

องค์ความรู้ อุตุนิยมวิทยา และการแพร่กระจาย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ขนานแก้ว
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์
ดร.ศิริพงศ์ สุขขทวี



องค์ความรู้เรื่อง อุตุนิยมวิทยาและการแพร่กระจาย

ISBN 978-616-94015-2-0

ชุดความรู้ องค์ความรู้เพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ

พิมพ์ครั้งแรก กรกฎาคม 2565

จำนวน 100 เล่ม

ชื่อผู้แต่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ขนบแก้ว คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์นรี สลิตาภรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศิริพงศ์ สุทธิวี ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม

คณะบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธรวดี สุวัฒน์ิกะ

พิสูจน์อักษร ณัฐจิต อันเมฆ และ นิชนันท์ นันทาวงค์
ปกและรูปเล่ม โยชิตา กรกิจเจริญ

จัดพิมพ์โดย

ศูนย์วิชาการเพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ (ศวอ.)
สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย
122/4 ซ.เรวดี ถ.พระราม 6 แขวงพญาไท
เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ : 02-617-1530-1 โทรสาร : 02-279-9720 E-mail : info@ccas.or.th

พิมพ์ที่

ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ เอ เซอร์วิส
33 ซ.อินทามระ 4 ถ.สุทธิสารวินิจฉัย แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ : 02-279-5233 โทรสาร : 02-279-5322

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการส่งเสริมสุขภาพ (สสส.)

คำนำ

องค์ความรู้เล่มนี้เป็นหนึ่งในชุดความรู้ องค์ความรู้เพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ ซึ่งจัดทำโดยศูนย์วิชาการเพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ (ศวอ.) ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)

ศวอ. มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นศูนย์รวมนักวิชาการในการพัฒนาองค์ความรู้เป็นฐานในการขับเคลื่อน สื่อสารชี้นำสังคม และสนับสนุนมาตรการ นโยบาย เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ อย่างมีส่วนร่วมของภาคีเครือข่าย ทำหน้าที่รวบรวมองค์ความรู้ด้านฝุ่น $PM_{2.5}$ พัฒนาค้นคว้างานวิชาการ พัฒนานวัตกรรม และพัฒนาระบบข้อมูลงานวิชาการเพื่อใช้ในการป้องกันและแก้ไขปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ และเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจกำหนดมาตรการป้องกันและแก้ไขปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ อย่างยั่งยืน

องค์ความรู้ที่อยู่ในมือของท่านนี้เป็นเอกสารที่ผ่านการรวบรวมสังเคราะห์ ประชุมเสวนารับฟังความคิดเห็น เพื่อการสื่อสาร เผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการป้องกันและแก้ไขปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ สู่สังคมและกลุ่มเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อปลูกฝังความเป็นเจ้าของในทรัพยากรอากาศสะอาดร่วมกัน

ทั้งนี้ ศวอ. มีเป้าหมายที่สำคัญคือสร้างการมีส่วนร่วมกับภาคีเครือข่าย ทั้งภาครัฐ ภาคประชาชน และภาคเอกชน เพื่อร่วมกันขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยร่วมจัดทำข้อเสนอแนะเกี่ยวกับมาตรการ และนโยบายในการป้องกันแก้ไขปัญหามลพิษอากาศทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ความเข้มข้นของฝุ่นละอองมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลักที่สำคัญ 3 ปัจจัย คือ แหล่งกำเนิด ภูมิประเทศ และอุตุนิยมวิทยา ปัจจัยแหล่งกำเนิดเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างมลพิษในบรรยากาศ ขณะเดียวกันหากพื้นที่ดังกล่าวมีภูมิประเทศที่มีลักษณะปิด ฝุ่นละอองจะสามารถสะสมตัวได้ดีกว่าพื้นที่ที่มีลักษณะเปิดโล่ง ส่วนปัจจัยสุดท้ายคือปัจจัยอุตุนิยมวิทยา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่จะกล่าวถึงในองค์ความรู้ฉบับนี้ อุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางลม ความกดอากาศ ความชื้นแสงอาทิตย์ ปริมาณฝน ฯลฯ ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ที่มีความกดอากาศสูงและลมสงบทำให้เกิดภาวะอากาศปิด (การระบายอากาศน้อยทั้งแนวตั้งและแนวระนาบ) ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีความเข้มข้นสูงในพื้นที่ ในทางกลับกัน ในพื้นที่ที่มีความกดอากาศต่ำและลมแรง มีแนวโน้มการระบายอากาศได้ดีทั้งแนวตั้งและแนวระนาบ ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีความเข้มข้นต่ำในพื้นที่ การเข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฝุ่นละอองจึงจำเป็นต้องนำข้อมูลต่าง ๆ เข้ามาประกอบการพิจารณา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่เป็นปัจจัยกำหนดการแพร่กระจายของมลพิษในพื้นที่ต่าง ๆ อย่างไรก็ดีตาม การส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศเนื่องจากปัจจัยอุตุนิยมวิทยานั้น เมื่อเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันจะมีความซับซ้อนขึ้นกับว่า ณ ขณะนั้นกลุ่มปัจจัยใดที่มีอิทธิพลมากกว่ากัน

แบบจำลองทางด้านอากาศจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ อุตุนิยมวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ และการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิด รวมถึงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ทั้งโดยขั้นพื้นฐานและขั้นสูงเข้ามาช่วยในการคาดการณ์การแพร่กระจายและความเข้มข้นของมลพิษอากาศที่มีความซับซ้อนได้ แบบจำลองประเภทแรกที่จะกล่าวถึง คือ แบบจำลองทางสถิติ ซึ่งเป็นการใช้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้โดยเครื่องมือตรวจวัด โดยเฉพาะจากดาวเทียมตรวจวัดสิ่งแวดล้อมและเซนเซอร์ไอโอที (IoT sensor) จากนั้นใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่ออธิบายตัวแปรอิสระ (เช่น ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (ในที่นี้คือมลพิษอากาศ) และพัฒนาเป็นสมการในการคาดการณ์ ในส่วนของแบบจำลองประเภทที่สอง เป็นการใชแบบจำลองการแพร่กระจายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศ ได้แก่ แบบจำลองแบบกล่อง (Box model) แบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian) และแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี (Chemical transport model) การเลือกใช้แบบจำลองแต่ละประเภทยานั้นสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ความรวดเร็วในการทำงาน จำนวนข้อมูล และระดับความเชื่อมั่นของผลที่ต้องการ

1. ปัจจัยอุตุนิยมวิทยาและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ

การเคลื่อนที่ของอากาศส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ ดังนั้นมลพิษอากาศได้รับอิทธิพลสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในพื้นที่ หากอากาศสงบและมลพิษไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ความเข้มข้นของมลพิษเหล่านี้จะก่อตัวขึ้น ในทางกลับกันเมื่อลมพัดแรงและปั่นป่วน มลพิษจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ดี และแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความเข้มข้นของมลพิษลดลง ดังนั้นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาช่วยให้สามารถระบุแหล่งที่มาของมลพิษ และใช้ทำนายเหตุการณ์มลพิษอากาศได้ เช่น การผกผันของบรรยากาศและวันที่ความเข้มข้นของมลพิษสูง และยังใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองและคาดการณ์คุณภาพอากาศด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นเมื่อศึกษาคุณภาพอากาศ การตรวจวัดปัจจัยอุตุนิยมวิทยาจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในบรรยากาศ

ตัวแปรอุตุนิยมวิทยามีมากมายหลากหลายชนิด ในองค์ความรู้นี้จะกล่าวถึงตัวแปรอุตุนิยมวิทยาพื้นฐานและตัวแปรอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ ได้แก่ ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิ รังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความกดอากาศ และความสูงผสม โดยเฉพาะความสูงผสม (Mixing layer height) ซึ่งเป็นการวัดความปั่นป่วนของอากาศในแนวตั้งของพื้นที่ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเจือจางและการสะสมตัวของมลพิษที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดใกล้ผิวดิน ความสูงผสมเปลี่ยนแปลงขึ้นกับการการผกผันของอุณหภูมิในแนวตั้งและความกดอากาศ หากความสูงผสมอยู่ใกล้ผิวดิน (ระดับไม่กี่ร้อยเมตร) จะทำให้การแพร่กระจายต่ำ เกิดการสะสมตัวได้ดี มลพิษมีความเข้มข้นสูง ในกรณีตรงข้ามหากความสูงผสมอยู่ห่างผิวดิน (ระดับหลายร้อยเมตรขึ้นไป) จะทำให้การแพร่กระจายสูง เจือจางได้ดี มลพิษมีความเข้มข้นต่ำ โดยความเข้าใจสำหรับประชาชนทั่วไปมักจะพูดหรือได้ยินกันว่าอากาศปิด สำหรับกรณีความสูงผสมต่ำ และอากาศเปิดสำหรับกรณีความสูงผสมสูง ตามลำดับ

2. การประเมินความเข้มข้นและการแพร่กระจายของฝุ่นละอองด้วยดาวเทียมและเซนเซอร์

ในปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีดาวเทียมและเซนเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ ดาวเทียมสามารถให้ข้อมูลคุณภาพอากาศที่ครอบคลุม

พื้นที่ทั่วโลกซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะสำหรับบริเวณพื้นที่ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศยังมีข้อจำกัดในการเข้าถึง สำหรับเทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วและประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันด้วยต้นทุนต่ำและคุณภาพที่เหมาะสมกับราคา สามารถดำเนินการเชื่อมโยงข้อมูลและดึงข้อมูลผ่านระบบไอโอที (IoT) และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยระบบข้อมูลขนาดใหญ่ (Big data) ทำให้เพิ่มโอกาสอย่างมากที่จะทำให้กระบวนการวิเคราะห์เป็นไปโดยอัตโนมัติ ด้วยข้อมูลที่มีจำนวนมากทำให้มีความแม่นยำสำหรับคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลดีในการพัฒนานโยบายที่เกี่ยวข้องในอนาคต การใช้งานของดาวเทียมและเซนเซอร์สรุปไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ข้อเสนอแนะความเหมาะสมในการใช้งานดาวเทียมและเซนเซอร์

ประเภท	ความเหมาะสมในการใช้งาน
ดาวเทียม	ดาวเทียมเหมาะสำหรับการประเมินสถานการณ์การแพร่กระจายของมลพิษในพื้นที่กว้าง ระดับประเทศ ระดับภูมิภาค และระดับโลก เพื่อเป็นข้อมูลฐาน และเพื่ออธิบายสถานการณ์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลจะเป็นลักษณะย้อนหลังและใกล้เคียงกับเวลาจริง (Near real-time)
เซนเซอร์	IoT sensor เหมาะสำหรับการเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษแบบตามเวลาจริง (Real-time) การเคลื่อนที่ของมลพิษ การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าในระยะเวลาสั้น และการประเมินหรือจำแนกรูปแบบของแหล่งกำเนิดมลพิษ

3. แบบจำลองทางด้านอากาศสำหรับคาดการณ์ความเข้มข้นและการแพร่กระจายของฝุ่นละออง

จากความซับซ้อนและการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาของปัจจัยอุตุนิยมวิทยา แบบจำลองทางด้านอากาศเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการนำเข้าข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ อุตุนิยมวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ และการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิด เพื่อคาดการณ์ความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ แบบจำลองทางด้านอากาศอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง

ขั้นพื้นฐานและขั้นสูงมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฝุ่นละออง ตั้งแต่แบบจำลองอย่างง่าย เช่น แบบจำลองแบบกล่อง (Box model) จากนั้นพัฒนาเป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจัดอยู่ในระดับกลาง เช่น แบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian) จนมาเป็นแบบจำลองขั้นสูง เช่น แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี (Chemical transport model) ที่ใช้สมการความต่อเนื่องของออยเลอร์ (Euler continuity equation) และรวมปฏิกิริยาเคมีในการคาดการณ์ การเลือกใช้แบบจำลองแต่ละประเภทนั้นสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ความรวดเร็วในการทำงาน จำนวนข้อมูล และระดับความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2

ข้อเสนอแนะความเหมาะสมในการใช้งานแบบจำลองต่าง ๆ

ประเภทแบบจำลอง	ความเหมาะสมในการใช้งาน
แบบจำลองแบบกล่อง	แบบจำลองแบบกล่องเหมาะสำหรับประเมินเพื่อคัดกรองสถานการณ์มลพิษเบื้องต้นในพื้นที่ระดับเล็ก (ประมาณ 1 km) และมีแหล่งกำเนิดมลพิษเป็นแบบพื้นที่ (Area source)
แบบจำลองเกาส์เซียน	แบบจำลองเกาส์เซียนเหมาะสำหรับประเมินแหล่งกำเนิดมลพิษแบบจุด (Point source) และมีการปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่อง เช่น ปล่อยระบายนมลพิษจากอุตสาหกรรม สำหรับขนาดพื้นที่ระดับกลาง
แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี	แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีเหมาะสำหรับประเมินความเข้มข้นของมลพิษอากาศที่มลพิษส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในอากาศ (มลพิษทุติยภูมิ) ไม่ได้เกิดจากการปล่อยตรงจากแหล่งกำเนิดทั้งหมด เช่น ฝุ่นละอองทุติยภูมิและโอโซน โดยเหมาะสำหรับขนาดพื้นที่ระดับกลาง (ภูมิภาค/ประเทศ) จนถึงระดับใหญ่ (ทวีป/โลก)

4. แนวทางการดำเนินงานด้านวิจัยและนโยบายในอนาคต

สำหรับแนวทางการวิจัยในปัจจุบันและอนาคต ยังควรให้ความสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมิวิทยาที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของมลพิษอากาศ (และขณะเดียวกัน การ

เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมวิทยา เช่นเดียวกัน) การลงทุนทางเครื่องมือขั้นสูงที่ใช้ในการตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา เช่น เรดาร์ ไลดาร์ หรือโซดาร์ เพื่อใช้ดูการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง โดยเฉพาะความสูงผสม จะทำให้เข้าใจสถานการณ์มลพิษและควบคุมการปล่อยมลพิษได้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับสถานการณ์และพื้นที่ ในแง่ของการคาดการณ์พบว่า การบูรณาการแบบจำลองต่าง ๆ ทั้งด้วยวิธีทางสถิติด้วย ข้อมูลดาวเทียมและเซนเซอร์ไอโอที และแบบจำลองการแพร่กระจายในการประเมินการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเติมเต็มข้อจำกัดของแต่ละเครื่องมือ

นอกจากนี้ในเชิงนโยบายพบว่า การเข้าถึงแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยา กรมควบคุมมลพิษ หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานภาครัฐอื่น ๆ ควรจะสามารถดำเนินการและดึงข้อมูลที่ต้องการผ่านช่องทางออนไลน์ได้โดยตรงและได้โดยง่าย สำหรับบุคคลทั่วไปที่ไม่ได้มีพื้นฐานด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการใช้ข้อมูลและประเมินสถานการณ์มลพิษอากาศได้อย่างทันทั่วทั้ง



สารบัญ

คำนำ

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

บทที่ 1	บทนำ	12
บทที่ 2	ปัจจัยส่งผลต่อการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ	16
	2.1 ลักษณะภูมิประเทศ	17
	2.2 อุตุนิยมวิทยา	21
บทที่ 3	พื้นฐานความรู้อุตุนิยมวิทยา	22
บทที่ 4	แหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยา	29
	4.1 แหล่งข้อมูลระดับชาติ	30
	4.2 แหล่งข้อมูลระดับสากล	33
บทที่ 5	ความสัมพันธ์ของอุตุนิยมวิทยาและการแพร่กระจายมลพิษอากาศ	36
	5.1 ระดับใหญ่	37
	5.2 ระดับกลาง	38
	5.3 ระดับเล็ก	38
บทที่ 6	การประเมินการแพร่กระจายและความเข้มข้นมลพิษอากาศ	39
	6.1 วิธีทางสถิติ	40
	6.2 แบบจำลองการแพร่กระจาย	50
บทที่ 7	บทสรุป	59
	เอกสารอ้างอิง	63
	ภาคผนวก	67

MONDAY



TUESDAY



WEDNESDAY



THURSDAY



FRIDAY



สารบัญรูป

รูปที่ 1	ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ	17
รูปที่ 2	การผกผันของบรรยากาศในบริเวณพื้นที่แอ่งกระทะและการสะสมตัวของมลพิษอากาศ	18
รูปที่ 3	การไหลเวียนของอากาศเนื่องจากอิทธิพลของลมบก-ลมทะเลในพื้นที่ชายฝั่ง (พื้นที่เปิดโล่ง)	18
รูปที่ 4	การเกิดอุณหภูมิมักผันที่เกิดจากทะเล	19
รูปที่ 5	การระบายอากาศบนถนนเปิดโล่งและบนถนนที่รายล้อมด้วยอาคารสูง	20
รูปที่ 6	การผกผันของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของมลพิษอากาศ	21
รูปที่ 7	การเปลี่ยนแปลงฝุ่นละออง PM_{10} ในพื้นที่ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี	28
รูปที่ 8	ช่องทางการรับบริการข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา	31
รูปที่ 9	ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก NOAA	33
รูปที่ 10	ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก WYOMING UNIVERSITY (ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดิน)	34
รูปที่ 11	ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก WYOMING UNIVERSITY (ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาชั้นบน)	34
รูปที่ 12	หลักการทำงานของดาวเทียม	42
รูปที่ 13	ตัวอย่างสมการทางสถิติที่ใช้คาดการณ์ฝุ่นละออง PM_{10} และ $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ต่าง ๆ ระดับโลก	44
รูปที่ 14	ตัวอย่างสมการทางสถิติที่ใช้คาดการณ์ฝุ่นละออง PM_{10} และ $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย	45
รูปที่ 15	พื้นที่ติดตั้งเซนเซอร์ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และสมการทางสถิติสำหรับคาดการณ์ $PM_{2.5}$	49
รูปที่ 16	แบบจำลองแบบกล่อง	50
รูปที่ 17	แบบจำลองเกาส์เซียน	52
รูปที่ 18	แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีด้วยออยเลอร์เรียน	54
รูปที่ 19	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการแพร่กระจาย	57

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	สรุปแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยา	35
ตารางที่ 2	ระดับพื้นที่จำแนกตามอิทธิพลของอุตุนิยมวิทยา	37
ตารางที่ 3	ตัวอย่างดาวเทียมตรวจวัดคุณภาพอากาศ	43
ตารางที่ 4	ประเภทและหลักการทำงานของเซนเซอร์ราคาประหยัด	46
ตารางที่ 5	ตัวอย่างแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี	55
ตารางที่ 6	สรุปความเหมาะสมในการใช้งานของแบบจำลองต่าง ๆ	57

MONDAY



22°C
71.6 °F

TUESDAY



22°C
71.6 °F

WEDNESDAY



22°C
71.6 °F

THURSDAY

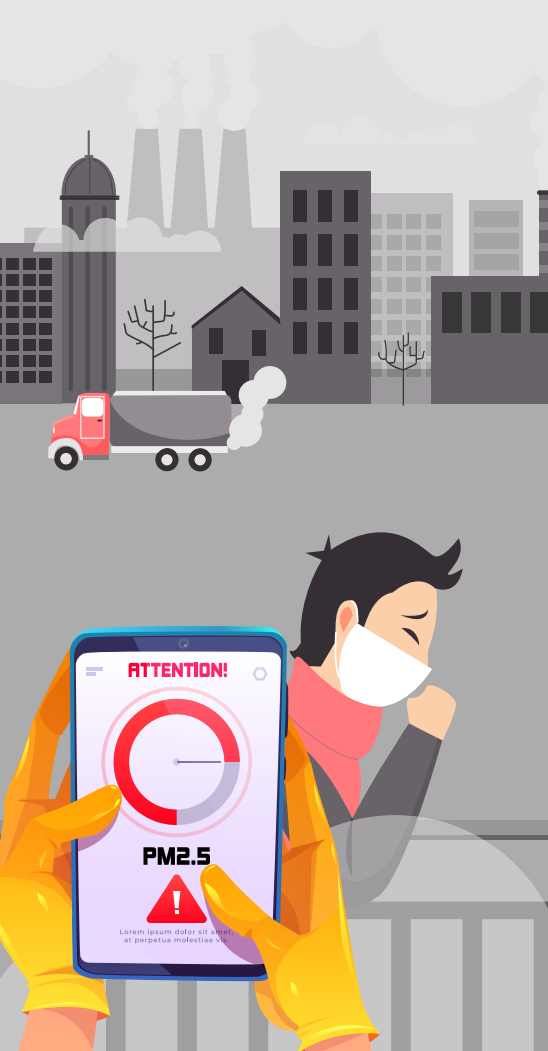


22°C
71.6 °F

FRIDAY



22°C
71.6 °F



1 บทนำ

มลพิษอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละอองและก๊าซต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด เมื่อสะสมตัวอยู่ในชั้นบรรยากาศและมีปริมาณมากพอ ย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝุ่นละอองในอากาศ ได้แก่ PM₁₀ (ฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร) และ PM_{2.5} (ฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร) ซึ่งถูกกล่าวถึงอย่าง

กว้างขวางในช่วงที่ผ่านมาในประเทศไทย หลังจากที่มีการสื่อสารและส่งต่อข้อมูลความเข้มข้นสูงของ PM_{2.5} ในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่ต่อเนื่องกันเป็นเวลานานในช่วงปลายปี พ.ศ. 2562 ถึงต้นปี พ.ศ. 2563 และตามมาด้วยสถานการณ์ฝุ่นละออง PM_{2.5} ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดเชียงรายซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจและแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญของภาคเหนือ หากย้อนข้อมูลกลับไปในอดีตมากกว่า 2 ทศวรรษที่ผ่านมา ฝุ่นละอองในประเทศไทยมีความเข้มข้นสูงเป็นประจำในช่วงฤดูหนาว (ประมาณเดือนพฤศจิกายน – เดือนกุมภาพันธ์) ของทุกปี การรับรู้และตื่นตัวของภาคีสื่อมวลชนและภาคประชาชนจึงมีบทบาทสำคัญในการผลักดันเพื่อแก้ปัญหาฝุ่นละอองและมลพิษอื่น ๆ ในบรรยากาศของประเทศไทย

ความเข้มข้นของฝุ่นละอองมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลักที่สำคัญ 3 ปัจจัย คือ แหล่งกำเนิด ภูมิประเทศ และอุตุนิยมวิทยา ปัจจัยแหล่งกำเนิด เช่น การจราจรขนส่ง อุตสาหกรรม การเผาในที่โล่ง ฯลฯ นั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างมลพิษในบรรยากาศ หากพื้นที่ดังกล่าวมีภูมิประเทศที่มีลักษณะปิด เช่น พื้นที่แอ่งกระทะที่โอบล้อมด้วยภูเขา ฝุ่นละอองจะสามารถสะสมตัวได้ดีกว่าพื้นที่ที่มีลักษณะเปิดโล่ง ในขณะเดียวกันปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางลม ความกดอากาศ ความชื้น แสงอาทิตย์ ปริมาณฝน ฯลฯ ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศ ทำให้เกิดภาวะอากาศปิด (การระบายอากาศน้อยทั้งแนวตั้งและแนวระนาบ) ดังตัวอย่างสถานการณ์ เช่น ในพื้นที่ที่มีความกดอากาศสูงและลมสงบ มีแนวโน้มการระบายอากาศได้ต่ำทั้งแนวตั้งและแนวระนาบ ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีความเข้มข้นสูงในพื้นที่ดังกล่าว ในทางกลับกัน ในพื้นที่ที่มีความกดอากาศต่ำและลมแรง มีแนวโน้มการระบายอากาศได้ดีทั้งแนวตั้งและแนวระนาบ ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีความเข้มข้นต่ำในพื้นที่ดังกล่าว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของฝุ่นละอองในพื้นที่ต่าง ๆ พบว่าพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทยจะมีความเข้มข้นโดยเฉลี่ยต่ำกว่าพื้นที่อื่น ๆ เนื่องจากได้รับอิทธิพลของลมประจำถิ่น (ลมบก-ลมทะเล) และลมมรสุมทั้งปี การเข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฝุ่นละอองจึงจำเป็นต้องนำข้อมูลต่าง ๆ เข้ามาประกอบการพิจารณา โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่เป็นปัจจัยกำหนดการแพร่กระจายของมลพิษในพื้นที่ต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศเนื่องจากปัจจัยอุตุนิยมวิทยานั้น เมื่อเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันจะมีความซับซ้อนขึ้นกับว่า ณ ขณะนั้นกลุ่มปัจจัยใดที่มีอิทธิพลมากกว่ากัน





แบบจำลองทางด้านอากาศจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ อุตุนิยมหาวิทยาลัย ลักษณะภูมิประเทศ และการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิด รวมถึงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ทั้งโดยชั้นพื้นฐานและชั้นสูงเข้ามาช่วยในการคาดการณ์การแพร่กระจายและความเข้มข้นของมลพิษอากาศที่มีความซับซ้อนได้ แบบจำลองประเภทแรกที่จะกล่าวถึง คือ แบบจำลองทางสถิติ ซึ่งเป็นการใช้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้โดยเครื่องมือตรวจวัด จากนั้นใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่ออธิบายตัวแปรอิสระ (เช่น ปัจจัยทางอุตุนิยมหาวิทยาลัย) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (ในที่นี้คือมลพิษอากาศ) และพัฒนาเป็นสมการในการคาดการณ์ต่อไป ทั้งนี้การคาดการณ์ทางสถิติจะมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใดขึ้นกับปริมาณข้อมูลทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ดังนั้นการคาดการณ์ทางสถิติจึงใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินความเข้มข้นของฝุ่นละอองด้วยเครื่องมือตรวจวัดประเภทเซนเซอร์ IoT (IoT Sensor) และการตรวจวัดด้วยดาวเทียม ในส่วนของแบบจำลองประเภทที่สอง เป็นการใช้แบบจำลองการแพร่กระจายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฝุ่นละออง ตั้งแต่แบบจำลองอย่างง่าย เช่น แบบจำลองแบบกล่อง (Box Model) แล้วพัฒนาเป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้นจัดอยู่ในระดับกลาง เช่น



องค์ความรู้ชุดนี้ได้รวบรวมและสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อแสดงให้เห็นที่มาความสำคัญของปัจจัยอุตุนิมวิทยาที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองในบรรยากาศ เพื่อให้ประชาชนทั่วไปเข้าใจธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่มีค่าสูงที่เกิดขึ้นในบรรยากาศได้ ซึ่งจะนำไปสู่การรับรู้และผลักดันให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยข้อเท็จจริง นอกจากนี้องค์ความรู้ชุดนี้ยังได้รวบรวม สังเคราะห์ และเสนอแนะแบบจำลองต่าง ๆ และการใช้งานของแบบจำลองเพื่อใช้คาดการณ์ความเข้มข้นของฝุ่นละอองตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม

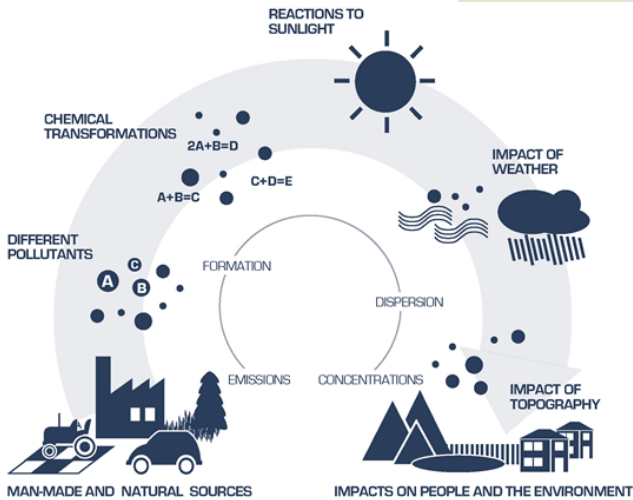
แบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian) จนมาเป็นแบบจำลองขั้นสูง เช่น แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี (Chemical Transport Model) ที่ใช้สมการความต่อเนื่องของออยเลอร์ (Euler Continuity Equation) และรวมปฏิกิริยาเคมีในการคาดการณ์ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แบบจำลองแต่ละประเภทนั้นสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ความรวดเร็วในการทำงาน จำนวนข้อมูล และระดับความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ



2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการ แพร่กระจายของ มลพิษอากาศ

ระดับการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิด ไม่ได้เป็นเพียงปัจจัยเดียวที่กำหนดความเข้มข้นของมลพิษอากาศ หากแต่ปัจจัยอื่น ๆ เช่น สภาพอากาศหรือสภาพทางอุตุนิยมวิทยา การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอากาศ และการเคลื่อนย้ายมลพิษ ล้วนมีบทบาทสำคัญ (รูปที่

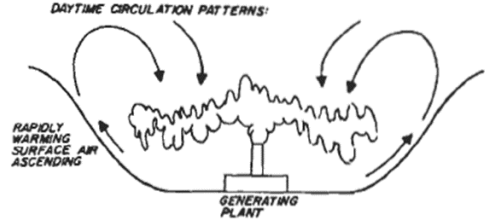
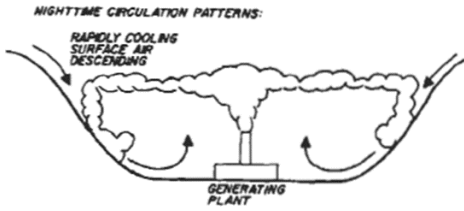
1) ดังนั้นการลดการปล่อยมลพิษไม่ได้หมายความว่าจะสามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษนั้นในสัดส่วนที่เท่ากันได้ อย่างไรก็ตามนอกเหนือไปจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดมลพิษแล้ว ยังพบว่าการแพร่กระจายและความเข้มข้นของมลพิษนั้นได้รับอิทธิพลสำคัญจากลักษณะทางภูมิประเทศและอุตุนิยมวิทยาอีกด้วย



รูปที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ (EEA, 2013)

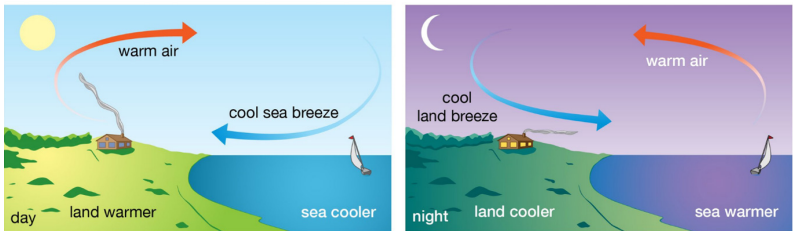
2.1 ลักษณะภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ พื้นที่ราบและลุ่มจะมีการไหลเวียนของอากาศได้ดีทั้งแนวระนาบและแนวตั้ง แตกต่างจากพื้นที่ที่มีลักษณะปิดกั้นด้วยด้วยโครงสร้างตามธรรมชาติ เช่น ภูเขา หรือโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น อาคารสูง ลักษณะการไหลเวียนของอากาศในพื้นที่ที่ปิดกั้นด้วยโครงสร้างดังกล่าวเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากมีสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ลักษณะพื้นที่ที่เป็นแอ่งกระทะ เช่น พื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งเสริมให้เกิดการผกผันของบรรยากาศ (Atmospheric inversion) และความคงตัวของบรรยากาศ (Atmospheric stability) ทำให้มลพิษอากาศสะสมตัวได้ดี (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การผกผันของบรรยากาศในบริเวณพื้นที่แอ่งกระทะและ การสะสมตัวของมลพิษอากาศ (Cheremisinoff, 2002)

เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชายฝั่งทะเล ที่เป็นพื้นที่เปิดโล่ง และได้รับ อิทธิพลจากลมประจำถิ่น คือ ลมบก-ลมทะเล (Land-Sea breeze) ก็จะมีพบว่าอากาศสามารถระบายได้ดีเนื่องจากการถ่ายเทและไหลเวียนอากาศได้ดี จึงทำให้ลดการสะสมตัวของมลพิษอากาศในพื้นที่ดังกล่าว (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การไหลเวียนของอากาศเนื่องจากอิทธิพลของลมบก-ลมทะเลในพื้นที่ชายฝั่ง (พื้นที่เปิดโล่ง)(Britannica, 2022)

อย่างไรก็ตามในพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่มีอุตสาหกรรมหนาแน่น อย่างกรณีของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากลมทะเล ในตอนกลางวันจะมีลมพัดจากชายฝั่งทะเลผ่านโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดเข้าสู่เขตชุมชนในตัวเมือง ซึ่งลมทะเลนี้จะพัดพาเอามลพิษอากาศที่เกิดจากแหล่งกำเนิดในพื้นที่เขตนิคมอุตสาหกรรมเข้าสู่ชุมชนไปด้วยทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับชุมชนตามมา โดยมากปัญหามักจะเกิดในช่วงฤดูร้อนถึงฤดูฝน (เดือนเมษายน-เดือนกรกฎาคม) ซึ่งเป็นช่วงที่ชายฝั่งทะเลได้รับอิทธิพลจากลมตะวันตกเฉียงใต้มากเป็นพิเศษ

นอกจากนี้บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดยังเกิดอุณหภูมิลดลงที่เกิดจากทะเล (Marine inversion) ทั้งนี้เนื่องจากลมทะเลพัดพาอากาศเย็นเหนือผิวน้ำทะเลเข้าสู่พื้นดินที่มี อุณหภูมิสูงกว่า อากาศอุ่นเหนือพื้นดินจะถูกแทนที่ด้วยอากาศเย็นจากน้ำทะเล อากาศอุ่นจะ ลอยตัวขึ้นดังรูปที่ 4 และไปกีดขวางอยู่ด้านบนบนอากาศเย็นที่ปกคลุมพื้นดิน ผลก็คือเกิดอุณหภูมิลดลง ซึ่งทำให้มลพิษอากาศจากโรงงานในพื้นที่เขตนิคมอุตสาหกรรมไม่สามารถแพร่กระจาย ออกไปได้และสะสมตัวอยู่ในเขตนิคมอุตสาหกรรมและเขตชุมชนในตัวเมืองมาบตาพุด



รูปที่ 4 การเกิดอุณหภูมิลดลงที่เกิดจากทะเล (ปัญชา, 2561)

นอกจากนี้ในกรณีของเขตเมืองพบว่าบนถนนเปิดโล่ง ความเข้มข้นของมลพิษอากาศจะเจือจางอย่างรวดเร็วเมื่อห่างจากถนนออกไป ในทางกลับกัน การระบายอากาศจะค่อนข้างต่ำบนถนนที่รายล้อมไปด้วยอาคารสูง ทำให้มลพิษสะสมตัวได้ดีบริเวณถนนที่ถูกปิดกั้นด้วยอาคารสูง ในบางครั้งอาจพบว่าความเข้มข้นของมลพิษอากาศมีค่าสูงแม้ว่าสภาพการจราจรมีความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 5)



(ก) ถนนเปิดโล่ง

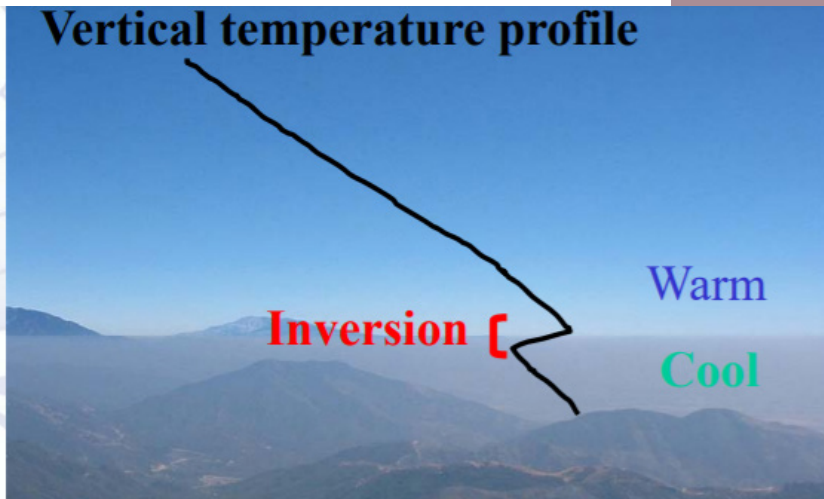


(ข) ถนนที่รายล้อมด้วยอาคารสูง

รูปที่ 5 การระบายอากาศบนถนนเปิดโล่งและบนถนนที่รายล้อมด้วยอาคารสูง
(HYS, 2021)

2.2 อุตุนิยมวิทยา

อุตุนิยมวิทยากับมลพิษอากาศมีความเกี่ยวข้องกันเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกระบวนการอุตุนิยมวิทยาที่เกิดขึ้นใกล้กับพื้นผิวโลก อุตุนิยมวิทยาส่งผลกระทบต่อมลพิษอากาศและในขณะเดียวกันมลพิษอากาศก็ส่งผลกระทบต่ออุตุนิยมวิทยา จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการสะสมตัวของมลพิษอากาศจะเกิดขึ้นได้ดีภายใต้ชั้นที่มีการผกผันของอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องทางอุตุนิยมวิทยา เหตุการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ชัดสำหรับการแพร่กระจายของมลพิษที่ถูกจำกัดในแนวตั้ง (รูปที่ 6) ที่มีการผกผันและความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น (Temperature Inversion) การผกผันของอุณหภูมิจึงมีความสำคัญเนื่องจากยับยั้งการแพร่กระจายของมลพิษอากาศในแนวตั้งและกักมลพิษเอาไว้ใกล้พื้นผิวโลก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอุตุนิยมวิทยาอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6 การผกผันของอุณหภูมิจึงส่งผลต่อการสะสมตัวของมลพิษอากาศ (IITM, 2021)

3

พื้นฐานความรู้ อุตุนิยมวิทยา

การเคลื่อนที่ของอากาศส่งผลต่อความชื้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ ดังนั้นมลพิษอากาศได้รับอิทธิพลสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในพื้นที่ หากอากาศสงบและมลพิษไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ความเข้มข้นของมลพิษเหล่านี้จะก่อดำเนิน ในทางกลับกัน เมื่อลมพัดแรงและปั่นป่วน มลพิษจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ดี และแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความเข้มข้นของมลพิษลดลง

SUNDAY
04.12.2015



RAIN

10°C

NIGHT

SUNDAY
04.12.2015



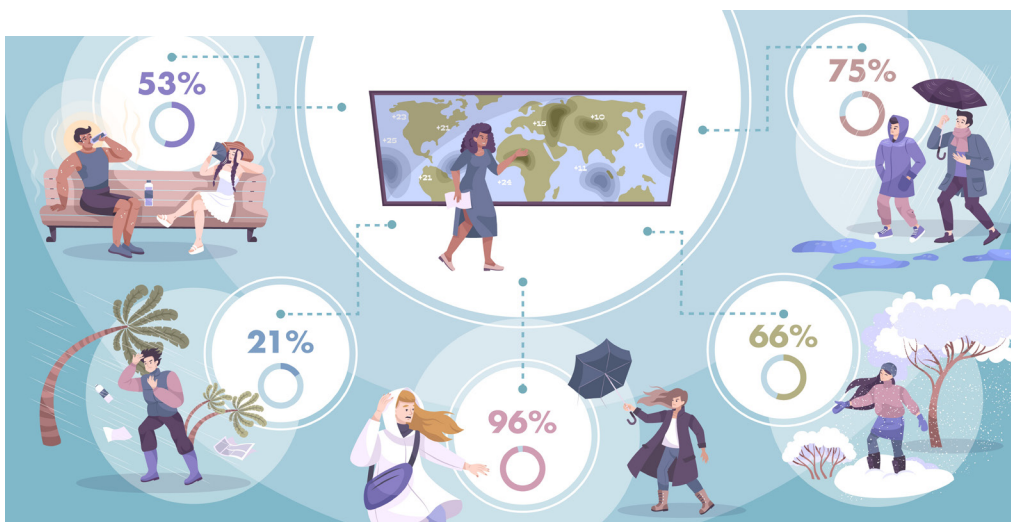
PARTLY CLOUDY

15°C

DAY

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาช่วยให้สามารถระบุแหล่งที่มาของมลพิษ และใช้ทำนายเหตุการณ์มลพิษอากาศได้ เช่น การผกผันของบรรยากาศ และวันที่ความเข้มข้นของมลพิษสูง และยังใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสู่สำหรับการจำลองและคาดการณ์คุณภาพอากาศด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นเมื่อศึกษาคุณภาพอากาศ การตรวจวัดปัจจัยอุตุนิยมวิทยาจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในบรรยากาศ (Queensland Government, 2021)

ตัวแปรอุตุนิยมวิทยามีมากมายหลากหลายชนิด ในองค์ความรู้นี้จะกล่าวถึงตัวแปรอุตุนิยมวิทยาพื้นฐานและตัวแปรอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ ได้แก่ ความเร็วและทิศทางการลม อุณหภูมิ รั้งสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความกดอากาศ และความสูงผสม ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องมือตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาทั้งเครื่องมือตรวจวัดพื้นฐานและเครื่องมือตรวจวัดขั้นสูงได้ถูกรวบรวมไว้เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับผู้ที่สนใจในภาคผนวก ก



ความเร็วและทิศทางลม (Wind speed and direction)

ข้อมูลความเร็วและทิศทางลมสามารถระบุทิศทางการแพร่กระจายของมลพิษและพื้นที่ของการปล่อยมลพิษเบื้องต้นได้ การที่สามารถระบุแหล่งที่มาของแหล่งกำเนิดมลพิษอากาศได้นั้นนำไปสู่การวางแผนเพื่อลดผลกระทบต่อคุณภาพอากาศที่อาจเกิดขึ้น (Kanabkaew et al., 2019) หากพิจารณาตัวแปรความเร็วและทิศทางลมเพียงอย่างเดียว พบว่าพื้นที่หรือช่วงเวลาที่มีลมแรงจะลดการสะสมตัวของมลพิษ ทำให้มีความเข้มข้นของมลพิษต่ำกว่าพื้นที่หรือช่วงเวลาที่ลมสงบ สำหรับหน่วยวัดความเร็วลมนั้นมีทั้งเป็นหน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) นอต (knot) หรือกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) เป็นต้น ส่วนหน่วยวัดทิศทางลมเป็นองศา (Degree) ทั้งนี้การแปลงหน่วยของความเร็วลมหรือตัวแปรอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ที่จะกล่าวถึงสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข



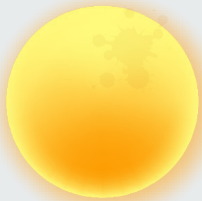
อุณหภูมิ (Temperature)

ข้อมูลอุณหภูมิสามารถนำมาใช้สำหรับประเมินคุณภาพอากาศด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแนวตั้งทำให้เกิดการคงตัวของบรรยากาศส่งผลให้มลพิษสะสมตัวได้ดี นอกจากนี้อุณหภูมิและแสงแดด (รังสีดวงอาทิตย์) มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในบรรยากาศทำให้เกิดหมอกควันจากปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (Photochemical smog) และมลพิษทุติยภูมิ (Secondary pollutants) ได้แก่ ฝุ่นละอองอินทรีย์และอนินทรีย์ทุติยภูมิ (Secondary organic และ Inorganic aerosols) และก๊าซโอโซน จากสารตั้งต้นอื่น ๆ ในสภาวะที่เอื้ออำนวย หน่วยที่ใช้วัดอุณหภูมิเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) และองศาเคลวิน ($^{\circ}\text{K}$)



รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation)

การตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์เป็นสิ่งสำคัญสำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์หมอกควันจากปฏิกิริยาเคมีเชิงแสงและมลพิษทุติยภูมิ เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์มีอิทธิพลสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ก่อให้เกิดหมอกควัน หน่วยวัดรังสีดวงอาทิตย์ คือ วัตต์ต่อตารางเมตร (w/m^2)

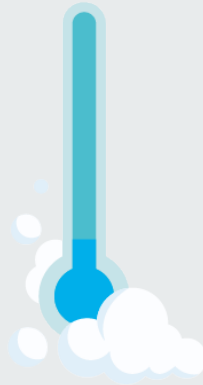


ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

ไอน้ำมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาความร้อนและปฏิกิริยาเคมีในชั้นบรรยากาศ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กและมีขั้ว จึงสามารถจับกับสารหลายชนิดได้อย่างแน่นหนา หากติดอยู่กับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศ จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Light scattering) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลต่อทัศนวิสัย หากโมเลกุลของน้ำเกาะติดกับก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซ

ดังกล่าวก็จะละลายในน้ำและกลายเป็นสารละลายกรดที่สามารถส่งผลต่อสุขภาพสิ่งแวดล้อม และทรัพย์สินได้

ปริมาณไอน้ำในอากาศถูกรายงานเป็นร้อยละ (%) ของความดันไอน้ำอิ่มตัว อุณหภูมิที่กำหนด เรียกว่า “ความชื้นสัมพัทธ์” ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีความแปรปรวนสูง ขึ้นอยู่กับที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ความใกล้ไกลแหล่งน้ำ ทิศทางลม และอุณหภูมิของอากาศ



ปริมาณฝน (Rainfall)

ฝนช่วยล้างฝุ่นละอองและก๊าซมลพิษจากบรรยากาศ การลดอุณหภูมิหรือสิ่งเจือปนในอากาศช่วยเพิ่มทัศนวิสัย โดยทั่วไปพื้นที่หรือฤดูกาลที่มีฝนตกชุกคุณภาพอากาศโดยทั่วไปจะดี เนื่องจากฝนช่วยชะล้างมลพิษลงสู่ผิวดิน อย่างไรก็ตามหากฝนละลายสารก่อมลพิษที่เป็นก๊าซ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ จะทำให้น้ำฝนนั้นมีฤทธิ์เป็นกรดที่เรียกว่า “ฝนกรด” ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ สร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินพืชพรรณ และระบบนิเวศน์ได้ หน่วยวัดปริมาณฝนเป็น มิลลิเมตร (mm)



ความกดอากาศ (Pressure)

ความกดอากาศ หรือความกดบรรยากาศ คือ น้ำหนักของอากาศที่กดทับลงมาบนพื้นผิวโลก ณ จุดใดจุดหนึ่ง ในแนวตั้ง ตั้งแต่เขตสูงสุดของบรรยากาศลงมาถึงผิวโลก อาจกล่าวได้ว่าความกดอากาศคือ แรงที่กระทำบนพื้นที่หนึ่งหน่วยนั่นเอง หากพิจารณาตัวแปรความกดอากาศเพียงอย่างเดียว พบว่าพื้นที่ที่มีความกดอากาศสูงจะทำให้การระบายอากาศในแนวตั้งต่ำ ส่งผลให้มลพิษสะสมตัวได้ดี ระดับมลพิษมีความเข้มข้นสูงกว่าพื้นที่ที่มีความกดอากาศต่ำ หน่วยความกดอากาศเป็น มิลลิบาร์ (Millibar) และกิโลปาสคาล (kPa)

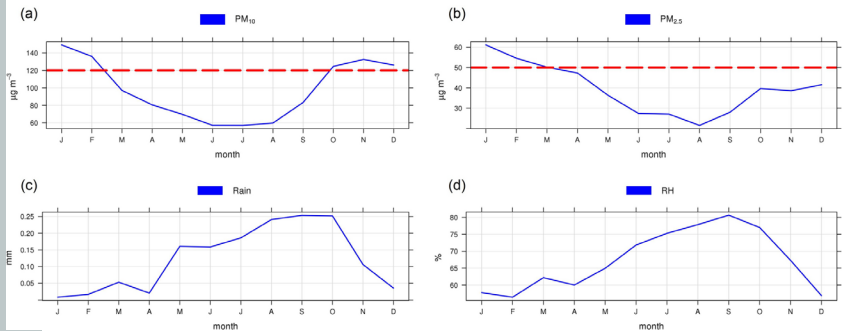


ความสูงผสม (Mixing layer height)

ความสูงผสม เป็นการวัดความปั่นป่วนของอากาศในแนวตั้งของพื้นที่ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเจือจางและการสะสมตัวของมลพิษที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดใกล้ผิวดิน ความสูงผสมเปลี่ยนแปลงขึ้นกับการการผกผันของอุณหภูมิในแนวตั้งและความกดอากาศ หากความสูงผสมอยู่ใกล้ผิวดิน (ระดับไม่กี่ร้อยเมตร) จะทำให้การแพร่กระจายต่ำ เกิดการสะสมตัวได้ดี มลพิษมีความเข้มข้นสูง ในกรณีตรงข้ามหากความสูงผสมอยู่ห่างผิวดิน (ระดับหลายร้อยเมตรขึ้นไป) จะทำให้การแพร่กระจายสูง เจือจางได้ดี มลพิษมีความเข้มข้นต่ำ โดยความเข้าใจสำหรับประชาชนทั่วไปมักจะพูดหรือได้ยินกันว่าเป็นลักษณะอากาศปิด (ความสูงผสมต่ำ) และอากาศเปิด (ความสูงผสมสูง) ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงความสูงผสมเกิดขึ้นได้ในรอบวัน และตามฤดูกาล สำหรับการเปลี่ยนแปลงในรอบวันพบว่า ความสูงผสมมีค่าต่ำในเวลากลางคืน (เย็นจนถึงเช้า) และความสูงผสมมีค่าสูงในเวลากลางวัน นั่นจึงเป็นที่มาว่าเพราะเหตุใด เรามักจะได้รับมลพิษอากาศสูงในเวลากลางคืน ตัวอย่างเช่น สำหรับประชาชนที่มีบ้านเรือนอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดมลพิษ (ประเภทที่ส่งกลิ่น) ก็มักจะได้รับกลิ่นไม่พึงประสงค์ในช่วงเวลากลางคืนมากกว่ากลางวัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลพบว่า ความสูงผสมมีค่าต่ำในฤดูหนาว และความสูงผสมมีค่าสูงในฤดูฝนและฤดูร้อน ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เรามักพบว่ามลพิษอากาศของประเทศไทย โดยเฉพาะตั้งแต่ภาคกลางขึ้นไป จะมีความเข้มข้นสูงในช่วงเดือนพฤศจิกายนจนถึงเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี

เมื่อพิจารณาปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศในแต่ละฤดูกาลในภาพรวม ถ้าหากมีการปล่อยมลพิษทั้งพื้นที่ในอัตราที่สม่ำเสมอหรือใกล้เคียงกันทั้งปี จะพบว่าในฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) จะมีปริมาณความเข้มข้นของมลพิษต่ำที่สุด (เป็นช่วงเวลาที่อากาศสะอาดที่สุด) เนื่องจากเป็นช่วงที่มลพิษอากาศถูกชะล้างด้วยปริมาณฝนและมีการระบายอากาศทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบได้ดีพอสมควร ถัดมาเป็นฤดูร้อน (มีนาคม-เมษายน) แม้ว่าจะจะเป็นช่วงที่มีการระบายอากาศได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ฤดู เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงและความกดอากาศต่ำกว่าช่วงฤดูหนาวทำให้ความสูงผสมอยู่เหนือระดับพื้นดินมาก แต่ไม่มีปริมาณฝนจึงทำให้มลพิษยังสะสมตัวในบรรยากาศได้ และสุดท้ายคือฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) เป็นช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นของมลพิษสูงที่สุด เนื่องจากสภาพอากาศมีอุณหภูมิต่ำ ความกดอากาศสูง ไม่มีปริมาณฝน ความสูงผสมในช่วงนี้อยู่ใกล้ระดับผิวดิน จึงทำให้มีโอกาสที่จะพบเหตุการณ์ที่มีความเข้มข้นของมลพิษอากาศสูง ซึ่งสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงมลพิษอากาศทั้ง 3 ฤดู สามารถอธิบายได้ดีด้วยตัวอย่างของสถานการณ์ฝุ่นละออง PM_{10} จากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมเหมืองและกิจกรรมที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี (ดังรูปที่ 7)



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงฝุ่นละออง PM_{10} ในพื้นที่ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี (Sooktawee et al., 2020)

Su		23° 13
Mo		24° 17
Tu		22° 14
We		20° 12
Th		21° 12
Fr		19° 13
Sa		18° 12

4

แหล่งข้อมูล อุตุนิยมวิทยา

4.1 แหล่งข้อมูลระดับชาติ

4.1.1 กรมอุตุนิยมวิทยา

เป็นหน่วยงานหลักของประเทศไทยสำหรับตรวจวัดและพยากรณ์สภาพอากาศ มีภารกิจเกี่ยวกับการบริหารจัดการด้านอุตุนิยมวิทยา โดยปฏิบัติหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจ เฝ้าระวัง ติดตาม และรายงานสภาวะอากาศทั่วไป อากาศการบิน และปรากฏการณ์ธรรมชาติ รวมทั้งให้ความรู้ และบริการด้านอุตุนิยมวิทยาด้วยความถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำและ ทันเหตุการณ์ เพื่อประโยชน์สูงสุดในเชิง เศรษฐกิจและสังคม เกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ตลอดจนเป็นการป้องกันการเกิดภัยพิบัติ และความสูญเสียในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน เอกชน และหน่วยงานของรัฐจากภัยธรรมชาติ โดยให้มีอำนาจหน้าที่ ดังต่อไปนี้ (อต., 2564ค)

- (1) ตรวจ เฝ้าระวัง ติดตาม รายงานสภาวะ อากาศ อากาศการบิน และปรากฏการณ์ธรรมชาติ
- (2) พยากรณ์อากาศและเตือนภัยที่เกิดจาก ธรรมชาติอย่างเป็นสากล
- (3) ให้บริการด้านอุตุนิยมวิทยาและแผ่นดินไหว แก่บุคคลทั่วไป และหน่วยงานต่างๆ โดยระบบและเทคนิคที่ ทันสมัย
- (4) ศึกษา วิจัย และพัฒนาด้านอุตุนิยมวิทยา ภูมิสารสนเทศอุตุนิยมวิทยา แผ่นดินไหว รังสีไอโซน มลภาวะ และเทคนิควิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง
- (5) ร่วมมือ ประสานงาน แลกเปลี่ยน และให้ ความรู้ด้านอุตุนิยมวิทยาและแผ่นดินไหวกับประชาชน และ หน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ
- (6) ปฏิบัติงานร่วมกับหรือสนับสนุนการปฏิบัติ งานของหน่วยงานอื่นด้านอุตุนิยมวิทยาและแผ่นดินไหว
- (7) ปฏิบัติการอื่นใดตามที่กฎหมายกำหนดให้ เป็นอำนาจหน้าที่ของกรมอุตุนิยมวิทยาหรือตามที่กระทรวง หรือคณะรัฐมนตรีมอบหมาย



ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ภารกิจหลักที่สำคัญ ระบุไว้ในข้อที่ 3 คือ “การให้บริการด้าน อุตุนิยมวิทยา” ซึ่งสามารถเข้าถึงการใช้บริการได้จาก <https://www.tmd.go.th/services/services.php> โดยสามารถกรอกแบบฟอร์มข้อมูลที่ต้องการและเลือกรับบริการได้ทั้งแบบไปรับข้อมูลด้วยตนเองและทาง E-mail อย่างไรก็ตามขั้นตอนดังกล่าวจะใช้เวลาสำหรับดำเนินการ ปัจจุบันกรมอุตุนิยมวิทยาได้เตรียมช่องทางการดึงข้อมูลผ่านระบบ TMD API (Application Programming Interface) เพิ่มเติมสำหรับผู้ให้บริการ (รูปที่ 8)

อัตราค่าบริการ

ข้อมูลบันทึกบนกระดาษ	
ก. ราคาข้อมูลกระดาษต่อเนื่อง	
1. ข้อมูลรายชั่วโมง ต่อชนิดข้อมูล/สถานี/เดือน	8.00 บาท
2. ข้อมูลราย 3 ชั่วโมง ต่อชนิดข้อมูล/สถานี/เดือน	4.00 บาท
3. ข้อมูลรายวัน ต่อชนิดข้อมูล/สถานี/ปี	4.00 บาท

รูปที่ 8 ช่องทางการรับบริการข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา

4.1.2 กรมควบคุมมลพิษ

เป็นหน่วยงานที่มีภารกิจเกี่ยวกับการกำกับ ดูแล อำนาจการ ประสานงาน ติดตาม และประเมินผลเกี่ยวกับการฟื้นฟู คุ้มครอง และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยมีอำนาจหน้าที่ และภารกิจ ดังต่อไปนี้ (คพ., 2564)

- (1) เสนอความเห็นเพื่อจัดทำนโยบายและแผนการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ด้านการจัดการมลพิษ
- (2) เสนอแนะการกำหนดมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมและมาตรฐานควบคุมมลพิษจากแหล่งกำเนิด
- (3) จัดทำแผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อมด้านการจัดการมลพิษ และมาตรการในการควบคุมป้องกัน และแก้ไขปัญหาอันเนื่องมาจากภาวะมลพิษ
- (4) ติดตาม ตรวจสอบ ประเมินผลคุณภาพสิ่งแวดล้อม และจัดทำรายงานสถานการณ์มลพิษ
- (5) พัฒนาองค์ความรู้ เทคโนโลยี และกฎหมายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการกากของเสียอันตราย คุณภาพน้ำ อากาศ ระดับเสียง และความสั่นสะเทือน
- (6) ประสานเพื่อให้มีการดำเนินการฟื้นฟู ระวังเหตุที่อาจเป็นอันตรายจากมลพิษในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนมลพิษ
- (7) ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับการจัดการมลพิษ
- (8) ประสานความร่วมมือกับต่างประเทศและองค์การระหว่างประเทศในด้านการจัดการมลพิษ
- (9) ดำเนินการเกี่ยวกับเรื่องร้องทุกข์ด้านมลพิษ
- (10) ดำเนินการตามกฎหมายว่าด้วยการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ด้านการควบคุมมลพิษ และกฎหมายอื่นที่เกี่ยวข้อง
- (11) ปฏิบัติการอื่นใดตามที่กฎหมายกำหนดให้เป็นหน้าที่และอำนาจของกรมหรือตามที่รัฐมนตรีหรือคณะรัฐมนตรีมอบหมาย

จะเห็นได้ว่าใน ภารกิจที่ 4 “ติดตาม ตรวจสอบ ประเมินผลคุณภาพสิ่งแวดล้อม และจัดทำรายงานสถานการณ์มลพิษ” มีการติดตั้งและตรวจวัดคุณภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย ซึ่งในแต่ละสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจะดำเนินการตรวจวัดสภาพอากาศทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเร็วลมและทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความกดอากาศ เป็นต้น ควบคุมไปด้วย ดังนั้นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางส่วนสามารถขอรับบริการได้ที่ กรมควบคุมมลพิษ โดยสามารถสอบถามการขอรับบริการข้อมูลได้ที่ <https://www.pcd.go.th>

4.2 แหล่งข้อมูลระดับสากล

นอกเหนือไปจากแหล่งข้อมูลจากทางราชการ ในระดับชาติของประเทศไทย ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทยยังสามารถขอรับบริการได้จากหน่วยงานระดับสากล ส่วนใหญ่ ข้อมูลที่ขอรับบริการจะเป็นส่วนของสถานีอุตุนิยมวิทยาหลัก ในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย

4.2.1 องค์การบริหารมหาสมุทรและชั้นบรรยากาศแห่งชาติ (NOAA)

สหรัฐอเมริกา

NOAA เป็นหน่วยงานด้านวิทยาศาสตร์ ดำเนินการสำรวจและติดตามข้อมูลจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์ไปจนถึงส่วนลึกของพื้นมหาสมุทร เพื่อเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โดยมุ่งเน้นไปที่สภาวะของมหาสมุทรและชั้นบรรยากาศ (NOAA, 2021) ข้อมูลที่สามารถขอรับบริการได้จาก NOAA จะเป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาชั้นบน (Upper air) เข้าถึงได้จาก <https://ruc.noaa.gov/raobs/> และมีหน้าต่างการเลือกข้อมูลผ่านระบบออนไลน์ ดังแสดงในรูปที่ 9

← → ↻ ruc.noaa.gov/raobs/ ⌵ ☆ ⓘ ⋮

- June 2020: Updated and merged the 2018 and 2019 data from IGRA and GSL observations.
- July 2020: The station [inventory](#) has been updated.

I. Input Dates: (UTC units)

From: Yr: 2021 Mo: 12 Dy: 13 Hr: 0

Thru: Yr: 2021 Mo: 12 Dy: 13 Hr: 0

II. Sounding Specific Information

Hours of access: All Times Data levels: All Levels

Wind Units: Knots

III. Select Stations / Data

Select Radiosonde Sites by: WMO Station Identifier

Continue Data Request

รูปที่ 9 ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก NOAA

4.2.2 Wyoming University สหรัฐอเมริกา

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในสถานีหลักของประเทศต่าง ๆ ทั้งข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดิน (Surface data) และอุตุนิยมวิทยาชั้นบน สามารถเข้าถึงและขอรับบริการผ่านช่องทางของ Wyoming University จาก <http://weather.uwyo.edu/index.shtml> ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 สำหรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดินและอุตุนิยมวิทยาชั้นบน ตามลำดับ

weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/seasia.shtml

get the latest observation available. All observations and all METARs will get all the observations for the selected hour for all the stations in the country of the selected station.

Region	Type of Output	Date	Hour	Units	Station
SouthEast Asia	Listing	Current	Current	American	KLAR

Select a station from the map or enter the station ID above.



รูปที่ 10 ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก Wyoming University
(ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยวอดิน)

weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

University of Wyoming
College of Engineering
Department of Atmospheric Science

Wyoming | Cities | Surface | Up



Include frost point calculations.

รูปที่ 11 ช่องทางการรับบริการข้อมูลจาก Wyoming University
(ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยชั้นบน)

ทั้งนี้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา หน่วยงาน และช่องทางการเข้าถึงข้อมูลทั้งระดับชาติและระดับ
สากล สรุปไว้ดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1

สรุปแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

แหล่งข้อมูล	หน่วยงานและการเข้าถึง	ข้อมูลที่เข้าถึงได้
ระดับชาติ	(1) กรมอุตุนิยมวิทยา https://www.tmd.go.th/services/services.php	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดินและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาชั้นบน ทุกสถานีอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย
	(2) กรมควบคุมมลพิษ https://www.pcd.go.th/	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดินทั่วไป อาทิ ความเร็วลมและทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความกดอากาศ เป็นต้น ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ
ระดับสากล	(1) NOAA https://ruc.noaa.gov/raobs/	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาชั้นบน ในบางสถานีอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย
	(2) Wyoming University http://weather.uwyo.edu/index.shtml	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวดินและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาชั้นบน ในบางสถานีอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย



5

ความสัมพันธ์ของ อุตุนิยมวิทยาและ การแพร่กระจาย มลพิษอากาศ

เนื่องจากอุตุนิยมวิทยาในแต่ละระดับ
ขนาดของพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ตัวอย่าง
เช่น การเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดขึ้นด้วย
ความแตกต่างของความกดอากาศและ
อุณหภูมิเหนือพื้นผิว การเคลื่อนที่ของอากาศ

มีทั้งขนาดเล็ก (ปกคลุมพื้นที่เพียงไม่ถึงตารางกิโลเมตร) และขนาดใหญ่ (ปกคลุมพื้นที่ทั้งทวีป
และมหาสมุทร) ดังนั้นมิติความสัมพันธ์ของอุตุนิยมวิทยาและการแพร่กระจายมลพิษอากาศ จึง
แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย ระดับใหญ่ (Macroscale) ระดับกลาง (Mesoscale) และ
ระดับเล็ก (Microscale) (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2

ระดับพื้นที่จำแนกตามอิทธิพลของอุตุนิยมวิทยา

ระดับ	ช่วงเวลา	ขนาด (ระยะทาง)
ระดับใหญ่ (Macroscale)	สัปดาห์ – ปี วัน – สัปดาห์	1,000 – 40,000 กิโลเมตร
ระดับกลาง (Mesoscale)	นาทีก่อน – ชั่วโมง	100 – 5,000 กิโลเมตร
ระดับเล็ก (Microscale)	วินาที – นาที	1 – 100 กิโลเมตร <1 กิโลเมตร

5.1 ระดับใหญ่ (Macroscale)

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมวิทยาระดับใหญ่ (Macroscale) เป็นลักษณะครอบคลุมพื้นที่กว้าง (Synoptic view) การไหลของบรรยากาศสามารถจำแนกตามรูปแบบการหมุนเวียนสอดคล้องกับรูปแบบการไหลเวียนของบรรยากาศของโลก (Global atmospheric circulation) ซึ่งวิธีการเหล่านี้ในทางสิ่งแวดล้อมสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น มลพิษอากาศข้ามพรมแดน และฝุ่นละอองในทะเลทราย ได้เป็นอย่างดี

สำหรับกรณีนี้ ในประเทศไทยสามารถดูตัวอย่างได้จากสถานการณ์ฝุ่นละอองข้ามพรมแดนของพื้นที่ภาคใต้ ที่ได้รับผลกระทบจากไฟป่าในประเทศอินโดนีเซียในช่วงประมาณเดือนสิงหาคม-เดือนกันยายน Pentamwa and Kim Oanh (2008) พบว่าในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2548 ความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM_{10} มีค่าสูงในจังหวัดสงขลา และจังหวัดภูเก็ต อย่างผิดสังเกต เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าระดับความเข้มข้นของ PM_{10} ในช่วงเวลาดังกล่าว มีค่าสูงสอดคล้องกับทิศทางลมและความรุนแรงของไฟป่าที่แสดงด้วยจุดความร้อน (Hotspot) ที่บริเวณเหนือลม (เกาะสุมาตรา) และระดับความเข้มข้นของ PM_{10} ลดลงเมื่อลมเปลี่ยนทิศทางจากทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นทิศตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศไม่ได้ผ่านเขตไฟป่า ทั้งนี้พบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของมวลอากาศจากต้นทางที่มีไฟป่ามายังภาคใต้ของประเทศไทยในช่วงเวลาดังกล่าวใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน

5.2 ระดับกลาง (Mesoscale)

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมวิทยาระดับกลาง (Mesoscale) โดยมากเป็นลักษณะอิทธิพลของลมที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ทางบกและทางทะเล หรือ ลม หุบเขาและลมภูเขา เป็นปัจจัยกำหนดการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของมลพิษในอากาศ ปฏิสัมพันธ์ในระดับกลางนี้เป็นเรื่องที่ยังได้รับความสนใจในเชิงการวิจัยทางวิชาการอยู่มากเนื่องจากสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางด้านมลพิษอากาศที่เกิดขึ้นในพื้นที่ได้ นอกจากนี้ การหมุนเวียนของมวลอากาศและอิทธิพลของเกาะความร้อน (Heat island) ในเขตเมืองก็อยู่ในระดับกลางนี้เช่นเดียวกัน (Pérez et al., 2020)

5.3 ระดับเล็ก (Microscale)

สำหรับรูปแบบการเปลี่ยนทางอุตุนิยมวิทยาระดับเล็ก (Microscale) ความเข้มข้นของมลพิษอากาศจะถูกควบคุมโดยขอบเขตบรรยากาศ โดยเฉพาะความสูงผสมผสม ขณะนั้น อย่างไรก็ตาม การกำหนดความลึกหรือความสูงผสมไม่่ง่ายนัก ต้องใช้เครื่องมือที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแนวดิ่ง จากนั้นจึงพล็อตกราฟเพื่อหาความสูงดังกล่าว หรือสามารถใช้เครื่องมือขั้นสูงในกลุ่มเรดาร์เข้ามาช่วยประเมิน

ความสูงผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างวัน โดยมีค่าสูงในเวลากลางวัน และมีค่าต่ำเมื่อเข้าสู่เวลากลางคืน บรรยากาศในเวลากลางวันจะมีความคงตัวสูง เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยการแผ่รังสีของพื้นดินทำให้เกิดการผกผันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กลายเป็นสภาพอากาศปิดเป็นแหล่งกักเก็บมลพิษที่เกิดจากการปล่อยมลพิษในเวลากลางวันและมลพิษที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (Pérez et al., 2020)

6

การประเมินการแพร่กระจาย และความเข้มข้นมลพิษอากาศ



6.1 วิธีทางสถิติ

วิธีทางสถิติถูกนำมาใช้ในการประเมินและคาดการณ์การแพร่กระจายและความเข้มข้นของมลพิษมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (Kanabkaew, 2013; Lalitaporn and Mekaumnuaychai, 2020) โดยในอดีตมุ่งเน้นการนำข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมาวิเคราะห์และคาดการณ์แนวโน้มของข้อมูลและความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น กิจกรรมที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศในพื้นที่ แต่ด้วยข้อจำกัดของข้อมูลสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีค่าลงทุนและดำเนินการสูง โดยเฉพาะสำหรับประเทศกำลังพัฒนา รวมถึงประเทศไทย ปัจจุบันข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากดาวเทียม (Satellite) และการใช้เซนเซอร์ราคาประหยัด (Low-cost sensor) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการตรวจติดตามคุณภาพอากาศ ข้อมูลตรวจวัดที่ได้จากดาวเทียมให้ภาพรวมของพื้นที่กว้างทำให้สามารถเห็นภาพการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ดี แต่ก็มีข้อจำกัดเชิงเวลาที่จะมีข้อมูลเฉพาะช่วงที่ดาวเทียมผ่านพื้นที่นั้น ๆ เช่น ข้อมูลจะมี 2 ครั้งต่อวัน สำหรับดาวเทียม MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) หรือทุก ๆ 9 วัน สำหรับดาวเทียม MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) ในขณะที่การใช้งานเซนเซอร์ราคาประหยัดสามารถดำเนินการตรวจวัดข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงเวลาได้ในระดับนาที่ และสามารถติดตั้งได้ในหลาย ๆ พื้นที่ได้พร้อมกัน ด้วยเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถดึงข้อมูล สกัดข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล และแสดงผลข้อมูล ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตแห่งสรรพสิ่ง หรือ IoT (Internet of Things หรือ IoT) ในเวลาจริง (Real-time) ได้ จึงเป็นจุดเด่นที่สำคัญของข้อมูลจากเซนเซอร์สำหรับการใช้งานข้อมูล อย่างไรก็ตาม การอ่านค่าด้วยเซนเซอร์ราคาประหยัดยังมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับเครื่องมือตรวจวัดมาตรฐาน ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้และสภาพแวดล้อมของการใช้งาน ดังนั้นการใช้งานเซนเซอร์ควรได้รับการประเมินหรือเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน และระหว่างเซนเซอร์ด้วยกันเอง



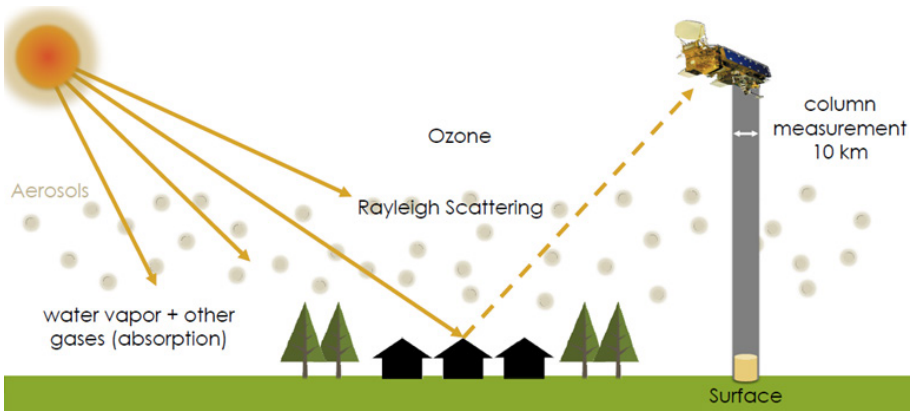
6.1.1 ข้อมูลดาวเทียม

ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีดาวเทียมนั้นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ เนื่องจากดาวเทียมสามารถให้ข้อมูลคุณภาพอากาศที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะสำหรับบริเวณพื้นที่ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศยังมีข้อจำกัดในการเข้าถึง ข้อมูลตรวจวัดที่ได้จากดาวเทียมก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการศึกษาคุณภาพอากาศโดยรวมของโลก โดยข้อมูลตรวจวัดที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศของโลกได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของมลพิษอากาศที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากข้อมูลตรวจวัดที่ได้จากดาวเทียมให้ข้อมูลคุณภาพอากาศจากมุมมองที่สูงอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้สามารถเห็นภาพการเคลื่อนตัวและการกระจายตัวของมลพิษอากาศได้

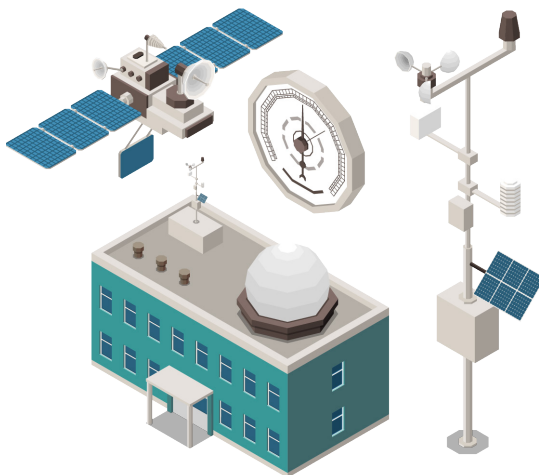
ข้อมูลคุณภาพอากาศที่ได้จากดาวเทียมเป็นการตรวจวัดคุณภาพอากาศด้วยเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม โดยอาศัยสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวกลางในการตรวจวัด ข้อมูล แหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเป็นแหล่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งก็คือดวงอาทิตย์ หรืออาจเกิดจากการที่ดาวเทียมสร้างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขึ้นมาเอง

ในกรณีที่ดวงอาทิตย์เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การตรวจวัดจะทำได้แค่เฉพาะในเวลากลางวันเท่านั้น การตรวจวัดคุณภาพอากาศเริ่มจากการที่แหล่งกำเนิดพลังงานปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาตกกระทบพื้นผิวโลก พลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยพื้นผิวโลก และพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับสู่ชั้นบรรยากาศ และเคลื่อนที่ไปยังเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม โดยในขณะที่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งประกอบไปด้วย ไอน้ำ ก๊าซชนิดต่าง ๆ และฝุ่นละออง หรือละอองลอยนั้น พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศใน 3 รูปแบบ คือ การกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) และการหักเห (Refraction) ซึ่งการเกิดปฏิสัมพันธ์นี้ส่งผลให้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านความเข้ม ทิศทาง รวมทั้งความยาวและความถี่ของช่วงคลื่นด้วย โดยสารแต่ละชนิดที่อยู่ในชั้นบรรยากาศจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นเฉพาะ (Spectral band) ที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้เซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียมสามารถตรวจวัดและบันทึกความแตกต่างขององค์ประกอบ

หรือสารแต่ละชนิดที่อยู่ในชั้นบรรยากาศนี้ไว้ได้ องค์ประกอบของชั้นบรรยากาศ ปัจจุบันมีสาร
 พร้อมทั้งแปลงเป็นข้อมูลเชิงภาพและข้อมูล มลพิษอากาศหลายชนิดที่สามารถตรวจวัดได้
 เชิงตัวเลข จึงทำให้สามารถบอกข้อมูล ด้วยดาวเทียม เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซไนโตรเจน
 คุณภาพอากาศได้ รูปที่ 12 แสดงปฏิสัมพันธ์ ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซ
 ระหว่างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซโอโซน ดังแสดง
 ตัวอย่างในตารางที่ 3



รูปที่ 12 หลักการทำงานของดาวเทียม (Gupta and Follette-Cook, 2019)



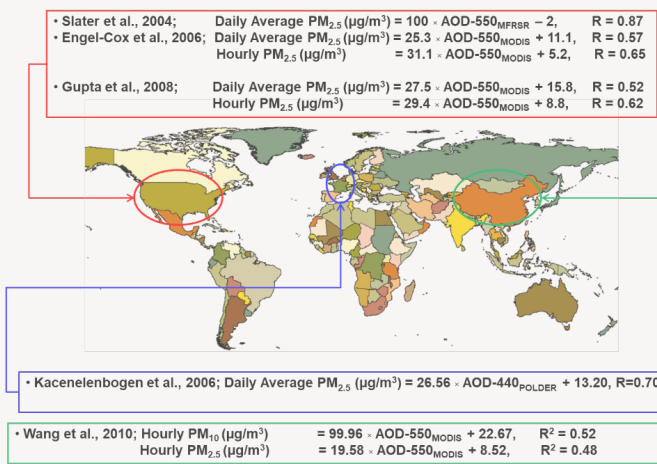
ตารางที่ 3

ตัวอย่างดาวเทียมตรวจวัดคุณภาพอากาศ

ดาวเทียม	ตัวแปร ที่ตรวจวัดได้	ความละเอียด ข้อมูล (ต่อ 1 Pixel)	ความถี่ การตรวจวัด (เชิงเวลา)	ความครอบคลุม พื้นที่ (ต่อ 1 Swath)	ที่มา
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	ความลึกเชิงแสง ของละอองลอย (Aerosol Optical Depth หรือ AOD)	3×3, 10×10 กิโลเมตร ²	2 ครั้งต่อ วัน	2,330 กิโลเมตร	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/
MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)	ความลึกเชิงแสง ของละอองลอย (Aerosol Optical Depth หรือ AOD)	17.6×17.6 กิโลเมตร ²	ทุก 9 วัน ต่อครั้ง	380 กิโลเมตร	https://mISR.jpl.nasa.gov/Mission/misrInstrument/ https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.A21G2234G/abstract
OMI (Ozone Monitoring Instrument)	โอโซน (O ₃) ไนโตรเจน ไดออกไซด์ (NO ₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) AOD และอื่น ๆ	24×13 กิโลเมตร ²	1 ครั้ง ต่อวัน	2600 กิโลเมตร	https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html
MOPITT (Measurements of Pollutants in the Troposphere)	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	22×22 กิโลเมตร ²	1 ครั้ง ต่อวัน	640 กิโลเมตร	https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/mopitt
GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2)	โอโซน (O ₃) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) และอื่น ๆ	80×40 กิโลเมตร ²	1 ครั้ง ต่อวัน	1920 กิโลเมตร	https://d-nb.info/1142272877/34 https://www.eumetsat.int/gome-2
SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY)	โอโซน (O ₃) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) AOD และอื่น ๆ	60×30 กิโลเมตร ²	1 ครั้ง ต่อวัน	960 กิโลเมตร	https://earth.esa.int/cogateway/catalog/envi-sat-sciamachy-geo-located-atmospheric-spectra-sci_n1_1p-

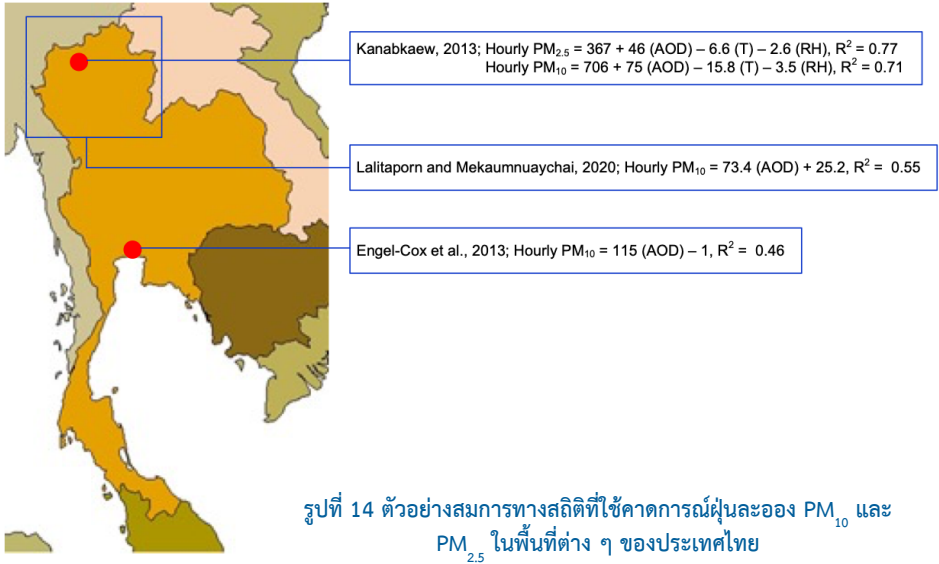
เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมเป็นการตรวจวัดทั้งคอลัมน์ของบรรยากาศและครอบคลุมพื้นที่เป็นลักษณะพิกเซล (Pixel) ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลตรวจวัดคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศระดับผิวดินที่เป็นลักษณะจุด (Point) ดังนั้นก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบข้อมูลดาวเทียม กับข้อมูลระดับผิวดิน และสร้างสมการเพื่อระบุความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโดยมีตัวแปรต้น คือ ข้อมูลดาวเทียม และตัวแปรตาม คือ ข้อมูลตรวจวัดคุณภาพอากาศระดับผิวดิน วิธีการทางสถิติจึงถูกนำมาใช้ในขั้นตอนนี้

จากผลการศึกษาในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ข้อมูลดาวเทียมถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการตรวจติดตามฝุ่นละออง PM₁₀ และ PM_{2.5} เนื่องจากปัญหาฝุ่นละอองเป็นปัญหามลพิษอากาศที่พบได้ทั่วไปในเมืองใหญ่ทั่วโลก ในแต่ละการศึกษามีความพยายามที่จะสร้างสมการทางสถิติเพื่อคาดการณ์ PM₁₀ และ PM_{2.5} จากข้อมูลเซนเซอร์ของดาวเทียมที่ใช้ตรวจวัดความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol Optical Depth หรือ AOD) ซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับฝุ่นละออง หรือละอองลอยในชั้นบรรยากาศ หากฝุ่นละอองมีปริมาณมากในชั้นบรรยากาศ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก ทำให้ค่า AOD มีค่ามากตามไปด้วย ในรูปที่ 13 เป็นการรวบรวมผลการศึกษาที่ผ่านมาตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการใช้งานข้อมูลดาวเทียม สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) ได้ถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศระดับผิวดิน สร้างสมการความสัมพันธ์ และประยุกต์สมการที่ได้คาดการณ์ความเข้มข้นของฝุ่นละอองในพื้นที่อื่น ๆ ที่ขาดแคลนสถานีตรวจวัด ด้วยข้อมูล AOD จากดาวเทียม



รูปที่ 13 ตัวอย่างสมการทางสถิติที่ใช้คาดการณ์ฝุ่นละออง PM₁₀ และ PM_{2.5} ในพื้นที่ต่าง ๆ ระดับโลก

สำหรับประเทศไทยมีหลายผลการศึกษาที่ได้ดำเนินการตั้งแต่อดีตและปัจจุบัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลดาวเทียมมาประเมินและคาดการณ์การแพร่กระจายและระดับความเข้มข้นของมลพิษอากาศ โดยส่วนใหญ่เน้น ฝุ่นละออง (PM_{10} และ $PM_{2.5}$) (รูปที่ 14) และบางส่วนสำหรับ CO และ NO_2 (Lalitaporn and Mekaumnuaychai, 2020)



6.1.2 ข้อมูล IoT sensor

โดยทั่วไปการตรวจวัดคุณภาพอากาศมาตรฐานจะดำเนินการโดยวิธีตรวจวัดแบบอ้างอิงและวิธีตรวจวัดแบบเทียบเท่า ที่ต้องใช้งบลงทุนและค่าใช้จ่ายสูง ผลลัพธ์ที่ได้จะแม่นยำและเชื่อถือได้ จึงนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามข้อบังคับทางกฎหมาย (USEPA, 2017) อย่างไรก็ตาม ในประเทศกำลังพัฒนา การติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศถาวรที่มีต้นทุนสูงนั้นดำเนินการได้ยาก ส่งผลให้จำนวนสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมีจำนวนน้อยและครอบคลุมไม่ทั่วถึง ในบางพื้นที่มีเพียงหนึ่งสถานีเท่านั้นที่ใช้เพื่อนำเสนอข้อมูลมลพิษอากาศในระดับจังหวัด หรือภูมิภาค ซึ่งอาจส่งผลให้มีการรายงานข้อมูลที่คลาดเคลื่อน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วและประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันด้วยต้นทุนต่ำและคุณภาพที่เหมาะสมกับราคา (Snyder et al., 2013; Kumar et al., 2015; Borrego et al., 2016; Morawska et al., 2018) สามารถดำเนินการเชื่อมโยงข้อมูลและดึงข้อมูลผ่านระบบ IoT และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยระบบข้อมูลขนาดใหญ่ (Big data) ทำให้เพิ่มโอกาสอย่างมากที่จะทำให้กระบวนการวิเคราะห์เป็นไปโดยอัตโนมัติ สามารถคาดการณ์ข้อมูลที่มีจำนวนมาก ๆ ทำให้มีความแม่นยำ ซึ่งส่งผลดีต่อผู้มีอำนาจตัดสินใจในการพัฒนานโยบายที่เกี่ยวข้องในอนาคต

เซ็นเซอร์ราคาประหยัดส่วนใหญ่จะมีหลักการทำงานตามประเภทของเซ็นเซอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) Light scattering และ (2) Electrochemical cell (ตารางที่ 4) สำหรับหลักการ Light scattering ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้ตรวจวัดมลพิษอากาศประเภทฝุ่นละออง ทั้งในหน่วยความเข้มข้นและจำนวนอนุภาคฝุ่นละออง สำหรับ Electrochemical cell ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้ตรวจวัดมลพิษอากาศประเภทก๊าซ

ตารางที่ 4

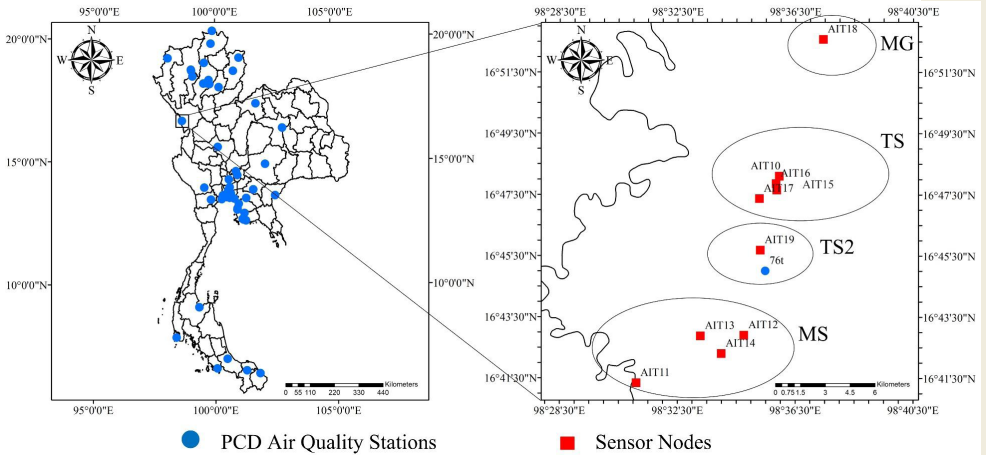
ประเภทและหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ราคาประหยัด

ประเภท	หลักการทำงาน	ชนิดมลพิษอากาศที่ตรวจวัดได้
Light scattering	Light scattering เป็นหลักการการกระเจิงด้วยเลเซอร์ (Laser) สามารถรวบรวมและคำนวณจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองได้ต่อเนื่องในปริมาตรอากาศ แล้วแปลงเป็นความเข้มข้นของมวล	ฝุ่นละออง (PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁)
Electrochemical cell	Electrochemical cell คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมี เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี จากนั้นแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ	CO CO ₂ O ₃ NO ₂

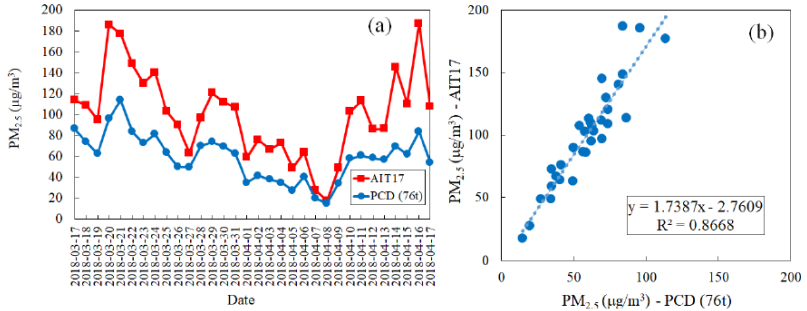
จากผลการศึกษาที่ผ่านมาในหลายประเทศ แม้แต่ประเทศพัฒนาแล้วที่มีความพร้อมทางด้านสถานีตรวจวัดอากาศมาตรฐาน ได้ให้ความสนใจในการนำเทคโนโลยีเซนเซอร์มาใช้ในการติดตามและคาดการณ์ความเข้มข้นของมลพิษอากาศ รวมถึงตรวจจัดการเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน ส่วนใหญ่เซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศยังคงให้ความสำคัญที่การตรวจจับฝุ่นละออง โดยเฉพาะ $PM_{2.5}$ ตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา ได้มีการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคาดการณ์ $PM_{2.5}$ ในขนาดกริด (Grid) 500×500 เมตร ที่ค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงด้วยข้อมูลจากเครือข่ายเซนเซอร์ราคาประหยัดของ PurpleAir สำหรับเมืองลอสแอนเจลิส ด้วยแบบจำลองฟอเรสต์ (Forest model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ประยุกต์การเรียนรู้ด้วยเครื่องจักร (Machine learning) ผลที่ได้พบว่าแบบจำลองสามารถคาดการณ์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และการเปลี่ยนแปลงในรอบวันของ $PM_{2.5}$ ในแต่ละวันได้ดี และสามารถประมาณค่า $PM_{2.5}$ เฉลี่ยรายชั่วโมงได้แม่นยำ เนื่องจากมีจำนวนเซนเซอร์หลายตัว (Lu et al., 2021) และจากการศึกษาในนอร์เวย์พบว่า ในบริบทของเมืองจะมีความแตกต่างเรื่องคุณภาพอากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนท้องถนน ทำให้ยากต่อการตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดที่มีต้นทุนสูง เนื่องจากปริมาณความต้องการในแง่จำนวนเครื่องมือมีมาก ดังนั้นเพื่อตรวจติดตามและประเมินระดับความเข้มข้นและการแพร่กระจายของฝุ่นละอองในบริบทเมือง การปรับใช้เครือข่ายเซนเซอร์ราคาประหยัดที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ครอบคลุมและหนาแน่นในทุกพื้นที่สามารถนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองการประเมินคุณภาพอากาศในอนาคตได้ (Veiga et al., 2021)

สำหรับในประเทศไทย ได้มีหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐ กลุ่มวิจัย และมหาวิทยาลัย ดำเนินการติดตั้งเครือข่ายเซนเซอร์ เพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศโดยเฉพาะ $PM_{2.5}$ ตัวอย่างเช่น ยักษ์ขาว (<https://yakkaw.mfu.ac.th>) DustBoy (https://PM2_5.nrct.go.th) Sensor For All (<https://sensorforall.eng.chula.ac.th>) และ SEA-HAZEMON (<https://วัดฝุ่น.ไทย>) ส่วนใหญ่เผยแพร่ข้อมูลการตรวจวัดและเทียบเคียงข้อมูลที่ตรวจวัดได้ต่อระดับผลกระทบต่อสุขภาพในรูปแบบดัชนีบ่งชี้คุณภาพอากาศ (Air Quality Index, AQI) จากการศึกษาที่ผ่านมา Kanabkaew et al. (2019) ได้นำข้อมูลที่ตรวจวัดได้จาก “SEA-HAZEMON” มาวิเคราะห์ข้อมูลฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ จากเซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศด้วย IoT ทั้งหมด 10 สถานี (Nodes) ในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับปริมาณฝุ่นละออง

PM_{2.5} ที่มีค่าสูงในช่วงฤดูการเผาในที่โล่งของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อเข้าใจการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองและเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เซนเซอร์ IoT สำหรับคาดการณ์ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ในเวลาที่ใกล้เคียงกับเวลาจริง (Near Real-time) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยข้อมูล PM_{2.5} และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (ความเร็วลมและทิศทางลม) ที่เวลาเฉลี่ย 15 นาที ผลการศึกษาพบว่า จากสมการการคาดการณ์ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ใน 15 นาที ถัดไปที่บริเวณท้ายลม (แม่กะสา: MG) ได้รับอิทธิพลหลักมาจากความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่เวลาก่อนหน้าของแม่กะสา (MG_Lag) และเมื่อความเร็วลมเพิ่มความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่เวลาก่อนหน้าจากบริเวณเหนือลมที่บริเวณแม่สอดและไทยสามัคคี (MS_Lag และ TS_Lag) เริ่มส่งผลมากขึ้น จะเห็นว่าเซนเซอร์ราคาประหยัดไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลการตรวจวัดแบบเวลาจริง (Real-time) แต่ยังสามารถให้เห็นถึงศักยภาพในการเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับเข้าใจการเคลื่อนที่ของ PM_{2.5} ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาและพื้นที่ (รูปที่ 15)



(ก) พื้นที่ศึกษา (อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก) พร้อมสถานีเซนเซอร์ (Sensor nodes) และสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศทั่วประเทศไทย (PCD air quality stations)



(ข) เปรียบเทียบข้อมูลตรวจวัดของเซนเซอร์ที่ใกล้เคียง (AIT17) กับสถานีตรวจวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษในพื้นที่ (76t)

ประเภทลม	ความเร็วลม	สมการคาดการณ์ $PM_{2.5}$ ที่เวลา 15 นาที ถัดไป	R^2
สงบ (Calm)	SW <1 km/h	$MG = 9.16 + 0.90 * MG_Lag1 + 0.06 * MG_Lag2$	0.894
เบา (Light)	SW 1-20 km/h	$MG = 4.81 + 0.79 * MG_Lag1 + 0.07 * MS_Lag2 + 0.06 * TS_Lag2$	0.953
ปานกลาง (Moderate)	SW 20-38 km/h	$MG = 0.39 + 0.77 * MG_Lag1 + 0.21 * TS_Lag2$	0.936

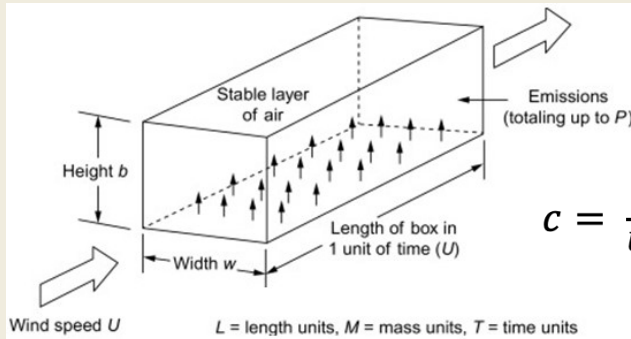
(ค) สมการคาดการณ์ $PM_{2.5}$ ที่เวลา 15 นาทีถัดไปที่โซนท้ายลม (แม่กะสา: MG) จำแนกตามความเร็วลม

รูปที่ 15 พื้นที่ติดตั้งเซนเซอร์ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และสมการทางสถิติสำหรับคาดการณ์ $PM_{2.5}$ (ดัดแปลงจาก Kanabkaew et al., 2019)

6.2 แบบจำลองการแพร่กระจาย

6.2.1 แบบจำลองแบบกล่อง (Box model)

แบบจำลองแบบกล่อง (Box model) เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่มีแนวคิด ว่าความเข้มข้นของมลพิษภายในกล่อง หรือขอบเขตขนาด กว้าง x ยาว x สูง ที่กำหนดมีการ ผสมกันสม่ำเสมอตลอดทั้งปริมาตร แบบจำลองแบบกล่องมีประโยชน์ในการประมาณความเข้มข้น โดยเฉพาอย่างยิ่งสำหรับการประเมินเบื้องต้นและต้องการข้อมูลอย่างรวดเร็ว การประมาณ ค่าความเข้มข้นสำหรับแบบจำลองแบบกล่องตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า การปล่อยมลพิษและสภาพ บรรยากาศอยู่ในสภาวะคงตัว และไม่มี ความเข้มข้นของมลพิษที่พัดมาจากทางด้านเหนือลม ใน กรณีนี้นี้ความเข้มข้นของมลพิษอากาศด้วยแบบจำลองแบบกล่องสามารถประมาณโดยสมการ ที่ (1) และแสดงรายละเอียดของปัจจัยต่างๆ ได้ดังรูปที่ 16 อย่างไรก็ตาม หากมีความเข้มข้น ของมลพิษที่พัดมาจากทางด้านเหนือลมและทราบค่าความเข้มข้นดังกล่าวสามารถบวกเพิ่มจาก ค่าที่ประเมินได้จากแบบจำลองแบบกล่อง



$$C = \frac{P}{Uwb}$$

สมการที่ 1

โดยที่ C คือความเข้มข้น ณ สภาวะคงตัว (g/m^3)

P คืออัตราการปล่อยมลพิษอากาศ (g/s)

U คือความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)

w คือระยะทางที่มีการปล่อยมลพิษอากาศทิศทางตั้งฉากกับลม (m)

b คือความสูงผสมหรือความสูงในแนวตั้งที่มลพิษสามารถแพร่กระจายได้ (m)

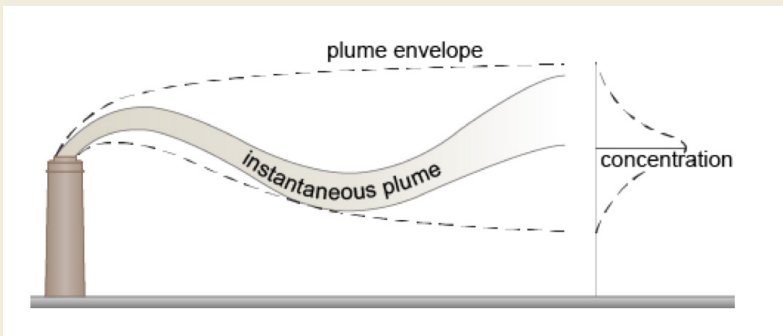
รูปที่ 16 แบบจำลองแบบกล่อง (Mareddy, 2017)

สำหรับการศึกษาที่ผ่านมาในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ได้มีการศึกษาข้อมูลความเข้มข้นของมลพิษอากาศจากแหล่งกำเนิดหลักที่มาจากการจราจร ในปี พ.ศ. 2550 และประยุกต์แบบจำลองแบบกล่องเพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software) สำหรับประเมินคุณภาพอากาศบนถนน พบว่าแบบจำลองแบบกล่องในพื้นที่ศึกษาสามารถคาดการณ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อนุภาคฝุ่น และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ เทียบกับค่าตรวจวัดจริงที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.907 0.618 และ 0.541 ตามลำดับ (ศิวพันธุ์, 2550)

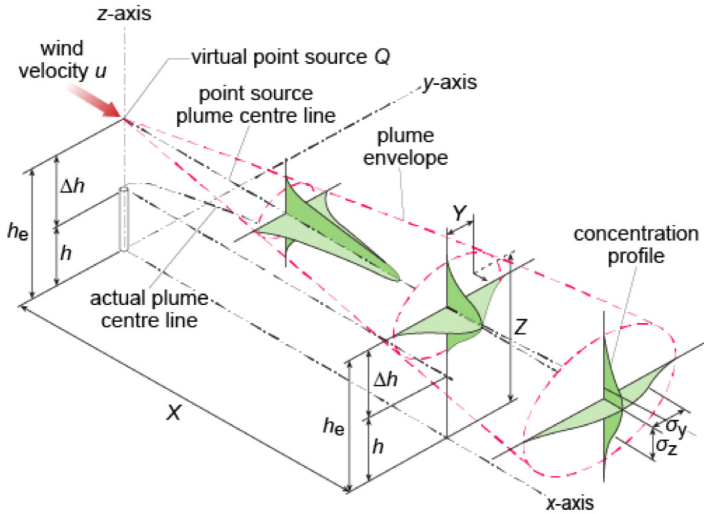
นอกจากนี้ แบบจำลองแบบกล่องได้นำมาใช้สำหรับการประเมินผลกระทบคุณภาพอากาศประกอบในรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental impact assessment) ในกิจกรรมที่มีลักษณะการปล่อยมลพิษเชิงพื้นที่ เช่น กิจกรรมการก่อสร้างและเตรียมพื้นที่ก่อสร้าง และโครงการประเภทอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (กพร., 2555)

6.2.2 แบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian)

แบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian) เป็นแบบจำลองแบบพลูม (Plume) ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของมลพิษเป็นกลุ่มควัน โดยมีแนวคิดมาจากการประเมินการเคลื่อนที่ของมลพิษที่มีแหล่งกำเนิดมลพิษแบบจุด (Point source) ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ เช่น ปล่องควันจากโรงงานอุตสาหกรรม ลักษณะรูปร่างของพลูมจะไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาขึ้นอยู่กับสภาพอุตุนิยมวิทยา ณ ขณะนั้น เนื่องจากพลูมมีแนวโน้มที่จะผันผวนอยู่ตลอดเวลา และความเข้มข้นเฉลี่ยของมลพิษในแต่ละตำแหน่งเมื่อความเข้มข้นซ้อนทับกันในแต่ละช่วงเวลาจะสร้างค่าเฉลี่ยแนวโน้มความเข้มข้น ทำให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบเกาส์เซียนหรือการแจกแจงแบบเส้นโค้งปกติ ดังนั้นความเข้มข้นของมลพิษอากาศสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (ค1) (ในภาคผนวก ค) และแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 17



(ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของมลพิษแบบพลูม (Plume)



(ข) ลักษณะการแพร่กระจายของมลพิษอากาศด้วยแบบจำลองเกาส์เซียน

รูปที่ 17 แบบจำลองเกาส์เซียน (Nesaratnam et al., 2014)

แบบจำลองการแพร่กระจายแบบเกาส์เซียน จำเป็นจะต้องนำเข้าสู่ข้อมูลหลัก ๆ ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาโดยเฉพาะลมและความเร็วลม และความคงตัวของบรรยากาศ (Atmospheric stability) ซึ่งเป็นตัวกำหนดสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน y และ แกน z (σ_y และ σ_z) ข้อมูลอัตราการปล่อยมลพิษ และข้อมูลลักษณะความสูงต่ำของภูมิประเทศ แบบจำลองแบบเกาส์เซียนถูกนำไปใช้แพร่หลายสำหรับการคาดการณ์ความเข้มข้นสูงสุดของมลพิษอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ได้ลม และได้มีการออกแบบซอฟต์แวร์ให้ใช้งานได้สะดวกสำหรับการคาดการณ์ความเข้มข้นของมลพิษที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา และสามารถคำนวณความเข้มข้นของมลพิษที่ความถี่เชิงเวลาได้ในระดับชั่วโมงจนถึงระดับปี ซอฟต์แวร์ดังกล่าวรู้จักกันดีภายใต้ชื่อว่า “AERMOD”

AERMOD เป็นซอฟต์แวร์ หรือแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจากสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency; USEPA) มีชื่อเต็มว่า “American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model” ซึ่ง AERMOD ได้รับคำแนะนำจากสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาว่า สามารถใช้งานได้สำหรับแหล่งกำเนิดที่ถูกปล่อยระดับผิวดินและระดับสูง เช่น แบบปล่อง และใช้ได้กับภูมิประเทศที่เป็นพื้นราบและภูมิประเทศที่ซับซ้อนได้ (USEPA, 2021)

สำหรับประเทศไทย แบบจำลอง AERMOD เป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมแพร่หลายและใช้กันมากในงานการประเมินคุณภาพอากาศในรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะสำหรับอุตสาหกรรมหรือแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีปล่องควัน นอกจากนี้ จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้ค่อนข้างแพร่หลายในหลายรูปแบบสำหรับคาดการณ์ความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษ

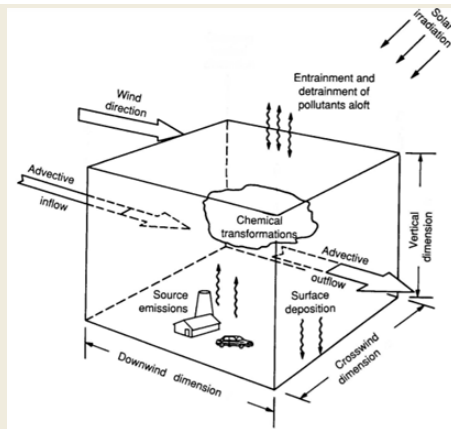
Kanabkaew and Buasing (2015) ได้ลงพื้นที่สำรวจเพื่อจัดทำฐานข้อมูลการปล่อยมลพิษจากเตาเผา และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ AERMOD คาดการณ์ลักษณะการแพร่กระจายของมลพิษและความเข้มข้นในรอบปี ของบริเวณพื้นที่บางปู อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีอุตสาหกรรมการเผาอิฐจำนวนมากในพื้นที่ อุตสาหกรรมการเผาอิฐเป็นอุตสาหกรรมที่ทำในครัวเรือนขนาดเล็ก โดยมากจะมีลักษณะเตาเผาเป็นแบบเปิดและปล่อยให้อากาศไหลออกด้านบน (Open top-updraft kiln) โดยใช้เชื้อเพลิงจากฟืนเป็นหลัก การขาดการควบคุมระบบการเผาไหม้เป็นสาเหตุให้เตาเผาเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษ ได้แก่ PM CO และ SO₂ ได้

Koomsang et al. (2015) ได้รวบรวมข้อมูลการปล่อยมลพิษอากาศ NO_x และ SO₂ จากการตรวจวัดที่ปล่องควันของเตาเผาขยะมูลฝอย ในปี พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2555 และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ AERMOD คาดการณ์รูปแบบการแพร่กระจายและความเข้มข้นของมลพิษในพื้นที่โดยรอบ ทั้งนี้เตาเผาขยะมูลฝอยได้รับการออกแบบและใช้งานเพื่อจัดการกับมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ การใช้ความร้อนสูงในการเผามูลฝอยที่ขาดการควบคุมหรือดักจับมลพิษอย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพตามมาได้

Katika and Karuchit (2018) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แบบจำลอง AERMOD เพื่อประเมินระดับมลพิษอากาศของเมือง “เทศบาลนครนครราชสีมา” โดยมีการศึกษามลพิษอากาศ 4 ชนิด ได้แก่ PM₁₀ CO SO₂ และ NO_x และเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ทั้งนี้แหล่งกำเนิดมลพิษที่นำเข้าแบบจำลองประกอบด้วย ที่อยู่อาศัย การจราจร และแหล่งอุตสาหกรรม ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารก่อมลพิษที่ได้จากแบบจำลองต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้จากกรมควบคุมมลพิษในทุกชนิดสาเหตุอาจเกิดจากการนำเข้าแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่ครบถ้วน

6.2.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี (Chemical Transport Model)

การประเมินความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษด้วยแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี (Chemical transport model) ของมลพิษแต่ละชนิด (I) ได้จากสมการความต่อเนื่องของออยเลอร์ (Euler continuity equation) ในแต่ละเวลา (t) บนระบบกริด 3 มิติที่ซ้อนกันในทุกในแนวนอนและแนวตั้ง ณ พิกัด (x,y,z) แสดงดังสมการที่ (ค2) (ระบุในภาคผนวก ค) ทั้งนี้สมการความต่อเนื่องดังกล่าวจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C_i) ในแต่ละกริดเซลล์ (Grid cell) อันเป็นผลมาจากการกระบวนการทางกายภาพและเคมีทั้งหมด ได้แก่ การปล่อยมลพิษ (Emission) การแพร่กระจาย (Dispersion) ปฏิกิริยาเคมี (Chemistry) และการตกสะสม (Removal) (CAMx, 2020) นอกจากนี้ รูปที่ 18 แสดงให้เห็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและเคมีในแต่ละกริดเซลล์ เมื่อนำกริดเซลล์หลาย ๆ กริดเซลล์มาเรียงกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกริดเซลล์ใด ๆ จะส่งผลต่อกริดเซลล์ที่อยู่ใกล้เคียง



รูปที่ 18 แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีด้วยออยเลอร์เรียน (Eulerian) (Sokolik, 2021)

จากสมการที่ (ค2) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของเคมีต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงและต้องการข้อมูลนำเข้าจำนวนมาก ดังนั้นหลายหน่วยงานในระดับสากลจึงได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อการคำนวณตามสมการดังกล่าวและเรียกซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นว่าแบบจำลอง ตัวอย่างแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนา มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และไม่มีค่าใช้จ่ายเรื่องลิขสิทธิ์ ส่วนใหญ่จะใช้งานบนระบบปฏิบัติการ UNIX แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5

ตัวอย่างแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี

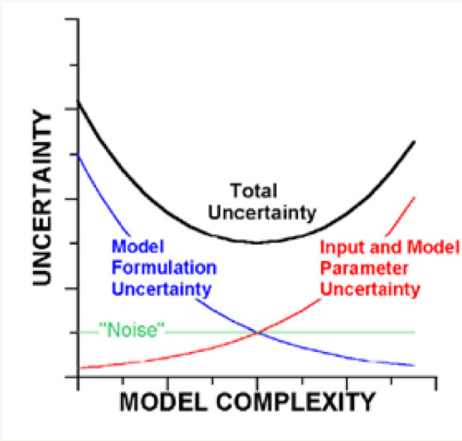
แบบจำลอง	ผู้พัฒนาหลัก	การใช้งาน	ที่มา
CAMx	ENVIRON International Corporation	ฝุ่นละออง (ปฐมภูมิและทุติยภูมิ) โอโซน และมลพิษอื่น ๆ	https://www.camx.com/
CMAQ	USEPA	ฝุ่นละออง (ปฐมภูมิและทุติยภูมิ) โอโซน และมลพิษอื่น ๆ	https://www.epa.gov/cmaq
WRF-Chem	NOAA/ESRL	ฝุ่นละออง (ปฐมภูมิและทุติยภูมิ) โอโซน และมลพิษอื่น ๆ	https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/

สำหรับประเทศไทย Kanabkaew (2011) ได้ศึกษาผลกระทบของการเผาในที่โล่งของ ชังข้าวในเขตพื้นที่โดยรอบกรุงเทพมหานครต่อความเข้มข้นของ PM_{10} ด้วยแบบจำลอง CAMx โดยใช้ปี พ.ศ. 2550 เป็นปีฐานที่ศึกษา ผลการศึกษาพบว่า ค่าความเข้มข้นที่ได้จากแบบจำลอง สำหรับค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของ PM_{10} สอดคล้องกับค่าตรวจวัดที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพ อากาศของกรุงเทพมหานคร มากกว่าค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง สาเหตุอาจมาจากสมมติฐานที่ กำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าการปล่อยมลพิษในรอบวันที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากแบบจำลอง CAMx พบว่า PM_{10} ยังคงเป็นไปตามการทดสอบประสิทธิภาพ สถิติที่แนะนำ และการแพร่กระจายของ PM_{10} ที่ได้จากแบบจำลองความสอดคล้องกับความเร็ว ลมและทิศทางลม รูปแบบการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มี การเผาและไม่มีการเผาในที่โล่งของชังข้าว พบว่าในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 ที่มีความเข้มข้น ของ PM_{10} สูงที่สุด สามารถลดความเข้มข้นของ PM_{10} โดยเฉลี่ยรายเดือนของเดือนกุมภาพันธ์ ทั่วพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้ $6 \mu g/m^3$ และค่าสูงสุดที่ลดได้สำหรับค่าเฉลี่ยราย

ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง อยู่ที่ 33 และ $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ทั้งนี้มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปสำหรับ PM_{10} ของประเทศไทย กำหนดไว้ที่ $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง และรายปี ตามลำดับ และจากการศึกษาเดียวกันยังพบอีกว่าค่าฝุ่นละอองอนินทรีย์ทุติยภูมิ (Secondary inorganic aerosol) อยู่ที่ประมาณ 10% ของ PM_{10} (ฝุ่นละอองอนินทรีย์ทุติยภูมิ คือ ฝุ่นละอองที่เกิดจากก๊าซสองตัวทำปฏิกิริยากัน แล้วเกิดเป็นสารตัวใหม่ที่เป็นของแข็ง เช่น แอมโมเนียมกับไนเตรตเมื่อทำปฏิกิริยากันในบรรยากาศจะเกิดเป็นสารตัวใหม่คือ “แอมโมเนียมไนเตรต” ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคฝุ่น ($\text{NH}_4^+(\text{g}) + \text{NO}_3^-(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s})$)

Sooktawee et al. (2018) ได้ศึกษาอิทธิพลของ PM_{10} จากแหล่งภายนอกพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยในช่วงที่เกิดหมอกควันด้วยแบบจำลอง WRF-Chem โดยเปรียบเทียบค่า PM_{10} ที่ได้จากแบบจำลองระหว่างมีและไม่มีแหล่งกำเนิดจากภายนอก โดยการจำลองครั้งแรกใช้ข้อมูลนำเข้าแหล่งกำเนิดการปล่อย PM_{10} ครอบคลุมพื้นที่ภาคเหนือตอนบน และพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบ ในขณะที่การจำลองครั้งที่สองใช้เฉพาะข้อมูลนำเข้าแหล่งกำเนิดการปล่อย PM_{10} ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนเท่านั้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างผลการจำลองทั้งสองครั้ง ทำให้เห็นอิทธิพลของ PM_{10} ในเชิงปริมาณที่ส่งผลจากพื้นที่ภายนอก หรือมลพิษข้ามแดนโดยรอบ (Transboundary air pollution) อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การใช้งานแบบจำลองการแพร่กระจายทั้ง 3 แบบจำลองนั้น ย่อมมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งระดับของความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ (1) ข้อมูลนำเข้า ได้แก่ อัตราการปล่อยมลพิษอากาศ อุทยานวิทยา และลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ และ (2) โครงสร้างของแบบจำลอง ได้แก่ สมการทางคณิตศาสตร์ และปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ (รูปที่ 19) จากข้อมูลที่ผ่านมา เราจะเห็นได้ว่าการสร้างแบบจำลองมีเป้าหมายเพื่อนำไปสู่การประเมินและเข้าใจความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน เมื่อต้องการความเข้าใจที่เพิ่มมากขึ้น จะมีการสร้างความซับซ้อนให้กับแบบจำลองที่จำเป็นจะต้องปรับโครงสร้างของแบบจำลอง เช่น ปฏิกิริยาเคมี ให้มีความละเอียดมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 19 จะเห็นว่าถ้าแบบจำลองมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น จำเป็นจะต้องมีข้อมูลนำเข้าเพิ่มขึ้น โอกาสของความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์สุดท้ายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นกับแหล่งข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 19 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการแพร่กระจาย (Irwin et al., 2001)

จากหลายกรณีของการใช้งานแบบจำลองทั้งวิธีทางสถิติและแบบจำลองการแพร่กระจายสามารถสรุปและแนะนำการใช้งานแบบจำลองกับสถานการณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6

สรุปความเหมาะสมในการใช้งานของแบบจำลองต่าง ๆ

ประเภทแบบจำลอง	ประเภทย่อย	ความเหมาะสมในการใช้งาน
วิธีทางสถิติ	IoT Sensor	IoT Sensor เหมาะสำหรับการเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษแบบ Real-time การเคลื่อนที่ของมลพิษ คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าในระยะเวลาสั้น และประเมินรูปแบบของแหล่งกำเนิดมลพิษ
	ดาวเทียม	ดาวเทียมเหมาะสำหรับการประเมินสถานการณ์การแพร่กระจายของมลพิษในพื้นที่กว้าง ระดับภูมิภาคระดับประเทศ และระดับโลก เพื่อเป็นข้อมูลฐาน และเพื่ออธิบายสถานการณ์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลจะเป็นลักษณะย้อนหลัง และ Near Real-time

ประเภทแบบจำลอง	ประเภทย่อย	ความเหมาะสมในการใช้งาน
แบบจำลองการแพร่กระจาย	แบบจำลองแบบกล่อง	แบบจำลองแบบกล่องเหมาะสำหรับประเมินเพื่อกลั่นกรองสถานการณ์มลพิษเบื้องต้นในพื้นที่ระดับเล็ก (ประมาณ 1 km) และมีแหล่งกำเนิดมลพิษแบบพื้นที่ (Area source)
	แบบจำลองเกาส์เซียน	แบบจำลองเกาส์เซียนเหมาะสำหรับประเมินแหล่งกำเนิดมลพิษแบบจุด (Point source) และมีการปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่อง เช่น ปล่อยระบายมลพิษจากอุตสาหกรรมสำหรับบนขนาดพื้นที่ระดับกลาง
	แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี	แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีเหมาะสำหรับประเมินมลพิษอากาศที่ความเข้มข้นของมลพิษส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในอากาศ (มลพิษทุติยภูมิ) ไม่ได้ปล่อยตรงจากแหล่งกำเนิดทั้งหมด เช่น ฝุ่นละอองและโอโซนเหมาะสำหรับขนาดพื้นที่ระดับกลาง (ภูมิภาค/ประเทศ) จนถึงระดับใหญ่ (ทวีป/โลก)



7 บทสรุป

จากเนื้อหาขององค์ความรู้ชุดนี้พบว่า หากไม่นับรวมปัจจัยทางแหล่งกำเนิดมลพิษซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ และไม่นับรวมปัจจัยทางภูมิประเทศ ซึ่งเป็นปัจจัยเฉพาะสำหรับพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมองความสัมพันธ์ในภาพรวมของฤดูกาลและตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่สอดคล้องกัน ทำให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศมากขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา คำว่าสภาพอากาศปิด ซึ่งหมายถึงวันที่สภาพอากาศค่อนข้างนิ่ง การระบายอากาศต่ำทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่ออธิบายเหตุการณ์ที่มลพิษอากาศมีค่าสูง วันและช่วงเวลาดังกล่าวจะสอดคล้องกับวันและเวลาที่ระดับความสูงผสมมีค่าต่ำหรืออยู่ใกล้กับระดับผิวดิน ซึ่งลักษณะดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นในฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) เป็นส่วนใหญ่ หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษในรอบวัน พบว่ามลพิษอากาศมักจะมีค่าสูงในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สภาพอากาศปิด (ระดับความสูงผสมต่ำ) มากกว่าในช่วงเวลากลางวันที่การระบายอากาศเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากระดับความสูงผสมสูง อย่างไรก็ตามตัวแปรอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศทั้งในรอบวันและฤดูกาลก็ยังมีผลสำคัญ เมื่อตัวแปรอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ เหล่านั้น (อาทิ ความเร็วลมและทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความกดอากาศ เป็นต้น) เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน การส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศจึงซับซ้อน ขึ้นอยู่กับว่าตัวแปรอุตุนิยมวิทยากลุ่มใดมีอิทธิพลมากกว่าในเวลาดังกล่าว ดังนั้นการประเมินการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศ จึงต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเข้าใจการก่อตัวและสลายตัว และการแพร่กระจายของมลพิษในอากาศ



การประเมินการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และการแพร่กระจายของมลพิษอากาศสามารถทำได้หลากหลายวิธี ในองค์ความรู้ชุดนี้ ได้มุ่งเน้นไปที่การใช้งานวิธีทางสถิติและแบบจำลองการแพร่กระจาย สำหรับวิธีทางสถิติ ในปัจจุบันถูกนำมาใช้กันมากเพื่อการประเมินและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และการแพร่กระจายของมลพิษอากาศด้วยข้อมูลจำนวนมากทั้งจากดาวเทียม และ IoT sensor โดยเฉพาะการประเมินสถานการณ์ฝุ่นละออง สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจาย อาทิ แบบจำลองแบบกล่อง แบบจำลองเกาส์เซียน และแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ตั้งแต่การประเมินอย่างง่าย (แบบจำลองแบบกล่อง) การประเมินที่ซับซ้อนขึ้น (แบบจำลองเกาส์เซียน) และการประเมินขั้นสูงที่รวมการเกิดปฏิกิริยาเคมี (แบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมี) เมื่อพิจารณาตามประเภทของแบบจำลองการแพร่กระจาย แบบจำลองแบบกล่องเหมาะสำหรับการประเมินเบื้องต้น และแหล่งกำเนิดมลพิษเชิงพื้นที่ แบบจำลองเกาส์เซียนเหมาะสำหรับการประเมินการแพร่กระจายของแหล่งกำเนิดมลพิษแบบจุด เช่น ปล่องระบายมลพิษจากอุตสาหกรรม ที่มีกรปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่องทั้งปี และแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางเคมีเหมาะสำหรับการประเมินการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการ

แพร่กระจายของมลพิษที่ส่งผลมาจากมลพิษทุติยภูมิ อาทิ ฝุ่นละอองและโอโซน เป็นต้น (แต่ก็ไม่ได้จำกัดสำหรับการใช้งานกับมลพิษปฐมภูมิ อาทิ ก๊าซต่าง ๆ และโลหะหนัก เช่นปรอท เป็นต้น) นอกจากนี้การใช้งานแบบจำลองการแพร่กระจายควรพิจารณาความพร้อมของข้อมูลนำเข้า ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์การประเมินที่ได้จากแบบจำลอง

สำหรับแนวทางการวิจัยในปัจจุบันและอนาคต ยังควรให้ความสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงทางอุดมวิทย์วิทยาที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของมลพิษอากาศ และขณะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษอากาศส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุดมวิทย์วิทยาเช่นเดียวกัน การลงทุนทางเครื่องมือขั้นสูงที่ใช้ในการตรวจวัดทางอุดมวิทย์วิทยา เช่น เรดาร์ โลดาร์ หรือโซดาร์ เพื่อใช้ดูการเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่ง โดยเฉพาะความสูงผสม จะทำให้เข้าใจสถานการณ์มลพิษและควบคุมการปล่อยมลพิษได้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับสถานการณ์และพื้นที่ในแง่ของการคาดการณ์พบว่า การบูรณาการแบบจำลองต่าง ๆ ทั้งด้วยวิธีทางสถิติและแบบจำลองการแพร่กระจายในการประเมินการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเติมเต็มข้อจำกัดของแต่ละเครื่องมือ

นอกจากนี้ในเชิงนโยบายพบว่า การเข้าถึงแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยา กรมควบคุมมลพิษ หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานภาครัฐอื่น ๆ ควรจะสามารถดำเนินการและดึงข้อมูลที่ต้องการผ่านช่องทางออนไลน์ได้โดยตรง จะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการใช้ข้อมูลและประเมินสถานการณ์มลพิษอากาศได้อย่างทันทั่วถึง ซึ่งในปัจจุบันพบว่า กรมอุตุนิยมวิทยาได้เพิ่มช่องทางการเข้าถึงข้อมูลผ่านช่องทางออนไลน์ ด้วยระบบ TMD API ไว้แล้ว อย่างไรก็ตาม หากมีช่องทางในการเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายสำหรับบุคคลทั่วไปที่ไม่มีพื้นฐานด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จะเป็นการเปิดกว้างสำหรับการใช้ข้อมูลมากขึ้น

จากองค์ความรู้ชุดนี้จะเห็นได้ว่า ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยทั้งหน่วยงานภาครัฐ ภาควิชาการ และภาคประชาชน ได้ดำเนินการหลาย ๆ อย่าง เพื่อผลักดันให้มีการปรับใช้นโยบายเพื่อการปรับปรุงคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การรับรู้และตื่นตัวของภาคประชาชนเข้ามามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก การเข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมวิทยาที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ และการเลือกใช้แบบจำลองทางอากาศเพื่อการประเมินความเข้มข้นและการแพร่กระจายของมลพิษอากาศที่เหมาะสมจะนำไปสู่การผลักดันนโยบายที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานข้อเท็จจริงและเป็นความต้องการที่มาจากความเข้าใจโดยแท้จริง



- กพร. 2555. แนวทางการจัดทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการเหมืองแร่อุตสาหกรรมเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- คพ. 2564. หน้าที่ บทบาท และ ภารกิจทั่วไป กรมควบคุมมลพิษ. เข้าถึงได้จาก: https://www.pcd.go.th/pcd_structure/472/.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2561. อินเทอร์เน็ตเกิดขึ้นได้อย่างไร?. เข้าถึงได้จาก: https://www.matichon.co.th/columnists/news_914506.
- ศิวพันธุ์ ชูอินทร์. 2550. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อประเมินคุณภาพอากาศในพื้นที่เกาะรัตนโกสินทร์. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยศรีปทุม ปีการศึกษา 2550, วันที่ 6 สิงหาคม 2550.
- อต. 2556. รู้เร็ว รู้ทัน รู้ป้องกัน ภัยธรรมชาติ. เอกสารวิชาการ การสัมมนาวิชาการวันอุดมศึกษาโลก 2556. เข้าถึงได้จาก: https://www.tmd.go.th/info/wmo_document_2013.pdf.
- อต. 2564ก. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจอากาศผิวพื้น-การบินและชั้นบนแบบทั่วไป. กรมอุตุนิยมวิทยา. เข้าถึงได้จาก: <http://www.cmmet.tmd.go.th/instrument/instruments.php>.
- อต. 2564ข. ความรู้อุตุนิยมวิทยา. กรมอุตุนิยมวิทยา. เข้าถึงได้จาก: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=84>.
- อต. 2564ค. ภารกิจหลักและโครงสร้างกรมอุตุนิยมวิทยา. เข้าถึงได้จาก: <https://www.tmd.go.th/aboutus/structure.php>.
- Borrego C., Costa A.M., Ginja J., Amorim M., Coutinho M., Karatzas K., Sioumis Th, Katsifarakis N., Konstantinidis K., De Vito S., Esposito E., Smith P., André N., Gérard P., Francis L.A., Castell N., Schneider P., Viana M., Minguillón M.C., Reimringer W., Otjes R.P., von Sicard O., Pohle R., Elen B., Suriano D., Pfister V., Prato M., Dipinto S., Penza M.. 2016. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: the EuNetAir joint exercise. Atmos. Environ., 147, 246-263.
- Britannica. 2022. Sea breeze and land breeze. Available at: <https://www.britannica.com/science/land-breeze>.
- CAMx. 2020. User's guide: comprehensive air quality model with extensions version 7.10. Available at: https://camx-wp.azurewebsites.net/Files/CAMxUsersGuide_v7.10.pdf.
- Cheremisinoff N.P. 2002. Handbook of air pollution prevention and control. Elsevier Science.
- EEA. 2013. Air quality in Europe - 2013 report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Engel-Cox J.A., Hoff R.M., Rogers R., Dimmick F., Rush A.C., Szykman J.J., Al-Saadi J., Chu D.A., Zell E.R. 2006. Integrating LIDAR and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. Atmospheric Environment, 40, 8056-8067.

- Engel-Cox J.A., Huff A.K., Kanabkaew T., Kim Oanh, N.T. 2013. Satellite tools for air quality management with focus on particulate matter, in Kim Oanh, N.T. (Editor). Integrated air quality management: Asian case studies. CRC Press.
- Gupta P., Follette-Cook M. 2019. Theoretical basis for converting satellite observations to ground-level PM_{2.5} concentrations. Available at: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/D1_AOD_PM_THR_final_7.pdf.
- Gupta, P., Christopher S.A. 2008. An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the southeastern United States, *Atmospheric Environment*. 42,6465-6471.
- HYS. 2021. Effect of distance and height on air quality. Available at: <https://www.hsy.fi/en/air-quality-and-climate/information-for-urban-planning/effect-of-distance-and-height-on-air-quality/>.
- IITM. 2021. Air pollution meteorology. Available at: <https://www.troPMet.res.in/~gurme/Lec-08.htm>.
- Irwin J.S., Steinberg K., Hakkarinen C., Feldman H. 2001. Characterizing uncertainty in risk calculations. *Proceedings of Guideline on Air Quality Modeling: A New Beginning AW&MA Specialty Conference, April 4-6, 2001*.
- Kacenelenbogen M., Léon J.F., Chiapello I., Tanré D. 2006. Characterization of aerosol pollution events in France using ground-based and POLDER-2 satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4843–4849.
- Kanabkaew T. 2011. Assessment of effects from crop residue field burning on particulate matter air quality in Thailand. PhD Dissertation: Asian Institute of Technology, Thailand.
- Kanabkaew T. 2013. Prediction of hourly particulate matter concentrations in Chiangmai, Thailand using MODIS aerosol optical depth and ground-based meteorological data. *EnvironmentAsia*, 6(2), 65-70.
- Kanabkaew T., Buasing K. 2015. Assessment of air pollution concentrations from brick kilns using an atmospheric dispersion model. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 198, 27-37.
- Kanabkaew T., Mekbungwan P., Raksakietisak S., Kanchanasut K. 2019. Detection of PM_{2.5} plume movement from IoT ground level monitoring data. *Environmental Pollution*, 252 (Part A), 543-552.
- Katika K., Karuchit S. 2018. Estimation of urban air pollutant levels using AERMOD: A case study in Nakhon Ratchasima, Thailand. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 164, 012024.

- Koomsang R., Chuchue S., Kanabkaew T. 2015. Applications of atmospheric dispersion model for air quality assessment of NO_x and SO₂ from waste incinerator. *Environ Nat Resour J*, 13(1), 21-27.
- Kumar P., Morawska L., Martani C., Biskos G., Neophytou M., Sabatino S.D., Bell M., Norford L., Britter R. 2015. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ. Int.*, 75, 199-205.
- Lalitaporn P., Mekaumnuaychai T. 2020. Satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide and comparison with ground data. *Environ. Monit. Assess.*, 192, 369.
- Lu Y., Giuliano G., Habre R. 2021. Estimating hourly PM_{2.5} concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study. *Environmental Research*, 195, 110653.
- Morawska L., Thai P.K., Liu X., Asumadu-Sakyi A., Ayoko G., Bartonova A., Bedini A., Chai F., Christensen B., Dunbabin M., Gao J., Hagler G.S.W., Jayaratne R., Kumar P., Lau A.K.H., Louie P.K.K., Mazaheri M., Motta Z.N.N., Mullins B., Rahman M.M., Ristovski Z., Shafiei M., Tjondronegoro D., Westerdahl D., Williams R. 2018. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone? *Environ. Int.*, 116, 286-299.
- Nesaratnam S.T., Taherzadeh T., Barratt R. 2014. *Air quality management*. John Wiley & Sons.
- NOAA. 2021. About our agency. Available at: <https://www.noaa.gov/>.
- Pentamwa P., Kim Oanh, N.T. 2008. Air quality in Southern Thailand during haze episode in relation to air mass trajectory, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 30(4), 539-546.
- Pérez I.A., García M.Á., Sánchez M.L., Pardo N., Fernández-Duque B. 2020. Key Points in Air Pollution Meteorology. *Int J Environ Res Public Health.* 17(22), 8349.
- Queensland Government. 2021. Meteorological factors. Available at: <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air/air-monitoring/meteorology-influence/meteorology-factors>.
- Slater J.F., Dibb J.E., Campbell J.W., Moore T.S. 2004. Physical and chemical properties of surface and column aerosols at a rural New England site during MODIS overpass. *Remote Sensing of Environment*, 92(2), 173-180.
- Snyder E.G., Watkins T.H., Solomon P.A., Thoma E.D., Williams R.W., Hagler G.S.W., Shelow D., Hindin D.A., Kilaru V.J., Preuss P.W. 2013. The changing paradigm of air pollution monitoring *Environ. Sci. Technol.*, 47(20), 11369-11377.

- Sokolik I.N. 2021. Lecture 29-Introduction to atmospheric chemical transport models (Part 1). Available at: http://irina.eas.gatech.edu/ATOC3500_Fall1998/Lecture29.pdf.
- Sooktawee, S., Kanabkaew, T., Boonyapitak, S., Patpai, A., Piemyai, N. 2020. Characterising particulate matter source contributions in the pollution control zone of mining and related industries using bivariate statistical techniques. *Scientific Reports*, 10(1), 21372.
- Sooktawee S., Patpai A., Boonyapitak S., Kongsong R., Piemyai N., Humphries U. 2018. Influence of PM_{10} from the outside area affecting on the northern part of Thailand. The 3rd Environment and Natural Resources International Conference, November 22-23, 2018.
- USEPA. 2017. List of designated reference and equivalent methods. Available at: https://www3.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/criteria/AMTIC_List_June_2017_update_6-19-2017.pdf.
- USEPA. 2021. Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models. Available at: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>.
- Veiga T., Munch-Ellingsen A., Papastergiopoulos C., Tzovaras D., Kalamaras I., Bach K., Votis K., Akselsen S. 2021. From a Low-cost air quality sensor network to decision support services: steps towards data calibration and service development. *Sensors*, 21(9),3190.
- Wang Z., Chen L., Tao J., Zhang Y., Su L. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sensing of Environment*. 114, 50-63.

ภาคผนวก ก เครื่องมือตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา

ภาคผนวก ก1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐาน

อุปกรณ์และเครื่องมือพื้นฐานสำหรับตรวจวัดอุตุนิยมวิทยาผิวดินและสำหรับตรวจวัดอุตุนิยมวิทยาชั้นบน แสดงรายละเอียดพอสังเขป ได้ดัง ตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1

ตัวอย่างอุปกรณ์และเครื่องมือพื้นฐานสำหรับตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา

เครื่องมือ	คำอธิบาย	รูปประกอบ
Anemometer	เครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม	 <p>(อต., 2564ก)</p>
Thermometer	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	 <p>(อต., 2564ก)</p>
Rain gauge	เครื่องมือวัดปริมาณฝน	 <p>(อต., 2564ข)</p>

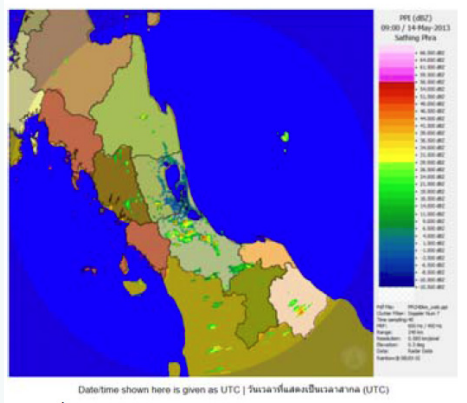
เครื่องมือ	คำอธิบาย	รูปประกอบ
Radiosonde	<p>เครื่องมือตรวจอากาศชั้นบน (ข้อมูลที่สามารถตรวจได้ ประกอบด้วย ความกดอากาศ ความสูง อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วและทิศทางลมในระดับมาตรฐาน โดยรับสัญญาณ จาก เครื่องหึ่งอากาศที่ติดไปกับบอลลูน ส่งข้อมูลลงมายังคอมพิวเตอร์หรือ ภาครับทางภาคพื้นดิน)</p>	 <p>อุปกรณ์บอลลูนที่ใช้ผูกกับเครื่องหึ่งอากาศ (อต., 2556)</p>

ภาคผนวก ก2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดชั้นสูง

ก2.1 การตรวจอากาศด้วยเรดาร์

เรดาร์ (RADAR: Radio Detection And Ranging) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์การตรวจวัดระยะไกล (Remote sensing instruments) หลักการทำงาน คือ จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ในช่วงคลื่นความถี่วิทยุออกไปในชั้นบรรยากาศ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง คือ 380,000 km/h ไปกระทบเป้าหมาย (เป้าหมายในทางอุตุนิยมวิทยา หมายถึง กลุ่มฝนหรือหยาดน้ำฟ้า) พลังงานดังกล่าวจะกระเจิง (Scattered) ทุกทิศทุกทาง และพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับ (Backscattered) ไปยังจานสายอากาศของเรดาร์ จากนั้นเครื่องรับจะทำหน้าที่จับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาและแปลงสัญญาณดังกล่าวให้มีความถี่ที่ต่ำลงเพื่อประมวลผลเป็นค่าแฟคเตอร์การสะท้อนกลับ (Reflectivity factor, Z)

เรดาร์อุตุนิยมวิทยา (Meteorological radar) หรือเรดาร์ตรวจอากาศ เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งใช้สำหรับตรวจวัดฝน ฝนฟ้าคะนอง หิมะ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจและแสดงตำแหน่งศูนย์กลางของพายุหมุนเขตร้อน เมื่อศูนย์กลางของพายุเคลื่อนเข้ามาในรัศมีหวังผลของเรดาร์ตรวจอากาศ กลุ่มฝนจากภาพเรดาร์จะมีรายละเอียดที่สังเกตได้ ดังในรูปที่ ก1 ดังนี้ สีเขียวอ่อน คือ ฝนกำลังอ่อน สีเขียวแก่ คือ ฝนกำลังปานกลาง และสีแดงที่อยู่ภายในกลุ่มฝน คือ ฝนฟ้าคะนอง



รูปที่ ก1 ภาพจากเรดาร์ตรวจอากาศ (อต., 2556)

ก2.2 การตรวจอากาศด้วยดาวเทียม

ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา (Meteorological satellite) เป็นดาวเทียมที่ถ่ายภาพได้ในบริเวณกว้างทั้งภาคพื้นดิน และมหาสมุทร เพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพอากาศ ลำดับการเคลื่อนตัวของพายุ วัตถุในห้วงอวกาศ ข้อมูลแหล่งน้ำ และถ่ายทอดข้อมูลกับสถานีภาคพื้นดิน แบ่งได้สองประเภทคือ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาโคจรใกล้ขั้วโลก หรือชนิดโคจรผ่านขั้วโลก และดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาค้างฟ้า หรือดาวเทียมประจำท้องถิ่น ดาวเทียมจะถ่ายภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจากผิวโลกในช่วงคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา (Visible spectrum) และคลื่นพลังงานความร้อนในช่วงอินฟราเรด (Infrared spectrum) เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาที่นำมาใช้งาน เช่น ดาวเทียมธีออส (Theos) ดาวเทียมโกลด์ (GOES9) ดาวเทียมเรดาร์แซต (Radarsat-1) ดาวเทียมแลนด์แซต (Landsat) และดาวเทียมไออาร์เอส (IRS) เป็นต้น ภาพถ่ายที่ได้จะนำมาปรับแต่งให้สามารถเห็นลักษณะทิศทางเคลื่อนที่ของพายุ และจะนำข้อมูลไปรายงานถึงสภาพอากาศและสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องต่อไป

ภาคผนวก ข การแปลงหน่วยทางอุตุนิยมวิทยา

ตัวแปรอุตุนิยมวิทยา	หน่วยเมตริก	หน่วยอื่น ๆ
ความเร็วลม	m/s	knot = m/s*1.94384449 km/h = m/s*3.6
อุณหภูมิ	°C	°F = °C *1.8 + 32 °K = °C + 273.15
ความกดอากาศ	kPa	millibar = kPa*10

หมายเหตุ:

นอกจากนี้สามารถใช้งานระบบแปลงหน่วยผ่านเว็บไซต์ของกรมอุตุนิยมวิทยาได้ที่

<https://www.tmd.go.th/WeatherCalculator/Index.html>

ภาคผนวก ค สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง

ภาคผนวก ค1 สมการเกาส์เซียน

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(h_e - z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(h_e + z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad \text{สมการที่ (ค1)}$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของมลพิษ (g/m^3)

x, y และ z คือ พิกัดของจุดที่ต้องการทราบค่าความเข้มข้นของมลพิษ (m)

Q คือ อัตราการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิด (g/s)

σ_y และ σ_z คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน y และแกน z (m)

h_e คือ ความสูงปรากฏของปล่อง (Effective stack height) (m)

ภาคผนวก ค2 สมการความต่อเนื่องของออยเลอร์

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{v} c_l + \nabla \cdot \rho K \nabla (c_l / \rho) + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Emission}} + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Chemistry}} - \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Removal}} \quad \text{สมการที่ (ค2)}$$

โดยที่ C_l คือ ความเข้มข้นของมลพิษชนิด l

∇ คือ โอเปอเรเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลของเวกเตอร์สามมิติ

\vec{v} คือ เวกเตอร์ลมสามมิติ

ρ คือ ความหนาแน่นของบรรยากาศ

K คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแบบปั่นป่วน (การแพร่กระจาย)

ศูนย์วิชาการเพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ (ศวอ.)

อาคารสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

122/4 ซอยเรวดี (แยกซอยศาสนา 28) ถนนพระราม 6

แขวงพญาไท เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ : 02-617-1530-1 / โทรสาร : 02-279-9720

อีเมล : info@ccas.or.th

เว็บไซต์ : www.ccas.or.th

<https://www.facebook.com/CCAS.EEAT>

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)

อาคารศูนย์เรียนรู้สุขภาวะ 99/8 ซอยงามดูพลี ถนนพระรามสี่

แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

โทรศัพท์ : 02-343-1500

เว็บไซต์ : www.thaihealth.or.th

<https://www.facebook.com/thaihealth>



