องค์ความรู้

คุณภาพอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์
ดร.ฐิฏาพร สุภาษี

ศูนย์วิชาการเพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ

องค์ความรู้เรื่อง

คุณภาพอากาศกับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

ISBN 978-616-94130-1-1
ชุดความรู้ องค์ความรู้เพื่อขับเคลื่อนการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษอากาศ
พิมพ์ครั้งแรก พฤศจิกายน 2565
จำนวน 100 เล่ม

ชื่อผู้แต่ง

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ดร.ฐิฏาพร สุภาษี สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

คณะบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ

พิสูจน์อักษร ณัฐจิต อ้นเมฆ และ ณิชนันทน์ นันตาวงค์
ปกและรูปเล่ม โยษิตา 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 เอ เซอร์วิส
33 ซ.อินทามระ 4 ถ.สุทธิสารวินิจฉัย แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ : 02-279-5233 โทรสาร : 02-279-5322

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)

คำนำ

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

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

องค์ความรู้ที่อยู่ในมือของท่านนี้เป็นเอกสารที่ผ่านการรวบรวม สังเคราะห์ ประชุมเสวนารับฟังความคิดเห็น เพื่อการสื่อสาร เผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการป้องกันและแก้ไขปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ สู่สังคมและกลุ่มเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อปลูกฝังความเป็นเจ้าของในทรัพยากรอากาศสะอาดร่วมกัน

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

สารบัญ

บทที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 10

บทที่ 2 มลพิษอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 12

บทที่ 3 ฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซนในฐานะสารมลพิษภูมิอากาศ 14

บทที่ 4 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อสภาพอากาศ และมลพิษอากาศ 17

บทที่ 5 บัญชีการปล่อยมลพิษ 21

บทที่ 6 ผลประโยชน์ร่วม: ทฤษฎียิงปืนนัดเดียวได้นกสองตัว 25

บทที่ 7 ตัวอย่างการศึกษาผลประโยชน์ร่วม 29

บทที่ 8 ข้อเสนอแนะสำหรับประเทศไทย 31

เอกสารอ้างอิง 33

สารบัญรูป

รูปที่	1	อิทธิพลของการดูดกลืนรังสีของสารต่าง ๆ ในบรรยากาศ	14
รูปที่	2	ความเชื่อมโยงระหว่างมลพิษอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	20
รูปที่	3	ประเภทของผลประโยชน์ร่วม	24
รูปที่	4	แนวคิดการบริหารจัดการมลพิษอากาศควบคู่กับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	24
รูปที่	5	แนวคิดการศึกษาผลประโยชน์ร่วมในกรณีศึกษาที่ 1	28
รูปที่	6	แนวคิดการศึกษาผลประโยชน์ร่วมในกรณีศึกษาที่ 2	30

สารบัญอักษรย่อ

AIM/CGE	แบบจำลองเศรษฐกิจมหภาค Asia–Pacific Integrated Assessment/ Computable General Equilibrium
BC	คาร์บอนดำหรือเขม่าดำ (Black Carbon)
BVOC	ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งกำเนิดชีวภาพ (Biogenic Volatile Organic Compounds)
NMVOC	ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่รวมก๊าซมีเทน (Non–Methane Organic Compounds)
CCMs	หลักการกลไกตลาดคาร์บอน (Compliance Carbon Markets)
CFCs	ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons)
CH_4	ก๊าซมีเทน (Methane)
CMAQ	แบบจำลองคุณภาพอากาศ Community Multiscale Air Quality Modeling System
CO	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)
CO_2	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)
COP26	การประชุม Conference of the Parties ครั้งที่ 26
GCAM	แบบจำลองการปล่อยมลพิษ Global Change Analysis Model
GEMM	แบบจำลองประเมินผลกระทบทางสุขภาพ Global Exposure Mortality Model
GEOS–Chem	แบบจำลองคุณภาพอากาศ Goddard–Earth–Observing–System Chemical Transport
GHGs	ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases)
GWP	ศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential)
HCFCs	ก๊าซไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons)
HFCs	ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons)

IMED/CGE	แบบจำลองเศรษฐกิจจุลภาค Integrated Model of Energy, Environment, and Economy for Sustainable Development/Computable General Equilibrium
IPCC	คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (International Panel on Climate Change)
IVE	แบบจำลองการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ International Vehicle Emissions
LEAP–IBC	แบบจำลองการใช้พลังงาน Long–Range Energy Alternatives Planning System – Integrated Benefits Calculator
LLCPs	สารมลพิษภูมิอากาศที่มีชีวิตยาว (Long–Lived Climate Pollutants)
N_2O	ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide)
NH_4NO_3	แอมโมเนียมไนเตรต (Ammonium Nitrate)
$(NH_4)_2SO_2$	แอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Sulfate)
NO	ก๊าซไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide)
NO_2	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide)
NOx	ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides)
O_3	ก๊าซโอโซน (Ozone)
OC	คาร์บอนอินทรีย์หรือควันขาว (Organic Carbon)
Pb	สารตะกั่ว (Lead)
PFCs	ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbons)
PM_{10}	ฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน
$PM_{2.5}$	ฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน
RCPs	แนวทางนโยบายด้านภูมิอากาศในระดับนานาชาติ (Representative Concentration Pathways)
SDGs	เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals)

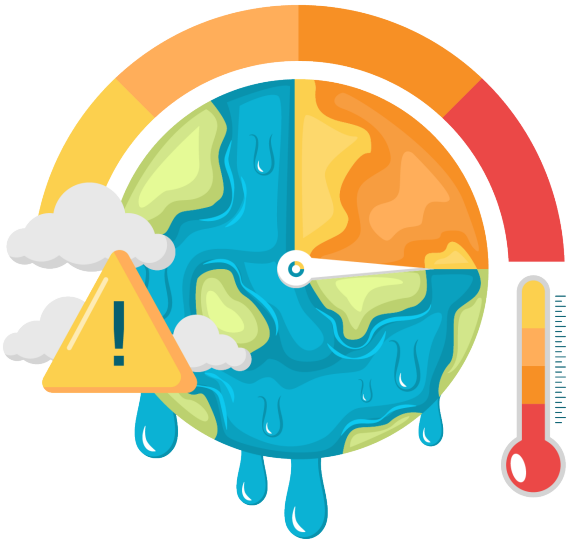
SF_6	ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride)
SLCPs	สารมลพิษภูมิอากาศที่มีชีวิตสั้น (Short–Lived Climate Pollutants)
SO_2	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide)
SSPs	แนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในระดับประเทศ (Shared Socio-economic Pathways)
TM5–FASST	แบบจำลองคุณภาพอากาศ Tracer Model Version 5 – Fast Scenario Screening Tool
TSP	ฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate)
UNFCCC	กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change)
VOC	ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)
VSL	มูลค่าชีวิตเชิงสถิติ (Value of Statistical Life)
WRF	แบบจำลองสภาพอากาศ Weather Research & Forecasting Model
WRF–Chem	แบบจำลองสภาพอากาศ–คุณภาพอากาศ Weather Research & Forecasting Model Coupled with Chemistry

คุณภาพอากาศกับ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

1. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

กิจกรรมของมนุษย์ได้สร้างผลกระทบต่อระบบภูมิอากาศของโลกเนื่องจากปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases หรือ GHGs) ขึ้นสู่บรรยากาศมายาวนานตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรมและทำให้ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่อง ก๊าซเรือนกระจกเป็นก๊าซที่ดูดกลืนรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟาเรดได้ดี แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทสู่อากาศโดยรอบและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Warming) เมื่อก๊าซเหล่านี้สะสมในบรรยากาศมากเกินไป จึงไปรบกวนสมดุลพลังงานของระบบภูมิอากาศและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) เช่น อุณภูมิอากาศและอุณหภูมิพื้นผิวทะเลเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น หรือที่เรียกว่า “ภาวะโลกร้อน (Global Warming)” รวมทั้งระดับน้ำทะเลเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้น ยังเหนี่ยวนำให้สภาพอากาศแปรปรวนมากขึ้นและทำให้มีเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme Event) เกิดขึ้นบ่อยครั้ง เช่น อากาศร้อนจัด อากาศเย็นจัด คลื่นความร้อน ฝนตกหนัก น้ำท่วมใหญ่ และความแห้งแล้ง อีกทั้งเหนี่ยวนำให้เกิดเหตุการณ์สุดขั้วผสม (Compound Extreme Events) มากขึ้น เช่น อากาศร้อนจัดกับความแห้งแล้งเกิดร่วมกัน จากรายงานประเมินสถานการณ์ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศฉบับที่ 6 (The 6th Assessment Report) ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (International Panel on Climate Change หรือ IPCC) (IPCC 2021) และจากการประชุม Conference of the Parties ครั้งที่ 26 (COP26) ภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change หรือ UNFCCC) ที่ถูกจัดขึ้นในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2564 ที่ประเทศสกอตแลนด์ ได้ตระหนักและเน้นถึงภัยอันตรายที่อาจเกิดขึ้นหากอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียส และผลักดันให้เกิดความร่วมมือจากนานาชาติในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างเป็นรูปธรรมโดยตั้งเป้าหมายเบื้องต้นไว้ไม่เกิน 1.5 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยง ชะลอ หรือลดผลกระทบ ความสูญเสีย และความเสียหายที่รุนแรงและเกินความสามารถในการปรับตัวของมนุษย์และธรรมชาติ

ประเทศไทยให้ความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้เป็นตัวแปรหนึ่งที่เข้ามากำหนดและขับเคลื่อนทิศทางการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมในปัจจุบัน (ศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้านโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 2560) การพัฒนาองค์ความรู้ในด้านนี้สำหรับประเทศจึงมีความจำเป็น เพื่อช่วยสนับสนุนและขับเคลื่อนมาตรการหรือนโยบายที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องเหมาะสมกับสถานการณ์ในอนาคตได้ เหล่านี้เป็นที่มาและเหตุผลของการเขียนชุดความรู้นี้ขึ้นมา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายและสร้างความตระหนักถึงความเชื่อมโยงระหว่างมลพิษอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากทั้งสองเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบรรยากาศจึงเชื่อมโยงกัน



2. มลพิษอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

มลพิษอากาศก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพสาธารณะและอาจสร้างความเสียหายต่อพืชผลทางการเกษตรและระบบนิเวศทางธรรมชาติผ่านการรับหรือสัมผัสสารมลพิษในบรรยากาศโดยตรงหรือการตกสะสมจากบรรยากาศสู่พื้นผิว สารมลพิษอากาศที่สำคัญในพื้นที่เมืองใหญ่ ได้แก่ ฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) หรือนิยมเรียกว่า ฝุ่นจิ๋ว และก๊าซโอโซน (Ozone หรือ O_3) สารมลพิษอากาศบางชนิดสามารถดูดกลืนหรือกระเจิงแสงอาทิตย์ ทำให้ทัศนวิสัยลดลง ซึ่งมีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการเดินทาง อีกทั้งทำให้การเห็นทิวทัศน์โดยรอบน้อยลงและส่งผลกระทบต่อการท่องเที่ยวได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพราะระบบภูมิอากาศถูกรบกวน จึงทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนไปหรือแตกต่างไปจากเดิม (รวมถึงกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีในบรรยากาศ) ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำมลพิษอากาศให้เกิดง่ายหรือรุนแรงขึ้นอันเป็นผลพวงได้

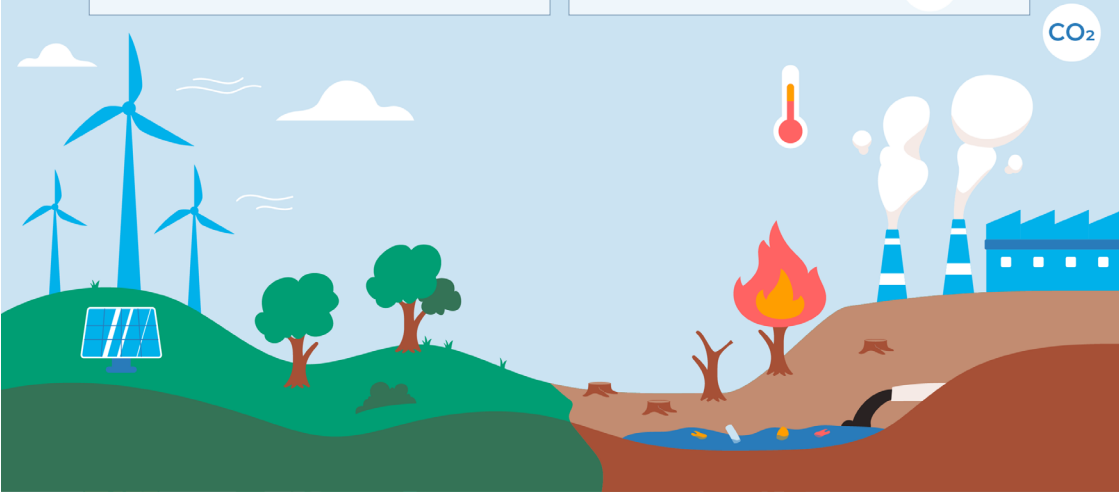
แม้ว่าการสะสมของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แต่ยังมีสารอื่นที่รบกวนสมดุลพลังงานของระบบภูมิอากาศได้ เช่น ฝุ่นที่แขวนลอยในอากาศหรือละอองลอย (Aerosols) ซึ่งภายในอาจมีส่วนประกอบที่ดูดกลืน (Absorb) รังสีที่เดินทางผ่านบรรยากาศแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทสู่อากาศโดยรอบและทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น โดยเรียกรวมกับก๊าซเรือนกระจกว่า “สารมลพิษภูมิอากาศ (Climate Pollutants)” ดังนั้นสารมลพิษภูมิอากาศมีค่าอิทธิพลของการดูดกลืนรังสี (Radiative Forcing) เป็นบวก ขณะที่สารประกอบในฝุ่นที่มีคุณสมบัติสะท้อน (Reflect) หรือกระเจิง (Scatter) รังสีดวงอาทิตย์ หรือฝุ่นที่เข้าไปเกี่ยวข้องกับกระบวนการเม็ดเมฆ (Cloud Droplet) แล้วก่อเมฆขึ้นและช่วยสะท้อนกลับรังสีดวงอาทิตย์ สารประกอบหรือฝุ่นเหล่านี้จึงทำให้อากาศเย็นลง (Cooling) และมีค่าอิทธิพลของการดูดกลืนรังสีเป็นลบ (รูปที่ 1) สารมลพิษภูมิอากาศแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

ก. สารมลพิษภูมิอากาศที่มีชีวิตสั้น (Short–Lived Climate Pollutants หรือ SLCPs) เป็นสารที่มีช่วงชีวิตค่อนข้างสั้นแต่มีศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential หรือ GWP) สูงเมื่อเทียบกับศักยภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide หรือ CO_2) ได้แก่

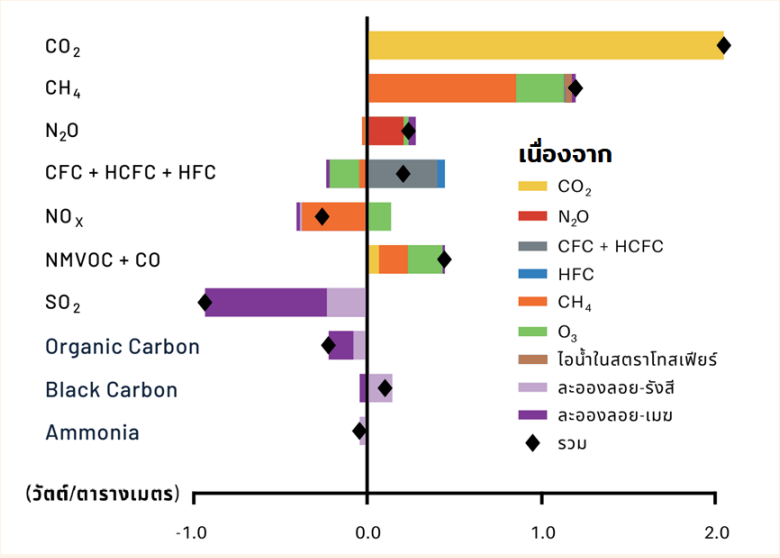
1. คาร์บอนดำหรือเขม่าดำ (Black Carbon หรือ BC)
2. ก๊าซโอโซน
3. ก๊าซมีเทน (Methane หรือ CH_4)
4. ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons หรือ HFCs)
5. ก๊าซไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons หรือ HCFCs) (ยุติ–ใกล้ยุติการผลิตหรือการใช้)

ข. สารมลพิษภูมิอากาศที่มีชีวิตยาว (Long–Lived Climate Pollutants หรือ LLCPs) เป็นสารที่มีช่วงชีวิตยาวและมีศักยภาพที่ทำให้โลกร้อนสูงเมื่อเทียบกับหรือใกล้เคียงศักยภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่

1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2. ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide หรือ N_2O)
3. ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Per fluorocarbons หรือ PFCs)
4. ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons หรือ CFCs) (ยุติ–ใกล้ยุติการผลิตหรือใช้)
5. ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride หรือ SF_6) (ยุติ–ใกล้ยุติการผลิตหรือใช้)



สำหรับสารมลพิษอากาศ แบ่งเป็นสารมลพิษอากาศหลัก (Criteria Air Pollutants) และสารมลพิษอากาศอันตราย (Hazardous Air Pollutants) สารมลพิษอากาศหลักจะพบอยู่ทั่วไป มีที่มาหรือถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมปกติของมนุษย์ และมีการกำหนดค่ามาตรฐานที่ปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัย ในปัจจุบัน ประเทศไทยเฝ้าระวังและติดตามสารมลพิษอากาศหลักจำนวน 8 สาร ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide หรือ CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide หรือ NO_2) ก๊าซโอโซน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide หรือ SO_2) ฝุ่น $PM_{2.5}$ ฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) ฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate หรือ TSP) และสารตะกั่ว (Lead หรือ Pb) ในฝุ่น มีเพียงแค่ก๊าซโอโซนและฝุ่น $PM_{2.5}$ เท่านั้นที่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ก๊าซโอโซนถูกจัดเป็นสารมลพิษภูมิอากาศอยู่แล้ว แต่สำหรับฝุ่น $PM_{2.5}$ จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบภายใน คาร์บอนดำจะดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์และทำให้อากาศอุ่นขึ้น สารประกอบที่สามารถสะท้อนหรือกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์หรือที่ก่อเมฆขึ้นแล้วช่วยสะท้อนกลับรังสีดวงอาทิตย์มากขึ้นจะทำให้อากาศเย็นลง สำหรับฝุ่น PM_{10} และฝุ่น TSP เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ไม่นาน จึงไม่มีนัยสำคัญเท่ากับฝุ่น $PM_{2.5}$



รูปที่ 1 อิทธิพลของการดูดกลืนรังสีของสารต่าง ๆ ในบรรยากาศ
[ดัดแปลงจากตารางที่ TS.15a ใน IPCC (2021)]

3. ฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซนในฐานะสารมลพิษภูมิอากาศ

ฝุ่น $PM_{2.5}$ มีส่วนประกอบที่เป็นทั้งฝุ่นปฐมภูมิ (Primary) และฝุ่นทุติยภูมิ (Secondary) ฝุ่นปฐมภูมิถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดโดยตรง ขณะที่ฝุ่นทุติยภูมิเกิดจากการเปลี่ยนรูปทางเคมีและกายภาพในบรรยากาศของก๊าซสารตั้งต้น ส่วนประกอบของฝุ่น $PM_{2.5}$ แบ่งย่อยได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

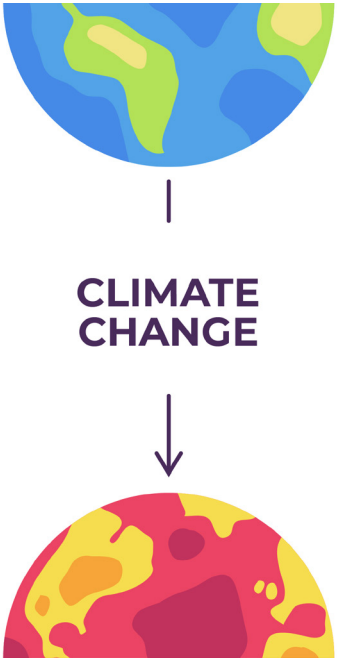
1. **ฝุ่นปฐมภูมิอนินทรีย์ (Primary Inorganic)** เช่น คาร์บอนดำหรือเขม่าดำจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์
2. **ฝุ่นปฐมภูมิอินทรีย์ (Primary Organic)** เช่น คาร์บอนอินทรีย์หรือควันขาวจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์
3. **ฝุ่นทุติยภูมิอนินทรีย์ (Secondary Inorganic)** เช่น ละอองลอยไนเตรตและละอองลอยซัลเฟต โดยมีสารประกอบที่สำคัญคือ แอมโมเนียมไนเตรต (Ammonium Nitrate หรือ NH_4NO_3) และแอมโมเนียซัลเฟต (Ammonium Sulfate หรือ $(NH_4)_2SO_2$) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนรูปของก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia หรือ NH_3) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides หรือ NO_x) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซสารตั้งต้น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เป็นผลรวมของก๊าซไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide หรือ NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์
4. **ฝุ่นทุติยภูมิอินทรีย์ (Secondary Organic)** เป็นคาร์บอนอินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนรูปของก๊าซสารตั้งต้นจำพวกสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) ที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดชีวภาพ (Biogenic) และสารอินทรีย์ที่ปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น สารประกอบอะโรมาติก แอลเคน (Alkane) และแอลคีน (Alkene)

อิทธิพลของฝุ่น $PM_{2.5}$ ต่ออุณหภูมิอากาศขึ้นอยู่กับส่วนประกอบเป็นสำคัญ จากรูปที่ 1 คาร์บอนดำทำให้อากาศอุ่นขึ้น ขณะที่คาร์บอนอินทรีย์ แอมโมเนียมไนเตรต และแอมโมเนียซัลเฟตทำให้อากาศเย็นลง จากที่เห็นในรูป อิทธิพลของการดูดกลืนรังสีของคาร์บอนอินทรีย์มีค่าเป็นลบ และก๊าซสารตั้งต้นของแอมโมเนียมไนเตรตและแอมโมเนียซัลเฟตมีค่าเป็นลบ (ผ่านกระบวนการละอองลอย–รังสีและกระบวนการละอองลอย–เมฆ) ดังนั้น เมื่อลดการปล่อยคาร์บอนดำในเมืองใหญ่หรือในระดับภูมิภาค ก็จะให้ผลประโยชน์ทั้งในบริบทมลพิษอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศพร้อมกัน ซึ่งเรียกว่า “ผลประโยชน์ร่วม (Co–Benefit) สำหรับก๊าซโอโซนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) ซึ่งเป็นชั้นล่างสุดและเป็นที่อาศัยของสิ่งมีชีวิต เป็นสารมลพิษอากาศที่อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโดยเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในบรรยากาศของก๊าซสารตั้งต้นที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds หรือ VOC) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซมีเทน หากลดก๊าซโอโซนก็จะให้ผลประโยชน์ร่วมเพราะก๊าซโอโซนเป็นสารมลพิษภูมิอากาศด้วย สำหรับก๊าซมีเทนซึ่งเป็นสารมลพิษภูมิอากาศและสารตั้งต้นของก๊าซโอโซน หากการลดการปล่อยก๊าซมีเทนมีส่วนช่วยลดก๊าซโอโซนก็จะสร้างผลประโยชน์ร่วม ถึงกระนั้น ก๊าซมีเทนไม่มีความไวของปฏิกิริยาเคมีที่สูงเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ระเหยอื่น บ่อยครั้งอาจไม่ได้รับความสำคัญในการบริหารจัดการมลพิษก๊าซโอโซน ก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) เป็นก๊าซที่มีคุณค่าเพราะช่วยดูดกลืนรังสีอัลตร้าไวโอเลต (Ultraviolet) จึงช่วยปกป้องมนุษย์และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยบนพื้นผิวให้สัมผัสรังสีดังกล่าวอย่างไม่เป็นอันตราย ก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์จึงไม่นับเป็นทั้งสารมลพิษอากาศและสารมลพิษภูมิอากาศ

4. อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อสภาพอากาศและมลพิษอากาศ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนไปหรือแตกต่างจากเดิมได้ ทั้งในมาตราส่วนสรุป (Synoptic Scale) และมาตราส่วนขนาดกลาง (Mesoscale) มาตราส่วนสรุปเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ (หลายร้อยถึงหลายพันกิโลเมตร) และดำเนินด้วยเวลาค่อนข้างนาน (1–2 วัน ถึง 1 สัปดาห์) เช่น ระบบความดันบรรยากาศ การเคลื่อนตัวของมวลอากาศ และพายุหมุนเขตร้อนหรือนอกเขตร้อน มาตราส่วนขนาดกลางเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพที่ครอบคลุมพื้นที่ที่เล็กกว่า (100 ถึงหลายร้อยกิโลเมตร) และดำเนินด้วยเวลาที่สั้นกว่า (1 วันหรือไม่กี่วัน) เช่น พายุฝนฟ้าคะนอง แนวปะทะอากาศ ลมทะเล ลมเฉพาะถิ่น เกาะความร้อนเมือง และคลื่นโน้มถ่วง ภาวะโลกร้อนสะท้อนถึงอากาศที่อุ่นขึ้นเฉลี่ยทั่วโลก แต่ลักษณะหรือความรุนแรงก็แตกต่างกันไปตามพื้นที่หรือภูมิภาคหรือตามเวลาไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศผ่านกระบวนการทางกายภาพต่าง ๆ ได้ และทำให้ตัวแปรสภาพอากาศจำนวนมากเปลี่ยนไป

เมื่อสภาพอากาศเปลี่ยนไป ย่อมส่งผลกระทบต่อมลพิษอากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในที่นี้ จะขอกล่าวโดยสังเขปสำหรับตัวแปรสภาพอากาศดังต่อไปนี้



ก. อุณหภูมิ: อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับก๊าซโอโซนและฝุ่นทุติยภูมิ อีกทั้งอาจเพิ่มอัตราการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิดบางประเภทให้สูงขึ้นได้ เช่น ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากแหล่งกำเนิดชีวภาพ (Biogenic Volatile Organic Compounds หรือ BVOC) (โดยเฉพาะ ต้นไม้หรือป่า) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ผลิตจากกระบวนการชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในดิน การระเหยหรือฟุ้งกระจายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากการกักเก็บหรือการลำเลียงสารเคมี บ่อกำจัดขยะ และบ่อบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์ (โดยเฉพาะที่ใช้แก๊สโซลีน) ในบริเวณเครื่องยนต์และถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซและฝุ่นควันจากไฟหรือการเผาในที่โล่งเนื่องจากอุณหภูมิและฝนเป็นเงื่อนไขพื้นฐานต่อการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงและความรุนแรงของไฟหลังจากจุดติด

ข. ฝน: ฝนช่วยชะล้างมลพิษในบรรยากาศโดยดักจับสารมลพิษระหว่างที่ตกลงสู่พื้นผิว ซึ่งเป็นการตกสะสมแบบเปียก (Wet Deposition) ที่เกิดขึ้นใต้เมฆโดยฝนที่ตก (Washout)

ค. ความชื้น: ความชื้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับเมฆและฝน รวมทั้งกระบวนการทางเคมีสำหรับการเกิดก๊าซโอโซนและฝุ่นทุติยภูมิ ฝุ่นขนาดเล็กอาจรวมไอน้ำในบรรยากาศและทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์มากขึ้น

ง. เมฆ: เมฆบดบังรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกสู่พื้นผิวในเวลากลางวันและสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์กลับไปบางส่วน เมฆยังสามารถดูดกลืนรังสีจากโลกที่แผ่จากพื้นผิวซึ่งเป็นรังสีอินฟาเรดและเปลี่ยนเป็นความร้อนซึ่งถูกถ่ายเทสู่อากาศ เหล่านี้ จะกระทบต่อสมดุลพลังงานที่พื้นผิวและในบรรยากาศ รวมทั้งอุณหภูมิอากาศและเสถียรภาพของบรรยากาศ (Atmospheric Stability) นอกจากนั้น สารมลพิษอาจถูกดักหรือดูดกลืนเข้าไปในเม็ดเมฆ หรืออนุภาคที่เล็กมากอาจทำหน้าที่เป็นแกนควบแน่นของเมฆ (Cloud Condensation Nuclei) ได้ นอกจากนั้น ก๊าซและละอองลอยในอากาศอาจถูกกำจัดหรือเปลี่ยนรูปผ่านกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีในเมฆ ซึ่งคือการตกสะสมแบบเปียกที่เกิดขึ้นภายในเมฆ (Rainout)

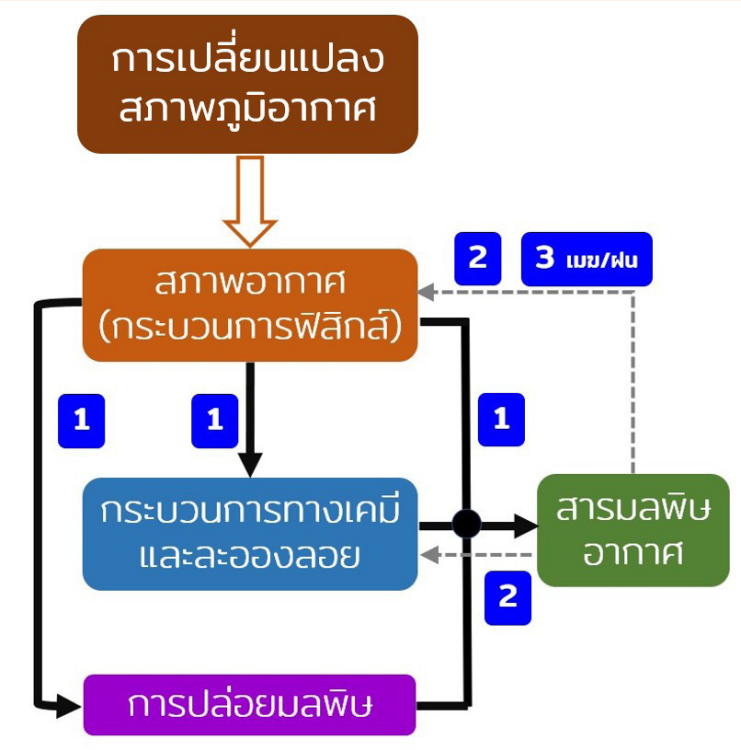
จ. ลม: ลมพัดพาสารมลพิษออกไปจากพื้นที่ เมื่อไม่มีลมหรือลมน้อย สภาพอากาศจะนิ่ง (Stagnation) และทำให้สารมลพิษสะสมขึ้น ทิศทางของลมนั้นมีความสำคัญ หากลมหมุนเวียนในแนวราบก็อาจทำให้สารมลพิษสะสมอยู่ภายในพื้นที่ไม่ถูกระบายออกไปจนเกิดการสะสม หากลมพัดผ่านเหนือพื้นที่ซึ่งมีมลพิษสูงในระดับต่ำหรือใกล้พื้นผิว มวลอากาศสามารถดูดซับหรือรับสารมลพิษและพัดพาจากพื้นที่หนึ่งไปสู่อีกพื้นที่อื่นได้

ฉ. เสถียรภาพของบรรยากาศ: สารมลพิษกระจายตัวและเจือจางได้ช้าหรือน้อยหาก บรรยากาศมีเสถียรภาพ ในบริเวณระดับใกล้พื้นผิว ความเสถียรภาพจะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งรับพลังงานจากความร้อนจากพื้นผิวที่ถ่ายเทให้อากาศ (Sensible Heat) ผ่านสมดุลพลังงานพื้นผิว และจากความเร็วลมหรือลมเฉือน (Wind Shear) แต่ในระดับที่สูงขึ้นไป ความเสถียรภาพขึ้นอยู่กับการแปรผันของอุณภูมิอากาศในแนวดิ่งเป็นส่วนใหญ่ หากมีชั้นอุณหภูมิผกผัน (Inversion Layer) ซึ่งเป็นชั้นอากาศอุ่นที่อยู่เหนือชั้นอากาศด้านล่างที่เย็นกว่า สารมลพิษจะถูกจำกัดที่ด้านล่างไม่สามารถกระจายตัวขึ้นไปได้และเกิดการสะสมขึ้น ระดับความสูงหรือความหนาของชั้นอากาศจากพื้นผิวถึงชั้นอุณภูมิผกผันเรียกว่า “ความสูงผสม (Mixing Height)”

ลักษณะของความเชื่อมโยงหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลพิษอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ (รูปที่ 2) ดังนี้

1. แบบทั่วไป: ตามที่ได้กล่าวมา การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นเหนี่ยวนำให้สภาพอากาศและการปล่อยมลพิษเปลี่ยนไป ซึ่งก็ทำให้การกระจายตัวและความเข้มข้นของสารมลพิษอากาศเปลี่ยนไป

2. แบบผลย้อนกลับ: เมื่อสารมลพิษบางชนิดสะสมในปริมาณที่มาก ก็อาจมีผลย้อนกลับไปยังไปยังสภาพอากาศหรือกระบวนการในบรรยากาศได้ ซึ่งอาจเป็นแบบผลย้อนกลับทางตรง (Direct Effect) เช่น ฝุ่นเมื่อสะสมขึ้นในปริมาณที่มากก็จะบดบังรังสีดวงอาทิตย์และลดอุณหภูมิอากาศใกล้พื้นผิวและเพิ่มความเสถียรภาพแก่ชั้นบรรยากาศในระดับล่างใกล้พื้นผิว ทำให้สารมลพิษกระจายตัวน้อยลง สำหรับแบบผลย้อนกลับทางอ้อม (Indirect Effect) โดยทั่วไป จะหมายถึง ฝุ่นในบรรยากาศเข้าไปมีส่วนร่วมกับกระบวนการเมฆและฝนและทำให้ปริมาณและรูปแบบของเมฆและฝนเปลี่ยนไป



รูปที่ 2 ความเชื่อมโยงระหว่างมลพิษอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
หมายเหตุ: เส้นทึบหมายเลข 1 แสดงแบบทั่วไป เส้นประหมายเลข 2 แสดงแบบผลย้อนกลับทางตรง และเส้นประหมายเลข 3 แสดงแบบผลย้อนกลับทางอ้อม

ผู้อ่านสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อสภาพอากาศและมลพิษอากาศจาก Fiore et al. (2015) Jacob and Winner (2009) และ von Schneidemesser et al. (2015) และดูตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเรื่องดังกล่าวได้จากศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้านโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (2560, บทที่ 4 และ 5) Amnuaylojaroen et al. (2022) Chotamonsak and Lapyai (2020) Manomaiphiboon et al. (2013) Tagaris et al. (2007) และ Tangang et al. (2020)

5. บัญชีการปล่อยมลพิษ

การพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับความเชื่อมโยงระหว่างคุณภาพอากาศกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการกำหนดนโยบายหรือมาตรการที่เกี่ยวข้องต้องอาศัยบัญชีการปล่อยมลพิษ (Emission Inventory) ที่ครอบคลุมข้อมูลปริมาณสารที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดสู่บรรยากาศสำหรับทั้งสารมลพิษอากาศและสารมลพิษภูมิอากาศพร้อมกัน ประเทศไทยอยู่ในภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จึงต้องจัดทำและเสนอรายงานแห่งชาติ (National Communication) ต่อภาคีดังกล่าว โดยมีข้อมูลบัญชีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศแสดงประกอบในรายงาน (บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม 2553) ที่ผ่านมา ประเทศไทยได้มีการจัดทำรายงานแห่งชาติหลายครั้ง ได้แก่

ก. รายงานแห่งชาติครั้งที่ 1 (ปี พ.ศ. 2543) คำนวณการปล่อยมลพิษสำหรับปี พ.ศ. 2537

ข. รายงานแห่งชาติครั้งที่ 2 (ปี พ.ศ. 2554) คำนวณย้อนหลังสำหรับปี พ.ศ. 2537 และการปล่อยมลพิษสำหรับปี พ.ศ. 2543–2547

ค. รายงานแห่งชาติครั้งที่ 3 (ปี พ.ศ. 2561) คำนวณการปล่อยมลพิษสำหรับปี พ.ศ. 2543–2556

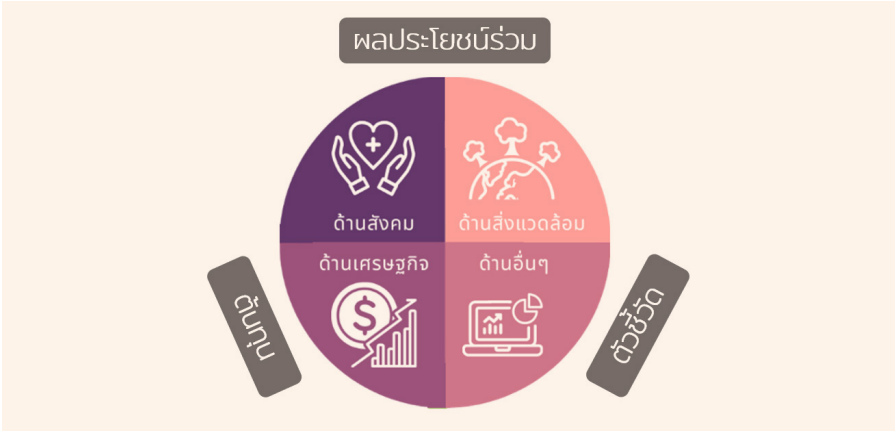
ง. รายงานแห่งชาติครั้งที่ 4 (อยู่ระหว่างการจัดทำ)

บัญชีการปล่อยมลพิษภูมิอากาศฉบับล่าสุดที่เผยแพร่โดยสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (https://climate.onep.go.th/th/topic/database/ghg-inventory) ครอบคลุมปี พ.ศ. 2543–2559 ประกอบด้วย 5 ภาคส่วน ได้แก่ พลังงาน กระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ การเกษตร การใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้ และของเสีย โดยภาคพลังงานและภาคการเกษตรปล่อยปริมาณก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด (ในหน่วยของตันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ทั้งนี้การคำนวณพิจารณาเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์ นอกจากนั้น ยังประมาณการปล่อยก๊าซอื่นอีกจำนวน 4 ก๊าซ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งก๊าซทั้งสี่นี้เป็นสารตั้งต้นของก๊าซโอโซนหรือฝุ่นทุติยภูมิบางส่วน

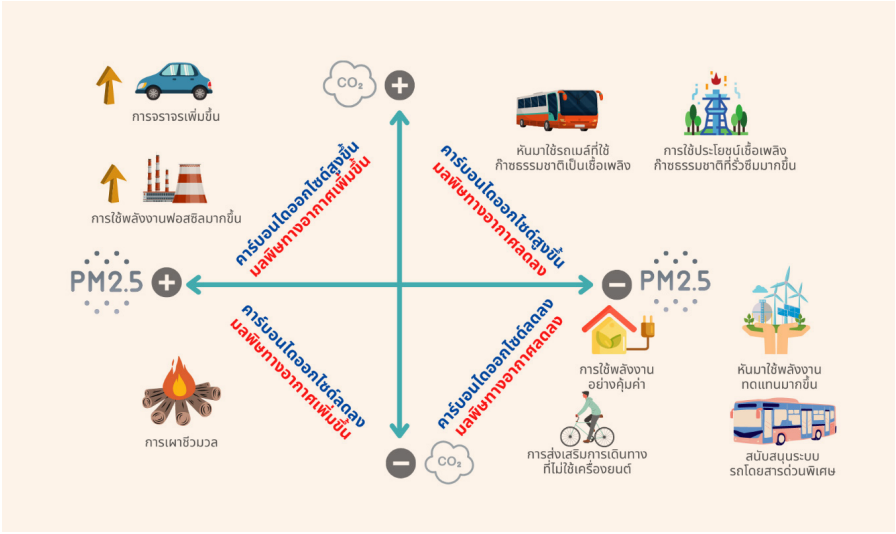
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการรายงานค่าอิทธิพลของการดูดรังสี (รูปที่ 1) หากรวมคาร์บอนดำ คาร์บอนอินทรีย์ และก๊าซแอมโมเนียไว้ด้วย ก็จะทำให้บัญชีการปล่อยมลพิษมีความสมบูรณ์ต่อการใช้ในงานมลพิษอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและใช้ศึกษาผลประโยชน์ร่วมได้ ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดที่เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (สารมลพิษภูมิอากาศ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (เป็นสารมลพิษอากาศ) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (สารมลพิษอากาศและสารตั้งต้นของก๊าซโอโซนและละอองลอยไนเตรต) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หากมีกำมะถันในเชื้อเพลิง (สารมลพิษอากาศและสารตั้งต้นของละอองลอยซัลเฟต) ก๊าซสารอินทรีย์ระเหยง่าย (สารตั้งต้นของก๊าซโอโซนและฝุ่นทุติยภูมิอินทรีย์) คาร์บอนดำ (สารมลพิษภูมิอากาศ) และคาร์บอนอินทรีย์ ดังนั้น หากมีการควบคุมแหล่งกำเนิดนี้ ก็จะทำให้ทราบว่ามีการลดการปล่อยสารมลพิษอากาศและสารมลพิษภูมิอากาศมากน้อยแค่ไหนพร้อมกัน

6. ผลประโยชน์ร่วม: ทฤษฎียิงปืนนัดเดียวได้นกสองตัว

มลพิษอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีความเชื่อมโยงกันและทั้งสองเป็นประเด็นที่อยู่ในเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ (Sustainable Development Goals หรือ SDGs; https://www.undp.org/sustainable-development-goals) ดังนั้น มาตรการหรือนโยบายสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ลดก๊าซเรือนกระจกและสามารถลดมลพิษอากาศร่วมด้วยจึงได้รับความสนใจ (หมายเหตุ: ในที่นี้ ก๊าซเรือนกระจกหมายรวมถึงสารมลพิษภูมิอากาศต่าง ๆ) ผลประโยชน์ร่วมจากการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการลดปัญหามลพิษอากาศอาจนิยามแตกต่างไปตามแต่ละด้าน เช่น สังคม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ (รูปที่ 3) หากเปรียบเทียบต้นทุนจากการใช้มาตรการหรือนโยบายเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกับมูลค่าของผลประโยชน์ร่วมที่ได้รับ ก็จะทราบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลประโยชน์ร่วมด้านสังคม (ในที่นี้ สุขภาพหรือสาธารณสุข) มักเป็นเป้าหมายหลักของการลดมลพิษอากาศเพราะส่งผลกระทบทางสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว สำหรับผลประโยชน์ร่วมด้านอื่น ก็อาจพิจารณาใช้หลักการในทำนองเดียวกันแต่ต่างกันที่ตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินผลประโยชน์ร่วม รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างแนวคิดการบริหารจัดการมลพิษอากาศคู่กับการควบคุมก๊าซเรือนกระจกในเมืองใหญ่ จะเห็นว่า ทางเลือกและรูปแบบการใช้พลังงานมีความสำคัญในการกำหนดทิศทางของผลประโยชน์ร่วม ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือพลังงานทดแทนมากขึ้น ใช้ยานพาหนะที่สะอาดเพื่อการเดินทาง และจัดการการจราจรและขนส่งให้มีประสิทธิภาพ พร้อมกับลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่สะอาด



รูปที่ 3 ประเภทของผลประโยชน์ร่วม



รูปที่ 4 แนวคิดการบริหารจัดการมลพิษอากาศควบคู่กับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [ดัดแปลงจาก https://urbanemissions.info]

7. ตัวอย่างการศึกษาผลประโยชน์ร่วม

ผลประโยชน์ร่วมจากการลดก๊าซเรือนกระจกและการลดมลพิษอากาศเป็นประเด็นที่ยังศึกษาค่อนข้างน้อยสำหรับประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน จึงควรส่งเสริมให้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยให้มากขึ้น ขณะที่ต่างประเทศได้ให้ความสนใจและศึกษาอย่างกว้างขวางมานาน ตัวอย่างเช่น Shrestha et al. (2013) ได้ประเมินการปล่อยมลพิษยานพาหนะบนถนน (ได้แก่ รถโดยสาร สามล้อแท็กซี่ และจักรยานยนต์) สำหรับเมืองกาฐมาณฑุ ประเทศเนปาล โดยอาศัยแบบจำลองการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ International Vehicle Emissions (IVE) และข้อมูลจากการสำรวจ พบว่า ส่วนใหญ่ของยานพาหนะในช่วงเวลาที่ศึกษายังคงใช้มาตรฐานไอเสียสำหรับยานพาหนะและเชื้อเพลิงแบบยูโร–2 (EURO–2) แต่ถ้าหากปรับเปลี่ยนมาตรฐานให้สูงขึ้นเป็นแบบยูโร–3 ทั้งหมด ก็สามารถลดทั้งก๊าซเรือนกระจกและสารมลพิษอากาศได้ ยกเว้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่เปลี่ยนเท่าไหร่และก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยมากขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนดำจะลดลงไปมากประมาณเกือบครึ่งด้วยที่คาร์บอนดำมีศักยภาพที่ทำให้โลกร้อนสูงมาก การลดคาร์บอนดำจะลดค่าศักยภาพที่ทำให้โลกร้อนรวมได้มากถึงร้อยละ 31 อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้จำกัดการพิจารณาเพียงแค่การปล่อยมลพิษและศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน โดยไม่ได้ประเมินผลประโยชน์ร่วมด้านสุขภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เทียบกับต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Vandyck et al. (2020) ศึกษาผลประโยชน์ร่วมด้านสุขภาพจากการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซนสำหรับภูมิภาคและประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก พิจารณาการปล่อยมลพิษจาก 5 ภาคส่วน ได้แก่ ที่อยู่อาศัย ขนส่ง อุตสาหกรรม การใช้พลังงาน และป่าไม้เกษตร–การใช้ที่ดิน–ของเสีย ภายใต้ภาพฉายภาวะโลกร้อนที่ 2 องศาเซลเซียสและ 1.5 องศาเซลเซียส และคำนวณมูลค่าทางการเงินจากการลดอัตราการตายก่อนวัยอันควรจากกลุ่มโรคที่เกี่ยวข้อง แต่ไม่ได้พิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจก แบบจำลองที่ใช้ทำนายฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซน คือ Tracer Model Version 5 – Fast Scenario Screening Tool (TM5–FASST) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกปรับให้ง่ายและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับแบบจำลองคุณภาพอากาศสามมิติขั้นสูง โดยพบว่า ในภาพรวมเฉลี่ยทั่วโลก การลดก๊าซ

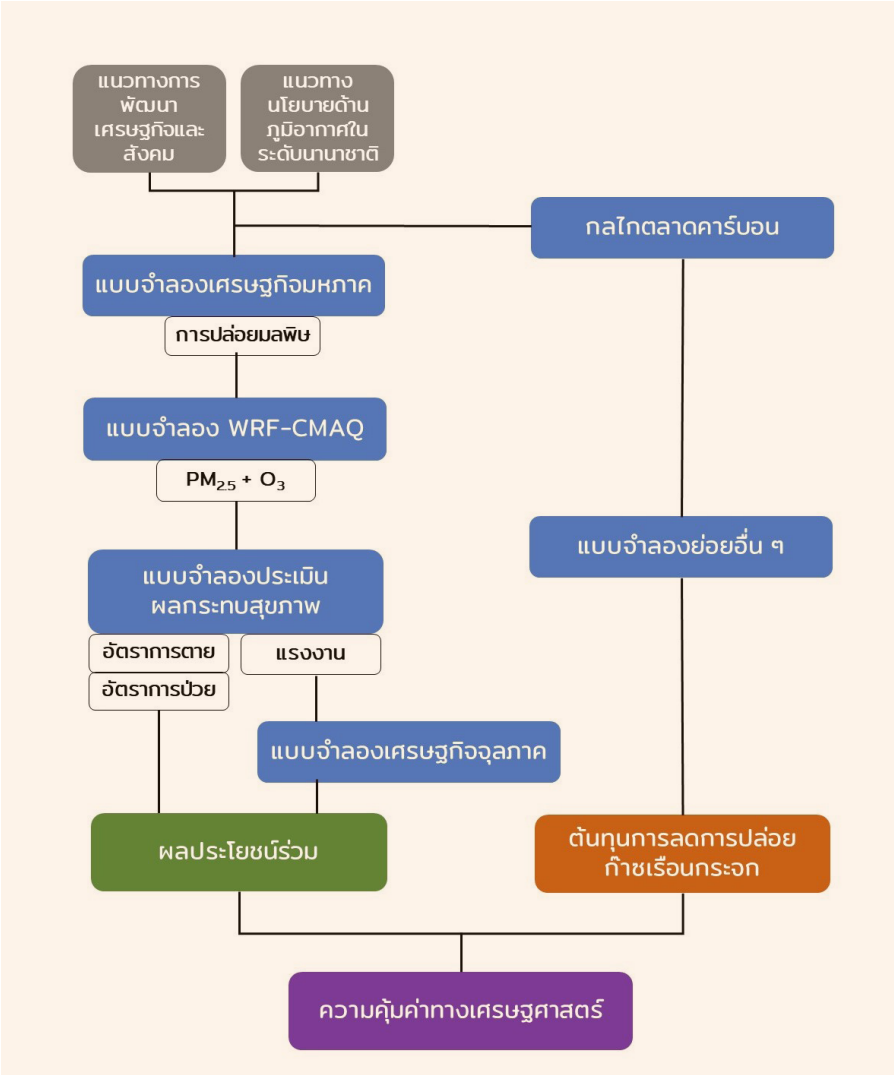
เรือนกระจกเพื่อชะลอหรือจำกัดภาวะโลกร้อนตามที่กำหนดไว้นั้น ควรเน้นไปที่ภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยเฉพาะประเทศใหญ่ในทวีปเอเชีย แต่ประสิทธิผลจากของการลดก๊าซเรือนกระจกพบสูงสุดในภาคที่อยู่อาศัยและภาคขนส่ง (ในหน่วยของมูลค่าของผลประโยชน์ร่วมต่อตันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ลด)

Nakarmi et al. (2020) พิจารณาสารมลพิษภูมิอากาศที่มีช่วงชีวิตสั้น (โดยเฉพาะคาร์บอนดำและก๊าซมีเทน) สำหรับประเทศเนปาล โดยจัดเตรียมบัญชีการปล่อยมลพิษสำหรับกรณีพื้นฐานและภาพฉายสถานการณ์ต่าง ๆ ในอนาคต ครอบคลุมจนถึงปี พ.ศ. 2593 โดยประมาณการปล่อยภายใต้กรอบสมมติฐานของแบบจำลองการใช้พลังงาน Long–Range Energy Alternatives Planning System–Integrated Benefits Calculator (LEAP–IBC) ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซนถูกทำนายโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ความไวซึ่งเป็นผลจากแบบจำลองคุณภาพอากาศ Goddard–Earth–Observing–System Chemical Transport Model (GEOS–Chem) ซึ่งรันโดยการศึกษาอื่นมาใช้ประกอบเพื่อประเมินผลกระทบจากการลดอัตราการตายก่อนวัยอันควรและความเสียหายทางการเกษตร พบว่า การดำเนินการภายใต้สถานการณ์ในอนาคตในประเทศเนปาลมีส่วนช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของโลกแต่เป็นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่สามารถลดผลกระทบทางสุขภาพและความเสียหายทางการเกษตรในประเทศได้มาก คิดเป็นมูลค่ารวมสูงกว่าต้นทุนการลดการปล่อยมลพิษถึง 2.7 เท่า ซึ่งสะท้อนความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ดี

นอกเหนือจากการศึกษาข้างต้น ผู้เขียนจะขอบรรยายเพิ่มเติมข้างล่างนี้โดยเลือกการศึกษาของ Kim et al. (2020) และ Tang et al. (2022) เป็นกรณีศึกษา ทั้งสองการศึกษาได้ประเมินผลประโยชน์ร่วมในระดับประเทศ มีรายละเอียดทางเทคนิคที่น่าสนใจ มีการบูรณาการใช้เครื่องมือวิจัยที่หลากหลาย และอาจเป็นประโยชน์ต่อการอ้างอิงหรือเป็นตัวอย่างในการประยุกต์ใช้สำหรับประเทศไทยต่อไปได้

กรณีศึกษาที่ 1

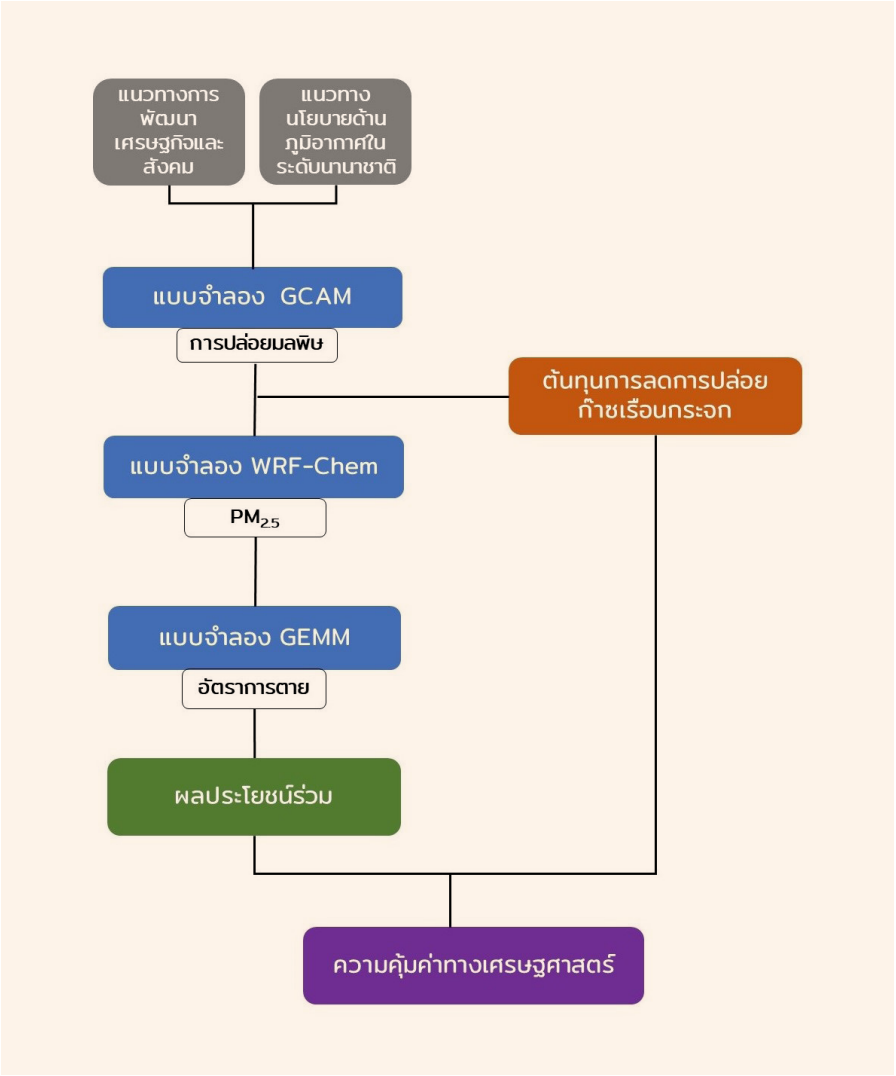
Kim et al. (2020) ประเมินผลประโยชน์ร่วมสำหรับสาธารณรัฐเกาหลีหรือประเทศเกาหลีใต้ (รูปที่ 5) การศึกษาเริ่มด้วยการกำหนดแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในระดับประเทศ (Shared Socioeconomic Pathways หรือ SSPs) ร่วมกับแนวทางนโยบายด้านภูมิอากาศในระดับนานาชาติ (Representative Concentration Pathways หรือ RCPs) โดยเน้นเลือกแบบทางสายกลางเป็นกรอบของการประเมิน ต่อมา ประมาณการปล่อยมลพิษทั้งในส่วนที่เป็นก๊าซเรือนกระจกและสารมลพิษอากาศจากภาคส่วนต่าง ๆ ครอบคลุมทุกปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 จนถึงปี พ.ศ. 2593 ด้วยแบบจำลองเศรษฐกิจมหภาค Asia–Pacific Integrated Assessment/Computable General Equilibrium (AIM/CGE) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำเข้าระบบจำลองคุณภาพอากาศซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองสภาพอากาศ Weather Research & Forecasting (WRF) และแบบจำลองคุณภาพอากาศ Community Multiscale Air Quality Modeling System (CMAQ) เพื่อทำนายฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซน ค่าสารมลพิษที่ทำนายถูกนำเข้าแบบจำลองประเมินผลกระทบทางสุขภาพ การคำนวณต้นทุนทางสุขภาพใช้มูลค่าชีวิตเชิงสถิติ (Value of Statistical Life หรือ VSL) สำหรับกรณีที่ตายก่อนวัยอันควรและประมาณค่าใช้จ่ายในการรักษาสำหรับกรณีเจ็บป่วย นอกจากนั้น พิจารณาผลกระทบต่อกำลังแรงงานและต่อเศรษฐกิจในประเทศอีกด้วยโดยใช้แบบจำลองเศรษฐกิจจุลภาค Integrated Model of Energy, Environment, and Economy for Sustainable Development/Computable General Equilibrium (IMED/CGE) ต้นทุนการลดการปล่อยมลพิษถูกประเมินโดยใช้หลักการกลไกตลาดคาร์บอน (Compliance Carbon Markets หรือ CCMs) ร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองย่อยอื่น ๆ ในท้ายสุด คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งพบว่า ผลประโยชน์ร่วมซึ่งรวมจากผลกระทบทางสุขภาพและผลกระทบทางแรงงานที่ลดลงมีค่า 2.8 เท่าของต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจก ชี้ถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ดี



รูปที่ 5 แนวคิดการศึกษาผลประโยชน์ร่วมในกรณีศึกษาที่ 1
ดัดแปลงจาก Kim et al. (2020)

กรณีศึกษาที่ 2

Tang et al. (2022) ประเมินผลประโยชน์ร่วมสำหรับสาธารณรัฐประชาชนจีนหรือประเทศจีน (รูปที่ 6) การศึกษาเริ่มด้วยการพิจารณาแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในระดับประเทศร่วมกับนโยบายด้านภูมิอากาศในระดับนานาชาติ (เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 1 โดย Kim et al. (2022) แล้วกำหนดเป็นสถานการณ์ต่าง ๆ จุดเด่นของการศึกษานี้คือ เป็นการประเมินภายใต้สภาพการณ์ที่โลกเผชิญกับการระบาดโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา–2019 (COVID–19) ซึ่งประเทศจีนมีการปิดประเทศ เศรษฐกิจชะลอตัวหรือเติบโตช้าลง และการบริโภคพลังงานน้อยลง แต่ยังคงการใช้มาตรการการลดการปล่อยมลพิษอยู่ จึงทำให้คาดการณ์กันว่า การปล่อยก๊าซการเรือนกระจกในประเทศจะขึ้นสูงสุดก่อนปี พ.ศ. 2573 (ซึ่งเป็นปีที่คาดการณ์ไว้แต่เดิม) ซึ่งหมายถึงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี พ.ศ. 2573 และปี พ.ศ. 2593 จะมีแนวโน้มปรับตัวลงและอาจช่วยเพิ่มผลประโยชน์ร่วมให้สูงขึ้นได้ แบบจำลองการปล่อยมลพิษ Global Change Analysis Model (GCAM) ถูกใช้เพื่อประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสารมลพิษอากาศ รวมทั้งคำนวณต้นทุนการลดก๊าซเรือนกระจกสำหรับแต่ละสถานการณ์ ข้อมูลการปล่อยมลพิษถูกนำเข้าแบบจำลองสภาพอากาศ–คุณภาพอากาศ Weather Research & Forecasting Model Coupled with Chemistry (WRF–Chem) เพื่อทำนายฝุ่น $PM_{2.5}$ อย่างไรก็ตาม ก๊าซโอโซนไม่ถูกพิจารณาในการศึกษานี้ด้วยเหตุผลที่ว่าฝุ่น $PM_{2.5}$ เป็นสารมลพิษอากาศที่ส่งผลกระทบทางสุขภาพมากที่สุดสำหรับประเทศจีน ผลจากแบบจำลอง WRF–Chem ถูกนำเข้าแบบจำลองประเมินผลกระทบทางสุขภาพ Global Exposure Mortality Model (GEMM) (ในที่นี้ อัตราการตายก่อนวัยอันควร) แล้วคำนวณเป็นต้นทุนโดยใช้มูลค่าชีวิตเชิงสถิติ พบว่า การที่ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจะขึ้นสูงสุดเร็วกว่าเดิมจากที่คาดการณ์ไว้จะเป็นคุณและช่วยเพิ่มมูลค่าของผลประโยชน์ร่วมจากต้นทุนผลกระทบทางสุขภาพที่ลดลง และยังชี้ถึงโอกาสหรือความเป็นไปได้ในอนาคตที่จะมีมูลค่าของผลประโยชน์ร่วมเท่ากับหรือสูงกว่าต้นทุนของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้สำหรับกรณีประเทศจีน



รูปที่ 6 แนวคิดการศึกษาผลประโยชน์ร่วมในกรณีศึกษาที่ 2
[ดัดแปลงจาก Tang et al. (2022)]

8. ข้อเสนอแนะสำหรับประเทศไทย

อากาศสะอาดและการแก้ไขรับมือกับภาวะโลกร้อนเป็นสิ่งสำคัญต่อการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งอิทธิพลต่อสภาพอากาศและมลพิษอากาศ มลพิษอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจึงเชื่อมโยงกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นอาจช่วยลดมลพิษอากาศได้ด้วยเพราะมีแหล่งกำเนิดร่วมกัน ซึ่งทำให้เกิดผลประโยชน์ร่วมขึ้นมา ผู้เขียนได้เสนอความเห็นและมุมมองเพื่อเป็นข้อเสนอแนะสำหรับประเด็นดังกล่าวไว้ข้างล่างนี้ ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการและผู้สนใจได้

ก. จากการประชุม COP26 ที่ผ่านมาซึ่งพยายามผลักดันและขอความร่วมมือจากนานาชาติในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างจริงจัง และจากที่ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2608 ภาครัฐจึงได้เสนอมาตรการหรือนโยบายจำนวนมากเพื่อให้ประเทศเดินทางไปสู่เป้าหมายดังกล่าว ซึ่งเป็นโจทย์ที่ไม่ง่ายและมีความท้าทาย จำเป็นที่ทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องในประเทศต้องช่วยกัน อย่างไรก็ตาม พบว่า หลายมาตรการสามารถลดมลพิษอากาศควบคู่ไปกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมีศักยภาพในการสร้างผลประโยชน์ร่วมขึ้นได้ ได้แก่ การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนหรือเชื้อเพลิงสะอาด (เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และลดการใช้ถ่านหินหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล) การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การใช้ระบบขนส่งสาธารณะ การส่งเสริมรถยนต์พลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงานทดแทนในยานพาหนะบนถนน (เช่น เอทานอลและไบโอดีเซล) การจัดการก๊าซมีเทนในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรมและการจัดการของเสีย การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานให้มีประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงาน และการลดการเผาในที่โล่ง

ข. การจัดทำบัญชีการปล่อยมลพิษซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในรายงานแห่งชาติที่เสนอต่อภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศควรครอบคลุมก๊าซเรือนกระจก (หมายรวมถึงสารมลพิษภูมิอากาศ) และสารมลพิษอากาศให้มากขึ้น เช่น พิจารณาเพิ่มคาร์บอนดำเนื่องจากเป็นสารที่มีศักยภาพที่ทำให้โลกร้อนสูงมาก นอกจากนั้น หากแผนการ

ลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ (ตัวอย่างเช่น สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2562) รวมคาร์บอนดำไว้ด้วยก็จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศเพราะจะช่วยเสริมให้ถึงเป้าหมายของการลดได้มากขึ้น

ค. ยกระดับความสำคัญของสารมลพิษภูมิอากาศที่มีชีวิตสั้น โดยเฉพาะคาร์บอนดำและก๊าซโอโซนซึ่งเป็นสารมลพิษอากาศที่สำคัญ เนื่องจากคาร์บอนดำเป็นส่วนประกอบในฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซโอโซนเป็นสารมลพิษทุติยภูมิ จึงเกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ร่วมด้านสุขภาพได้โดยตรง

ง. ส่งเสริมการศึกษาในประเด็นข้างล่างนี้เพื่อสร้างหรือลดช่องว่างในองค์ความรู้หรือเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดมาตรการหรือนโยบายที่เกี่ยวข้อง

- อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อคุณภาพอากาศในระดับประเทศและพื้นที่เมืองใหญ่ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง
- การพัฒนาบัญชีการปล่อยมลพิษของประเทศแนวทางต่าง ๆ ตามแผนการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ รวมทั้งเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์
- ขยายมุมมองไปยังผลประโยชน์ร่วมด้านสุขภาพ ผลผลิตการเกษตร และระบบนิเวศ สำหรับฝุ่น $PM_{2.5}$ ก๊าซโอโซน และการตกสะสมกรด
- ศึกษาการประยุกต์เครื่องมือหรือแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ร่วมให้สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยหรือภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น การประเมินผลกระทบทางสุขภาพ การประเมินความเสียหายทางการเกษตรและระบบนิเวศ และเศรษฐศาสตร์กับกลไกตลาดคาร์บอน

เอกสารอ้างอิง

บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม. 2553. การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย. รายงานฉบับสมบูรณ์, เสนอต่อ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้านโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. 2560. รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2559. อำนาจ ชิดไธสง และคณะ (บรรณาธิการ), สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายสวัสดิภาพสาธารณะ. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2562. แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573.

Amnuaylojaroen, T., Surapipith, V., Macatangay, R. 2022. Projection of the near–future $PM_{2.5}$ in Northern Peninsular Southeast Asia under RCP8.5. Atmosphere, 13: 305.

Chotamonsak, C., Lapyai, D. 2020. Climate change impacts on air quality–related meteorological conditions in upper northern Thailand. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 42: 957–964.

Fiore, A. M., Naik, V. Leibensperger, E. M. 2015. Air quality and climate connections. Journal of the Air & Waste Management Association, 65: 645–685.

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson–Delmotte et al. (editors), Cambridge University Press.

Jacob, D. J., Winner, D. A. 2009. Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment, 43: 51–63.

Kim, S. E., Xie, Y., Dai, H., Fujimori, S., Hijioka, Y., et al. 2020. Air quality co–benefits from climate mitigation for human health in South Korea. Environment International, 136: 105507.

Manomaiphiboon, K., Octaviani, M., Torsri, K., Towprayoon, S. 2013. Projected changes in means and extremes of temperature and precipitation over Thailand under three future emissions scenarios by regional climate modeling. Climate Research, 58: 97–115.

Nakarmi, A. M., Sharma, B., Rajbhandari, U. S., Prajapati, A., Malley, C. S., et al. 2020. Mitigating the impacts of air pollutants in Nepal and climate co–benefits: a scenario–based approach. Air Quality, Atmosphere & Health, 13: 361–370.

Shrestha, S. R., Oanh, N. T. K., Xu, Q., Rupakheti, M., Lawrence, M. G. 2013. Analysis of the vehicle fleet in the Kathmandu Valley for estimation of environment and climate co–benefits of technology intrusions. Atmospheric Environment, 81, 579–590.

Tagaris, E., Manomaiphiboon, K., Liao, K.–J., Leung, L.–Y., Woo, J.–H., et al. 2007. Impacts of global climate change and emissions on regional ozone and fine particulate matter concentrations over the United States. Journal of Geophysical Research, 112: D14312.

Tang, R., Zhao, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, Y., et al. 2022. Air quality and health co–benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030. Nature Communications, 13: 1008.

Tangang, F., Chung, J. X., Juneng, L., Supari, Salimun, E., et al. 2020. Projected future changes in rainfall in Southeast Asia based on CORDEX–SEA multi–model simulations. Climate Dynamics, 55, 1247–1267.

Vandyck, T., Keramidas, K., Tchung–Ming, S., Weitzel, M., Dingenen, R. V. 2020. Quantifying air quality co–benefits of climate policy across sectors and regions. Climatic Change, 163: 1501–1517.

von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., et al. 2015. Chemistry and the linkages between air quality and climate change. Chemical Reviews, 115: 3856–3897.

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

CLIMATE
CHANGE