

มลพิษ ทางอากาศ อุตสาหกรรม และการควบคุม Industrial Air Pollution and Control

กฎหมาย / การตรวจวัด / แบบจำลองคุณภาพอากาศ /
การป้องกันและการควบคุมในอุตสาหกรรม

รัฐพล อันแดง

พิมพ์ครั้งที่ 2

มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม

และการควบคุม

Industrial Air pollution and Control

กฎหมาย | การตรวจวัด | แบบจำลองคุณภาพอากาศ |
การป้องกันและควบคุมในอุตสาหกรรม

พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2568

รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อ้นแจ้ง

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมและการควบคุม Industrial Air pollution and Control

รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อ้นแฉ่ง

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2561

พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2568

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์

ข้อมูลทางบรรณานุกรม

รัฐพล อ้นแฉ่ง.

มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมและการควบคุม (พิมพ์ครั้งที่ 2) / รัฐพล อ้นแฉ่ง
กรุงเทพฯ: วังอักษร, 2568.

272 หน้า : ภาพประกอบ, ตาราง.

ISBN 978-974-641-685-6

1. มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมและการควบคุม. I. ชื่อเรื่อง.

363.7392

พิมพ์ที่ สำนักพิมพ์วังอักษร

69/3 อรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ เขตบางกอกใหญ่

กรุงเทพฯ 10600

คำนำ

ตำราเล่มนี้ได้เรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้ประกอบการสอนในวิชามลพิษทางอากาศและการควบคุม โดยคัดสรรเนื้อหาที่สำคัญต่อการจัดการมลพิษทางอากาศในภาคอุตสาหกรรม และอิงกับเนื้อหาที่คณะกรรมการสภาวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้กำหนดเพื่อขอรับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีควบคุมฯ ด้านมลพิษทางอากาศ ในการพิมพ์ครั้งที่ 2 นี้ ได้มีการปรับปรุงเนื้อหาและเปลี่ยนชื่อจากมลพิษทางอากาศและการควบคุม (ในการพิมพ์ครั้งที่ 1) เป็น “มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมและการควบคุม”

ในบทที่ 1 และ บทที่ 2 ได้กล่าวถึงปัญหาและแนะนำความรู้พื้นฐานด้านมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม บทที่ 3 ได้เรียบเรียงวิวัฒนาการของกฎหมายและมาตรฐานของต่างประเทศและลงในรายละเอียดในส่วนของประเทศไทย บทที่ 4 มีรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการตรวจวัดสารมลพิษที่ระบายนจากปล่องและจากการรั่วไหลหรือฟุ้งกระจาย รวมถึงการตรวจวัดสารมลพิษในบรรยากาศ ตามวิธีการของสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ที่ประเทศไทยนำมาใช้เป็นวิธีการมาตรฐาน บทที่ 5 ได้อธิบายถึงแบบจำลองคุณภาพอากาศ โดยได้นำเสนอความรู้พื้นฐานด้านบรรยากาศ ทฤษฎีและแนวทางการใช้แบบจำลองฯ

บทที่ 6 ได้นำเสนอระบบระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม บทที่ 7 บทที่ 8 และ บทที่ 9 มีเนื้อหาเกี่ยวกับการควบคุมมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม โดยได้อธิบายการเลือกอุปกรณ์ควบคุมมลพิษที่เหมาะสม หลักการทำงานและแนวทางการออกแบบและการดูแลรักษาอุปกรณ์ บทที่ 10 เป็นการแนะนำแนวทางการป้องกันมลพิษโดยใช้หลักการการผลิตที่สะอาดและกลไกการพัฒนาที่สะอาด พร้อมยกตัวอย่างการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ ผู้เรียบเรียงได้นำงานวิจัยและข้อมูลที่เกี่ยวข้องสอดแทรกเป็นเกร็ดความรู้เพิ่มเติมไว้ในแต่ละบทด้วย

อย่างไรก็ตามตำราเล่มนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งขององค์ความรู้ด้านมลพิษทางอากาศเท่านั้น ทั้งนี้ผู้อ่านสามารถนำความรู้ที่ได้รับจากตำรานี้ไปต่อยอดค้นคว้าในเชิงลึกต่อไปได้

ขอขอบคุณเจ้าของผลงานทางวิชาการทุกท่าน ที่ผู้เขียนได้นำมาใช้เรียบเรียงในตำราเล่มนี้ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนงบประมาณและผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาตำราเล่มนี้ ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ บิดา มารดา และเหนือสิ่งอื่นใด คุณอภิมน อันฉ่าง (ภรรยา) ที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. รัฐพล อันฉ่าง

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม: ความรู้เบื้องต้น	4
2.1 ระบบมลพิษทางอากาศ	4
2.2 แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม	5
2.3 แหล่งกำเนิดมลพิษและการเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศ	7
2.4 ผลของสารมลพิษต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ	9
2.5 ผลกระทบของมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม	11
2.6 หลักการจัดการมลพิษทางอากาศ	14
สรุป	17
บทที่ 3 กฎหมายและมาตรฐานมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม	20
3.1 กฎหมายมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมของประเทศไทย	21
3.1.1 พระราชบัญญัติโรงงาน	22
3.1.2 พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ	23
3.1.3 พระราชบัญญัติการสาธารณสุข	24
3.1.4 กฎหมายที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ	25
3.2 มาตรฐานมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม	25
3.2.1 มาตรฐานการระบายสารมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม	26
3.2.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ	29
3.2.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศในสถานประกอบการ	44
สรุป	45
บทที่ 4 การตรวจวัดมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม	48
4.1 การตรวจติดตามมลพิษทางอากาศ	49
4.1.1 การเก็บตัวอย่างอากาศ	49
4.1.2 การตรวจวัดมลพิษทางอากาศแบบอัตโนมัติ	50
4.2 การตรวจวัดสารมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรม	52
4.2.1 การกำหนดจุดเก็บตัวอย่างอากาศจากปล่อง	53
4.2.2 การกำหนดจำนวนและตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างอากาศในปล่อง	55
4.2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างอากาศในปล่อง	57
4.2.4 การคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่อง	65
4.3 การตรวจวัดมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่แบบต่อเนื่อง	68
4.3.1 ระบบดึงก๊าซไปวิเคราะห์	68

4.3.2 ระบบวิเคราะห์ที่จุดเก็บตัวอย่าง	69
4.3.3 การกำหนดตำแหน่งตรวจวัด	71
4.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของ CEMS	72
4.3.5 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง CEMS ทั้ง 2 ระบบ	72
4.3.6 การประยุกต์ใช้ CEMS	73
4.4 การตรวจวัดสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดชนิดฟุ้งกระจาย	75
4.4.1 หลักการทำงานของ Flame ionization detector	76
4.4.2 หลักการทำงานของ Photoionization detector	77
4.4.3 วิธีการประเมินการรั่วไหลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	78
4.5 การตรวจติดตามมลพิษทางอากาศในบรรยากาศ	80
4.5.1 การกำหนดจุดตรวจวัดมลพิษทางอากาศ	81
4.5.2 การกำหนดชนิดของสารมลพิษที่จะตรวจวัด	86
4.5.3 การตรวจติดตามฝุ่นละอองในบรรยากาศ	86
4.5.4 การตรวจติดตามสารมลพิษชนิดก๊าซในบรรยากาศ	97
4.5.5 สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบอัตโนมัติ	106
4.6 การตรวจวัดมลพิษทางอากาศในสถานที่ทำงาน	109
สรุป	111

บทที่ 5 แบบจำลองคุณภาพอากาศ 117

5.1 ความสำคัญของแบบจำลองคุณภาพอากาศ	117
5.2 กระบวนการของบรรยากาศ	118
5.2.1 กลไกการแพร่กระจายสารมลพิษในบรรยากาศ	118
5.2.2 ผลของความคงตัวของบรรยากาศต่อการแพร่กระจายสารมลพิษ	119
5.3 โครงสร้างของแบบจำลองคุณภาพอากาศ	124
5.4 ความละเอียดเชิงเวลาและแหล่งข้อมูลอุตุนิยมวิทยา	125
5.5 แบบจำลองพื้นฐานเกาส์เซียน	126
5.6 ข้อจำกัดของแบบจำลองพื้นฐานเกาส์เซียน	137
5.7 การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์	138
5.8 แบบจำลองคุณภาพอากาศสำหรับโครงการอุตสาหกรรม	139
5.8.1 การพัฒนาแบบจำลองคุณภาพอากาศ AERMOD	139
5.8.2 โครงสร้างของแบบจำลองคุณภาพอากาศ AERMOD	141
5.9 ข้อมูลอัตราการระบายสารมลพิษ	143
5.9.1 การหาอัตราการระบายสารมลพิษด้วยข้อมูลจากการตรวจวัด	143
5.9.2 การคำนวณด้วยตัวคูณการปล่อยสารมลพิษ	144
5.9.3 การทำสมดุลมวลสาร	145
5.10 ข้อควรพิจารณาในการใช้แบบจำลองคุณภาพอากาศ	146

5.10.1 ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง	146
5.10.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้แบบจำลองคุณภาพอากาศ	147
สรุป	149
บทที่ 6 การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม	152
6.1 ประเภทของระบบระบายอากาศ	152
6.1.1 ระบบระบายอากาศแบบเจือจาง	153
6.1.2 ระบบระบายอากาศแบบเฉพาะที่	155
6.2 แนวทางการนำระบบระบายอากาศมาใช้งาน	156
6.2.1 ระบบระบายอากาศแบบเจือจาง	156
6.2.2 ระบบระบายอากาศแบบเฉพาะที่	159
6.3 หลักการออกแบบระบบระบายอากาศแบบเจือจาง	159
6.4 หลักการออกแบบระบบระบายอากาศแบบเฉพาะที่	164
6.4.1 ประเภทของฮูด	164
6.4.2 การหาอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ	168
สรุป	172
บทที่ 7 การควบคุมมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม: หลักการเบื้องต้น	174
7.1 การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต	174
7.2 การสับเปลี่ยนเชื้อเพลิง	175
7.3 การติดตั้งระบบควบคุมมลพิษ	176
7.4 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมมลพิษ	178
สรุป	180
บทที่ 8 อุปกรณ์ดักจับฝุ่นละออง	182
8.1 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักจับฝุ่น	184
8.2 กลไกการดักจับอนุภาคฝุ่น	187
8.3 ชนิดของอุปกรณ์และวิธีการดักจับฝุ่น	188
8.3.1 เครื่องคัดแยกโดยการตกจากน้ำหนักฝุ่น	189
8.3.2 ไซโคลน	191
8.3.3 การดักจับด้วยหยดน้ำ	195
8.3.4 ถุงกรอง	201
8.3.5 เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต	206
8.4 ข้อเสนอแนะในการเลือกอุปกรณ์ดักจับฝุ่น	210
สรุป	212

บทที่ 9 อุปกรณ์ควบคุมก๊าซและไอ	215
9.1 การเผาทำลาย	216
9.2 การดูดซับ	222
9.3 การดูดซึม	228
9.4 การควบแน่น	239
9.5 ข้อเสนอแนะในการเลือกอุปกรณ์ควบคุมก๊าซและไอ	245
สรุป	246
บทที่ 10 การผลิตที่สะอาดและกลไกการพัฒนาที่สะอาด	248
10.1 การผลิตที่สะอาด	248
10.1.1 นิยามและหลักการผลิตที่สะอาด	249
10.1.2 การนำหลักการผลิตที่สะอาดมาสู่การปฏิบัติ	251
10.1.3 ความสำคัญของการผลิตที่สะอาดต่อการจัดการมลพิษทางอากาศ	252
10.1.4 ตัวอย่างการผลิตที่สะอาด กรณีอุตสาหกรรมปิโตรเลียม	253
10.2 กลไกการพัฒนาที่สะอาด	256
10.2.1 หลักการกลไกการพัฒนาที่สะอาด	257
10.2.2 การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก	258
10.2.3 ตัวอย่างโครงการภายใต้กลไกการพัฒนาที่สะอาด	260
สรุป	262
บทสรุป	264
ดัชนี	265

บทที่ 1

บทนำ

อากาศที่เป็นปกคลุมอยู่บนโลก เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่จำเป็นต่อการดำรงอยู่ของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต เมื่อเกิดการปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ ย่อมมีผลกระทบต่อภาวะสุขภาพ มลพิษทางอากาศ คือ สภาวะการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพอากาศ ที่เกิดจากการเจือปนของสารมลพิษชนิดใดชนิดหนึ่งหรือมากกว่า เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซ โอ ควีน กลิ่น ฯลฯ จนทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหรือไม่มีชีวิต เช่น ก่อให้เกิดโรกระบบทางเดินหายใจ และโรคหัวใจในมนุษย์ มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เกิดภาวะความเสื่อมโทรมของอาคาร รวมถึงโบราณสถาน ฯลฯ มลพิษทางอากาศเกิดจากแหล่งกำเนิดทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural source) เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ การพัดพาฝุ่นละอองจากพื้นที่แห้งแล้ง เป็นต้น และแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made source หรือ anthropogenic source) เช่น มลพิษจากยานพาหนะ การเผาในที่โล่ง (Open burning) และมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเฉพาะพื้นที่ เช่น ในเขตนิคมอุตสาหกรรม หรือกระจายอยู่ทั่วไปทั้งในเขตเมืองและในเขตชนบท

การพัฒนาอุตสาหกรรมเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศ จากรายงานของธนาคารโลกพบว่า รายได้จากภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย มีสัดส่วนราวร้อยละ 30 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ (World Bank and OECD, 2023) ถึงแม้การพัฒนาอุตสาหกรรมมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ แต่หากพิจารณาในมิติด้านสิ่งแวดล้อม ต้องยอมรับว่า การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ได้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงมิได้

ปัญหามลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมไม่ใช่เรื่องใหม่ ในอดีตช่วงก่อน ค.ศ. 1285 พบว่าเกิดปัญหามลพิษทางอากาศในกรุงลอนดอน ซึ่งมีสาเหตุจากการใช้ถ่านหิน (Sea coal) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาเพื่อผลิตปูนขาว จนกระทั่งมีการสั่งห้ามการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยให้ใช้เชื้อเพลิงจากไม้แทน จนถึงช่วงกลางศตวรรษที่ 16 (ค.ศ. 1500-1601) เกิดวิกฤติการขาดแคลนไม้ เหตุเพราะมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการไม้เพื่อสร้างที่พักอาศัยและใช้เป็นเชื้อเพลิง การใช้ถ่านหินจึงกลับมาอีกครั้ง (Te Brake, 1975) ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศในกรุงลอนดอน ต่อเนื่องไปพร้อมกับการปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงศตวรรษที่ 18 ถึง 19 (ค.ศ. 1700-1901) จนในที่สุดจึงเกิดวิกฤติการณ์มลพิษทางอากาศอีกครั้ง ซึ่งรู้จักกันในชื่อ Great smog of London ที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตสูงถึง 4,000 คน และมีผู้ป่วยกว่า 100,000 คน เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงต้นเดือน

ธันวาคม ปี ค.ศ. 1952 เกิดกลุ่มควันพิษ (Smog) จากการเผาไหม้ถ่านหิน ประกอบกับในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดสภาวะความกดอากาศสูง ขัดขวางการเจือจางสารมลพิษสู่บรรยากาศ ทำให้สารมลพิษสะสมตัวในพื้นที่กินเวลากว่า 1 สัปดาห์ จนก่อให้เกิดเหตุสลดดังกล่าว

ในทวีปเอเชีย วิกฤตมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมที่สำคัญ คือ เหตุรั้วไหลของเมทิล ไอโซไซยาเนต (Methyl isocyanate) จากโรงงานผลิตสารปราบศัตรูพืช ที่เมือง Bhopal ประเทศอินเดีย วันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2527 เกิด สารมลพิษเกิดการแพร่กระจายสู่ชุมชนจนทำให้มีผู้เสียชีวิตกว่า 3,800 คน และมีผู้ป่วยกว่า 170,000 คน ไม่นับสัตว์เลี้ยงที่ล้มตายอีกเป็นจำนวนมาก

ปัญหามลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม ส่งผลต่อเนื่องถึงปัญหาด้านสาธารณสุขในหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย (Choi et al., 2012) มลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมของประเทศไทย คือ ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀ และ PM_{2.5}) โดยเฉพาะพื้นที่ตำบลหน้าพระลาน จังหวัดสระบุรี เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงโม่บดหรือย่อยหิน โรงงานปูนขาว โรงงานปูนซีเมนต์และกิจการเหมืองหินในพื้นที่ ปัญหาระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds VOCs) มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐาน ในพื้นที่ตำบลมาตาพุด จังหวัดระยอง โดยมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญ คือ การใช้สารตัวทำละลายในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังพบปัญหาก๊าซโอโซน (O₃) ในบรรยากาศ ที่ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ ทั้งพื้นที่เมืองและพื้นที่อุตสาหกรรม

รัฐพล อันแย้ง, มลิวรรณ บุญเสนอ, อรประภา ฤมมะกาญจนะ โรแบร์, และนภวรรณ รัตสุข (2555) ได้วิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงจากภาวะมลพิษทางอากาศ จากอุตสาหกรรมในพื้นที่รายตำบลของ 4 จังหวัดภาคกลาง ประกอบด้วย ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา สระบุรีและอ่างทอง ด้วยกระบวนการลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) ในระบบภูมิสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นเครื่องมือ โดยให้ผู้เชี่ยวชาญด้านมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม ที่พิจารณาความเสี่ยงจากตัวชี้วัด 4 ตัว ประกอบด้วย ประเภทและขนาดของโรงงาน จำนวนโรงงานต่อพื้นที่ (ตำบล) และวัตถุดิบที่ใช้ ผลพบว่า จังหวัดปทุมธานีมีจำนวนตำบลที่เสี่ยงต่อภาวะมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ สระบุรี พระนครศรีอยุธยา และอ่างทอง ตามลำดับ

สถานการณ์ข้างต้นเป็นตัวอย่างที่สะท้อนปัญหามลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม ทำให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการคุณภาพอากาศ ที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ของนักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รวมถึงความใส่ใจของผู้ประกอบการ และความตระหนักรู้ของประชาชน เพื่อให้การพัฒนาอุตสาหกรรมที่ผสานไปกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2560). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2559.

กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.

รัฐพล อ้นแฉ่ง, มลิวรรณ บุญเสนอ, อรประภา ภูมมะกาญจนะ โรแบร์, และ นภวรรณ รัตสุข. (2555). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยการวิเคราะห์สถานการณ์และความเสี่ยงของมลพิษอุตสาหกรรมต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ภาคกลาง. นนทบุรี: สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข (สวรส.).

สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม. (2556). คู่มือมาตรฐานอนามัยสิ่งแวดล้อม (ด้านอากาศ น้ำ ดิน เสียง ความสั่นสะเทือน ความร้อน และความเข้มแสงสว่าง) (พิมพ์ครั้งที่ 4).

กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.

Choi K., Paek D., Wu T., Chan C.C., Onchang R., Padungtod C., & Koizumi A. (2012). Asian forum on environmental health policy: challenges and perspectives of environmental health problems in the region in the next 30 years. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 17(2), 170-172. doi: 10.1007/s12199-012-0269-7

Te Brake, W.H. (1975). Air pollution and fuel crises in preindustrial London. *Technology and Culture*, 16(3).

World Bank & OECD (2023) *Industry (including construction), value added (% of GDP)*. Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS>

บทที่ 2 มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม: ความรู้เบื้องต้น

2.1 ระบบมลพิษทางอากาศ

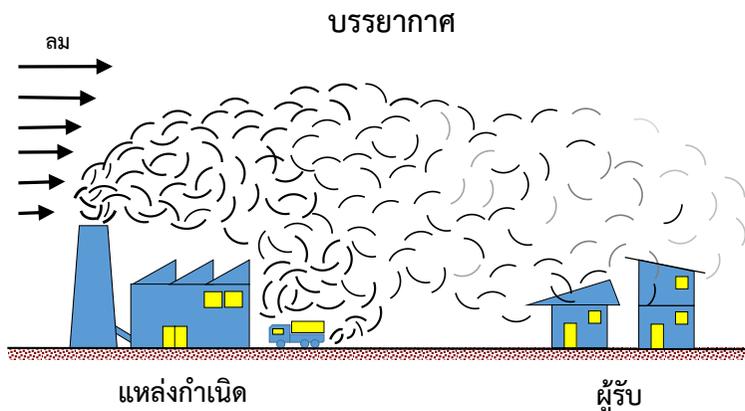
พื้นฐานที่สำคัญของการจัดการคุณภาพอากาศ คือ ความเข้าใจถึงระบบมลพิษทางอากาศ (Air pollution system) ที่มี 3 องค์ประกอบ ที่มีความเกี่ยวเนื่องเชื่อมโยงกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดมลพิษ (Emission sources) บรรยากาศ (Atmosphere) และผู้รับ (Receptor) (ดังรูปที่ 2.1) แหล่งกำเนิดมลพิษมีการปลดปล่อยสารมลพิษทางอากาศ (Air pollutants) ออกสู่บรรยากาศ ระหว่างที่สารมลพิษมีการแพร่กระจาย (Dispersion) ในบรรยากาศจะเกิดกลไกที่สำคัญ คือ การเคลื่อนย้าย (Transport) และการเปลี่ยนรูป (Transformation) ก่อนที่จะไปสู่ผู้รับ ทั้งนี้การเกิดกลไกดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา (เช่น ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิและความกดอากาศ ฯลฯ) ที่ผันแปรไปตามช่วงเวลาและพื้นที่

ในกรณีมลพิษทางอากาศในอาคาร (Indoor air pollution) ระบบมลพิษทางอากาศ มีรูปแบบต่างกับมลพิษทางอากาศในบรรยากาศที่กล่าวมาข้างต้น ดังนี้ แหล่งกำเนิดภายในอาคาร (เช่น ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ภายในอาคารหรือในสถานประกอบการ ฯลฯ) ตัวกลาง คือ อากาศภายในอาคาร ซึ่งอาจเป็นในที่พักอาศัย ในสถานที่ทำงาน หรือในสถานประกอบการอุตสาหกรรม และผู้รับ คือ ผู้ที่พักอาศัยหรือทำงานอยู่ภายในอาคาร

จากระบบมลพิษทางอากาศข้างต้น หากมีการจัดการเพื่อตัดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งออก เช่น หากมีวิธีการป้องกันมิให้สารมลพิษถูกระบายออกสู่บรรยากาศ หรือ มิให้ผู้รับอยู่ในบริเวณที่มีการแพร่กระจายสารมลพิษ ภาวะมลพิษทางอากาศก็ไม่สามารถเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงนั้นเราไม่สามารถดำเนินการดังกล่าวอย่างใดอย่างหนึ่งได้อย่างเบ็ดเสร็จสมบูรณ์ได้ในทันที จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดระดับมลพิษทางอากาศ อาทิ มาตรฐานการระบายสารมลพิษทางอากาศ (Air pollution emission standards) และมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ (Ambient air quality standards) หรือมาตรฐานคุณภาพอากาศในอาคาร (Indoor/workplace air quality standards) เพื่อเป็นเป้าหมายในการกำหนดมาตรการจัดการมลพิษ

หากพิจารณาในส่วนของผู้รับนั้น โดยทั่วไปจะพิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดกับมนุษย์เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงนั้นผู้รับอาจหมายถึงรวมถึงสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ทั้งที่มีชีวิต (สัตว์และพืชพรรณ) และไม่มีชีวิต (วัสดุอาคาร โบราณสถาน) อีกด้วย ดังนั้นจึงควรพิจารณาผลของ

มลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในมุมมองที่กว้างขึ้น ซึ่งเป็นช่องว่างองค์ความรู้ด้านมลพิษทางอากาศ ที่ต้องอาศัยการวิจัยเพื่อหาคำตอบ



รูปที่ 2.1 ระบบมลพิษทางอากาศ

2.2 แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม

แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม (Sources of industrial air pollutants) สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) และแหล่งกำเนิดแบบไม่ใช่จุด หรือที่ไม่สามารถระบุแหล่งกำเนิดได้แน่นอน (Non-point source) หรือ แหล่งกำเนิดแบบฟุ้งกระจาย (Fugitive source)

1) แหล่งกำเนิดแบบจุด ได้แก่ แหล่งกำเนิดมลพิษที่ปลดปล่อยสารมลพิษออกมาผ่านช่องทางสำหรับการระบายมลพิษ เช่น ปล่องระบาย (Stack) และท่อระบายอากาศ (Vent pipe) สามารถระบุจุดกำเนิดได้อย่างชัดเจน

2) แหล่งกำเนิดแบบไม่ใช่จุด ได้แก่ แหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่สามารถระบุแหล่งที่เล็ดลอดออกมาได้ชัดเจนหรือเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิต จัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า แหล่งกำเนิดฟุ้งกระจายในกระบวนการผลิต (Process fugitive sources) เช่น สารมลพิษภายในอาคารที่ถูกระบายจากพัดลมดูดออก (Exhaust fan) สารมลพิษที่ระบายออกจากกล่องครอบเครื่องจักร (Enclosures) (ซึ่งหากสามารถรวบรวม และมีช่องทางการระบายที่ชัดเจน สามารถจัดเป็นแหล่งแบบจุดได้) ในกรณีที่ไม่สามารถระบุแหล่งที่เล็ดลอดออกมาได้ชัดเจน หรือไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิต จัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า แหล่งกำเนิดฟุ้งกระจายเชิงพื้นที่ (Area fugitive sources) โดยพิจารณาให้สารมลพิษฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศจากพื้นที่ซึ่งมีผิวหน้าตัดขนาดใหญ่ เช่น กลิ่นที่ระเหยจากบ่อบำบัดน้ำเสีย พื้นที่เทกอง (Storage piles) เป็นต้น และรวมถึงถนน (Line sources) ที่อยู่ในเขตประกอบการ

6 | บทที่ 2 มลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม: ความรู้เบื้องต้น

อุตสาหกรรมนั้น ๆ ด้วย สำหรับกระบวนการอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดสารมลพิษทางอากาศสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) **กระบวนการเผาไหม้ (Combustion process)** เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง (ฟอสซิล ขยะ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ) เพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) การเผาไหม้เพื่อกำจัดขยะในโรงงานกำจัดขยะ ฯลฯ

2) **กระบวนการที่ไม่มีการเผาไหม้ (Non-combustion process)** เช่น การระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในโรงกลั่นน้ำมัน ฝุ่นละอองจากการม่ บด ย่อย หิน ในอุตสาหกรรมเหมืองหิน ฝุ่นจากการลำเลียงถ่านหินเพื่อป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้า ฯลฯ

กระบวนการอุตสาหกรรมและสารมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของกิจกรรมการผลิตในอุตสาหกรรมที่ปล่อยสารมลพิษทางอากาศ

กระบวนการผลิต (Process operation)	แหล่งกำเนิดฟุ้งกระจาย (Fugitive sources)
ช่องระบายดังทำปฏิกิริยา (Reactor vent)	วาล์ว (Valves)
ระบบการกลั่น (Distillation systems)	ซีลปั๊ม (Pump seals)
ระบบสุญญากาศ (Vacuum systems)	หน้าแปลนท่อ (Flange) และ ข้อต่อ (Connector)
ปล่องระบาย (Combustion stack)	คอมเพรสเซอร์ (Compressors)
การเป่าขึ้นรูป (Blow molding)	ส่วนปลายท่อ (Open-ended line)
	อุปกรณ์ลดความดัน (Pressure relief devices)
	การทำความสะอาดและบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Equipment cleaning and maintenance)
แหล่งกำเนิดเชิงพื้นที่ (Surface area sources)	การยกขน การจัดเก็บและการบรรทุก (Handling, Storage and Loading)
การระเหยจากบ่อ (Pond evaporation)	การรั่วไหลจากถังเก็บสาร (Storage tank breathing losses)
การระเหยจากหอหล่อเย็น (Cooling tower evaporation)	การขนถ่าย
ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment)	ช่องระบายตามท่อ
การกำจัดบนดิน (Land disposal)	การบรรจุและการบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ (Packaging and Container loading)

ที่มา: ปรับปรุงจาก U.S. EPA (2003)

2.3 แหล่งกำเนิดมลพิษและการเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศ

สารมลพิษที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม มีความหลากหลายแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม ประเภทของอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญ ได้แก่ อุตสาหกรรมด้านพลังงาน เช่น โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ) โรงไฟฟ้าชีวมวล หรือโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมโลหะ รวมถึงโรงงานที่มีของเสีย และทำให้เกิดภาวะมลพิษทางอากาศ เช่น โรงงานแปงมันที่มีน้ำเสีย และทำให้เกิดกลิ่นรบกวน โรงงานกำจัดกากของเสีย เป็นต้น ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดมลพิษ ได้แก่ วัตถุดิบ เชื้อเพลิงที่ใช้ กระบวนการผลิต รวมถึงสถานะของกระแสอากาศ (เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ฯลฯ) ที่เป็นตัวพาสารมลพิษออกสู่บรรยากาศ สารมลพิษมีผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี สารบางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อน (เช่น ไกกรดซัลฟูริกและไนโตริก) บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (เช่น เบนซิน และ 1,3-บิวทาไดอีน) บางชนิดก่อให้เกิดกลิ่นรบกวน (เช่น อามีน และไพรีดีน) ตัวอย่างของสารมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.2

นอกจากนี้สารมลพิษบางชนิด สามารถทำปฏิกิริยาในบรรยากาศ หลังระบายออกจากแหล่งกำเนิด เกิดเป็นสารมลพิษชนิดใหม่ เช่น การเกิดโอโซน ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารมลพิษหลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และ ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ในสถานะที่มีแสงอาทิตย์ โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่า **โฟโตเคมีคอลออกซิเดชัน** (Photochemical oxidation) ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในบรรยากาศที่ผิวโลก (Troposphere) จึงเรียกโอโซนที่เกิดขึ้นนี้ว่า โอโซนชั้นผิวพื้น (Ground level ozone หรือ Tropospheric ozone) สารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาเรียกว่า **สารมลพิษปฐมภูมิ** (Primary pollutants) ส่วนสารที่เป็นผลลัพธ์ของปฏิกิริยาเรียกว่า **สารมลพิษทุติยภูมิ** (Secondary pollutants) นอกจากนี้โอโซนแล้ว ยังมีสารมลพิษทุติยภูมิอื่น ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าว เช่น สารเปอร์ออกซีอะซิไธลไนเตรท (Peroxy Acetyl Nitrate; PAN) สารมลพิษทุติยภูมิอาจอยู่ในรูปของละอองลอยอินทรีย์ (Secondary organic aerosol) ซึ่งเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ในบรรยากาศ (รวมถึงสารอินทรีย์ระเหยง่าย) สารมลพิษทุติยภูมินี้เป็นส่วนหนึ่งของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{2.5}) ในบรรยากาศ โดยพบว่ามีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 90 ของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กทั้งหมด (Kanakidou et al., 2005)

ด้วยเหตุที่สารมลพิษทุติยภูมิดังกล่าวนี้ เกิดจากสารมลพิษปฐมภูมิที่มีแหล่งกำเนิดผสมผสานกัน ทั้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่น ๆ (เช่น จากการจราจร การเผาในที่โล่ง) ทำให้การแก้ปัญหาต้องดำเนินการไปพร้อมๆ กัน ไม่เน้นเฉพาะแหล่งกำเนิดใดแหล่งกำเนิดหนึ่งอย่างเดียว

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี

ธาตุหลัก	สารมลพิษ	แหล่งกำเนิด
ซัลเฟอร์ (S)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	อากาศเสียจากการเผาไหม้ถ่านหิน
	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	การผลิตที่ใช้กรดซัลฟูริก
	ไอกรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄ vapors)	การผลิตที่ใช้กรดซัลฟูริก กระบวนการแช่กรด (Pickling)
	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	กระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ การบำบัดน้ำเสีย
	เมอร์แคปแทนส์ (CH ₃ SH)	การกลั่นปิโตรเลียม โรงงานเยื่อกระดาษ
ไนโตรเจน (N)	ไนตริกออกไซด์ (NO)	การผลิตกรดไนตริก
	ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	อากาศเสียจากการเผาไหม้
	ไอกรดไนตริก (HNO ₃ vapors)	การผลิตที่ใช้กรดไนตริก กระบวนการแช่กรด
	แอมโมเนีย (NH ₃)	การผลิตที่ใช้แอมโมเนีย
	สารประกอบอื่น ๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (เช่น อามีน ไพริดีน)	น้ำเสียที่มีโปรตีน การแปรรูปสัตว์ (โรงงานปลาป่น) กระบวนการที่ใช้ตัวทำละลาย
คาร์บอน (C)	อินทรีย์คาร์บอน: คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	อากาศเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
	อินทรีย์คาร์บอน: สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)	การใช้ตัวทำละลาย การจัดจำหน่าย เชื้อเพลิงก๊าซโซลีน โรงงานปิโตรเคมี
	ไฮโดรคาร์บอน: พาราฟิน โอลีฟิน อะโรมาติก	การใช้ตัวทำละลาย การจัดจำหน่าย เชื้อเพลิงก๊าซโซลีน โรงงานปิโตรเคมี
	ออกซิเจนไฮโดรคาร์บอน: อัลดีไฮด์ คีโตน แอลกอฮอล์ ฟีนอล	กระบวนการเคลือบผิว กระบวนการที่ใช้ปิโตรเลียม การผลิตพลาสติก
	ตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ	การซักแห้ง การกำจัดไขมัน
	ฮาโลเจน: ฟลูออไรด์ (F)	อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยฟอสเฟต อุตสาหกรรมผลิตอลูมิเนียม
	ซิลิคอนเตตระฟลูออไรด์ (SiF ₄)	อุตสาหกรรมเซรามิก การผลิตปุ๋ย
คลอรีน	ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)	การผลิตไฮโดรเจนคลอไรด์ การเผาพลาสติกพีวีซี
	คลอไรด์ (Cl ₂)	การผลิตคลอรีน

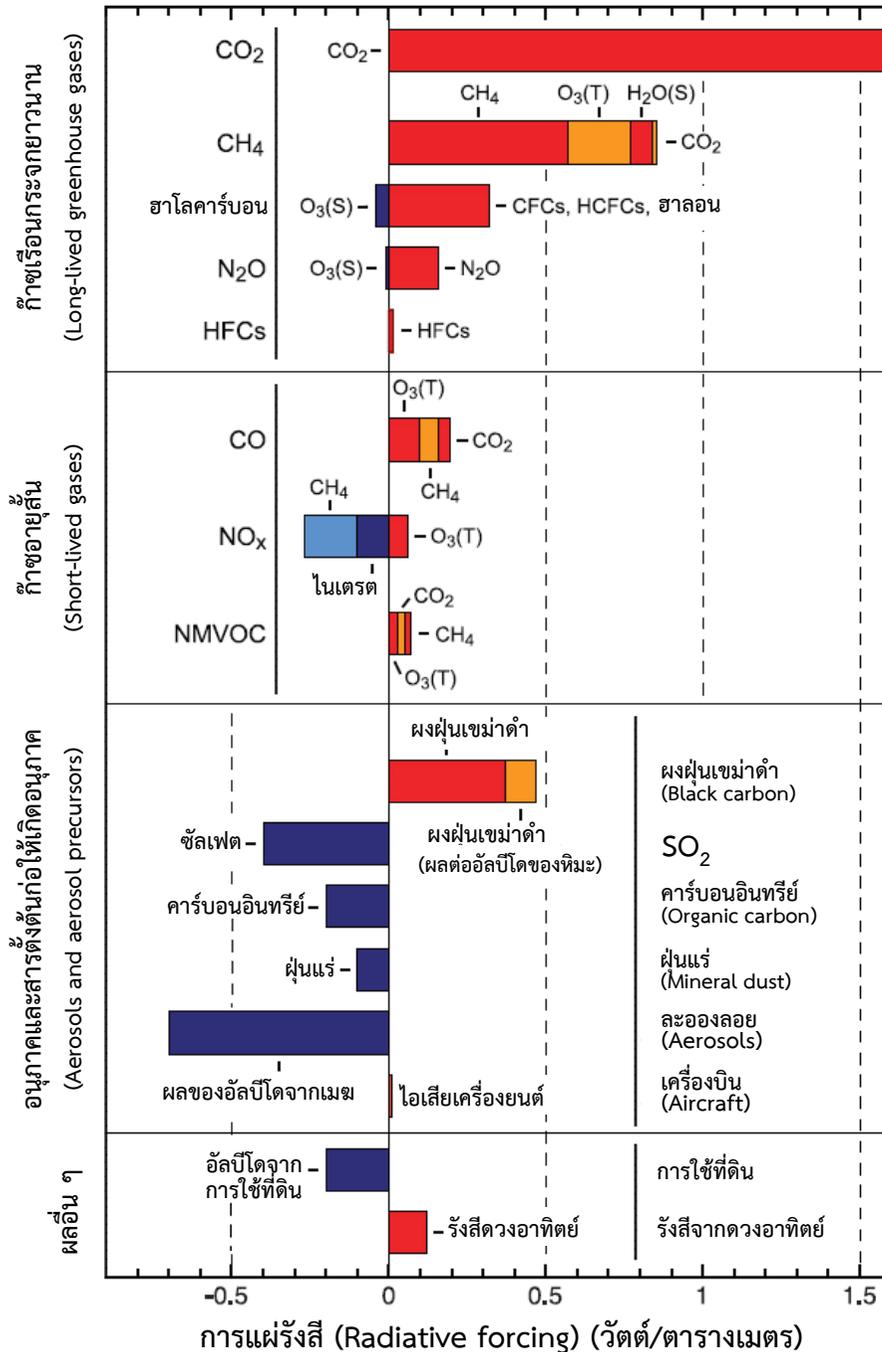
ที่มา: ปรับปรุงจาก Limpaseni (2006)

2.4 ผลของสารมลพิษต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

นอกจากสารมลพิษทางอากาศและการเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีสารอีกกลุ่มหนึ่งที่เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เรียกว่า **สารก่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate forcing agents)** (ดังในรูปที่ 2.2) สารกลุ่มนี้มีผลต่อการแผ่รังสี (Radiative forcing) ของโลก ทำให้เกิดผลกระทบใน 2 ด้าน คือ ทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น (Warming effect) และทำให้อุณหภูมิโลกลดลง (Cooling effect) (ค่าที่เป็นบวกและค่าติดลบในแกนนอนในรูปที่ 2.2) การที่สารดังกล่าวทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้นนั้น เกิดจากการที่ตัวมันมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ปลดปล่อยจากพื้นผิวโลกออกสู่อากาศ จึงส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ประกอบด้วย ก๊าซเรือนกระจกต่าง ๆ (คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และสารกลุ่มฮาโลคาร์บอน เป็นต้น) และผงฝุ่นเขม่าดำ (Black carbon)

ในทางตรงข้าม สารอีกกลุ่มหนึ่งกลับทำให้อุณหภูมิของโลกลดลง สารในกลุ่มนี้ได้แก่ ฝุ่นแร่ (Mineral dust) ละอองลอยซัลเฟต (Sulfate aerosol) และสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ที่เป็นเช่นนี้เพราะตัวของสารมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดที่ปลดปล่อยจากพื้นผิวโลก ทำให้ไม่เกิดการสะสมความร้อนในบรรยากาศ

จากรูปที่ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการแผ่รังสีที่เป็นบวก (อุณหภูมิโลกสูงขึ้น) กับลบ (อุณหภูมิโลกลดลง) ที่เกิดจากสารต่าง ๆ ในบรรยากาศ (ร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น การใช้ที่ดิน รังสีจากดวงอาทิตย์ เป็นต้น) พบว่าค่าสุทธิที่ได้นั้นมีค่าเป็นบวก ชี้ให้เห็นว่าโลกกำลังมีอุณหภูมิสูงขึ้น และที่สำคัญสารเหล่านี้ หลายชนิด (เช่น โอโซนชั้นผิวพื้น อนุภาคคาร์บอนและไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น) ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอีกด้วย



รูปที่ 2.2 การแผ่รังสี (Radiative forcing) ที่เป็นผลจากสารต่าง ๆ ในบรรยากาศ และตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งมีทั้งที่ส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ค่าเป็นบวก) และต่ำลง (ค่าเป็นลบ)

หมายเหตุ: (T) และ (S) คือ การปรากฏของสารในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere)

และสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ตามลำดับ

ที่มา: ปรับปรุงจาก Forster et al. (2007)

ในปี พ.ศ. 2558 ในการประชุมคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) ได้มีข้อตกลงร่วมกัน เรียกว่า ข้อตกลงปารีส (21st Session of the Conference of the Parties หรือ COP21) คือ การควบคุมอุณหภูมิของอากาศโลกไม่ให้สูงเกิน 2 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม ภายในปี ค.ศ. 2100 ด้วยเหตุนี้โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) และ องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (WMO) ได้ออกมาตราการและรณรงค์ ให้ลดการปล่อยสารก่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอายุสั้น (Short-lived climate pollutants; SLCPs) เป็นลำดับแรกก่อน (CCAC, 2014) ซึ่งกระบวนการผลิตและการใช้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เป็นแหล่งกำเนิดหนึ่งที่สำคัญ สารเหล่านี้มี 4 ชนิด ประกอบด้วย ผงฝุ่นเขม่าดำ (Black carbon) (เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ฯลฯ) มีเทน (จากอุตสาหกรรมการผลิตปศุสัตว์ น้ำเสียอุตสาหกรรม ฯลฯ) โอโซนชั้นผิวพื้น (เกิดจากปฏิกิริยาของสารมลพิษปฐมภูมิ เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่าย และไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) และ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) (จากอุตสาหกรรมที่มีการใช้ห้องเย็น และสารทำให้เย็น ฯลฯ) สารทั้ง 4 ชนิดนี้ อยู่ในบรรยากาศได้ในระดับไม่กี่วันถึงไม่กี่สัปดาห์ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเรือนกระจกหลัก ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เนื่องจากมีอายุที่ยาวนานประมาณ 100 ปี และมีแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย จึงยากในการลดการปลดปล่อยในระยะเวลานั้น การลดการปลดปล่อยสารทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวจึงเห็นผลได้เร็วกว่า ประกอบกับสารในกลุ่มนี้บางชนิดเป็นสารมลพิษทางอากาศอยู่แล้ว ดังนั้นจึงส่งผลดีต่อคุณภาพอากาศอีกทางหนึ่งด้วย

2.5 ผลกระทบของมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม

มลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม สามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ ตัวอย่างของผลกระทบต่อระบบนิเวศ เช่น ภาวะความเป็นกรด (Acidification) จากสารตั้งต้นจำพวก ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และแอมโมเนีย ทำให้เกิดผลต่อระบบนิเวศทางน้ำและทางบก ลดการเจริญเติบโตของพืชทั้งในพื้นที่เพาะปลูกและในป่าธรรมชาติ และผลต่อการสืบพันธุ์ของสัตว์ นอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และแอมโมเนียยังเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือ ภาวะที่แหล่งน้ำมีการเพิ่มพูนสารอาหารของพืช ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้น้ำเน่าเสีย ปริมาณสัตว์และพืชน้ำลดลง

Panyakapo & Onchang (2008) ได้ศึกษาการตกสะสมของกรดในบรรยากาศในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นตัวแทนพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย ภายใต้เครือข่าย Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) โดยตรวจวัดความเป็นกรดต่างและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำฝนต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ปี ผลพบว่าน้ำฝนมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 4-7.8 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.1 (ฝนตามธรรมชาติอยู่ที่ 5.6) เมื่อทำการวิเคราะห์แหล่งที่มาของสารเคมีที่อยู่ในน้ำฝนด้วยวิธีทางสถิติพบว่า มีแหล่งที่มาทั้งจากธรรมชาติ (ฟุ้งกระจายจากดิน พัดพามาจากทะเล) และจากกิจกรรมของมนุษย์ (การทำเกษตรกรรม การเผาชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิง เหมืองหิน)

ผลกระทบของมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมเกิดจากการปลดปล่อยสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดสู่บรรยากาศ สามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ

1) **ลักษณะอุบัติเหตุ (Accident hazards):** สารมลพิษมีการรั่วไหลหรือสารมลพิษที่เกิดจากอัคคีภัยหรือการระเบิดอย่างมิได้ตั้งใจ เช่น ก๊าซแอมโมเนียรั่วไหลจากถังเก็บขนาดใหญ่ในโรงงานผลิตน้ำแข็ง การระเหยของสารอินทรีย์จากรถบรรทุกน้ำมัน ภายหลังจากประสบอุบัติเหตุ เหตุไฟไหม้โกดังเก็บสินค้า ฯลฯ

2) **ลักษณะทั่วไป (General releases):** สารมลพิษถูกระบายออกจากตำแหน่งใด ๆ ในสถานประกอบการ อาจเป็นทั้งที่ได้มีการเตรียมการไว้ เช่น การระบายมลพิษออกจากปล่อง หรือ หอเผาทิ้ง (Flare) (ลักษณะของหอเผาทิ้งแสดงในรูปที่ 9.3) หรือ เกิดจากกระบวนการผลิตที่ไม่สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารมลพิษได้โดยง่าย เช่น กลิ่นจากโรงงานฟอกหนัง ฝุ่นละอองจากโรงบดและย่อยหิน ฯลฯ

ทั้งสองรูปแบบนี้มีผลต่อผู้รับที่แตกต่างกัน กรณีการเกิดอุบัติเหตุ สารมลพิษที่เกิดขึ้นมักมีความเข้มข้นที่สูง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะเวลานั้น หรือหากสารมลพิษมีความเป็นพิษสูง อาจส่งผลอย่างเฉียบพลันจนอาจทำให้เสียชีวิตได้ ตัวอย่างกรณีการรั่วไหลของสารเมทิล ไอโซไซยาเนตในโรงงานผลิตสารปราศศัตรูพืช ที่เมือง Bhopal ประเทศอินเดีย ที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้านี้ จนทำให้มีผู้เจ็บป่วยและเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก ส่วนกรณีทั่วไป สารมลพิษมักมีความเข้มข้นหรือมีความเป็นพิษต่ำกว่า การปลดปล่อยเกิดขึ้นแบบชั่วคราว (Intermittent) หรือต่อเนื่อง (Continuous) เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะกลางและระยะยาว โดยผลกระทบต่อสุขภาพของสารมลพิษทางอากาศ สามารถเกิดแบบฉับพลัน (Acute effect) และแบบเรื้อรัง (Chronic effect) ตัวอย่างของผลกระทบต่อสุขภาพแสดงดังตารางที่ 2.3

Onchang, Panyakapo, & Paopuree. (2017) ได้วิเคราะห์ปริมาณโลหะในฝุ่นและประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสในพื้นที่ชุมชน ที่อยู่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรมอิฐและเครื่องปั้นดินเผา และพื้นที่เหมืองแร่เก่าของจังหวัดราชบุรี โดยใช้วิธีการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพของ U. S. EPA ผลพบว่า โลหะภายในอาคารของกลุ่มที่อยู่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม มีความเข้มข้นและชนิดของโลหะหลากหลายกว่า แต่พบความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคมะเร็งที่เกินกว่าเกณฑ์ที่ U.S. EPA กำหนดทั้งสองพื้นที่ โดยพบว่า โครเมียมและนิเกิลเป็นโลหะหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบดังกล่าว นอกจากนี้สภาวะอากาศ [องค์ประกอบที่ 2 ของระบบมลพิษทางอากาศ (รูปที่ 2.1)] ก็มีอิทธิพลต่อปริมาณฝุ่นและโลหะ โดยพบในช่วงฤดูฝนน้อยกว่าฤดูแล้ง ทั้งนี้การตกของฝนเป็นตัวช่วยให้เกิดการชะล้าง (Rainout และ Washout) ฝุ่นในบรรยากาศ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศ

สารมลพิษทางอากาศ	ผลกระทบต่อสุขภาพ
ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 และ 10 ไมครอน (PM _{2.5} และ PM ₁₀)	โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด การทำหน้าที่ผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง โรคมะเร็ง
โอโซนชั้นผิวพื้น	การทำหน้าที่ผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ หัวใจและหลอดเลือด การระคายเคืองตา
คาร์บอนมอนอกไซด์	ความเสียหายต่อระบบประสาทส่วนกลางหัวใจและหลอดเลือด
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ผลต่อระบบทางเดินหายใจ หัวใจและหลอดเลือด การระคายเคืองตา
ไนโตรเจนไดออกไซด์ ตะกั่ว	ความเสียหายต่อดับ ปอด ม้าม และหลอดเลือด การทำหน้าที่ผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลางและหลอดเลือด การระคายเคืองตา
โพลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	ผลต่อระบบทางเดินหายใจและระบบประสาทส่วนกลาง โรคมะเร็ง

ที่มา: ปรับปรุงจาก Ghorani-Azam, Riahi-Zanjani, & Balali-Mood (2016)

สารมลพิษทางอากาศบางชนิด สามารถสะสมในดิน น้ำ และพืชพรรณ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างยาวนาน เช่น สารไดออกซิน (Polychlorinated dibenzo-para-dioxins; PCDDs) และสารฟิวแรน (Polychlorinated dibenzo furans; PCDFs) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ กระบวนการผลิตโลหะและหลอมโลหะ และอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อนสูง เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถเคลื่อนย้ายจากอากาศสู่ดิน จากดินสู่พืช หรือจากดินสู่น้ำโดยการชะล้างและเข้าสู่มนุษย์และสัตว์ โดยมีค่าครึ่งชีวิตในร่างกายมนุษย์ยาวนานถึง 7-11 ปี สารชนิดนี้จัดเป็นสารก่อมะเร็ง เป็นพิษต่อระบบประสาท ระบบภูมิคุ้มกัน ทำให้เกิดความผิดปกติต่อการสืบพันธุ์ และความผิดปกติในทารก

เนื่องจากสารเหล่านี้มีความเป็นพิษสูงและอยู่คงทนในสิ่งแวดล้อมได้อย่างยาวนาน องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) และโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) จึงจัดให้สารสารไดออกซินและฟิวแรน อยู่ในกลุ่มสารอินทรีย์ที่ตกค้างยาวนาน (Persistent Organic Pollutants; POPs) ภายใต้อนุสัญญาสตอกโฮล์ม เพื่อให้แต่ละประเทศร่วมกันลดการปลดปล่อยสารชนิดนี้ โดยให้ความสำคัญไปที่แหล่งกำเนิดประเภทเตาเผาและกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเป็นลำดับแรก

อนุสัญญากรุงสตอกโฮล์ม ว่าด้วยสารอินทรีย์ที่ตกค้างยาวนาน (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants) มีจุดมุ่งหมายเพื่อคุ้มครองสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจากสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน ซึ่งอนุสัญญากำหนดสารทั้งหมด 12 ชนิด รวมถึง สารไดออกซินและฟิวแรน พันธกรณีสำคัญที่ภาคีต้องปฏิบัติ ได้แก่ การกำหนดแนวทางด้านเทคนิคที่ดีที่สุด (Best Available Techniques: BAT) และแนวทางปฏิบัติทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ดีที่สุด (Best Environmental Practices: BEP) และประสานงานกับประเทศภาคี ประเทศไทยให้สัตยาบันในอนุสัญญาสตอกโฮล์มฯ เมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2548 โดยมีกรมควบคุมมลพิษเป็นศูนย์ประสานงาน (Focal point) ในการปฏิบัติตามพันธกรณีของอนุสัญญา (นิรมล สุธรรมกิจ, ศุภฤดี ถาวรยุติการต์, อนิน อรุณเรืองสวัสดิ์, นนท นุชหมอน, 2555)

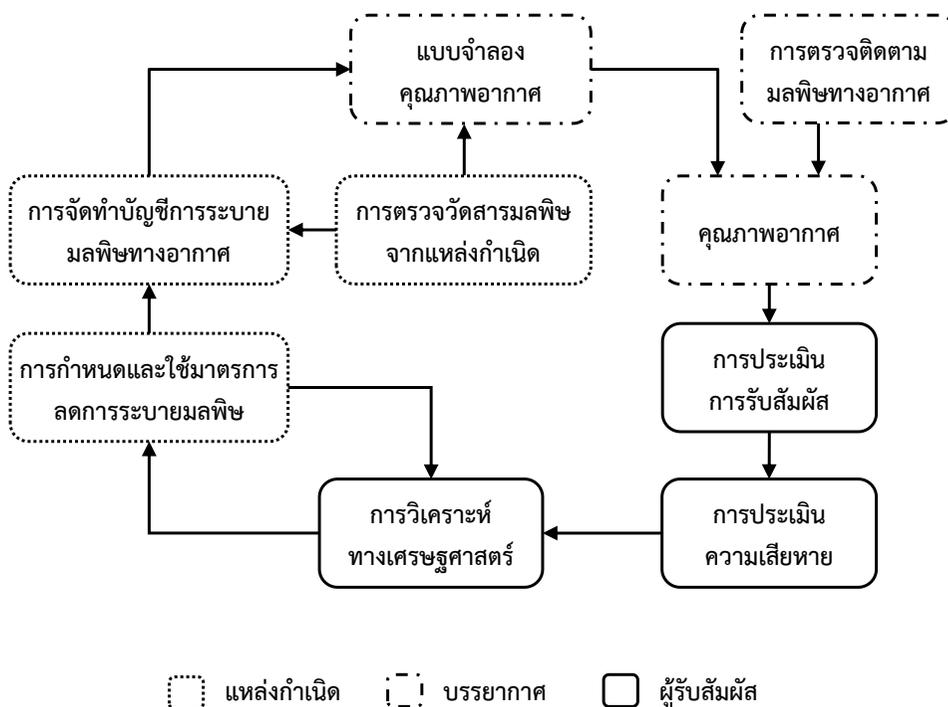
มลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมมิได้เป็นประเด็นปัญหา เฉพาะในแต่ละประเทศอีกต่อไป การยกระดับความร่วมมือในระดับนานาชาติเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาอย่างเป็นรูปธรรมจึงเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้ในอนาคต มลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมจะเป็นประเด็นที่ถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขทางการค้าระหว่างประเทศ ดังนั้นการกำหนดมาตรการเพื่อป้องกันและควบคุมมลพิษ มิให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอย่างเร่งด่วน

2.6 หลักการจัดการมลพิษทางอากาศ

จากปัญหาภาวะมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรมดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีการหาวิธีการเพื่อจัดการมลพิษทางอากาศ โดยนำหลักของ “ระบบมลพิษทางอากาศ” ซึ่งประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งกำเนิด บรรยากาศและผู้รับสัมผัส (รูปที่ 2.1) มาขยายเป็น “ระบบการจัดการมลพิษทางอากาศ” (Air quality management system) (รูปที่ 2.3) โดยเริ่มจากการประเมินปริมาณการระบายสารมลพิษจากแหล่งกำเนิด (Quantification of actual emission) และการจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษ (Emission inventory) ข้อมูลที่ได้สามารถใช้ในการกำหนดมาตรการลดการระบายมลพิษเพื่อให้อยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐานการระบายสารมลพิษ (Emission standard) (เป็นการจัดการที่องค์ประกอบแรกของระบบมลพิษทางอากาศ คือ แหล่งกำเนิด

นอกจากนี้ ผลจากการจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองคุณภาพอากาศ (Air quality modeling) เพื่อคาดการณ์การแพร่กระจายของสารมลพิษในบรรยากาศ (ดูรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองคุณภาพอากาศได้ในบทที่ 5) ร่วมกับการตรวจติดตามมลพิษทางอากาศ (Air pollution monitoring) เพื่อให้ทราบถึงสภาวะคุณภาพอากาศในพื้นที่อุตสาหกรรม โดยผลลัพธ์ที่ได้

ทั้งจากแบบจำลอง และจากการการตรวจติดตามมลพิษทางอากาศ คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ (Air pollutant concentration)



รูปที่ 2.3 ระบบการจัดการมลพิษทางอากาศ
ที่มา: ปรับปรุงจาก Larssen et al. (2003)

เมื่อนำความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่ได้ มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศ (Ambient air quality standard) จะทำให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น (เป็นการจัดการที่องค์ประกอบที่สองของระบบมลพิษทางอากาศ คือ บรรยากาศ) หรือเป็นข้อมูลเพื่อประเมินการรับสัมผัส (Exposure assessment) และการประเมินความเสียหาย (Damage assessment) ซึ่งครอบคลุมถึงการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health risk assessment) ของประชากรในพื้นที่ (เป็นการจัดการที่องค์ประกอบที่สามของระบบมลพิษทางอากาศ คือ ผู้รับสัมผัส)

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economics analysis) ในรูปที่ 2.3 เป็นกระบวนการที่เสริมขึ้นมาในระบบการจัดการคุณภาพอากาศ หลักการ คือ การนำความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการรับสัมผัสสารมลพิษของประชากร มาวิเคราะห์ให้อยู่ในหน่วยของเงิน เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบผลประโยชน์และต้นทุน (Benefit and cost) โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1) เพื่อชี้ให้เห็นถึงความรุนแรงของปัญหามลพิษทาง

อากาศในพื้นที่ ซึ่งทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย (ต้นทุน) ที่เกิดขึ้นจากการที่ประชากรได้รับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสารมลพิษ และ 2) การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของมาตรการลดการระบายมลพิษ (Emission abatement measure) โดยเป็นการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost benefit analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นหากนำมาตรการนั้น ๆ มาปฏิบัติ (Cost) กับค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพที่ลดลงเมื่อนำมาตรการนั้น ๆ มาใช้ (Benefit) จึงทำให้ได้มาตรการที่มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ สร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ตัดสินใจในการนำมาตรการไปใช้

ภายหลังจากการนำมาตรการลดการระบายมลพิษไปใช้ในระยะเวลาหนึ่งจนส่งผลให้การระบายมลพิษมีการเปลี่ยนแปลง การประเมินผลสัมฤทธิ์ของมาตรการจึงมีความจำเป็น ซึ่งสามารถทำได้โดยการดำเนินการแบบวนซ้ำ (Loop) ตามรูปที่ 2.3 เริ่มตั้งแต่การจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษ จนถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และนำผลมาเปรียบเทียบกับก่อนนำมาตรการนั้นไปปฏิบัติ (Harrop, 2002; Larssen et al., 2003)

อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยมีการนำระบบการจัดการมลพิษทางอากาศมาใช้เพียงบางส่วน ได้แก่ การตรวจวัดสารมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิด และในบรรยากาศ การจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ แบบจำลองคุณภาพอากาศ การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ และมีมาตรฐานการระบายสารมลพิษและมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะได้อธิบายในบทต่อ ๆ ไป

สรุป

การจัดการมลพิษทางอากาศประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งกำเนิดมลพิษ บรรยากาศและผู้รับ แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แหล่งกำเนิดแบบจุด (รู้แหล่งแน่นอน) และแหล่งแบบไม่ชัดเจน (ไม่สามารถระบุได้แน่นอน) ในกรณีของภาคอุตสาหกรรมนั้น กระบวนการที่ทำให้เกิดสารมลพิษทางอากาศ ประกอบด้วย กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการที่ไม่มีการเผาไหม้ (การระเหยของสารอินทรีย์ การบดย่อยหิน ฯลฯ) สารมลพิษที่ระบายออกจากแหล่งกำเนิดสามารถทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเกิดเป็นสารมลพิษทุติยภูมิ

สารมลพิษทางอากาศบางชนิดยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นหรือมีผลทำให้อุณหภูมิต่ำลง สารเหล่านี้บางชนิดยังเป็นสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น โอโซนชั้นผิวพื้น สารมลพิษทางอากาศที่เกิดจากอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะความเป็นกรดและการเกิดยูโทรฟิเคชัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในวงกว้าง สารมลพิษทางอากาศบางชนิดมีความเป็นพิษสูง และสามารถสะสมอยู่สิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน จึงต้องอาศัยความร่วมมือระหว่างประเทศ เพื่อร่วมกันลดการปลดปล่อยสารเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม

ระบบการจัดการคุณภาพอากาศอุตสาหกรรม ได้พัฒนาขึ้นจากระบบมลพิษทางอากาศ ประกอบด้วยเครื่องมือที่สำคัญ คือ การจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ การตรวจวัดสารมลพิษทางอากาศ ทั้งจากแหล่งกำเนิดและในบรรยากาศ แบบจำลองคุณภาพอากาศและการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ และมีการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ผนวกรวมขึ้นมา เพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ ในการนำมาตราการลดมลพิษทางอากาศมาใช้ในมิติทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- นิรมล สุธรรมกิจ, ศุภฤทธิ ถาวรยุติการต์, อนิณ อรุณเรืองสวัสดิ์, นนท นุชหมอน .(2555).
โครงการการเปรียบเทียบมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมของสมาชิกประชาคมอาเซียน.
กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- CCAC (Climate and Clean Air Coalition). (2014). *Time to act to reduce short-lived climate pollutants*. (2nd ed.). France, United Nations Environment Programme (UNEP): Author.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., ... Van Dorland R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In S., Solomon, D., Qin. , M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K.B., Averyt, ... H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 130-234). Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., & Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *International Journal of Research in Medical Sciences*, 21(65). doi: 10.4103/1735-1995.189646.
- Harrop, D.O. (2002). *Air quality assessment and management a practical guide*. New York: Spon Press.
- Kanakidou, M., Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., Barnes, I., Dentener, F.J., Facchini, M.C., ... Wilson, J. (2005). *Organic aerosol and global climate modelling: a review*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1053-1123. doi.org/10.5194/acp-5-1053-2005
- Larssen, S., Jansen, H., Olsthoorn, X.A., Shah, J. J., Aarhus, K., & Changzhong, F. (2003). A systematic approach to air quality management: examples from the URBAIR cities. In G. McGranahan & F. Murray (Eds.), *Air pollution & health in rapidly developing countries* (pp. 108-128). London: Earthscan.

- Limpaseni W. (2007, Jan-Feb). *Control measures for point sources*. Paper presented at the International Training Course on Air Pollution Management, Faculty of Environmental and Resource Studies, Mahidol University, Nakhorn Pathom, Thailand.
- Onchang, R., Panyakapo, M. & Paopuree, P. (2017). Metal from indoor respirable particulate matter and, its health risk in industrial and rural areas of Thailand. In Japan Society for Environmental Chemistry, *The 26th Symposium on Environmental Chemistry*. (pp. 326-327). Shizuoka: Shizuoka Convention & Arts Center.
- Panyakapo, M. and Onchang, R. (2008). A four-year investigation on wet deposition in western Thailand, *Journal of Environmental Science*, 20(4), 441-448.
- U.S. EPA. (2003). *Principles and practices of air pollution control student manual*. (3rd Ed). Carolina: Research Triangle Park: Author.