจุดที่ไม่ทราบค่าไปยังจุดที่ทราบค่าจุดต่อไป ซึ่งจุดที่ทราบค่าที่อยู่ใกล้ที่สุดจะมีความสำคัญหรือมีค่าน้ำหนักมากที่สุดในการประมาณค่าจุดที่ไม่ทราบค่า (ธัญญรัตน์และสุเพชร, 2557)

2.3.5 การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยง PM10

หลังจากประมาณค่าโดยวิธีการ IDW แล้ว ทำการแบ่งช่วงชั้นข้อมูล (Classified) หรือจำแนกระดับความเข้มข้นของปริมาณ PM10 และผลกระทบต่อสุขภาพ โดยตัดแปลงจากดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index: AQI) ของ The Committee on the Medical Effects of Air Pollutants: COMEAP (2011) และดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยโดยแบ่งเป็น 5 ระดับ ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์กำหนดระดับเฉดสีแสดงความเข้มข้นของปริมาณ PM10 เฉลี่ยปี 2558 ไประดับเฉดสี บริเวณที่มีค่าสูงสุดกำหนดเป็นสีแดง (ประมาณ $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) แล้วไล่ระดับสีส้ม สีเหลือง สีเขียว และสีฟ้า ซึ่งกำหนดให้เป็นบริเวณที่มีค่าต่ำสุด (ประมาณ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ตามลำดับ จากนั้นจำแนกระดับความเข้มข้นของปริมาณ PM10 และระดับ

ความเสี่ยงเป็น 5 ระดับ คือ ต่ำที่สุด (ไม่เกิน $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ต่ำ ($30.1 - 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ปานกลาง ($40.1 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) สูง ($50.1 - 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และสูงที่สุด (เกิน $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) เสร็จแล้วตัดพื้นที่นอกเขต กทม. จะได้ชั้นข้อมูลการแพร่กระจายของ PM10 เฉพาะพื้นที่ กทม. แล้ววิเคราะห์พื้นที่และจำนวนผู้ที่ได้อาจารย์ผลกระทบจาก PM10 โดยใช้เทคนิคการซ้อนทับข้อมูล (Overlay) กับชั้นข้อมูล (Layer) แผนที่ฐาน (Base Map) และชั้นข้อมูลอาคารที่อยู่อาศัย

2.3.6 การวิเคราะห์จำนวนผู้ที่อาจได้รับผลกระทบ

ใช้วิธีการคาดประมาณจากจำนวนอาคารที่อยู่อาศัยประเภทต่างๆ ในพื้นที่ กทม. ในแต่ละระดับความเสี่ยง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากฐานข้อมูล GIS มีขั้นตอนดังนี้ (สำนักผังเมือง, 2550)

1. เลือกชั้นข้อมูลแผนที่ที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ ได้แก่ ชั้นข้อมูลการแพร่กระจายของ PM10 และชั้นข้อมูลประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและอาคาร (บ้านเดี่ยว บ้านแฝด ทาวน์เฮาส์ ห้องแถว และตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้ (ไม่รวมอาคารอยู่อาศัยรวม ได้แก่ คอนโดมิเนียม อพาร์ทเมนต์ แฟลต และหอพัก)

2. หาจำนวนหน่วยที่อยู่อาศัยในพื้นที่ศึกษาจากฐานข้อมูล โดยการซ้อนทับข้อมูลระหว่างชั้นข้อมูลการแพร่กระจายของ PM10 และชั้นข้อมูลประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและอาคาร

3. หาจำนวนประชากร (ตามทะเบียนราษฎร์) เฉลี่ยต่อครัวเรือน (ขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต) ในระดับเขตของ กทม. โดยคำนวณจากจำนวนประชากรรวมของเขตหารด้วย จำนวนบ้านในเขต มีหน่วยเป็น คน/ครัวเรือน

4. นำค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขตตามข้อ 3) มาปรับค่าสัมประสิทธิ์คงที่ตามประเภทอาคารตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ดังตารางที่ 2

5. คำนวณจำนวนประชากรเฉลี่ยแต่ละเขตในระดับความเสี่ยงต่างๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การหาค่าสัมประสิทธิ์คงที่ตามประเภทอาคาร

ประเภทอาคาร	ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ตามประเภทอาคาร
บ้านเดี่ยว	ค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต + 0.15
บ้านแฝด	ค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต
ทาวน์เฮาส์	ค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต - 0.1
ห้องแถว	ค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต - 0.1
ตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้	ค่าขนาดครัวเรือนเฉลี่ยรายเขต - 0.1

แหล่งที่มา: สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา, 2553; สำนักผังเมือง, 2550

ตารางที่ 3 การหาจำนวนประชากรเฉลี่ยในแต่ละเขตที่เสี่ยงต่อ PM10 ในระดับความเสี่ยงต่างๆ

พื้นที่เสี่ยง	ลักษณะที่อยู่อาศัย	จำนวนหน่วยที่อยู่อาศัย (H)	ขนาดครัวเรือนเฉลี่ย (F)	ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าคงที่)	จำนวนประชากร (คน)
เขต _x	บ้านเดี่ยว (a)	H _a	F _x	F _x + 0.15	H _a (F _x + 0.15)
	บ้านแฝด (b)	H _b	F _x	F _x	H _b F _x
	ทาวน์เฮาส์ (c)	H _c	F _x	F _x - 0.1	H _c (F _x - 0.1)
	ห้องแถว (d)	H _d	F _x	F _x - 0.1	H _d (F _x - 0.1)
	ตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้ (e)	H _e	F _x	F _x - 0.1	H _e (F _x - 0.1)
	สรุปรายเขต	ผลรวม			ผลรวม
กทม.	สรุปรวม	ผลรวมทุกเขต			ผลรวมทุกเขต

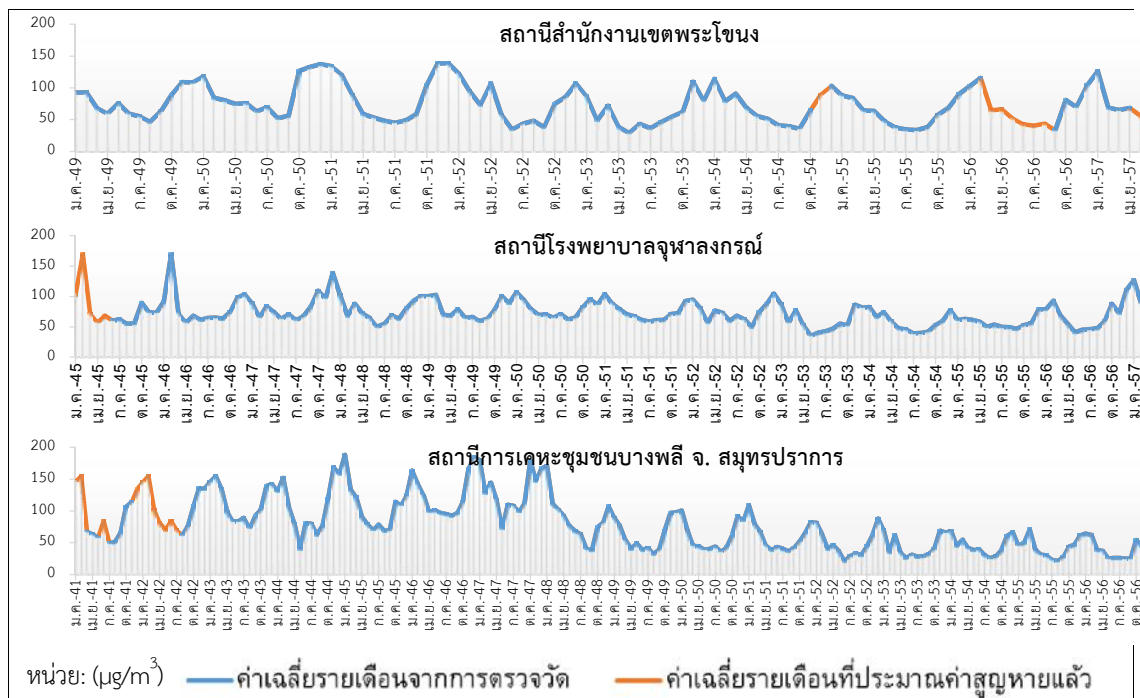
แหล่งที่มา: ดัดแปลงจากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา, 2553 ; สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร, 2550

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของข้อมูลอนุกรมเวลา

ข้อมูลอนุกรมเวลาซึ่งได้แก่ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนในแต่ละสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศพบว่า

ข้อมูลมีแนวโน้มและมีการผันแปรตามฤดูกาล โดยมีค่าสูงในช่วงเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ และธันวาคม รวมทั้งพบค่าต่ำในช่วงเดือนมิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคมของทุกปีเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างแสดงการเคลื่อนไหวของข้อมูลอนุกรมเวลา (ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือน)

3.2 ผลการพยากรณ์ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือน เมื่อประมาณค่าที่สูญหายของค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. และจังหวัดใกล้เคียง จำนวน 31 สถานี ตั้งแต่ปี 2540 - 2557 แล้วพบค่าอยู่ในช่วง 8.0 - 230.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยมีค่าข้อมูลที่สูญหายอยู่ในช่วงร้อยละ 0.46 - 28.57 ดังตารางที่ 4

สำหรับการพยากรณ์ค่า PM10 เฉลี่ยราย เดือนของปี 2558 พบค่าอยู่ในช่วง 8.9 - 111.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยพบค่าสูงสุดที่สถานีสวนปาวีราษฎร์ ดินแดง สถานี โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ และสถานีสำนักงานเขตพระ โขนง ที่ระดับความเข้มข้น 111.6 91.5 และ 90.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าเป็นพื้นที่ใน กทม. ทั้งสิ้น ส่วนค่าต่ำสุดพบที่สถานีสานบ้านพักกรม อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ จ. สมุทรปราการ สถานีโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ (สิงห์ราช

พิทยาคม) กทม. และสถานีตำรวจนครบาลโชคชัย กทม. ที่ระดับความเข้มข้น 8.9 11.2 และ 12.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4

3.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ พยากรณ์

ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ค่า PM10 เฉลี่ยรายเดือนจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน พื้นที่ กทม. และจังหวัดใกล้เคียง แสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยพบค่า MAPE อยู่ในช่วง 10.5 - 21.82 ส่วนใหญ่ ร้อยละ 90.32 จัดเป็นการพยากรณ์ที่ดี (Good Forecasting (10 - 20)) ส่วนอีกร้อยละ 9.68 จัดเป็น การพยากรณ์ที่พอสมเหตุสมผล (Reasonable Forecasting (20 - 50)) ตามหลักเกณฑ์ของ Lewis (1982 อ้างถึงใน Wang and Hsu, 2008)

3.4 ผลการวิเคราะห์ค่า PM10 เฉลี่ยรายปี

3.4.1 ค่า PM10 เฉลี่ยรายปีในทุกสถานี

จากการวิเคราะห์ค่า PM10 เฉลี่ยรายปีจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. และจังหวัดใกล้เคียง จำนวน 31 สถานี ตั้งแต่ปี 2540 - 2558 ดังตารางที่ 4 พบค่าอยู่ในช่วง 15.5 - 139.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยพบค่าสูงสุดที่สถานีโรงไฟฟ้าพระนครใต้ จ.สมุทรปราการ สถานีการเคหะชุมชนดินแดง กทม. และสถานีมหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต จ.ปทุมธานี ที่ระดับความเข้มข้น 142.0 139.7 และ 135.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนสถานีที่พบค่าต่ำสุดได้แก่ สถานีโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ (สิงหราชพิทยาคม) กทม. สถานีมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช จ.นนทบุรี และ สถานีโรงเรียนสมุทรสาครวิทยาลัย จ.สมุทรสาคร ที่ระดับความเข้มข้น 15.5 21.5 และ 22.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ

สำหรับการพยากรณ์ค่า PM10 เฉลี่ยปี 2558 พบค่าอยู่ในช่วง 8.9 - 111.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ เกินมาตรฐาน (มาตรฐานไม่เกิน 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) จำนวน 9 สถานี หรือ ร้อยละ 29 อยู่ในพื้นที่ กทม. จำนวน 5 สถานี และอยู่ในพื้นที่จังหวัดใกล้เคียง จำนวน 4 สถานี โดยพบค่าสูงสุดอยู่ในพื้นที่ กทม. ทั้งสิ้นที่สถานีสวนป่าวิภาวดี ดินแดง สถานีโรงพยาบาลจุฬา-ลงกรณ์ และสถานี สำนักงานเขตพระโขนง ที่ระดับความเข้มข้น 111.6 91.5 และ 90.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนค่าต่ำสุดพบที่ สถานีบ้านพักกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ จ.สมุทรปราการ สถานีโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ (สิงหราชพิทยาคม) กทม. และสถานีตำรวจนครบาล

โชคชัย กทม. ที่ระดับความเข้มข้น 8.9 11.2 และ 12.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ

3.4.2 ค่า PM10 เฉลี่ยรายปีใน กทม.

จากการวิเคราะห์ค่า PM10 เฉลี่ยรายปีในพื้นที่ กทม. ตั้งแต่ปี 2540 - 2558 (ตารางที่ 4) พบค่าอยู่ในช่วง 15.5 - 139.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ เกินมาตรฐาน (มาตรฐานไม่เกิน 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) จำนวน 5 สถานี หรือ ร้อยละ 25 ได้แก่ สถานีสวนป่าวิภาวดี ดินแดง สถานี สำนักงานเขตพระโขนง สถานีกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถานีกรมการขนส่งทางบก และสถานี โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ โดยพบค่าสูงสุดที่สถานีการเคหะชุมชนดินแดง สถานีสวนป่าวิภาวดี ดินแดง และ สถานีกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ระดับความเข้มข้น 139.7 116.5 และ 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนสถานีที่พบค่าต่ำสุดได้แก่ สถานีโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ (สิงหราชพิทยาคม) สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย และสถานีไปรษณีย์ราษฎร์บูรณะ ที่ระดับความเข้มข้น 15.5 22.3 และ 22.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ค่า PM10 เฉลี่ยเฉพาะปี 2558 พบค่าอยู่ในช่วง 15.5 - 80.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยพบค่าสูงสุดที่สถานีสวนป่าวิภาวดี ดินแดง สถานี โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ และสถานีสำนักงานเขตพระโขนง ปริมาณ 80.3 69.6 และ 66.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนค่าต่ำสุดพบที่สถานีโรงเรียนมัธยมวัดสิงห์ (สิงหราชพิทยาคม) สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย และสถานีการไฟฟ้าอยุธยาธนบุรี 15.5 16.2 และ 20.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 2

ตารางที่ 4 ข้อมูล PM10 จากสถานีตรวจคุณภาพอากาศ และการพยากรณ์ค่า PM10

สถานี	จังหวัด	ข้อมูล PM10 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ						ค่า PM10 เฉลี่ย (รวมปี 2558) (µg/m³)				
		ช่วงปี		จำนวนข้อมูล			MAPE (%)	รายเดือน		รายปี		เฉพาะปี 2558
		ตั้งแต่	ถึง	ที่มีค่า	ที่สูงหาย	%ที่สูงหาย		ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	
1. สถานีสวนป่า ดินแดง	กทม.	2549	2557	103	5	4.63	11.89	27.5	194.9	54.7	116.5	80.3
2. สำนักงานเขตพระโขนง	กทม.	2549	2557	98	10	9.26	21.21	28.9	138.8	58.7	89.2	66.5
3. สำนักงานเขตราชบุรีบูรณะ	กทม.	2549	2557	89	19	17.59	15.52	21.4	114.5	47.5	86.9	47.5
4. สำนักงานเขตราชเทวี	กทม.	2554	2557	44	4	8.33	11.82	21.2	105.6	39.6	64.4	39.6
5. มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา	กทม.	2551	2557	68	16	19.05	11.41	24.7	117.0	46.0	73.9	46.0
6. ไปรษณีย์ราชบุรีบูรณะ	กทม.	2552	2557	55	17	23.61	10.50	13.5	88.0	22.9	41.8	29.7
7. กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา	กทม.	2551	2557	70	14	16.67	19.10	19.7	131.0	37.2	47.7	44.5
8. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม	กทม.	2552	2557	57	15	20.83	14.36	20.5	91.4	42.9	51.0	46.6
9. สำนักงานการเคหะชุมชนคลองจั่น	กทม.	2540	2557	210	6	2.78	11.68	17.9	106.0	25.8	62.5	42.7
10. สนามกีฬาการเคหะชุมชนห้วยขวาง	กทม.	2540	2557	215	1	0.46	11.62	23.9	141.3	35.5	97.8	35.5
11. โรงเรียนนันทรีวิทยา	กทม.	2540	2557	197	19	8.80	13.03	16.8	144.4	34.1	82.6	41.2
12. โรงเรียนมัธยมวัดสิงห์	กทม.	2540	2557	208	8	3.70	15.41	10.0	145.5	15.5	89.8	15.5
13. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	กทม.	2545	2557	151	5	3.21	13.67	41.8	195.3	53.5	113.0	53.5
14. กรมการขนส่งทางบก	กทม.	2545	2557	151	5	3.21	21.82	12.5	158.0	34.9	79.6	59.8
15. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์	กทม.	2545	2557	152	4	2.56	12.93	35.1	169.5	56.6	83.3	69.6
16. สถานีการไฟฟ้าอยุธยาธนบุรี	กทม.	2540	2557	213	3	1.39	13.63	13.0	147.3	20.3	96.1	20.3
17. สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย	กทม.	2540	2557	214	2	0.93	13.18	12.0	169.2	16.2	122.0	16.2

ตารางที่ 4 ข้อมูล PM10 จากสถานีตรวจคุณภาพอากาศ และการพยากรณ์ค่า PM10 (ต่อ)

สถานี	จังหวัด	ข้อมูล PM10 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ						ค่า PM10 เฉลี่ย (รวมปี 2558) (µg/m ³)				
		ช่วงปี		จำนวนข้อมูล			MAPE (%)	รายเดือน		รายปี		เฉพาะ ปี 2558
		ตั้งแต่	ถึง	ที่มี ค่า	ที่สูญ หาย	%ที่ สูญ หาย		ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	
18. การเคหะชุมชน ดินแดง	กทม.	2540	2557	212	4	1.85	14.46	21.8	195.2	47.1	139.7	49.5
19. กรมประชาสัมพันธ์	กทม.	2547	2557	126	6	4.55	12.97	21.9	105.8	37.4	51.6	37.5
20. โรงเรียนบดินทร์ เดชา	กทม.	2541	2557	101	19	15.83	18.10	13.3	90.0	25.6	44.0	44.0
21. ศูนย์ฟื้นฟูอาชีพคน พิการและทุพพลภาพ	สมุทรปราการ	2540	2557	195	9	4.41	21.57	8.0	230.6	19.0	111.6	19.0
22. การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย	นนทบุรี	2540	2557	201	15	6.94	14.09	19.9	133.9	37.5	101.3	48.4
23. แขวงทางทาง สมุทรสาคร	สมุทรสาคร	2540	2557	203	13	6.02	13.16	20.0	157.7	27.3	104.3	58.7
24. โรงไฟฟ้า พระนครใต้	สมุทรปราการ	2541	2557	193	10	4.93	14.40	26.0	227.1	40.4	142.0	51.2
25. บ้านพักกรม อุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่	สมุทรปราการ	2541	2557	186	18	8.82	15.01	8.9	209.8	31.4	130.3	31.4
26. ศาลากลางจังหวัด สมุทรปราการ	สมุทรปราการ	2541	2557	197	7	3.43	19.87	24.6	212.4	42.8	125.9	50.3
27. การเคหะชุมชน บางพลี	สมุทรปราการ	2541	2557	193	11	5.39	14.29	20.6	188.2	39.2	130.1	39.2
28. มหาวิทยาลัย กรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต	ปทุมธานี	2544	2557	156	12	7.14	19.75	23.3	151.7	41.9	135.7	44.4
29. มหาวิทยาลัย สุโขทัยธรรมา- ธิราช	นนทบุรี	2544	2557	165	3	1.79	16.35	17.0	129.1	21.5	102.0	36.1
30. โรงเรียนสมุทรสาคร วิทยาลัย	สมุทรสาคร	2540	2557	213	3	1.39	17.79	11.7	148.0	22.1	86.9	54.2
31. อบต.วังเย็น อ.แปลงยาว	ฉะเชิงเทรา	2544	2557	120	48	28.57	15.94	12.0	76.5	23.9	45.8	33.1
น้อยที่สุด				44	1	0.46	10.50	8.0	76.5	15.5	41.75	15.5
มากที่สุด				215	48	28.57	21.82	41.8	230.6	58.7	141.95	80.3

3.5 ผลการวิเคราะห์แนวโน้ม PM10 เฉลี่ยรายปี

การวิเคราะห์แนวโน้ม PM10 เฉลี่ยรายปีจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. ระหว่างปี 2540 - 2558 พิจารณาจากเส้นแนวโน้มเชิงเส้น (Linear Trend) ดังรูปที่ 2 โดยพบว่า ส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะสถานีสำนักงานเขตราชเทวี สถานีมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สถานีการไฟฟ้าอยุธยาบุรี และสถานีตำรวจนครบาลโชคชัย ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่สถานีกรมอุทยาน-วิทยาบางนา และสถานีมหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ส่วนสถานีไปรษณีย์ราชบุรีบูรณะ และสถานีกรมการขนส่งทางบกกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศรายปี ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) พบว่าในช่วงปี 2540 - 2541 มีค่าเกินมาตรฐานทุกสถานี ตรวจวัด และจากนั้นเป็นต้นมาร้อยละที่ค่าเกินมาตรฐานมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง

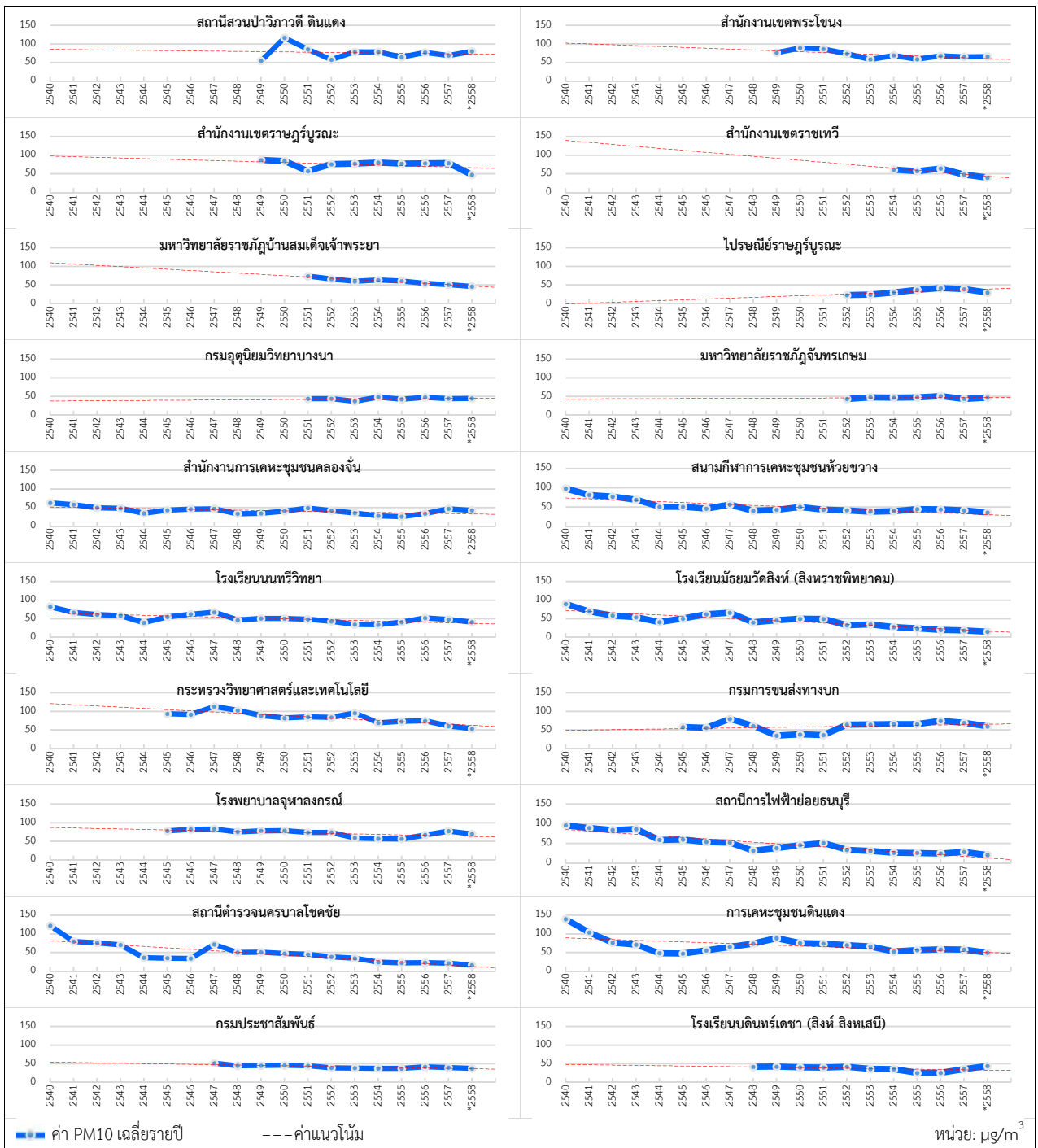
3.6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยง PM10

การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยง PM10 ปี 2558 โดยการประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการ IDW แสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ

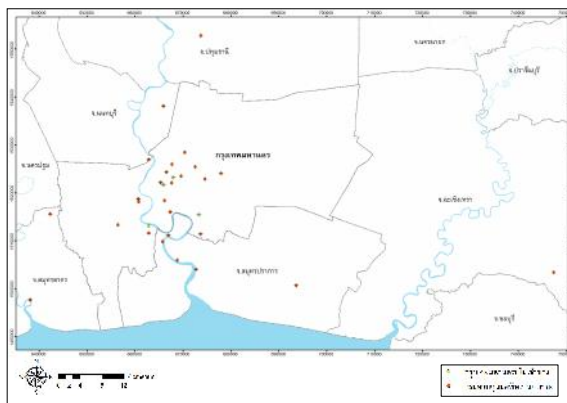
จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นการจำแนกระดับความเข้มข้นของปริมาณ PM10 ในพื้นที่ กทม. เป็น 5 ระดับความเสี่ยง สามารถคำนวณขนาดพื้นที่เสี่ยง PM10 ใน กทม. ได้ดังตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า พื้นที่เสี่ยงปานกลาง ($40.1 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) มีขนาดพื้นที่มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 80.14 ของพื้นที่ กทม. ส่วนพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุดมีขนาดพื้นที่น้อยที่สุดคือ 30.673 km^2 คิดเป็นร้อยละ 1.95 ของพื้นที่ กทม. โดยเขตที่มีพื้นที่อยู่ในบริเวณพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุดมีจำนวน 7 เขต เรียงลำดับจากมากไปน้อยประกอบด้วย พระโขนง ปทุมวัน บางรัก พญาไท ดินแดง คลองเตย สวนหลวง วัฒนา และสาทร ตามลำดับ โดยมีพื้นที่อยู่ระหว่าง $0.116 - 2.137 \text{ km}^2$

3.7 ผลการวิเคราะห์จำนวนผู้ที่อาจได้รับผลกระทบ

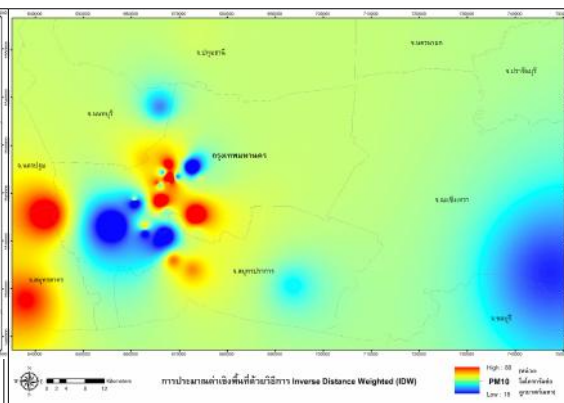
การวิเคราะห์โดยการซ้อนทับชั้นข้อมูลพื้นที่เสี่ยง PM10 กับชั้นข้อมูลประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและอาคาร (เฉพาะอาคารที่อยู่อาศัยประเภทบ้านเดี่ยว บ้านแฝด ทาวน์เฮาส์ ห้องแถว และตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้) ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงผลการกระจายของอาคารที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยงระดับต่างๆ ใน กทม.



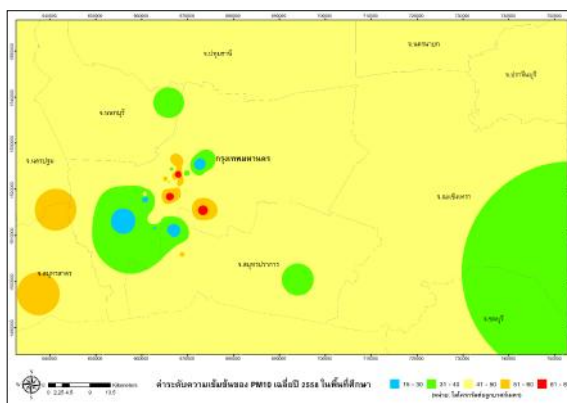
รูปที่ 2 แนวโน้มค่า PM10 เฉลี่ยรายปีใน กทม.



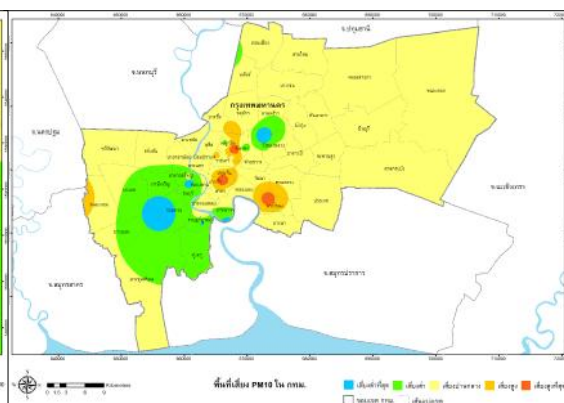
รูปที่ 3 ตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ
ในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 4 การประมาณค่าเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการ IDW



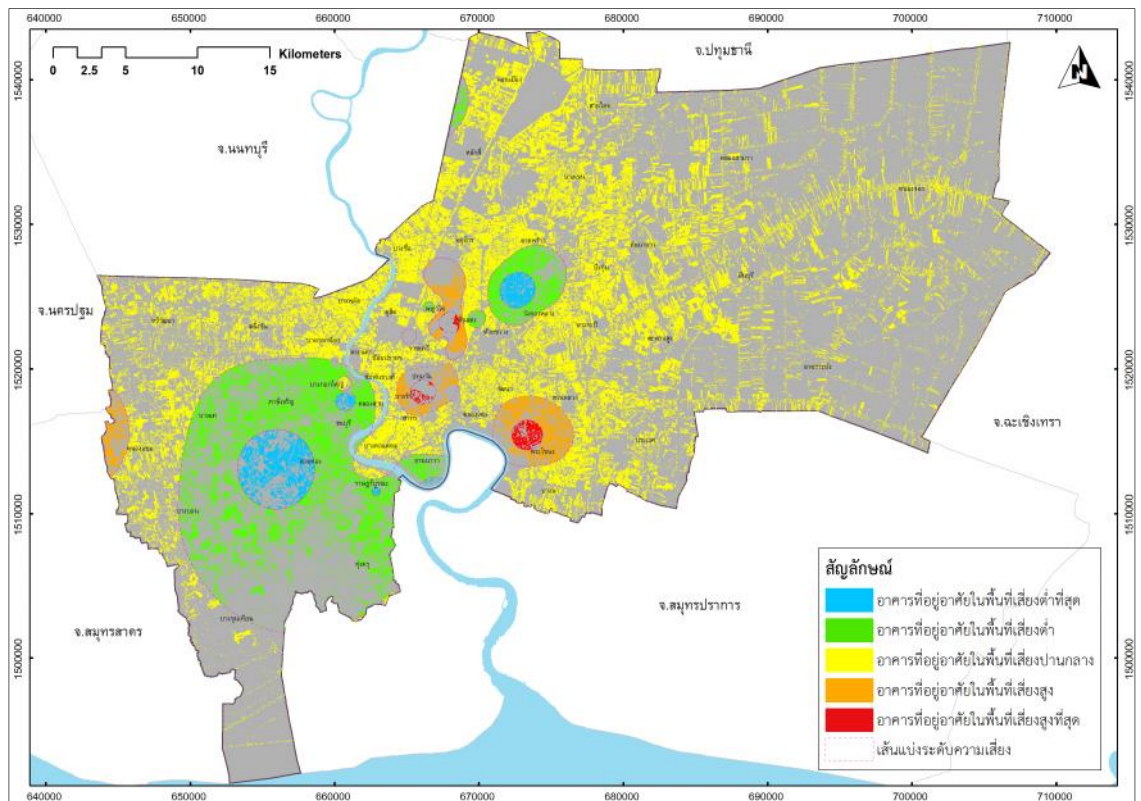
รูปที่ 5 การจำแนกระดับความเข้มข้นของปริมาณ
PM10



รูปที่ 6 ระดับพื้นที่เสี่ยง PM10 ใน กทม.

ตารางที่ 5 ขนาดพื้นที่เสี่ยง PM10 ใน กทม. ปี 2558 (คำนวณด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์)

ระดับความเสี่ยง	ระดับความเข้มข้นของ PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ขนาดพื้นที่เสี่ยง		ร้อยละ
		ตารางกิโลเมตร (km^2)	ไร่	
พื้นที่เสี่ยงต่ำที่สุด	น้อยกว่า 30	30.673	19,170.6	1.95
พื้นที่เสี่ยงต่ำ	30.1 - 40	227.541	142,213.1	14.44
พื้นที่เสี่ยงปานกลาง	40.1 - 50	1,262.960	789,350.0	80.14
พื้นที่เสี่ยงสูง	50.1 - 60	47.282	29,551.3	3.00
พื้นที่เสี่ยงสูงที่สุด	มากกว่า 60	7.419	4,636.9	0.47
พื้นที่รวม		1,575.875	984,921.9	100.00



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์อาคารที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยง PM10

จากรูปที่ 7 สามารถคำนวณจำนวนอาคารที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยง PM10 โดยจำแนกตามประเภทอาคารที่อยู่อาศัย ผลปรากฏดังตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าอาคารที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยงปานกลางมีจำนวนอาคารที่อยู่อาศัยมากที่สุดร้อยละ 69.86 และเมื่อพิจารณาตามประเภทอาคารที่อยู่อาศัยพบว่า เป็นบ้านเดี่ยวมากที่สุดร้อยละ 53.35

ระดับความเสี่ยง	จำนวนอาคารที่อยู่อาศัย					รวม	ร้อยละ
	บ้านเดี่ยว	บ้านแฝด	ทาวน์เฮาส์	ห้องแถว	ตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้		
พื้นที่เสี่ยงต่ำที่สุด	23,567	1,734	9,766	1,942	23,646	60,655	4.00
พื้นที่เสี่ยงต่ำ	147,133	7,732	53,745	5,106	94,872	308,588	20.34
พื้นที่เสี่ยงปานกลาง	599,679	24,135	244,775	16,684	174,369	1,059,642	69.86
พื้นที่เสี่ยงสูง	34,074	970	17,212	1,234	24,954	78,444	5.17
พื้นที่เสี่ยงสูงที่สุด	4,794	82	1,772	18	2,848	9,514	0.63
จำนวนอาคารที่อยู่อาศัยรวม	809,247	34,653	327,270	24,984	320,689	1,516,843	100.00
ร้อยละ	53.35	2.28	21.58	1.65	21.14	100.00	-

จากการวิเคราะห์จำนวนประชากรเฉลี่ยแต่ละเขตในระดับความเสี่ยงต่างๆ ตามตารางที่ 3 โดยคำนวณจากฐานข้อมูลประชากรปี 2557 ทำให้ทราบจำนวนประชากรที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยง PM10 ในกทม. ปรากฏผลดังตารางที่ 7 โดยในภาพรวมทั้งพื้นที่กรุงเทพมหานครพบว่า มีจำนวนประชากรทั้งสิ้น 3,375,761 คน และเมื่อพิจารณาในแต่ละพื้นที่เสี่ยงจะเห็นได้ว่า จำนวนประชากรส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงปานกลาง รองลงมาอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่ำ พื้นที่เสี่ยงสูง พื้นที่เสี่ยงต่ำที่สุด และพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุด ตามลำดับ

ตารางที่ 7 จำนวนประชากรที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยง PM10 ใน กทม. (คำนวณจากฐานข้อมูลประชากรปี 2557)

ระดับความเสี่ยง	ระดับความเข้มข้นของ PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	จำนวนประชากรที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยง	ร้อยละ
พื้นที่เสี่ยงต่ำที่สุด	น้อยกว่า 30	139,278	4.13
พื้นที่เสี่ยงต่ำ	30.1 - 40	707,648	20.96
พื้นที่เสี่ยงปานกลาง	40.1 - 50	2,355,398	69.77
พื้นที่เสี่ยงสูง	50.1 - 60	156,175	4.63
พื้นที่เสี่ยงสูงที่สุด	มากกว่า 60	17,262	0.51
รวม		3,375,761	100.00

หมายเหตุ เฉพาะประชากรที่อาศัยอยู่ในอาคารประเภทบ้านเดี่ยว บ้านแฝด ทาวน์เฮาส์ ห้องแถว และตึกแถว/อาคารครึ่งตึกครึ่งไม้

4. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ค่า PM10 เฉลี่ยปี 2558 จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศใน กทม. อยู่ในช่วง 15.5 - 80.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในบรรยากาศโดยทั่วไป และมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับ ส่วนพื้นที่ที่มีปัญหาได้แก่ บริเวณสถานีสวนปาวีภาวดี ดินแดง สถานีโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สถานีสำนักงานเขตพระโขนง สถานีกรมการขนส่งทางบก และสถานีกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งยังมีค่า PM10 สูงกว่ามาตรฐาน ทั้งนี้สาเหตุสำคัญของปัญหาฝุ่นละอองใน กทม. สูงเกินมาตรฐานส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จากการจราจร และฝุ่นละอองจากฝุ่นดินที่ฟุ้งขึ้นมาจากพื้นถนนเป็นหลัก และอาจพบ

จากตารางที่ 7 ประชากรที่อยู่อาศัยในพื้นที่เสี่ยงปานกลางจำนวนมากที่สุด 2,355,398 คน คิดเป็นร้อยละ 69.77 ของจำนวนประชากรที่คาดการณ์ (3,375,761 คน) ส่วนในพื้นที่เสี่ยงสูงที่สุดมีประชากรที่อยู่อาศัยจำนวน 17,262 คน คิดเป็นร้อยละ 0.51 ซึ่งพบอยู่ในพื้นที่ 9 เขต เรียงจากมากไปน้อยประกอบด้วย พระโขนง บางรัก ดินแดง สวนหลวง คลองเตย วัฒนา พญาไท ปทุมวัน และสาทร ตามลำดับ โดยมีจำนวนอยู่ระหว่าง 62 - 7,591 คน

ฝุ่นละอองที่มาจากการก่อสร้างอยู่บ้าง ในบริเวณที่มีโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัย หรือระบบขนส่งมวลชน (สำนักสิ่งแวดล้อม, 2556)

4.2 ปริมาณ PM10 ใน กทม. มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปล่อยควันดำของรถยนต์ดีเซลลดลง การเพิ่มความเข้มงวดในการตรวจจับของเจ้าหน้าที่ การห้ามนำรถเมล์และรถร่วมบริการเอกชนควันดำวิ่งให้บริการประชาชนตามคำสั่งของศาลปกครองสูงสุด รวมทั้งมีการกำหนดมาตรฐานไอเสียสำหรับยานพาหนะควบคู่กับมาตรฐานของเชื้อเพลิงเป็น EURO4 ทำให้ความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศในเขต กทม. ลดลง (Wisit, 2015) แต่ถึงแม้ว่าคุณภาพอากาศโดยรวมจะมีแนวโน้มลดลง แต่ในหลาย

พื้นที่ยังมีคุณภาพอากาศเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นความเสี่ยงของประชาชนที่จะได้รับอันตรายจากฝุ่นละอองขนาดเล็กใน กทม. สอดคล้องกับรายงานของกรมควบคุมมลพิษ (2557) ที่จัดให้พื้นที่ในกรุงเทพมหานครติด 5 ลำดับแรกของประเทศที่มีปริมาณฝุ่นละอองสูงสุด

4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ PM₁₀ ในบรรยากาศด้วยการประยุกต์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์ สามารถนำเสนอข้อมูลการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากจุดที่มีการตรวจวัดไปยังจุดที่ไม่ทราบค่าได้ โดยสามารถแจกแจงเส้นชั้นระดับปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ระดับต่างๆ และจำแนกพื้นที่เสี่ยงใน กทม. ได้

4.4 การวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดเรื่องจำนวนสถานี ตรวจวัดคุณภาพอากาศในกรุงเทพมหานครที่มีเพียง 21 สถานี ไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ นอกจากนี้ลักษณะอากาศในแต่ละฤดูกาล รวมทั้งทิศทางลม ความเร็วลม และปริมาณฝน ยังมีผลต่อค่า PM₁₀ ในบรรยากาศ ซึ่งไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ จึงอาจทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ในการวิจัยครั้งต่อไปจึงควรนำข้อมูลอุตุนิยมวิทยามาใช้ประกอบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณ PM₁₀

4.5 การเลือกเทคนิค Winter (Triple Exponential Smoothing) มาวิเคราะห์อนุกรมเวลาเพื่อพยากรณ์ค่า PM₁₀ เฉลี่ยรายเดือน เป็นเพียงเทคนิคหนึ่งที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีแนวโน้มและมีอิทธิพลของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง (กัลยา, 2552) แต่ยังมีเทคนิคอื่นที่สามารถพยากรณ์ได้เช่นกันไม่ว่าจะเป็นวิธีการพยากรณ์ของโฮลต์ บ็อกซ์-เจนกินส์ หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นต้น ในการศึกษาต่อไปจึงควรเปรียบเทียบเทคนิคการพยากรณ์ในแต่ละวิธี และวัดค่าวัดความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์ด้วย

ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAD) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ไปพร้อมกันเพื่อให้ได้เทคนิคการพยากรณ์ที่ดีและเหมาะสมกับข้อมูลคุณภาพอากาศมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมควบคุมมลพิษและกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง สำนักสิ่งแวดล้อม กทม. สำหรับข้อมูลคุณภาพอากาศที่ใช้ประกอบการวิจัย และขอขอบคุณสำนักผังเมือง กทม. สำหรับข้อมูลและคำชี้แนะด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. (2559). จำนวนรถจดทะเบียน (สะสม) ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558, แหล่งข้อมูล: http://apps.dlt.go.th/statistics_web/vehicle.html. ค้นเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม 2559.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2557). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2556. กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2558). ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนย้อนหลังจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.
- กรมแผนที่ทหาร. (2555). การใช้โปรแกรมภูมิสารสนเทศในการสร้างแบบจำลองความสูงสามมิติของภูมิประเทศ. กรุงเทพฯ: กรมแผนที่ทหาร.
- กัลยา วาณิชย์บัญชา. (2552). การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. กรุงเทพฯ: ธรรมสาร.
- แก้ว นวลฉวี, สุพรรณ กาญจนสุธรรม, ประพนธ์ วิบูลสุข และชิมชัย เศรษฐาพราหมณ์. (2555). ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์. ใน: สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. เล่มที่ 37. กรุงเทพฯ: โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 200-201.

- ธัญญรัตน์ ไชยคราม และ สุเพชร จิรขจรกุล. (2557). การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย จังหวัดระยอง. *Thai Journal of Science and Technology* 3(3): 160-172.
- ธนิย์ อินทรรัตน์. (2554). การประยุกต์ใช้ภูมิสารสนเทศเพื่อการประเมินคุณภาพอากาศ: กรณีศึกษา จังหวัดชลบุรี. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 16(1): 32-40.
- ประสพชัย พสุนนท์. (2553). สถิติธุรกิจ. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- ระพีพรรณ พิริยะกุล. (2550). CT487 Computer Simulation. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- วรางคณา กิริติวิบูลย์. (2556). การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ระหว่างวิธีบอกรี-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และวิธีการพยากรณ์รวม สำหรับการพยากรณ์อุณหภูมิเฉลี่ยต่อเดือนในเขตกรุงเทพมหานคร. *วิทยาศาสตร์บูรพา* 18(2): 149-160.
- วินัส ฤาชัย. (2543). เศรษฐศาสตร์สถิติ : สถิติเศรษฐศาสตร์. เชียงใหม่ : เชียงใหม่พรินติ้ง.
- วิรุญา แผงแสง. (2547). ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อภาวะมลพิษทางอากาศในเขตกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2556). สู่ประชาคมอาเซียน: บริหารจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างไรให้ยั่งยืน. ใน: เอกสารประกอบการประชุมประจำปี 2556 ของ สสช. เรื่อง เส้นทางประเทศไทย...สู่ประชาคมอาเซียน. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 179.
- สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา. (2553). โครงการประเมินผลและปรับปรุงผังเมืองรวมเมืองนครราชสีมา, แหล่งข้อมูล: http://www.phisutprojects.com/web3852/database/Update1/content/content_2.htm. ค้นเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2558.
- สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง. (2557). สถิติจำนวนประชากร ปี พ.ศ. 2557, แหล่งข้อมูล: http://stat.bora.dopa.go.th/stat/xstat/new/POP_HSE/stat_t57.txt. ค้นเมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม 2558.
- สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร. (2550). รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการพัฒนาศูนย์พาณิชย์กรรมชุมชนย่านบางกะปิ. กรุงเทพฯ: โชติจินดา มูเชลคอนซัลแตนท์.
- สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. (2556). รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการจ้างที่ปรึกษาเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพอากาศและเสียงบริเวณถนนที่เสี่ยงต่อการเกิดมลพิษ ปีงบประมาณ 2555. กรุงเทพฯ: ยูไนเต็ด แอนนาลิสต์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์.
- สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. (2558). ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนย้อนหลังจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพฯ: สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร.
- สุเพชร จิรขจรกุล. (2555). เรียนรู้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcGIS 10.1 for Desktop. นนทบุรี: เอ.พี.กราฟิคดีไซน์และการพิมพ์ จำกัด.
- Breyer, M. (2014). The 10 cities with the worst air pollution in the world, from: <http://www.mnn.com/earth-matters/climate-weather/stories/the-10-cities-with-the-worst-air-pollution-in-the-world>. Retrieved 10 January 2015.
- Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. (2011). Review of the UK Air Quality Index, from: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/304633/COM_EAP_review_of_the_uk_air_quality_index.pdf. Retrieved 8 April 2015.
- OECD. (2014). Towards Green Growth in Southeast Asia, OECD Green Growth Studies, from: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264224100-en>. Retrieved 30 October 2016.
- UNEP. (2014). Regional Reports, Southeast Asia: Actions taken by governments to improve

- air quality, from: http://www.unep.org/transport/airquality/RegionalReports/SouthEastAsia_report.pdf. Retrieved 31 October 2016.
- Wang, CH and Hsu, LC. (2008). Using genetic algorithms grey theory to forecast high technology industrial output. *Applied Mathematics and Computation* 195: 256-263.
- Wisit Thongkum. (2015). Numerical Analysis of Volatile Organic Compounds Concentration and Evaluation of Hazard Index in Bangkok, Thailand. Doctoral dissertation, Mahidol University.

