

กรอบทฤษฎีสำหรับการสร้างแบบจำลองความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในสภาพแวดล้อมเมืองและปริมณฑล: กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา

ส่วนที่ 1: ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับ PM2.5: แหล่งกำเนิดและการก่อตัว

1.1 นิยามของฝุ่นละออง PM2.5

ฝุ่นละออง PM2.5 (Particulate Matter 2.5) คืออนุภาคของแข็งหรือของเหลวขนาดเล็กที่แขวนลอยในอากาศ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter) ไม่เกิน 2.5 ไมครอน¹ ด้วยขนาดที่เล็กมาก ซึ่งเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ประมาณ 20-30 เท่า ทำให้ฝุ่นละอองชนิดนี้สามารถเล็ดลอดผ่านกลไกการป้องกันตามธรรมชาติของระบบทางเดินหายใจ เช่น ขนจมูก เข้าไปสู่ส่วนลึกสุดของปอด และสามารถซึมผ่านเข้าสู่กระแสเลือดเพื่อกระจายไปยังอวัยวะต่างๆ ทั่วร่างกายได้³

ผลกระทบต่อสุขภาพจากการสัมผัส PM2.5 นั้นมีความรุนแรงและหลากหลาย องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้จัดให้ PM2.5 อยู่ในกลุ่มที่ 1 ของสารก่อมะเร็ง⁴ การสัมผัสฝุ่นละอองชนิดนี้ในระยะยาวมีความเชื่อมโยงกับการเพิ่มความเสี่ยงของโรคระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง รวมถึงโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด เช่น โรคหัวใจขาดเลือด และโรคหลอดเลือดในสมอง⁶ การทำความเข้าใจคุณลักษณะและผลกระทบของ PM2.5 จึงเป็นรากฐานสำคัญในการสร้างแบบจำลองที่แม่นยำเพื่อการจัดการและป้องกันปัญหา

1.2 แหล่งกำเนิดปฐมภูมิ: การปลดปล่อยอนุภาคโดยตรง

ฝุ่น PM2.5 ปฐมภูมิ (Primary PM2.5) คือฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดสู่บรรยากาศโดยตรง

แหล่งกำเนิดเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทหลัก คือ แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น การปะทุของภูเขาไฟ พายุฝุ่น และไฟป่าที่เกิดจากฟ้าผ่า และแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Sources) ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในการสร้างแบบจำลองนี้³

กิจกรรมของมนุษย์ที่ก่อให้เกิด PM2.5 ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน⁸ แหล่งกำเนิดหลักที่ระบุในกรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา ได้แก่:

- **การเผาในภาคเกษตร:** การเผาไร่อ้อยและเศษวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ เพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก เป็นแหล่งกำเนิด PM2.5 ปฏิกิริยาที่สำคัญและเกิดขึ้นตามฤดูกาล⁹
- **ภาคอุตสาหกรรม:** โรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินและน้ำมันเตา ในกระบวนการผลิตและการผลิตไฟฟ้า จะปล่อยอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กออกมาโดยตรงจากปล่องระบาย⁷
- **การคมนาคมขนส่ง:** การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลในรถยนต์ รถบรรทุก และรถโดยสาร เป็นแหล่งกำเนิดเขม่าและควันดำ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของ PM2.5 ปฏิกิริยาในเขตเมือง⁶

1.3 การก่อตัวของแอโรซอลทุติยภูมิ: ปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ

นอกเหนือจากฝุ่นที่ถูกปล่อยออกมาโดยตรงแล้ว ความเข้มข้นของ PM2.5 ในบรรยากาศยังประกอบด้วยฝุ่นละอองทุติยภูมิ (Secondary PM2.5) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมักถูกประเมินค่าต่ำเกินไป¹¹ ฝุ่นละอองชนิดนี้ไม่ได้ถูกปล่อยออกมาโดยตรง แต่ก่อตัวขึ้นในบรรยากาศผ่านปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อนของก๊าซตั้งต้น (Precursor Gases)

ก๊าซตั้งต้นที่สำคัญซึ่งถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกับฝุ่นปฏิกิริยา ได้แก่:

- **ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx):** เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงในเครื่องยนต์สันดาปภายในของยานพาหนะและหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม¹
- **ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO2):** เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหินและน้ำมันเตา ซึ่งใช้ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมหนัก¹
- **สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs):** ปลดปล่อยจากไอเสียรถยนต์ ตัวทำละลายในภาคอุตสาหกรรม โรงงานเคมีภัณฑ์ และการเผาชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์¹²

กระบวนการก่อตัวของฝุ่นทุติยภูมิ หรือที่เรียกว่า "หมอกควันแบบโฟโตเคมีคัล" (Photochemical Smog) จะเกิดขึ้นเมื่อก๊าซตั้งต้นเหล่านี้ทำปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ โดยมีแสงแดด โดยเฉพาะรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา¹¹ ปฏิกิริยานี้ไปสู่การเปลี่ยนสภาพของก๊าซไปเป็นอนุภาคของแข็งและของเหลวขนาดเล็ก เช่น แอมโมเนียมไนเตรต (NH4NO3) และแอมโมเนียมซัลเฟต (NH4)2SO4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ PM2.5 ทุติยภูมิ

การที่แหล่งกำเนิดเป้าหมายทั้งสาม (การเผาไร่อ้อย, โรงงานอุตสาหกรรม, และการใช้รถยนต์) ไม่เพียงแต่ปล่อย PM2.5 ปฏิกิริยา แต่ยังเป็นแหล่งกำเนิดหลักของก๊าซตั้งต้นสำหรับ PM2.5 ทุติยภูมิดังนั้น สร้างผลกระทบแบบทวีคูณต่อคุณภาพอากาศ ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องไม่พิจารณาเฉพาะการปล่อยฝุ่นโดยตรง แต่ต้องสามารถจำลองกระบวนการแปรสภาพทางเคมีในบรรยากาศ ซึ่งหมายความว่าตัวแปร

ด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิ จะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

ส่วนที่ 2: พลวัตของการกระจายตัวและการสะสมของ PM2.5

ความเข้มข้นของ PM2.5 ณ จุดใดจุดหนึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการปล่อยจากแหล่งกำเนิดเท่านั้น แต่ยังถูกควบคุมโดยปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและลักษณะทางภูมิประเทศ ซึ่งเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ การเจือจาง และการสะสมของมลพิษในบรรยากาศ

2.1 บทบาทของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

สภาพอากาศมีอิทธิพลโดยตรงต่อการกระจายตัวและการกำจัดมลพิษทางอากาศ ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่:

- **ความเร็วและทิศทางลม:** ความเร็วลมสูงช่วยให้มลพิษเจือจางและถูกพัดพาออกจากแหล่งกำเนิดได้ดี ทำให้ความเข้มข้นในพื้นที่ลดลง ในทางกลับกัน สภาวะลมสงบจะเอื้อต่อการสะสมตัวของมลพิษ ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ⁴ ส่วนทิศทางลมเป็นตัวกำหนดว่าพื้นที่ใดจะได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดนั้นๆ
- **เสถียรภาพบรรยากาศและความสูงของชั้นผสม (Mixing Height):** เสถียรภาพบรรยากาศอธิบายถึงแนวโน้มของอากาศในการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ในช่วงกลางวัน ความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำให้อากาศใกล้พื้นผิวร้อนและลอยตัวขึ้น เกิดเป็นบรรยากาศไม่เสถียรและมีชั้นผสมที่สูง ส่งผลให้มลพิษสามารถกระจายตัวในแนวดิ่งได้ดี แต่ในเวลากลางคืนหรือช่วงฤดูหนาว พื้นดินจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศที่อยู่ติดกับพื้นเย็นและหนักกว่าอากาศที่อยู่ด้านบน เกิดเป็นสภาวะที่เรียกว่า "ชั้นผกผันของอุณหภูมิ" (Temperature Inversion) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงและมีความสูงของชั้นผสมต่ำมาก สภาวะนี้จะทำหน้าที่เหมือนฝาชีที่กักขังมลพิษไว้ใกล้พื้นผิวโลก ทำให้ความเข้มข้นของ PM2.5 พุ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ¹⁴
- **อุณหภูมิ:** อุณหภูมิมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกับ PM2.5 โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ก่อให้เกิดฝุ่นทุติยภูมิได้ ¹⁴ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยบางชิ้นพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นของ PM2.5 (ยกเว้นในฤดูหนาว) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆ ที่เกิดขึ้นร่วมกัน ¹⁷
- **ความชื้นสัมพัทธ์และหยาดน้ำฟ้า:** ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงอาจส่งผลต่อขนาดและองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่น ส่วนหยาดน้ำฟ้า เช่น ฝน เป็นกลไกการกำจัดมลพิษที่มีประสิทธิภาพที่สุด โดยกระบวนการชะล้าง (Washout) จะนำพาฝุ่นละอองออกจากบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิอากาศดีขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ปริมาณน้ำฝนจึงมีความสัมพันธ์เชิงลบที่ชัดเจนกับความเข้มข้นของ PM2.5 ¹⁴

ตารางที่ 1: อิทธิพลของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญต่อความเข้มข้นของ PM2.5

ตัวแปร	ผลกระทบทางกายภาพ	ความสัมพันธ์ที่คาดการณ์กับ PM2.5	นัยยะต่อการสร้างแบบจำลอง
ความเร็วลม	เพิ่มการพัดพาและการเจือจาง	ลบ	ตัวแปรหลักในเทอมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองการกระจายตัว
ความสูงของชั้นผสม	กำหนดปริมาตรของบรรยากาศที่มลพิษสามารถกระจายตัวในแนวตั้งได้	ลบ	สำคัญอย่างยิ่งในการจำลองสภาวะการสะสมตัวสูงในช่วงกลางคืนและฤดูหนาว
หยาดน้ำฟ้า (ฝน)	กำจัดอนุภาคออกจากบรรยากาศผ่านการชะล้าง	ลบ	เป็นกลไกการกำจัด (Removal term) ที่สำคัญในแบบจำลอง
ความชื้นสัมพัทธ์	ส่งผลต่อการเติบโตของอนุภาคและการเกิดปฏิกิริยาเคมี	ลบ (โดยทั่วไป)	อาจต้องพิจารณาในแบบจำลองเคมีบรรยากาศชั้นสูง
รังสีดวงอาทิตย์	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างฝุ่นทุติยภูมิ	บวก	จำเป็นสำหรับการคำนวณการก่อตัวของฝุ่นทุติยภูมิ
อุณหภูมิ	ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและเสถียรภาพบรรยากาศ	ซับซ้อน (บวกโดยทั่วไป)	มีอิทธิพลต่อการก่อตัวทางเคมีและการกระจายตัวทางกายภาพ

2.2 อิทธิพลของภูมิประเทศและลักษณะเมือง

ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ส่งผลอย่างมากต่อรูปแบบการไหลของอากาศและการสะสมของมลพิษ ทั้งในระดับมหภาคและจุลภาค

- ระดับมหภาค: แอ่งโคราช:** จังหวัดนครราชสีมาตั้งอยู่ในพื้นที่ราบสูงโคราช ซึ่งมีลักษณะทางภูมิศาสตร์เป็นแอ่งแผ่นดินขนาดใหญ่ หรือที่เรียกว่า "แอ่งโคราช" (Korat Basin) ล้อมรอบด้วยทิวเขาสำคัญ ได้แก่ ทิวเขาเพชรบูรณ์และดงพญาเย็นทางทิศตะวันตก ทิวเขาสันกำแพงและพนมดงรักทางทิศใต้ และทิวเขาภูพานทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ¹⁸ ลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะนี้จะขัดขวางการไหลเวียนของอากาศใน

ระดับภูมิภาค ทำให้มวลอากาศที่ปนเปื้อนมลพิษถูกกักเก็บอยู่ในแอ่งได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่สภาพอากาศปิดและลมสงบ

- **ระดับจุลภาค: หุบเขาถนนในเมือง (Urban Street Canyons):** ภายในเขตเมือง การมีอาคารสูงขนานสองข้างทางของถนนจะสร้างสภาพแวดล้อมที่เรียกว่า "หุบเขาถนน" ² โครงสร้างเหล่านี้จะกีดขวางการไหลของลม ทำให้การระบายอากาศเป็นไปได้น้อย มลพิษที่ปล่อยออกมาจากยานพาหนะจะถูกกักเก็บและสะสมตัวอยู่ในหุบเขาถนน ส่งผลให้ความเข้มข้นของมลพิษในระดับพื้นดินสูงกว่าพื้นที่เปิดโล่งอย่างมีนัยสำคัญ ² ประสิทธิภาพในการระบายอากาศของหุบเขาถนนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความสูงของอาคารต่อความกว้างของถนน (H/W ratio) และทิศทางลมที่สัมพันธ์กับแนวถนน ²

การซ้อนทับกันของปัจจัยทางภูมิประเทศทั้งสองระดับนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสถานการณ์ PM2.5 ในนครราชสีมา กล่าวคือ ในช่วงฤดูหนาว มลพิษที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างจะถูกกักเก็บไว้ในแอ่งโคราช ทำให้ความเข้มข้นของ PM2.5 "พื้นหลัง" (background concentration) ทั้งหมดภูมิภาคสูงขึ้น ²⁰ จากนั้น มลพิษที่ปล่อยออกมาจากการจราจรในตัวเมืองจะถูกกักเก็บซ้ำอีกครั้งในระดับจุลภาคภายในหุบเขาถนนต่างๆ ดังนั้น ความเข้มข้นของ PM2.5 ที่ประชาชนสัมผัสบนท้องถนนจึงเป็นผลรวมของมลพิษที่สะสมตัวในระดับท้องถิ่นซ้อนทับอยู่บนมลพิษพื้นหลังที่สะสมตัวในระดับภูมิภาค แบบจำลองที่มีความแม่นยำจึงต้องสามารถจำลองผลกระทบหลายมาตราส่วนนี้ได้ โดยอาจต้องคำนวณความเข้มข้นพื้นหลังระดับภูมิภาคก่อน แล้วจึงบวกผลกระทบจากแหล่งกำเนิดในท้องถิ่นเข้าไป

ส่วนที่ 3: การจำแนกลักษณะแหล่งกำเนิดสำหรับกรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา

การสร้างแบบจำลองที่แม่นยำจำเป็นต้องมีข้อมูลบัญชีการระบายมลพิษ (Emissions Inventory) ที่มีคุณภาพ ซึ่งระบุว่ามลพิษถูกปล่อยออกมาจากที่ใด เมื่อใด และในปริมาณเท่าใด สำหรับกรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา แหล่งกำเนิดหลักสามประเภทสามารถจำแนกลักษณะได้ดังนี้

3.1 การเผาในภาคเกษตร: การเผาปลูกอ้อย (แหล่งกำเนิดแบบพื้นที่)

การเผาไร่อ้อยเป็นแหล่งกำเนิดแบบพื้นที่ (Area Source) ที่มีลักษณะเฉพาะคือเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างและไม่ต่อเนื่องในเชิงเวลา

- **ฤดูกาลและปัจจัยขับเคลื่อน:** การเผาอ้อยมีความเชื่อมโยงโดยตรงกับฤดูการเก็บเกี่ยว ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงเดือนธันวาคมถึงเมษายน ²¹ ช่วงเวลานี้มักจะตรงกับฤดูแล้งที่มีสภาพอากาศนิ่งและแห้ง ซึ่งยิ่งทำให้ผลกระทบจากฝุ่นควันรุนแรงขึ้น ¹² เกษตรกรเลือกที่จะเผาเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และประหยัดต้นทุนด้านแรงงาน ¹¹
- **การกระจายตัวเชิงพื้นที่:** การเผาไม่ได้เกิดจากจุดเดียว แต่กระจายตัวไปตามพื้นที่เพาะปลูกอ้อยทั่วทั้งจังหวัด การสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลขอบเขตพื้นที่เพาะปลูกอ้อย ร่วมกับข้อมูลจุดความร้อน

- (Hotspot) จากดาวเทียม เพื่อระบุตำแหน่งและช่วงเวลาของการเผาที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละวัน ²⁰
- การคำนวณปริมาณการปล่อยมลพิษ: ปริมาณการปล่อยมลพิษสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐาน:

$$E = A \times B \times EF$$

โดยที่:

- คือ ปริมาณการปล่อยมลพิษ (เช่น กรัม)
- คือ พื้นที่ที่ถูกเผา (เช่น ตารางเมตร)
- คือ ปริมาณชีวมวลต่อหน่วยพื้นที่ (Biomass Load) (เช่น กิโลกรัม/ตารางเมตร)
- คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษ (Emission Factor) (เช่น กรัม/กิโลกรัมชีวมวลแห้ง)

จากงานวิจัยในประเทศไทย พบว่าปริมาณชีวมวลของใบอ้อยแห้งอยู่ที่ประมาณ กรัมต่อตารางเมตร (หรือประมาณ 1 กก./ตร.ม.) ²⁶ ส่วนค่า EF ของ PM2.5 เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดและมีความผันแปรสูง งานวิจัยเกี่ยวกับการเผาชีวมวลในไทยให้ค่า EF สำหรับ PM2.5 ในช่วง กรัมต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ²⁷ และงานวิจัยเฉพาะทางเกี่ยวกับการเผาตอซังข้าวโพดให้ค่า กรัม/กก. ²⁸ ขณะที่งานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับการเผาอ้อยโดยตรงให้ค่า กรัม/กก. ²⁹ การเลือกใช้ค่า EF ที่เหมาะสมและจำเพาะต่อการเผาใบอ้อยในบริบทของประเทศไทยเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

- **องค์ประกอบทางเคมี:** ควันที่เกิดจากการเผาชีวมวลไม่เพียงแต่มี PM2.5 เท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยก๊าซพิษและก๊าซตั้งต้นอื่นๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx), และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นสารก่อมะเร็ง เช่น เบนซีน (Benzene) และสารกลุ่ม PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) ²⁷

ตารางที่ 2: ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษ PM2.5 จากการเผาชีวมวลทางการเกษตร

ประเภทชีวมวล	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อย PM2.5 (กรัม/กก. ชีวมวลแห้ง)	มลพิษร่วมที่สำคัญ	แหล่งอ้างอิง
ใบอ้อย	(จากการศึกษาในบราซิล) และอยู่ในช่วงทั่วไปของการเผาชีวมวล	CO, , VOCs, PAHs	²⁶
ตอซังข้าวโพด		CO,	²⁸
ชีวมวลทั่วไป (ฟางข้าว, ใบไม้)		K+, Cl- (ตัวชี้วัดการเผาพิษ)	²⁷

3.2 แหล่งกำเนิดจากภาคอุตสาหกรรม (แหล่งกำเนิดแบบจุด)

โรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด (Point Source) ที่มีการปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่องจากตำแหน่งที่แน่นอน

- **ประเภทโรงงานที่ปล่อยมลพิษสูง:** โรงงานอุตสาหกรรมที่สำคัญในฐานะแหล่งกำเนิด PM2.5 และก๊าซตั้งต้น ได้แก่ โรงไฟฟ้า (โดยเฉพาะที่ใช้ถ่านหินและน้ำมันเตา), โรงงานน้ำตาล (ซึ่งมักมีโรงไฟฟ้าชีวมวลใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง), โรงงานปูนซีเมนต์, โรงโม่หิน, และโรงงานเคมีภัณฑ์⁷
- **บัญชีรายชื่อโรงงานในจังหวัดนครราชสีมา:** จากข้อมูลที่มี สามารถรวบรวมรายชื่อโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่อาจเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญได้ เช่น โรงงานน้ำตาลและโรงไฟฟ้าชีวมวลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกระจายตัวอยู่ในหลายอำเภอ เช่น พิกมาย ครบุรี สีคิ้ว และแก้งสนามนาง³² การจัดทำบัญชีการระบายมลพิษที่สมบูรณ์จำเป็นต้องเข้าถึงฐานข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม³⁷
- **พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง:** การจำลองการกระจายตัวของมลพิษจากแหล่งกำเนิดแบบจุดต้องการข้อมูลจำเพาะของแต่ละปล่อง ได้แก่ พิกัดตำแหน่ง, อัตราการระบายมลพิษ (กรัม/วินาที), ความสูงของปล่อง, เส้นผ่านศูนย์กลางของปล่อง, ความเร็วของก๊าซที่ออกจากปล่อง และอุณหภูมิของก๊าซ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มักจะปรากฏอยู่ในรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA) ของแต่ละโรงงาน³⁸

ตารางที่ 3: บัญชีรายชื่อเบื้องต้นของแหล่งกำเนิด PM2.5 จากภาคอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมา

ชื่อสถานประกอบการ	ประเภท	ที่ตั้ง (อำเภอ)	เชื้อเพลิงหลัก (ที่คาดการณ์)	มลพิษร่วมที่อาจเกิดขึ้น	แหล่งอ้างอิง
บริษัท อุตสาหกรรมโคราช จำกัด	โรงงานน้ำตาล/โรงไฟฟ้าชีวมวล	พิกมาย	ชานอ้อย, ใบอ้อย	, , CO	32
บริษัท น้ำตาลครบุรี จำกัด (มหาชน)	โรงงานน้ำตาล/โรงไฟฟ้าชีวมวล	ครบุรี, สีคิ้ว	ชานอ้อย, ใบอ้อย	, , CO	33
บริษัท น้ำตาลราชสีมา จำกัด	โรงงานน้ำตาล/โรงไฟฟ้าชีวมวล	แก้งสนามนาง	ชานอ้อย	, , CO	34
บริษัท อุตสาหกรรมอ่างเรียน จำกัด	โรงงานน้ำตาล	แก้งสนามนาง	ชานอ้อย	, , CO	39
โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา	โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	สีคิ้ว (ลำตะคอง)	พลังน้ำ	-	35

3.3 แหล่งกำเนิดจากการคมนาคม (แหล่งกำเนิดแบบเส้น)

การจราจรบนถนนสายหลักถูกจำลองเป็นแหล่งกำเนิดแบบเส้น (Line Source) ซึ่งมีการปล่อยมลพิษตลอดแนวนอน

- **การระบุแหล่งกำเนิด:** สำหรับจังหวัดนครราชสีมา ถนนมิตรภาพ (ทางหลวงหมายเลข 2) เป็นเส้นเลือดหลักที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่น และถือเป็นแหล่งกำเนิดแบบเส้นที่สำคัญที่สุด⁴¹
- **ปริมาณการจราจร (Activity Rate):** อัตราการปล่อยมลพิษจากถนนขึ้นอยู่กับจำนวนยานพาหนะที่วิ่งผ่านในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวันตลอดปี (Average Annual Daily Traffic: AADT) สามารถขอรับได้จากกรมทางหลวง⁴³ นอกจากนี้ รูปแบบการจราจรยังมีความผันผวนในรอบวัน โดยมีช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้าและตอนเย็น ซึ่งแบบจำลองที่มีความละเอียดสูงควรพิจารณาถึงความผันผวนนี้ด้วย
- **องค์ประกอบของยานพาหนะ (Fleet Composition):** การแยกประเภทของยานพาหนะมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการแยกแยะระหว่างเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นแหล่งกำเนิด PM2.5 ปฐมภูมิที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ⁵ สัดส่วนของยานพาหนะแต่ละประเภทสามารถประเมินได้จากข้อมูลการจดทะเบียนรถยนต์ของจังหวัดนครราชสีมา⁴⁶
- **ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษ (Emission Factors):** ค่า EF สำหรับยานพาหนะ (หน่วยเป็น กรัม/กิโลเมตร/คัน) ขึ้นอยู่กับประเภทของรถยนต์ เทคโนโลยีเครื่องยนต์ และที่สำคัญที่สุดคือ มาตรฐานการปล่อยไอเสีย (Euro Standard) ที่รถคันนั้นผ่านมาตรฐาน ประเทศไทยได้มีการบังคับใช้มาตรฐานที่เข้มงวดขึ้นตามลำดับ จาก Euro 4 ไปสู่ Euro 5 และ Euro 6⁴⁸ แบบจำลองที่ดีควรใช้ค่า EF เฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนของรถยนต์มาตรฐานต่างๆ ที่ใช้งานจริงบนท้องถนน

ตารางที่ 4: มาตรฐานการปล่อยมลพิษ (Euro) สำหรับฝุ่นละออง (PM) จากเครื่องยนต์ดีเซล (รถยนต์นั่งและรถเพื่อการพาณิชย์ขนาดเล็ก)

มาตรฐาน	ค่าจำกัด PM (กรัม/กม.)	วันที่บังคับใช้โดยประมาณในไทย
Euro 3	0.05	2549 (2006) ⁴⁸
Euro 4	0.025	2555 (2012) ⁴⁸
Euro 5	0.005	2567 (2024) ⁴⁸
Euro 6	0.0045	2568 (2025) เป็นต้นไป ⁵⁰
หมายเหตุ: ค่าจำกัด PM เป็นค่ามาตรฐานสากล การบังคับใช้ใน		

ไทยอาจมีระยะเวลาเปลี่ยนผ่าน		
-----------------------------	--	--

ส่วนที่ 4: พื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพยากรณ์ความเข้มข้นของ PM2.5 สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีหลักการทำงาน จุดแข็ง และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

4.1 แบบจำลองเชิงกำหนด (Deterministic/Physical Models)

แบบจำลองประเภทนี้ทำงานโดยการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกระบวนการทางกายภาพและเคมีของการเคลื่อนย้าย (Transport), การแพร่กระจาย (Dispersion), และการแปรสภาพ (Transformation) ของมลพิษในบรรยากาศ

- แบบจำลองเกาส์เซียนพุ่ม (Gaussian Plume Model):** เป็นแบบจำลองพื้นฐานที่สันนิษฐานว่าการกระจายตัวของความเข้มข้นมลพิษจากแหล่งกำเนิดจะมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ (Gaussian distribution) ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบตามทิศทางขวางลม เหมาะสำหรับการจำลองแหล่งกำเนิดแบบจุดที่ไม่ซับซ้อน ในสภาพอากาศและภูมิประเทศที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก¹⁶
- แบบจำลองขั้นสูง (เช่น AERMOD):** เป็นแบบจำลองการกระจายตัวที่ได้รับการยอมรับจากหน่วยงานกำกับดูแลสากล เช่น U.S. EPA แบบจำลอง AERMOD มีการจำลองฟิสิกส์ของบรรยากาศที่ซับซ้อนกว่าแบบจำลองเกาส์เซียนพื้นฐาน รวมถึงการพิจารณาผลกระทบของเสถียรภาพบรรยากาศ ความปั่นป่วน และลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อน สามารถใช้จำลองแหล่งกำเนิดได้หลายประเภทพร้อมกัน (จุด, เส้น, พื้นที่) และมักถูกใช้ในรายงาน EIA⁵²

4.2 แบบจำลองเชิงสถิติและการเรียนรู้ของเครื่อง (Statistical and Machine Learning Models)

แบบจำลองประเภทนี้ไม่ได้จำลองกระบวนการทางกายภาพโดยตรง แต่ใช้วิธีการทางสถิติหรืออัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อ "เรียนรู้" ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างชุดข้อมูลนำเข้า (Input) กับความเข้มข้นของ PM2.5 ที่เป็นผลลัพธ์ (Output) จากข้อมูลในอดีตจำนวนมาก⁵⁴

- แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression - MLR):** เป็นแบบจำลองทาง

สถิติพื้นฐานที่พยายามหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระ (เช่น ความเร็วลม, อุณหภูมิ) กับตัวแปรตาม (ความเข้มข้น PM2.5) ¹⁷

- **แบบจำลองอนุกรมเวลา (Time-Series Models):** เช่น SARIMAX ใช้ค่าในอดีตของ PM2.5 และตัวแปรอื่นๆ เพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต โดยสามารถพิจารณาถึงรูปแบบตามฤดูกาลได้ ⁵⁷
- **โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks):** โดยเฉพาะแบบจำลอง Long Short-Term Memory (LSTM) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ Deep Learning มีความสามารถสูงในการเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนจากข้อมูลอนุกรมเวลา งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง LSTM สามารถให้ผลการพยากรณ์ PM2.5 ที่แม่นยำกว่าแบบจำลองทางสถิติแบบดั้งเดิม ⁵⁷

ตารางที่ 5: การเปรียบเทียบแนวทางการสร้างแบบจำลองคุณภาพอากาศสำหรับสภาพแวดล้อมเมือง

ประเภทแบบจำลอง	หลักการ	ข้อมูลนำเข้าหลัก	จุดแข็ง	จุดอ่อนสำหรับกรณีศึกษา นครราชสีมา
Gaussian Plume	การกระจายตัวแบบเกาส์เซียน	อัตราการปล่อย, พารามิเตอร์ปล่อย, สภาพอุตุนิยมวิทยาคงที่	ง่ายต่อการใช้งาน, ใช้ทรัพยากรคำนวณน้อย	ไม่เหมาะกับภูมิประเทศซับซ้อน (แอ่งโคราช), สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง, และแหล่งกำเนิดหลายประเภท
AERMOD	การกระจายตัวของพุ่มเชิงสถานะคงตัว (Steady-state)	บัญชีการระบายมลพิษ (จุด, เส้น, พื้นที่), ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายชั่วโมง, ข้อมูลภูมิประเทศ	ได้รับการยอมรับในระดับสากล, สามารถจำลองแหล่งกำเนิดหลายประเภทและภูมิประเทศซับซ้อนได้	ใช้ทรัพยากรคำนวณสูง, ความแม่นยำขึ้นอยู่กับคุณภาพของบัญชีการระบายมลพิษ, ไม่ได้จำลองเคมีบรรยากาศโดยตรง
Multiple Linear Regression	ความสัมพันธ์เชิงเส้นทางสถิติ	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา, ข้อมูลมลพิษย้อนหลัง	ง่ายต่อการตีความ, คำนวณรวดเร็ว	ไม่สามารถจับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของปัญหามลพิษทางอากาศ

LSTM Neural Network	การเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนจากข้อมูลอนุกรมเวลา	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา, ข้อมูลมลพิษ, ข้อมูลการจราจร, ข้อมูลจุดความร้อน (ย้อนหลัง)	มีความแม่นยำสูงในการพยากรณ์, สามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี	เป็นแบบจำลอง "กล่องดำ" (Black Box) ทำให้ตีความยาก, ต้องการข้อมูลย้อนหลังจำนวนมากในการฝึกสอน
----------------------------	--	--	---	---

4.3 แนวทางแบบจำลองแบบผสมผสาน (Hybrid Modeling Approaches)

แนวทางนี้เป็นการผสมผสานจุดแข็งของแบบจำลองเชิงกำหนดและแบบจำลองเชิงสถิติเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำและยืดหยุ่นมากขึ้น ⁵⁴ ตัวอย่างเช่น การใช้แบบจำลอง AERMOD เพื่อคำนวณการกระจายตัวของมลพิษจากแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุพารามิเตอร์ได้ชัดเจน (โรงงาน, การจราจร) จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเป็นหนึ่งในตัวแปรนำเข้าสำหรับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งจะทำให้การเรียนรู้และปรับแก้ผลลัพธ์โดยพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่จำลองได้ยาก เช่น การเผาในที่โล่งแบบสุ่ม หรือปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน

สำหรับกรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา แนวทางแบบผสมผสานนี้มีความเหมาะสมอย่างยิ่ง เนื่องจากแหล่งกำเนิดมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แบบจำลองเชิงกำหนด เช่น AERMOD สามารถจัดการกับแหล่งกำเนิดแบบจุด (โรงงาน) และแบบเส้น (การจราจร) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสามารถเรียนรู้รูปแบบของมลพิษพื้นหลังจากแหล่งกำเนิดแบบพื้นที่ (การเผาไร่อ้อย) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียมและข้อมูลอุตุนิยมวิทยา การรวมผลลัพธ์จากทั้งสองส่วนจะทำให้ได้การพยากรณ์ที่ครอบคลุมและแม่นยำกว่า การใช้แบบจำลองประเภทใดประเภทหนึ่งเพียงอย่างเดียว

ส่วนที่ 5: การสังเคราะห์และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในจังหวัดนครราชสีมา

5.1 การบูรณาการการปล่อยมลพิษจากหลายแหล่งกำเนิดในกรอบการทำงานเดียว

ขั้นตอนแรกที่สำคัญที่สุดคือการสร้างบัญชีการระบายมลพิษ (Emissions Inventory) ที่ครอบคลุมและมีความละเอียดสูง โดยมีขั้นตอนดังนี้:

- **แหล่งกำเนิดแบบจุด:** ระบุทิศทางภูมิศาสตร์ของโรงงานอุตสาหกรรมที่สำคัญ³² รวบรวมพารามิเตอร์ของปล่อง (ความสูง, เส้นผ่านศูนย์กลาง) และอัตราการปล่อยมลพิษจากรายงาน EIA หรือประเมินจากประเภทและขนาดของโรงงาน
- **แหล่งกำเนิดแบบเส้น:** สร้างแบบจำลองโครงข่ายถนนมิตรภาพและถนนสายหลักอื่นๆ ในรูปแบบดิจิทัล กำหนดข้อมูลปริมาณการจราจรและสัดส่วนประเภทรถยนต์ (ดีเซล/เบนซิน) ให้กับแต่ละส่วนของถนน⁴³
- **แหล่งกำเนิดแบบพื้นที่:** สร้างกริด (Grid) ครอบคลุมพื้นที่ทั้งจังหวัด ในแต่ละเซลล์ของกริด คำนวณพื้นที่เพาะปลูกอ้อยและชีวมวลอื่นๆ จากนั้นใช้ข้อมูลจุดความร้อนจากดาวเทียมรายวันเพื่อกำหนด "อัตรากิจกรรม" หรือสัดส่วนของพื้นที่ที่ถูกเผาในแต่ละวัน

5.2 ข้อเสนอแนะในการเลือกแบบจำลองและการกำหนดพารามิเตอร์

จากการวิเคราะห์ข้างต้น ขอเสนอแนะให้ใช้ **แนวทางแบบจำลองแบบผสมผสาน (Hybrid Model)** ซึ่งเป็นการรวมแบบจำลองเชิงกำหนด (AERMOD) เข้ากับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (LSTM) เพื่อให้สามารถจำลองแหล่งกำเนิดทั้งสามประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

รายการข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง:

- **ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา:** ข้อมูลรายชั่วโมงของความเร็วลม, ทิศทางลม, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, รังสีดวงอาทิตย์, และปริมาณน้ำฝน จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ (เช่น จากกรมอุตุนิยมวิทยา)
- **ข้อมูลการปล่อยมลพิษ:** บัญชีการระบายมลพิษที่จัดทำเสร็จสมบูรณ์สำหรับแหล่งกำเนิดแบบจุด, เส้น, และพื้นที่ รวมถึงค่า EF ทั้งหมดที่กล่าวถึงในส่วนที่ 3
- **ข้อมูลภูมิประเทศ:** แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model - DEM) ของพื้นที่แอ่งโคราช เพื่อใช้ในแบบจำลองการกระจายตัวชั้นสูง
- **ข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง:** ข้อมูลความเข้มข้นของ PM2.5 รายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษในจังหวัดนครราชสีมา (เช่น ผ่านแอปพลิเคชัน Air4Thai)²⁰

5.3 การจัดการกับความไม่แน่นอนและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

สิ่งสำคัญคือต้องตระหนักว่าแบบจำลองทุกประเภทมีความไม่แน่นอนแฝงอยู่ ซึ่งเกิดจากความผันแปรของค่า EF, ความไม่แน่นอนในการประเมินปริมาณชีวมวลและปริมาณการจราจร, และความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์อากาศ⁵⁴

- **กระบวนการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation):** ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองจะต้องถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ เช่น ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error - MAE)⁵⁷
- **การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis):** ควรมีการวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองเพื่อทำความเข้าใจ

เข้าใจว่าพารามิเตอร์นำเข้าตัวใด (เช่น ค่า EF ของการเผาอ้อย, สัดส่วนรถยนต์ดีเซล) มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองมากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจในการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อลดความไม่แน่นอนของแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลงานที่อ้างอิง

1. เรียน รู้ อยู่ กับ ฝุ่น PM2.5 - จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.chula.ac.th/wp-content/uploads/2019/10/Chula-PM25.pdf>
2. ผลกระทบของความเร็วลม และการสะสม PM2.5 ในพื้นที่ - Journal of ..., เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 https://bee.kku.ac.th/wp-content/uploads/2025/02/BEE-Vol7_No2update5feb2025-15-36.pdf
3. ฝุ่นพิษ PM2.5 ทำไมใครก็ว่าร้าย? - Greenpeace Thailand, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.greenpeace.org/thailand/story/2162/pm25-invisible-villians/>
4. 'มลพิษอากาศ' ภัยปลายจมูก ! คนเมืองยังไม่รู้ตัว | CCDC : Climate Change Data Center, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.cmuccdc.org/newsdetail/2>
5. PM2.5 รหัสอันตราย รถดีเซลเป็นผู้ร้ายจริงหรือ !? - Autoinfo, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.autoinfo.co.th/fvOKR>
6. ปัจจัยกระตุ้นฝุ่น PM 2.5 หนาแน่น แพทย์แนะวิธีดูค่าฝุ่น และดูแลสุขภาพ : PPTVHD36, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.pptvhd36.com/health/care/6387>
7. ฝุ่น PM 2.5 เกิดจากอะไร? เจาะลึกสาเหตุ และผลกระทบต่อสุขภาพ - WEDO AIR Thailand, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://wedo-air.com/th/blog/where-does-pm25-come-from/>
8. เรียน รู้ อยู่ กับ ฝุ่น PM2.5 - จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.chula.ac.th/wp-content/uploads/2019/10/chula-pm25-booklet-1.pdf>
9. pm 2.5 คืออะไร เกิดจากอะไร ทำความเข้าใจและป้องกันฝุ่นไปพร้อมกัน, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://samitivejchinateown.com/th/article/health/what-is-pm-2.5>
10. Air quality in Thailand - Stockholm Environment Institute, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2021/02/210212c-killen-archer-air-quality-in-thailand-wp-2101e-final.pdf>
11. ฝุ่น PM 2.5 โจทย์ใหญ่ที่รัฐต้องแก้ เพราะแค่ 'สร้างจิตสำนึก' อาจไม่เพียงพออีกต่อไป, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 https://www.tei.or.th/th/article_detail.php?bid=146
12. ปัญหาคุณภาพอากาศจาก PM2.5 ในประเทศไทย - HEALTH & ENVITECH, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://healthenvi.com/%E0%B8%9B%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%AB%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%93%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81-pm2-5-%E0%B9%83%E0%B8%99-2/>
13. ภาควิชาอุตสาหกรรมการศึกษาต่อสำคัญสร้างฝุ่น PM2.5 - Policy Watch - Thai PBS, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://policywatch.thaipbs.or.th/article/environment-5>
14. ฝุ่นละออง PM 2.5 กับ พารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา - กรมควบคุมมลพิษ, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2025/08/pcdnew-2025-08-19_07-03-47_684545.pdf
15. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเสถียรภาพอากาศ ที่สถานี - กรมอุตุนิยมวิทยา, เข้าถึงเมื่อ

ตุลาคม 10, 2025

http://www.rnd.tmd.go.th/doc/public/%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99_UPA_PM25.pdf

16. พิสิกส์ของฝุ่นจิ๋ว - สมาคมพิสิกส์ไทย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<http://www.thaiphysoc.org/article/103/>
17. ความสัมพันธ์ของปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยากับความเข้มข้นฝุ่นละออง ... - ThaiJo, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://so06.tci-thaijo.org/index.php/vrurdistjournal/article/download/268882/184411/1141079>
18. ที่ราบสูงโคราช - วิקיพีเดีย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9A%E0%B8%AA%E0%B8%B9%E0%B8%87%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%8A>
19. ภูมิศาสตร์กายภาพและวัฒนธรรม - ศูนย์ศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://cac.kku.ac.th/%E0%B8%A0%E0%B8%B9%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%92/>
20. โคราชฟ้าเปิด ค่าฝุ่น PM 2.5 ลดลง พบต้นเหตุมาจากไฟป่าจากอุทยานฯ มาก ..., เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.thairath.co.th/news/local/northeast/2627065>
21. เผาอ้อย ตัวการสร้างมลพิษ PM2.5 เปิดวิธีเก็บเกี่ยวอ้อยแบบไม่ต้องเผา ..., เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.pptvhd36.com/news/%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%A1/241072>
22. ชาวไร่อ้อยโคราช ทอยยัดอ้อยสดแทนการเผา ชี้ได้วัสดุมาคลุมดินแถมลดฝุ่น PM 2.5 - ไทยรัฐ, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.thairath.co.th/agriculture/agricultural-products/2748323>
23. ไชยปรินา "เกษตรกรไทย" ทำไมต้องเผา? สร้างมลพิษทางอากาศ - มุลนิธิชีวิตไท, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://landactionthai.org/2012-05-18-03-24-45/article/item/2223-2019-02-07-14-29-14.html>
24. การจัด การและลดการเผาในพื้นที่เกษตร ของประเทศไทย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://www.tei.or.th/file/files/Agricultural%20Burning%20Management%20in%20Thailand_TEI-th.pdf
25. อ้อยไฟไหม้ : วิฤติฝุ่น PM 2.5 ใครต้องรับผิดชอบ? | Thailand Clean Air Network, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://thailandcan.net/th/blog/aoy-fai-mai-wikrit-fun-pm-2-5-krai-tong-rap-pid-chop>
26. Estimation of Emission from Open Burning of ... - ThaiScience, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.thaiscience.info/journals/Article/GMSA/10984142.pdf>
27. โครงการ “การติดตามตรวจสอบการเผาในที่โล่งในภาคเหนือของประเทศไทย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 https://elibrary.tsri.or.th/fullP/RDG58A0017/RDG58A0017_full.pdf
28. การศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน จากการเผาต่อช่วงต้นข้าวโพด, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025

- <https://conference.thaince.org/index.php/ncce26/article/download/1055/515/10946>
29. Assessment of Air Pollution Levels during Sugarcane Stubble Burning Event in La Feria, South Texas, USA - ScholarWorks @ UTRGV, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://scholarworks.utrgv.edu/context/eems_fac/article/1265/viewcontent/pdf.pdf
 30. thaienvi.com, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://thaienvi.com/storage/ckeditor/file/file-336-Thai-666850626.pdf>
 31. สรุปร สถานการณ์มลพิษ ของประเทศไทย ปี2561, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-09-28_02-34-33_204096.pdf
 32. ติดต่อเรา KI Sugar Group, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.kisugargroup.com/contact-us.html>
 33. ติดต่อเรา | Khonburi Sugar Public Company Limited (KBS), เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.kbs.co.th/th/contact-us>
 34. ข้อมูลทั่วไปโรงไฟฟ้า บริษัท น้ำตาลราชสีมา จำกัด, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://www2.eppo.go.th/cdf/Province/NorthEast/NakhonRatchasima/Ratchasima/x03RC_info.html
 35. ข้อมูลโรงไฟฟ้า แบ่งตามภูมิภาค > ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://www2.eppo.go.th/cdf/data_regional_northeast.html
 36. รายชื่อผู้ได้รับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้าในจังหวัด, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://nakhonratchasima.energy.go.th/th/https-nakhonratchasima-energy-go-th-energy-information/download?did=8181&filename=%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%B9%E0%B8%A5%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%8A%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%A1%E0%B8%B2.pdf&mid=13199&mkey=m_document&lang=th&url=%2Fweb-upload%2F18x07c414a112ee32e5d918ac21217012b6%2F202203%2Fm_document%2F13199%2F3796%2Ffile_download%2F558e56fb636fd8ce9bb443e3bf366543.pdf
 37. ข้อมูลโรงงาน – กรมโรงงานอุตสาหกรรม | Department of Industrial Works, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.diw.go.th/webdiw/s-data-fac/>
 38. แนวทางการจัดทำรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.onep.go.th/ebook/eia/eia-pub-06581425670614.pdf>
 39. บริษัท อุตสาหกรรมอ่างเวียน จำกัด - ไทยแลนด์ เอลส์เพจเจส, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.yellowpages.co.th/profile/%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%A9%E0%B8%B1%E0%B8%97-%E0%B8%AD%E0%B8%B8%E0%B8%95%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%AB%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%99-%E0%B8%88%E0%B8%B3%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%94-8XN4ZPeWj>
 40. กำลังผลิตโรงไฟฟ้าเอกชน - Electricity Generating Authority of Thailand - EGAT, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.egat.co.th/home/en/statistics-all-3rdparty/>

41. DEPARTMENT OF HIGHWAYS - กรมทางหลวง, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.doh.go.th/content/page/news/355352>
42. ถนนมิตรภาพ - วิกิพีเดีย, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%96%E0%B8%99%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E>
43. ปริมาณการจราจรบนทางหลวง - ชุดข้อมูล - MOT Data Catalog., เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://datagov.mot.go.th/dataset/traf62>
44. ปริมาณการจราจรบนทางหลวง ปี 2566 - Government Data Catalog, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://gdcatalog.go.th/dataset/gdpublish-traf62/resource/fb712678-8f34-41f3-a4f6-ce91a9442f5c?inner_span=True
45. รถ "เบนซิน" กับ "ดีเซล" แบบไหนปล่อยมลพิษมากกว่ากัน? - Sanook.com, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.sanook.com/auto/83392/>
46. จำนวนรถจดทะเบียนใหม่ จำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง ปี พ.ศ. 2565 - GD Directory, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://directory.gdcatalog.go.th/Dataset/Content/01373c15-0872-42df-9a0e-d5d9e741a4fc>
47. จังหวัดที่มีรถจดทะเบียนใหม่สูงสุด - Microsoft Power BI, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiZDBmMDhlMzktYmQxOC00YTk3LTkwOTQtNGNhMjU1NTMzYWE4IiwidCI6ImY2NGQzMtGzLTc2OTEtNGZjYi1hNWVmLTM5ZWJjMDgyYmZmOSIsImMiOiJlEwFQ%3D%3D>
48. Emission Standards: Thailand: On-Road Vehicles and Engines, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://dieselnet.com/standards/th/>
49. Preparation for the TISI Product Licensing Application and The Plant Assessment for Product Quality Control System According to EURO 5 and 6 - สถาบันยานยนต์, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
https://www.thaiauto.or.th/2020/news/news-detail.asp?news_id=4889
50. Industry Min in talks with Toyota over new Euro emission standard - Nation Thailand, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.nationthailand.com/business/automobile/40028274>
51. แบบจำลองระยะทางในการฟุ้งกระจายและความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ที่เกิดจากการเผาชีวมวล A computational model for diffusion and concentration of PM - SCJMSU JOURNAL, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://scjmsu.msu.ac.th/pdfsplit.php?p=MTY1NTI2MTcyMi5wZGZ8MzltNDA=>
52. การประยุกต์ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) จากภาคการจราจรบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย - Chula Digital Collections, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6589/>
53. Application of a PM2.5 dispersion model in the Bangkok central business district for air quality management - Frontiers, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1237366/full>
54. Machine Learning Algorithm for Estimating Surface PM2.5 in Thailand - Aerosol and Air Quality Research, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025
<https://aaqr.org/articles/aaqr-21-05-oa-0105.pdf>
55. Development and Evaluation of Statistical Models Based on Machine Learning

- Techniques for Estimating Particulate Matter (PM2.5 and PM10) Concentrations - PubMed, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35805388/>
56. Statistical PM 2.5 Prediction in an Urban Area Using Vertical Meteorological Factors - MDPI, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/589>
57. ผลกระทบของสภาพอากาศต่อความเข้มข้นฝุ่นละออง, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 https://doi.nrct.go.th/admin/doc/doc_629733.pdf
58. การพยากรณ์คืออะไร - คำอธิบายเกี่ยวกับโมเดลการคาดการณ์ - AWS, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://aws.amazon.com/th/what-is/forecast/>
59. “แบบจำลองการทำนายค่าฝุ่น PM2.5” ของนักเรียน วมว. ควารางวัลเหรียญทองเวทีนานาชาติ สาขาสิ่งแวดลอม - pr kmutt, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://pr.kmutt.ac.th/pr2/award-news/%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%88%E0%B8%B3%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%B3%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%9D%E0%B8%B8/>
60. แบบจำลองการพยากรณ์ค่า PM2.5 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ LSTM ในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร - ThaiJo, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/article/download/246987/168721/892399>
61. SatPM2.5 (Satellite-derived PM2.5) | Atmospheric Composition Analysis Group | Washington University in St. Louis, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://sites.wustl.edu/acag/surface-pm2-5/>
62. Nakhon-ratchasima Air Pollution: Real-time PM2.5 Air Quality Index (AQI), เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://aqicn.org/city/nakhon-ratchasima/th/>
63. การจำลอง Monte Carlo คืออะไร - AWS, เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 10, 2025 <https://aws.amazon.com/th/what-is/monte-carlo-simulation/>