บทที่ 3

ผลกระทบของสารมลพิษอากาศพื้นฐานต่อสุขภาพ

3.1 ภาวะมลพิษทางอากาศ (Air Pollution)

หมายถึง สภาวะที่อากาศในบรรยากาศมีสารปนเปื้อนหรือสารเคมีต่าง ๆ ในระดับที่มากเกินกว่าธรรมชาติจะรองรับได้ และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ พืช สัตว์ ตลอดจนระบบนิเวศโดยรวม

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency: U.S. EPA) ได้จัดแบ่งสารมลพิษทางอากาศออกเป็น 2 กลุ่มหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการกำกับควบคุมและจัดการคุณภาพอากาศ เพื่อปกป้องสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยสารมลพิษแต่ละกลุ่มมีลักษณะและผลกระทบที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) สารมลพิษอากาศพื้นฐาน (Criteria Air Pollutants) คือ สารมลพิษที่มีการพบเห็นได้ทั่วไปในอากาศ และสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงในวงกว้าง สารกลุ่มนี้เป็นสารที่ U.S. EPA ได้กำหนด “มาตรฐานคุณภาพอากาศแห่งชาติ” หรือ National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) ขึ้น เพื่อควบคุมระดับความเข้มข้นในบรรยากาศให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

สารในกลุ่มนี้มีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่

1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
2. ตะกั่ว (Pb)
3. โอโซน (O_3)
4. ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)
5. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)
6. ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM10 และ PM2.5)

สารเหล่านี้สามารถส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด และสิ่งแวดล้อม เช่น ทำให้เกิดฝนกรด หรือลดทัศนวิสัยในอากาศ

2) สารมลพิษอากาศอันตราย หรือ สารพิษในอากาศ (Hazardous Air Pollutants – HAPs หรือ Toxic Air Pollutants) คือ สารเคมีที่สามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพในระยะยาว แม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย สารเหล่านี้ไม่ได้ถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้มาตรฐาน NAAQS แต่ได้รับการควบคุมภายใต้ กฎหมาย Clean Air Act เนื่องจากเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง และสามารถก่อให้เกิดโรคเรื้อรัง เช่น มะเร็ง ความผิดปกติของระบบประสาท ระบบสืบพันธุ์ หรือระบบภูมิคุ้มกัน

ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่

1. เบนซีน (Benzene)
2. ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)
3. แอมโมเนีย (Ammonia)
4. ปรอท (Mercury)
5. แคดเมียม (Cadmium)

สารเหล่านี้มักพบในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเคมีภัณฑ์ โรงงานถลุงโลหะ หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางชนิด

3.2 การกำหนดมาตรฐานสารมลพิษทางอากาศในบรรยากาศของประเทศไทย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานถือเป็นกิจกรรมหลักของมนุษย์ในสังคมปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการเดินทาง การผลิตสินค้า หรือการใช้พลังงานในชีวิตประจำวัน ล้วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ทั้งสิ้น ซึ่งก่อให้เกิดสารมลพิษทางอากาศจำนวนมาก โดยเฉพาะกลุ่มสารมลพิษพื้นฐานที่สามารถส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ประเทศไทยเริ่มตระหนักถึงความสำคัญของคุณภาพอากาศมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยได้มีการประกาศใช้มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปอย่างเป็นทางการ ซึ่งกำหนดระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของสารมลพิษทางอากาศชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมและติดตามสถานการณ์คุณภาพอากาศในประเทศ โดยมาตรฐานดังกล่าวได้รับการปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านชนิดของสารมลพิษ วิธีการตรวจวัด และระดับค่ามาตรฐานให้สอดคล้องกับความรู้ทางวิทยาศาสตร์และแนวทางจากองค์การอนามัยโลก (WHO)

ปัจจุบันประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไปไว้สำหรับสารมลพิษหลัก 7 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองรวม (TSP), ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}), ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), โอโซน (O_3) และตะกั่ว (Pb) โดยสารเหล่านี้ถือเป็นสารมลพิษพื้นฐานที่มีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศและสามารถก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อสุขภาพ เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจ หรือโรคหลอดเลือดสมอง

ในปี พ.ศ. 2550 ประเทศไทยได้มีการขยายขอบเขตของมาตรฐานโดยกำหนดระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) เพิ่มเติม ซึ่งถือเป็นกลุ่มสารมลพิษอากาศอันตราย (Hazardous Air Pollutants) ที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งหรือโรคร้ายแรงในระยะยาว โดยเฉพาะในบริเวณที่มีกิจกรรมอุตสาหกรรมหรือการจราจรหนาแน่น

นอกจากนี้ ในช่วงปี พ.ศ. 2565–2566 มีการปรับปรุงค่ามาตรฐานของฝุ่น PM2.5 ให้เข้มงวดยิ่งขึ้น เพื่อลดผลกระทบทางสุขภาพของประชาชน โดยได้ลดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยรายวันของ PM2.5 จาก 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เหลือ 37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายระยะกลางของ WHO นอกจากนี้ รัฐบาลยังอยู่ระหว่างการผลักดันร่างพระราชบัญญัติอากาศสะอาด (Clean Air Act) เพื่อจัดตั้งระบบบริหารจัดการคุณภาพอากาศในระดับประเทศอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศจึงถือเป็นกลไกสำคัญในการป้องกันและควบคุมผลกระทบจากมลพิษทางอากาศ และยังเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการออกนโยบายและมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมในระดับชาติ ทั้งนี้ การดำเนินงานอย่างต่อเนื่องและการปรับปรุงมาตรฐานให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ประชาชนมีคุณภาพชีวิตที่ดีและสามารถอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ (กรมควบคุมมลพิษ)

3.3 ผลกระทบของสารมลพิษอากาศต่อสุขภาพ

มลพิษทางอากาศประกอบด้วยสารหลายชนิดที่มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ในหลายระบบของร่างกาย โดยอาการที่เกิดขึ้นอาจมีตั้งแต่ระดับเล็กน้อย เช่น การระคายเคืองตาและจมูก ไปจนถึงอาการรุนแรง เช่น โรคเรื้อรังในระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจ และโรคมะเร็งปอด

ตัวอย่างสารมลพิษทางอากาศที่มีผลกระทบต่อสุขภาพได้แก่

1) สารออกซิแดนท์จากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล เช่น Peroxyacyl Nitrate (PAN), Acrolein และ Formaldehyde สารกลุ่มนี้มักพบในหมอกควันโฟโตเคมี (Photochemical Smog) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) กับไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ภายใต้แสงแดด PAN และสารในกลุ่มนี้สามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองตา ระคายเคืองทางเดินหายใจ และปวดศีรษะได้ แม้ในความเข้มข้นที่ต่ำ

2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซ CO ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่มีพิษสูง เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะจับกับฮีโมโกลบินในเลือดแทนออกซิเจน ส่งผลให้เกิดภาวะออกซิเจนไม่เพียงพอไปเลี้ยงอวัยวะต่าง ๆ โดยเฉพาะหัวใจและสมอง อาจทำให้หมดสติ หรือถึงขั้นเสียชีวิตในกรณีได้รับในระดับความเข้มข้นสูง

3) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้ดี เมื่อเข้าสู่ทางเดินหายใจจะเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริกซึ่งทำลายเยื่อบุทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคือง ไอ หายใจติดขัด หรือโรคหลอดลมอักเสบ โดยเฉพาะในกลุ่มเสี่ยง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วยโรคหอบหืด

4) สารมลพิษที่กระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินหายใจเป็นด่านแรกที่สัมผัสกับสารมลพิษทางอากาศ การสัมผัสต่อเนื่องกับ SO_2, NO_2 หรือฝุ่นละอองขนาดเล็กอาจทำให้เกิดโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) ปอดอักเสบ หรือหลอดลมอักเสบ และยังเสริมให้อาการหอบหืดรุนแรงขึ้นในผู้ป่วยเดิม

5) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) PM2.5 มีขนาดเล็กมากจนสามารถผ่านเข้าไปในถุงลมปอดและกระแสเลือดได้ ทำให้เกิดการอักเสบเรื้อรังในหลอดเลือด เพิ่มความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดสมอง โรคหัวใจขาดเลือด และมะเร็งปอด ทั้งยังเชื่อมโยงกับปัญหาสุขภาพจิตในระยะยาวอีกด้วย

ผลกระทบของสารมลพิษทางอากาศจึงเป็นปัญหาที่ไม่ควรมองข้าม โดยเฉพาะในสังคมเมืองหรือพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น และมีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษสูง เช่น การเผาไหม้ในที่โล่ง หรือการใช้พลังงานฟอสซิลในภาคอุตสาหกรรม การป้องกันและลดการสัมผัสกับสารมลพิษเหล่านี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งต่อการรักษาสุขภาพของประชาชนในระยะยาว (สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข, 2564)

ผลกระทบของสารมลพิษทางอากาศต่อสุขภาพไม่ได้เกิดขึ้นในลักษณะที่เหมือนกันในทุกคน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งนี้เพราะแต่ละบุคคลมีความไวและความสามารถในการต้านทานสารพิษในอากาศต่างกัน การรับรู้และปฏิกิริยาต่อสารมลพิษจึงแตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของแต่ละคน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างนี้ ได้แก่

1) อายุ เด็กและผู้สูงอายุเป็นกลุ่มที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากระบบภูมิคุ้มกันและระบบทางเดินหายใจของเด็กยังไม่เจริญเต็มที่ ส่วนผู้สูงอายุระบบการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ลดลง ส่งผลให้ร่างกายไม่สามารถป้องกันหรือกำจัดสารพิษได้ดีเท่ากลุ่มวัยอื่น (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)

2) ภาวะสุขภาพก่อนหน้า ผู้ที่มีโรคเรื้อรัง เช่น โรคหอบหืด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) หรือโรคหัวใจ จะได้รับผลกระทบที่รุนแรงกว่าผู้ที่มีสุขภาพดี เนื่องจากระบบทางเดินหายใจและหัวใจของพวกเขามีความอ่อนแอและเสี่ยงต่อการเกิดภาวะแทรกซ้อนเมื่อสัมผัสสารมลพิษ (สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข, 2564)

3) พฤติกรรมและการสัมผัสสารมลพิษ การสูบบุหรี่ การทำงานหรือใช้ชีวิตในพื้นที่ที่มีมลพิษสูง เช่น ใกล้ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น หรือพื้นที่อุตสาหกรรม ก็ส่งผลให้ได้รับสารพิษในปริมาณมากขึ้นและส่งผลเสียต่อสุขภาพได้เร็วกว่า (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2563)

4) ปัจจัยทางพันธุกรรม บางงานวิจัยพบว่าความแตกต่างทางพันธุกรรมส่งผลต่อความไวต่อสารมลพิษ เช่น การมีพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันหรือการเผาผลาญสารพิษในร่างกาย ซึ่งจะมีผลต่อระดับความรุนแรงของอาการที่เกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)

ด้วยเหตุนี้ การวางมาตรการควบคุมมลพิษอากาศและการป้องกันสุขภาพจึงควรเน้นกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วยเรื้อรังเป็นพิเศษ รวมถึงส่งเสริมให้ประชาชนมีความรู้และปรับพฤติกรรมเพื่อลดการสัมผัสสารพิษในชีวิตประจำวันอย่างเหมาะสม

ระบบทางเดินหายใจถือเป็นเส้นทางหลักที่สารมลพิษทางอากาศเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ เนื่องจากทุกคนจำเป็นต้องหายใจเพื่อรับออกซิเจนที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ดังนั้น เมื่อเราหายใจเอาอากาศที่มีสารมลพิษเข้าไป สารเหล่านั้นจึงมีโอกาสเข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินหายใจโดยตรง ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะสั้นและระยะยาวได้ อย่างไรก็ตาม ร่างกายมนุษย์มีระบบทางเดินหายใจที่มีการป้องกันตนเองจากสารมลพิษเหล่านี้ด้วยกลไกหลายประการ เพื่อช่วยลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น กลไกสำคัญ ได้แก่

1) ขนอ่อนและเมือกในทางเดินหายใจ (Mucociliary Clearance) เยื่อบุของทางเดินหายใจจะมีขนอ่อนเคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่องพร้อมกับเมือกที่ทำหน้าที่ดักจับฝุ่นละออง สารเคมี และเชื้อโรคต่าง ๆ เมื่อสารมลพิษถูกดักจับไว้ในเมือก ขนอ่อนจะช่วยเคลื่อนย้ายสารเหล่านี้ออกไปจากปอดผ่านทางการไอหรือการกลืน

2) การตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน (Immune Response) หากสารพิษบางส่วนสามารถทะลุผ่านเยื่อบุทางเดินหายใจเข้าสู่เนื้อเยื่อปอด ระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายจะตอบสนองโดยส่งเซลล์เม็ดเลือดขาวและแมโครฟาจมาทำลายสิ่งแปลกปลอม เพื่อป้องกันการอักเสบและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

3) การปรับขนาดของหลอดลม (Bronchoconstriction and Bronchodilation) ทางเดินหายใจสามารถปรับขนาดหลอดลมเพื่อจำกัดปริมาณสารพิษที่เข้าสู่ปอด แม้ว่าบางครั้งการหดตัวของหลอดลมจะทำให้เกิดอาการหายใจลำบากในผู้ป่วยบางกลุ่ม เช่น ผู้ป่วยโรคหอบหืด แต่ก็เป็นกลไกหนึ่งที่ช่วยลดการสัมผัสสารพิษโดยตรงกับเนื้อเยื่อปอดลึก

แม้จะมีระบบป้องกันเหล่านี้ แต่หากสารมลพิษมีความเข้มข้นสูงหรือได้รับเป็นเวลานาน กลไกเหล่านี้อาจทำงานไม่เพียงพอ ทำให้สารพิษก่อให้เกิดการอักเสบ ความเสียหายของเนื้อเยื่อปอด และส่งผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรงในที่สุด (สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข, 2564)

3.4 ระบบทางเดินหายใจและกลไกการกำจัดสารมลพิษอากาศออกจากระบบทางเดินหายใจ

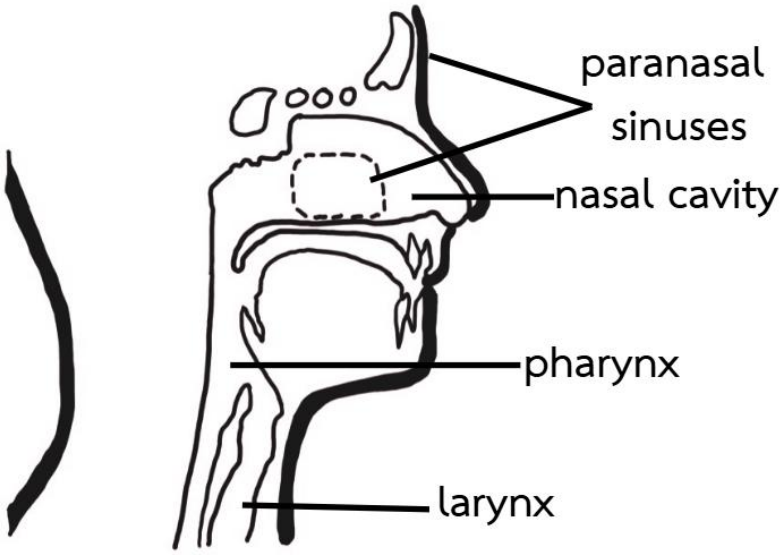
3.4.1 ระบบทางเดินหายใจ (Respiratory System)

เป็นหนึ่งในระบบที่สำคัญที่สุดของร่างกายมนุษย์ ทำหน้าที่หลักในการนำออกซิเจนจากอากาศเข้าสู่ร่างกาย และขับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผาผลาญพลังงานออกจากร่างกาย โดยมีการทำงานร่วมกันของอวัยวะหลายส่วนในลำดับขั้นตอนอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ

3.4.2 อวัยวะในระบบทางเดินหายใจ (Organs of the Respiratory System)

ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ประกอบด้วยอวัยวะหลายส่วนที่ทำงานร่วมกันเป็นลำดับเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างร่างกายกับสิ่งแวดล้อม แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ทางเดินหายใจส่วนต้น (Upper Respiratory Tract) และ ทางเดินหายใจส่วนล่าง (Lower Respiratory Tract) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ทางเดินหายใจส่วนต้น (Upper Respiratory Tract)



ภาพที่ 3.1 ทางเดินหายใจส่วนต้น (Upper Respiratory Tract)

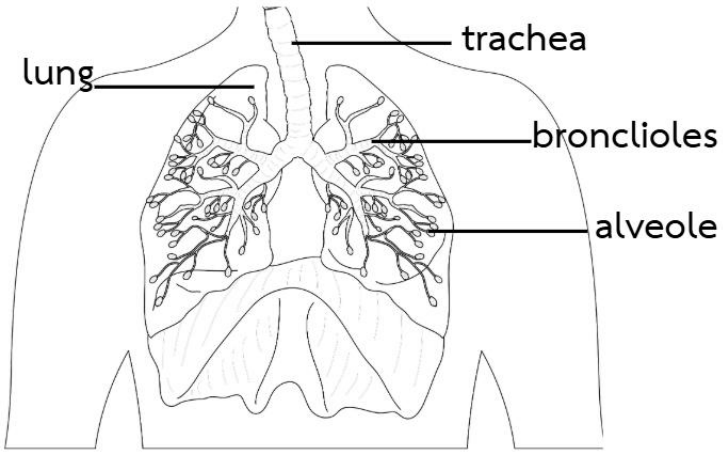
1.1) โพรงจมูก (Nasal Cavity) เป็นช่องว่างภายในกระดูกจมูก มีผนังกั้นกลาง แบ่งออกเป็นสองช่อง บุด้วยเยื่อเมือก (mucosa) ซึ่งมีขนอ่อน (cilia) และต่อมเมือก (mucous glands) ที่ทำหน้าที่กรอง ฝุ่น เชื้อโรค และให้ความชื้นแก่ลมหายใจ มี turbinates (หรือ conchae) เป็นกระดูกโค้งช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสและหมุนเวียนอากาศภายในโพรงจมูกให้ช้าลง เพื่อการกรองและอุ่นอากาศได้ดีขึ้น ทำหน้าที่กรองอากาศ อุ่นอากาศ เพิ่มความชื้น และตรวจจับกลิ่นผ่านเส้นประสาทรับกลิ่น (olfactory nerve)

1.2) ไซนัส (Sinuses) เป็นโพรงอากาศที่อยู่ภายในกระดูกของกะโหลก เช่น กระดูกหน้าผาก (frontal), กระดูกโหนกแก้ม (maxillary), กระดูกเอธมอยด์ (ethmoid), และกระดูกสฟีนอยด์ (sphenoid) ทำหน้าที่ลดน้ำหนักของกะโหลกศีรษะ ช่วยในการสะท้อนเสียง และผลิตเมือกเพื่อหล่อลื่นโพรงจมูก

1.3) คอหอย (Pharynx) เป็นทางเดินร่วมของอากาศและอาหาร แบ่งออกเป็น 3 ส่วน: Nasopharynx: ส่วนหลังโพรงจมูก เชื่อมต่อกับท่อยูสเตเชียน Oropharynx: ส่วนหลังช่องปาก Laryngopharynx: ส่วนล่าง เชื่อมต่อกับหลอดลมและหลอดอาหารทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอากาศสู่กล่องเสียง และช่วยในการออกเสียง

1.4) กล่องเสียง (Larynx) เป็นอวัยวะรูปกรวยสั้น อยู่ระหว่างคอหอยกับหลอดลม ประกอบด้วยกระดูกอ่อนหลายชิ้น เช่น thyroid cartilage, cricoid cartilage, epiglottis มีสายเสียง (vocal cords) ที่ทำให้เกิดเสียงจากการสั่นของอากาศ epiglottis ทำหน้าที่ปิดกั้นทางเดินหายใจขณะกลืนอาหาร เพื่อป้องกันการสำลัก

2) ทางเดินหายใจส่วนล่าง (Lower Respiratory Tract)



ภาพที่ 3.2 ทางเดินหายใจส่วนล่าง (Lower Respiratory Tract)

2.1) หลอดลม (Trachea) เป็นท่อกลวงยาวประมาณ 10-12 เซนติเมตร ตั้งอยู่หน้าหลอดอาหาร และยืดหยุ่นได้ผนังของหลอดลมมี วงกระดูกอ่อนรูปตัว C ที่ช่วยให้ท่อไม่ยุบตัวขณะหายใจ เยื่อบุภายในหลอดลมมีขนอ่อน (cilia) และเซลล์หลั่งเมือก ทำงานร่วมกันในการดักจับและขจัดสิ่งแปลกปลอม

2.2) หลอดลมฝอย (Bronchioles) หลอดลมจะแตกแขนงเป็นสองหลอดไปยังปอดซ้ายและขวา หลอดลมหลักแยกเป็นหลอดลมรอง (secondary) สำหรับแต่ละกลีบของปอด และแยกย่อยต่อเป็นหลอดลมฝอย (tertiary bronchi, bronchioles) หลอดลมฝอยไม่มีวงกระดูกอ่อน มีผนังที่สามารถยุบตัวได้ และมีผลต่อภาวะตีบแคบในโรคหอบหืด

2.3) ถุงลม (Alveoli) เป็นโครงสร้างเล็ก ๆ ที่ปลายสุดของหลอดลมฝอย มีผนังบางเฉียบและล้อมรอบด้วยเส้นเลือดฝอยเป็นที่แลกเปลี่ยนก๊าซ O_2 และ CO_2ระหว่างอากาศกับเลือด เซลล์ในถุงลมมี

2 ชนิดหลัก: Type I pneumocytes: ทำหน้าที่หลักในการแลกเปลี่ยนก๊าซ และType II pneumocytes: สร้างสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ป้องกันถุงลมแฟบ

2.4) ปอด (Lungs) ปอดซ้ายมี 2 กลีบ (lobes) และปอดขวามี 3 กลีบ แยกกันโดยเยื่อหุ้มปอด เนื้อเยื่อปอดมีความยืดหยุ่นสูงเพื่อให้สามารถขยายและหดตัวตามการหายใจ มีเส้นเลือดแดงและดำจากหัวใจเข้าสู่ปอดเพื่อแลกเปลี่ยนก๊าซกับถุงลม

3.4.3 กลไกการกำจัดสารมลพิษอากาศออกจากระบบทางเดินหายใจ

เมื่อมนุษย์หายใจ อากาศจะผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเป็นช่องทางที่ทำให้สารมลพิษในอากาศ เช่น ฝุ่นละออง สารเคมี ไอระเหย และจุลชีพต่าง ๆ เข้าสู่ร่างกายโดยตรง ระบบทางเดินหายใจจึงมีกลไกการป้องกันตนเอง เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ ก่อนที่มันจะเข้าสู่ถุงลมและกระแสเลือด ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อปอดหรืออวัยวะอื่นในร่างกายได้

กลไกการกำจัดมลพิษทางอากาศออกจากระบบทางเดินหายใจสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่

1) กลไกทางกายภาพ (Physical Defense Mechanisms)

1.1) ขนอ่อนและเมือก (Cilia & Mucus) เยื่อบุของทางเดินหายใจตั้งแต่โพรงจมูกถึงหลอดลมเล็กๆ จะมีเซลล์ขนอ่อน (cilia) และเซลล์สร้างเมือก (goblet cells) เมือกจะดักจับฝุ่นละออง แบคทีเรีย และสารเคมีที่ปนเปื้อนในอากาศขนอ่อนจะเคลื่อนไหวตลอดเวลา (ประมาณ 10-20 ครั้ง/วินาที) เพื่อพัดเมือกที่มีสิ่งแปลกปลอมเคลื่อนขึ้นไปยังคอหอย และถูกขับออกจากร่างกายด้วยการไอ จาม หรือกลืนลงกระเพาะอาหาร

1.2) การกรองของโพรงจมูก เส้นขนในโพรงจมูกและความชื้นในเยื่อเมือกช่วยดักจับฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (>10 ไมครอน) ผนังโพรงจมูกมีลักษณะซับซ้อนเป็นร่อง–สัน ช่วยเพิ่มโอกาสให้ฝุ่นตกตะกอน เป็นแนวป้องกันด่านแรกก่อนอากาศเข้าสู่ทางเดินหายใจส่วนล่าง

1.3) การไอและจาม (Cough & Sneeze Reflexes) เมื่อระบบประสาทรับรู้การระคายเคืองจากฝุ่นละอองหรือแก๊สบางชนิด จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไอหรือจาม ปฏิกิริยาเหล่านี้ช่วยขับสิ่งแปลกปลอมออกจากระบบทางเดินหายใจอย่างรวดเร็วและรุนแรง

2) กลไกทางเคมี (Chemical Defense Mechanisms)

2.1) เมือกและเอนไซม์ต้านจุลชีพ เมือกที่บุทางเดินหายใจประกอบด้วยสารเคมีที่มีคุณสมบัติต้านจุลชีพ เช่น Lysozyme, Lactoferrin, และ Defensins สารเหล่านี้ช่วยทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียหรือจับกับเหล็กเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลชีพ

2.2) สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) ร่างกายผลิตสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น กลูตาไธโอน (Glutathione) และ วิตามิน C, E เพื่อกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดจากมลพิษ เช่น โอโซนหรือไนโตรเจนไดออกไซด์ อนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และโปรตีนภายในเซลล์ จึงต้องมีการควบคุมอย่างเข้มงวด

3) กลไกทางชีวภาพ/ภูมิคุ้มกัน (Biological & Immune Mechanisms)

3.1) แมคโครฟาจในถุงลม (Alveolar Macrophages) ถุงลมไม่มีขนอ่อนและเมือก จึงใช้เซลล์แมคโครฟาจเป็นแนวป้องกันหลัก แมคโครฟาจสามารถกลืนกิน (phagocytosis) ฝุ่นละอองขนาดเล็ก จุลชีพ และสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ที่หลุดรอดเข้ามาได้ หลังจากกลืนกินแล้ว แมคโครฟาจจะเคลื่อนย้ายออกไปตามทางเดินหายใจหรือผ่านระบบน้ำเหลือง

3.2) ภูมิคุ้มกันเฉพาะ (Adaptive Immunity) หากมีเชื้อโรคเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ร่างกายจะกระตุ้นเซลล์เม็ดเลือดขาว (T-cells และ B-cells) เพื่อสร้างแอนติบอดี หรือสารภูมิคุ้มกันเฉพาะ เซลล์เหล่านี้จะจำแนกและทำลายสิ่งแปลกปลอมในร่างกายได้อย่างจำเพาะ (กรมอนามัย, 2564)

3.5 ปัจจัยร่วมในการเสริมผลกระทบของสารมลพิษอากาศต่อสุขภาพ

การสัมผัสสารมลพิษทางอากาศอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพในหลายระบบของร่างกาย เช่น ระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด ระบบประสาท และระบบภูมิคุ้มกัน อย่างไรก็ตาม ความรุนแรงของผลกระทบเหล่านี้ไม่เหมือนกันในทุกคน เนื่องจากมี “ปัจจัยร่วม” หลายประการที่ส่งเสริมหรือเพิ่มความไวต่อมลพิษ ในหัวข้อนี้จะขยายรายละเอียดของปัจจัยร่วมแต่ละด้านดังนี้

3.5.1 ปัจจัยด้านชีวภาพ (Biological Factors)

1) อายุ เด็กเล็ก (อายุต่ำกว่า 5 ปี) มีอัตราการหายใจเร็ว และระบบกรองมลพิษยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ได้รับมลพิษเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัว ผู้สูงอายุ (มากกว่า 65 ปี)

มักมีสมรรถภาพของปอดลดลง และเป็นกลุ่มที่มีโรคประจำตัวสะสม เช่น ความดันโลหิตสูง หรือโรคหัวใจ ทำให้ร่างกายมีความเปราะบางมากขึ้น

2) โรคประจำตัว ผู้ที่มี โรคหอบหืด จะมีทางเดินหายใจที่ไวต่อการระคายเคือง หากสูดดมสารระคายเคือง เช่น โอโซน หรือควันจากการเผา อาจทำให้หลอดลมหดตัว และเกิดอาการกำเริบเฉียบพลัน ผู้ป่วยโรคหัวใจหรือความดันโลหิตสูง จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซในเลือด เช่น การได้รับคาร์บอนมอนอกไซด์อาจทำให้กล้ามเนื้อหัวใจขาดออกซิเจน โรคเบาหวานและไตวายเรื้อรังมีการอักเสบของหลอดเลือดเรื้อรังอยู่แล้ว เมื่อได้รับมลพิษเพิ่มเติม อาจทำให้เกิดการอักเสบรุนแรงยิ่งขึ้น

3.5.2 ปัจจัยด้านพฤติกรรม (Behavioral Factors)

1) พฤติกรรมกลางแจ้ง ผู้ที่ทำงานหรือมีกิจกรรมกลางแจ้ง เช่น นักเรียน พนักงานจราจร พ่อค้าแม่ค้าริมถนน หรือแรงงานก่อสร้าง มีความเสี่ยงสูงเนื่องจากสัมผัสอากาศที่มีมลพิษโดยตรงและต่อเนื่องเป็นเวลานาน การออกกำลังกายกลางแจ้ง เช่น การวิ่งหรือปั่นจักรยาน ทำให้ปริมาณการหายใจเพิ่มขึ้นถึง 2–3 เท่า ทำให้สารมลพิษเข้าสู่ร่างกายมากกว่าปกติ

2) การสูบบุหรี่และพฤติกรรมเสี่ยงอื่น ๆ การสูบบุหรี่ส่งผลให้เยื่อบุทางเดินหายใจเสียหาย ขนอ่อนในหลอดลมถูกทำลาย และภูมิคุ้มกันลดลง ทำให้ไม่สามารถขจัดสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ที่ใช้เตาเผาถ่านหรือฟืนในครัวเรือนโดยไม่มีระบบระบายอากาศ มักได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และฝุ่น $PM_{2.5}$ ซึ่งซ้ำเติมผลกระทบของมลพิษภายนอก

3.5.3 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ (Environmental and Climatic Factors)

1) ลักษณะของพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่ใกล้ถนนใหญ่ เขตอุตสาหกรรม หรือจุดเผาขยะจะมีมลพิษอากาศสะสมสูงกว่าพื้นที่อื่น ทำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นได้รับผลกระทบในระยะยาว พื้นที่แออัดที่มีอาคารสูงล้อมรอบ (urban canyon effect) อาจลดการหมุนเวียนของอากาศ ทำให้มลพิษไม่สามารถกระจายตัวได้ดี

2) สภาพภูมิอากาศและฤดูกาล ฤดูหนาวและฤดูแล้ง เป็นช่วงที่ค่าฝุ่นละอองในอากาศสูง เนื่องจากไม่มีฝนชะล้าง และอากาศเย็นทำให้เกิดภาวะอุณหภูมิผกผัน (temperature inversion) ซึ่งดักมลพิษไว้ใกล้พื้นดิน ในภาคเหนือของประเทศไทย ช่วงเดือนธันวาคม–มีนาคมมักเผชิญปัญหาหมอกควันจากการเผาในที่โล่ง ส่งผลให้คุณภาพอากาศเลวร้ายและเพิ่มอัตราการเจ็บป่วยจากโรคระบบทางเดินหายใจ

3.5.4 ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคม (Socioeconomic Factors)

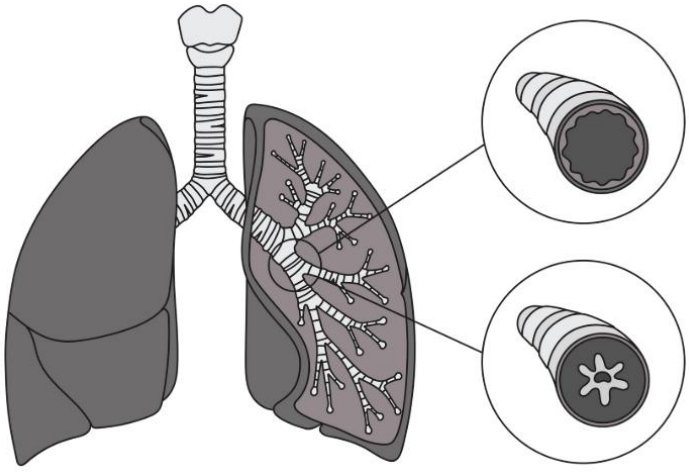
1) ระดับรายได้ ผู้มีรายได้น้อยอาจอาศัยในพื้นที่ที่มีคุณภาพอากาศแย่ เช่น ใกล้แหล่งจราจรหรืออุตสาหกรรม และขาดแคลนเครื่องฟอกอากาศหรือหน้ากากอนามัยที่มีคุณภาพ ยังอาจมีข้อจำกัดในการเข้าถึงบริการด้านสุขภาพ เช่น ไม่มีเงินไปรักษาหรือเข้ารับการวินิจฉัย

2) การศึกษาและการรับรู้ข้อมูล ผู้ที่มีความรู้เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมักสามารถปรับตัวและป้องกันตนเองจากมลพิษทางอากาศได้ดีกว่า เช่น การใช้หน้ากาก N95 การตรวจสอบค่า AQI หรือการอยู่ในอาคารที่ปิดมิดชิด กลุ่มประชากรที่ไม่สามารถเข้าถึงสื่อสารสาธารณะ อาจไม่ทราบถึงความเสี่ยงและมาตรการป้องกัน (กรมอนามัย, 2563)

3.6 โรคทางเดินหายใจที่เกี่ยวข้องกับสารมลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบทางเดินหายใจซึ่งเป็นเส้นทางหลักที่ร่างกายรับอากาศเข้าสู่ปอดเพื่อการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ สารมลพิษในอากาศ เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM10 และ PM2.5), ก๊าซพิษ (เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์, โอโซน), และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) สามารถแทรกซึมเข้าสู่ทางเดินหายใจและส่งผลกระทบทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยเฉพาะในกลุ่มประชากรที่มีความเปราะบาง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคประจำตัวด้านระบบหายใจเดิมอยู่แล้ว

1. หลอดลมอักเสบเรื้อรัง (Chronic Bronchitis)



ภาพที่ 3.3 หลอดลมอักเสบเรื้อรัง (Chronic Bronchitis)

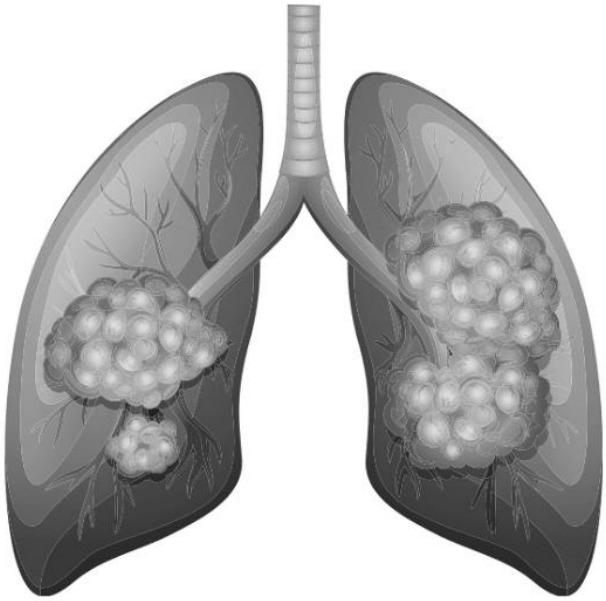
หลอดลมอักเสบเรื้อรังเป็นภาวะการอักเสบของเยื่อบุผิวหลอดลมที่เกิดขึ้นต่อเนื่องในระยะยาว โดยวินิจฉัยจากอาการไอมีเสมหะเป็นเวลาต่อเนื่องอย่างน้อย 3 เดือนในหนึ่งปี และเกิดขึ้นอย่างน้อย 2 ปีติดต่อกัน ภาวะนี้สัมพันธ์กับการสัมผัสสารระคายเคืองเรื้อรัง โดยเฉพาะควันบุหรี่และฝุ่นละอองขนาดเล็ก การสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และฝุ่น PM10 สามารถทำให้ขนกวัดแกว่งที่ทำหน้าที่กำจัดสิ่งแปลกปลอมในหลอดลมถูกทำลาย ส่งผลให้เมือกและสิ่งแปลกปลอมคั่งค้าง นำไปสู่การอักเสบเรื้อรังของหลอดลมและทำให้เกิดภาวะหลอดลมตีบตัน

2. ถุงลมโป่งพอง (Emphysema)

ภาพที่ 3.4 ถุงลมโป่งพอง (Emphysema)

ถุงลมโป่งพองเป็นโรคเรื้อรังที่มีลักษณะเฉพาะคือการทำลายผนังถุงลม (alveolar walls) ส่งผลให้ถุงลมรวมตัวกันเป็นถุงขนาดใหญ่และสูญเสียความยืดหยุ่น การแลกเปลี่ยนก๊าซจึงลดลง ผู้ป่วยมักมีอาการเหนื่อยง่าย หายใจถี่และหอบเหนื่อยแม้ขณะพัก สารพิษในอากาศ โดยเฉพาะฝุ่น PM2.5 และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย มีบทบาทในการกระตุ้นปฏิกิริยาการอักเสบภายในเนื้อเยื่อปอด โดยจะกระตุ้นเม็ดเลือดขาวหลั่งเอนไซม์ที่สามารถทำลายโครงสร้างของผนังถุงลมได้อย่างถาวร

3. มะเร็งปอด (Lung Cancer)



ภาพที่ 3.5 มะเร็งปอด (Lung Cancer)

มะเร็งปอดเป็นโรคที่เกิดจากการกลายพันธุ์ของเซลล์เยื่อบุปอดให้กลายเป็นเซลล์ที่มีการแบ่งตัวอย่างไม่สามารถควบคุมได้ โดยมีปัจจัยกระตุ้นหลักคือการสัมผัสสารก่อมะเร็ง (carcinogens) ในอากาศ เช่น ฝุ่น PM2.5 ซึ่งมีองค์ประกอบของโลหะหนัก สารไฮโดรคาร์บอนชนิดวงแหวน (PAHs) และเบนซีน การสัมผัสในระดับสูงอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เซลล์ในหลอดลมหรือถุงลมเกิดการกลายพันธุ์และพัฒนาเป็นมะเร็งได้ การศึกษาของกรมควบคุมมลพิษ (2566) พบว่าในพื้นที่ที่มีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงต่อเนื่อง มีอัตราการวินิจฉัยโรคมะเร็งปอดสูงกว่าพื้นที่ทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ

4. โรคหอบหืด (Asthma)

โรคหอบหืดเป็นภาวะอักเสบเรื้อรังของหลอดลมขนาดเล็ก ทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อหลอดลมเพิ่มขึ้น การไหลของอากาศจึงถูกจำกัด ผู้ป่วยจะมีอาการไอ หายใจลำบาก แน่นหน้าอก และมีเสียงหวีดขณะหายใจเข้าออก มลพิษทางอากาศโดยเฉพาะโอโซนและไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดอาการกำเริบในผู้ป่วยหอบหืด โดยสารมลพิษเหล่านี้สามารถทำให้เยื่อบุหลอดลมไวต่อสิ่งกระตุ้นมากขึ้น (airway hyperresponsiveness) และทำให้เซลล์อักเสบหลั่งสารที่ก่อให้เกิดอาการได้ง่ายขึ้น

5. การติดเชื้อของระบบหายใจ (Respiratory Infections)

มลพิษทางอากาศยังส่งผลให้ระบบภูมิคุ้มกันของทางเดินหายใจอ่อนแอลง ซึ่งนำไปสู่การติดเชื้อได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะในเด็กและผู้สูงอายุ การสัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ สามารถลดความสามารถของเมือกและขนกวัดแกว่งที่ทำหน้าที่ขจัดเชื้อโรคในทางเดินหายใจ สารพิษในอากาศยังสามารถลดระดับของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ทำหน้าที่ทำลายจุลชีพ ส่งผลให้มีความเสี่ยงสูงต่อการติดเชื้อ เช่น หวัดเรื้อรัง หลอดลมอักเสบเฉียบพลัน ปอดบวม หรือแม้แต่ไวรัสทางเดินหายใจที่รุนแรง เช่น ไวรัส RSV และไข้หวัดใหญ่ (สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข, 2564)

โรคระบบทางเดินหายใจที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศมีความหลากหลายตั้งแต่ภาวะการอักเสบเรื้อรัง การทำลายโครงสร้างของถุงลมปอด จนถึงโรคที่มีความรุนแรงถึงชีวิต เช่น มะเร็งปอด โดยมลพิษทางอากาศไม่ได้ส่งผลเฉพาะในระดับเซลล์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันและสมรรถภาพของปอดโดยรวม ในระยะยาวการสัมผัสมลพิษทางอากาศจึงไม่ใช่เพียงแค่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม แต่เป็นประเด็นด้านสุขภาพที่ควรได้รับการตระหนักและดำเนินมาตรการป้องกันอย่างจริงจัง ทั้งในระดับบุคคล ครอบครัว ชุมชน และระดับนโยบายของรัฐ

3.7 ผลของฝุ่นละอองต่อสุขภาพ

ฝุ่นละอองในอากาศถือเป็นมลพิษทางอากาศที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากสามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านทางการหายใจ และมีอนุภาคขนาดเล็กมากจนสามารถแทรกซึมลึกเข้าไปถึงถุงลมในปอด หรือแม้แต่เข้าสู่กระแสเลือด ฝุ่นละอองไม่ได้เป็นเพียงแค่ผงขนาดเล็กลอยฟุ้งในอากาศ แต่ยังมีองค์ประกอบของสารเคมี โลหะหนัก และสารพิษอื่น ๆ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดผลกระทบทั้งเฉียบพลันและเรื้อรังต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด ระบบประสาท และระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

3.7.1 ประเภทของฝุ่นละอองและความสามารถในการก่อผลกระทบ

ฝุ่นละออง (Particulate Matter: PM) หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ฝุ่นละอองมีหลายขนาดและองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยมีผลโดยตรงต่อระดับการแทรกซึมเข้าสู่ร่างกาย ความรุนแรงของผลกระทบ และระบบอวัยวะที่ได้รับผลกระทบ

การจำแนกฝุ่นละอองตามขนาดอนุภาค องค์การอนามัยโลก (WHO) และหน่วยงานควบคุมมลพิษในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทย ได้จำแนกฝุ่นละอองในอากาศออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ตามขนาดของ

อนุภาค (อนุภาคมีหน่วยเป็นไมครอน หรือไมโครเมตร: μm) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการแทรกเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ

1) ฝุ่นหยาบ (Coarse Particles หรือ PM_{10}) คือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน (ไมโครเมตร) โดยสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจตอนต้น เช่น โพรงจมูก ช่องคอ และหลอดลม ขนาดอนุภาคดังกล่าวแม้ไม่สามารถแทรกซึมลึกไปถึงถุงลมในปอดได้ แต่ก็สามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออ่อนในระบบหายใจได้

แหล่งกำเนิดของฝุ่น PM_{10} ส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับฝุ่นดินและการกระแทก เช่น การก่อสร้าง การขนส่งที่ทำให้ฝุ่นดินฟุ้งกระจาย การเผาไหม้กลางแจ้ง และการทำเหมือง ฝุ่นกลุ่มนี้มักมีองค์ประกอบของซิลิกา อนุภาคแร่ และสารอินทรีย์จากสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบต่อสุขภาพของฝุ่น PM10 คือทำให้เกิดการอักเสบของเยื่อบุโพรงจมูก การระคายเคืองตา คอ และระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ จาม น้ำมูกไหล และหายใจติดขัด โดยเฉพาะในผู้ที่มีภูมิแพ้ โรคหอบหืด หรือเด็กเล็ก

2) ฝุ่นละเอียด (Fine Particles หรือ $PM_{2.5}$) คือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่าฝุ่น PM10 ถึง 4 เท่า โดยมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ประมาณ 20-30 เท่า ฝุ่น $PM_{2.5}$ จึงสามารถแทรกซึมลึกเข้าสู่ถุงลมในปอด และบางส่วนสามารถแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้โดยตรง

แหล่งกำเนิดของฝุ่น $PM_{2.5}$ มักเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซล การเผาชีวมวล (เช่น เผาไร่อ้อย เผาขยะ) ควันบุหรี่ โรงงานอุตสาหกรรม และกิจกรรมในครัวเรือน เช่น การปรุงอาหารที่ใช้เตาถ่านหรือเตาแก๊สที่ไม่มีการระบายอากาศ

ผลกระทบทางสุขภาพของ $PM_{2.5}$ มีความรุนแรงกว่าฝุ่น PM_{10} โดยสามารถก่อให้เกิดการอักเสบเรื้อรังในปอด ทำลายเนื้อเยื่อถุงลม และเพิ่มความเสี่ยงของโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด เช่น โรคหัวใจขาดเลือด ภาวะหัวใจล้มเหลว โรคหลอดเลือดสมอง รวมถึงมะเร็งปอด งานวิจัยในประเทศไทยและระดับโลกยืนยันว่า $PM_{2.5}$ มีความเชื่อมโยงกับการตายก่อนวัยอันควร การคลอดก่อนกำหนด และพัฒนาการล่าช้าในเด็ก

3) ฝุ่นอัลตร้าไฟน์ (Ultrafine Particles หรือ $PM_{0.1}$) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ไม่เกิน 0.1 ไมครอน (หรือ 100 นาโนเมตร) ซึ่งมีขนาดเล็กจนสามารถผ่านเซลล์เยื่อบุถุงลม และเข้าสู่ระบบไหลเวียน

เลือดได้อย่างง่ายดาย อนุภาคเหล่านี้ยังสามารถเดินทางไปยังอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย รวมทั้งสมอง ผ่านแนวกั้นเลือด-สมอง (Blood-brain barrier)

แหล่งกำเนิดของฝุ่นอัลตร้าไฟน์ มักเกี่ยวข้องกับการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ เช่น ควันจากท่อไอเสียรถยนต์ การเผาขยะพลาสติก หรือจากเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง อนุภาค PM0.1 มักมีองค์ประกอบของสารเคมีอันตราย เช่น สารก่อกลายพันธุ์ โลหะหนัก และสารก่อมะเร็งในระดับโมเลกุล

ผลกระทบของฝุ่นอัลตร้าไฟน์นั้นมีความเฉียบพลันและซับซ้อนมากขึ้น เพราะสามารถแทรกซึมเข้าสู่เซลล์โดยตรงและเปลี่ยนแปลงกลไกทางพันธุกรรมในระดับ DNA เช่น การทำลายดีเอ็นเอ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีน การเหนี่ยวนำให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชันในเซลล์ รวมถึงเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคระบบประสาท โรคหัวใจ และมะเร็งในระยะยาว (กรมอนามัย, 2563)

3.8 ผลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสุขภาพ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide: SO_2) เป็นสารประกอบทางเคมีที่สำคัญชนิดหนึ่งในกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทโดยตรงต่อมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเข้มข้น ทั้งจากภาคอุตสาหกรรม พลังงาน และการคมนาคมขนส่ง ก๊าซนี้จัดเป็นมลพิษอากาศพื้นฐาน (Criteria Air Pollutant) ตามการจำแนกขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) และยังเป็นก๊าซที่ประเทศไทยกำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพอากาศแห่งชาติเนื่องจากผลกระทบที่รุนแรงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

ในด้านลักษณะทางกายภาพ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนที่ชัดเจนและแสบจมูก โดยมักถูกอธิบายว่าใกล้เคียงกับกลิ่นของไม้ขีดไฟที่เพิ่งถูกจุด ก๊าซนี้มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ โดยมีความหนาแน่นประมาณ 2.93 กรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ทำให้สามารถสะสมตัวในพื้นที่ต่ำหรือในอาคารที่ปิดทึบได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะที่อากาศไม่ถ่ายเท จุดเดือดของ SO_2 อยู่ที่ประมาณ –10 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ –72.7 องศาเซลเซียส สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิต่ำหรือภายใต้แรงดันสูง และละลายได้ดีในน้ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกลไกการเกิดฝนกรด

ในเชิงโครงสร้างโมเลกุล ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประกอบด้วยอะตอมของกำมะถัน (S) ซึ่งจับกับอะตอมออกซิเจน (O) สองอะตอม โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมมุมป้าน (bent shape) หรือรูปตัว V เนื่องจากอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมของซัลเฟอร์ ทำให้เกิดมุมพันธะประมาณ 119.5 องศา โมเลกุลของ

SO_2 มีขั้วทางไฟฟ้า (polar molecule) ทำให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี โดยเฉพาะกับน้ำและออกซิเจนในบรรยากาศ

ในด้านคุณสมบัติทางเคมี ก๊าซนี้มีความว่องไวสูงต่อปฏิกิริยาในบรรยากาศ หนึ่งในปฏิกิริยาหลักที่สำคัญ คือ การรวมตัวกับน้ำในอากาศหรือในทางเดินหายใจของมนุษย์ ทำให้เกิดกรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อนที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและสามารถก่อให้เกิดการอักเสบในเยื่อบุทางเดินหายใจได้โดยตรง นอกจากนี้ SO_2 ยังสามารถถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนในอากาศ (ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แสงอาทิตย์หรือโลหะหนักในบรรยากาศ) จนกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นกรดแก่ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงและเป็นองค์ประกอบหลักของฝนกรด

ปฏิกิริยาของ SO_2 กับสารอื่น ๆ ในอากาศยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดอนุภาคซัลเฟต (sulfate particles) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ ที่มีผลกระทบร้ายแรงต่อสุขภาพปอดและหัวใจ และยังสามารถแพร่กระจายไปไกลจากแหล่งกำเนิดได้ผ่านกระแสลมในบรรยากาศ การสะสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจึงไม่เพียงส่งผลในพื้นที่เฉพาะเท่านั้น แต่ยังอาจส่งผลกระทบข้ามภูมิภาคอีกด้วย

สำหรับในบริบทของประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศทั่วไปไม่เกิน 300 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (µg/m³) ในช่วงเวลาเฉลี่ย 1 ชั่วโมง และไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในช่วงเวลาเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อควบคุมไม่ให้ระดับ SO_2 เกินค่าที่อาจส่งผลต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะกลุ่มเสี่ยง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคระบบทางเดินหายใจ

เนื่องจาก SO_2 เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี เมื่อสูดดมเข้าไปจะทำปฏิกิริยากับความชื้นภายในทางเดินหายใจชั้นต้น เช่น จมูก คอ หลอดลม และเนื้อเยื่อในระบบหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคืองหรืออักเสบในบริเวณเหล่านี้ ซึ่งแสดงออกในลักษณะอาการต่าง ๆ เช่น แสบจมูก ไอ หายใจไม่สะดวก และแน่นหน้าอก โดยเฉพาะในกลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วยโรคหอบหืด หรือโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจเรื้อรัง

ในกรณีที่ได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณสูงในระยะเวลาสั้น อาจก่อให้เกิดอาการเฉียบพลัน เช่น หายใจถี่ หลอดลมหดตัว และอาจกระตุ้นให้เกิดอาการหอบหืดกำเริบได้ทันที โดยมีรายงานว่าการได้รับ SO_2 ที่ระดับความเข้มข้นเพียง 0.2–0.5 ppm ในอากาศ ก็อาจส่งผลกระทบต่อผู้ป่วยโรคหอบหืดได้อย่างชัดเจน

ในกรณีที่ได้รับในระดับต่ำแต่ต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจก่อให้เกิดการอักเสบเรื้อรังของทางเดินหายใจ ลดประสิทธิภาพของปอดในการแลกเปลี่ยนก๊าซ และเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดโรคปอดเรื้อรัง เช่น หลอดลมอักเสบเรื้อรัง หรือโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) อีกทั้งยังพบว่าการได้รับ SO_2 อย่างต่อเนื่องในระยะยาวสามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดหัวใจ โดยทำให้เกิดการอักเสบในระบบหลอดเลือดและเพิ่มภาวะเครียดออกซิเดชันในร่างกาย

นอกจากนี้ ยังมีข้อมูลทางระบาดวิทยาจากหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยที่สนับสนุนความสัมพันธ์ระหว่างระดับของ SO_2 ในอากาศกับอัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลจากโรคระบบหายใจ โดยเฉพาะในช่วงที่ระดับมลพิษทางอากาศสูง เช่น ในฤดูแล้งที่มีการเผาในที่โล่ง หรือในพื้นที่เขตอุตสาหกรรม

ในระดับเซลล์ มีหลักฐานว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถกระตุ้นกระบวนการอักเสบผ่านกลไกของไซโตไคน์และอนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species: ROS) ซึ่งนำไปสู่การทำลายเซลล์เยื่อบุทางเดินหายใจและกระบวนการซ่อมแซมที่ผิดปกติ ส่งผลให้เกิดพยาธิสภาพเรื้อรังของเนื้อเยื่อในปอด

จากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่มีศักยภาพสูงในการก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ โดยเฉพาะในระบบทางเดินหายใจ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ภาครัฐจะต้องมีการกำหนดมาตรการในการควบคุมและตรวจวัดระดับของก๊าซนี้อย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนในระยะสั้นและระยะยาว (กรมอนามัย, 2564)

3.9 ผลของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อสุขภาพ

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide: NO_2) เป็นหนึ่งในก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่สำคัญที่สุดในแง่ของมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะในเขตเมืองและบริเวณอุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจำนวนมาก ก๊าซชนิดนี้มักเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในอุณหภูมิสูง เช่น ในเครื่องยนต์ของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และเตาเผาทั่วไป

ในด้านลักษณะทางกายภาพ ไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นฉุนรุนแรงที่สามารถระคายเคืองได้แม้ในความเข้มข้นต่ำ มีมวลโมเลกุลประมาณ 46 กรัมต่อโมล และมีความหนาแน่นประมาณ 1.88 กรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 0°C และความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งหนักกว่าอากาศเล็กน้อย ทำให้สามารถสะสมในพื้นที่ต่ำหรือที่อากาศไม่ถ่ายเทได้ง่าย ก๊าซนี้มีจุดเดือดประมาณ 21°C และจุดหลอมเหลวที่ประมาณ –11°C ซึ่งหมายความว่าในสภาพอุณหภูมิห้อง NO_2 สามารถมีอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวได้ ทั้งนี้ NO_2 ยังสามารถเกิดภาวะสมดุลกับไนโตรเจนไตรออกไซด์ (N_2O_4) ซึ่งไม่มีสี โดยที่ NO_2 จะรวมตัวกันเป็น N_2O_4 ที่

อุณหภูมิต่ำ และจะแตกกลับเป็น NO_2 ที่อุณหภูมิสูง กระบวนการนี้เรียกว่า dimerization equilibrium ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของสารชนิดนี้

ในด้านลักษณะทางเคมี NO_2 เป็นโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว ทำให้มีความว่องไวทางเคมีสูง สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอื่นได้อย่างง่ายดาย โดยเฉพาะกับน้ำ ซึ่งจะเกิดเป็นกรดไนไตรก (HNO_2) และกรดไนตริก (HNO_3) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของฝนกรด (acid rain) ที่ส่งผลต่อดิน น้ำ พืช และสิ่งก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อละลายลงในหยดน้ำในชั้นบรรยากาศ จะเกิดสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

นอกจากนี้ NO_2 ยังเป็นสารตั้งต้น (precursor) สำคัญในการเกิดโอโซนระดับพื้นดิน (ground-level ozone) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ภายใต้แสงอาทิตย์ ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นส่วนหนึ่งของ photochemical smog หรือหมอกควันจากปฏิกิริยาแสง ซึ่งพบมากในเมืองใหญ่ที่มีการจราจรหนาแน่น ปรากฏการณ์นี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

ความสามารถของ NO_2 ในการซึมผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์นั้นเป็นประเด็นสำคัญด้านสาธารณสุข เนื่องจากก๊าซนี้สามารถเข้าไปถึงถุงลมปอด และกระตุ้นกระบวนการอักเสบของเยื่อบุทางเดินหายใจ มีการศึกษาทางคลินิกและระบาดวิทยาจำนวนมากที่ยืนยันว่า NO_2 มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดหรือกำเริบของโรคทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด หลอดลมอักเสบเรื้อรัง และโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) โดยเฉพาะในเด็กเล็กและผู้สูงอายุ รวมถึงผู้ที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่อง

ในด้านความปลอดภัย NO_2 ถือเป็นก๊าซพิษที่ต้องระวังอย่างยิ่ง มีระดับค่าความเข้มข้นที่สามารถทนได้ในระยะเวลาสั้น (Short-Term Exposure Limit: STEL) และระยะยาว (Time Weighted Average: TWA) ที่จำกัดชัดเจนโดยหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย ซึ่งกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศเฉลี่ย 1 ชั่วโมงไม่เกิน 320 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเฉลี่ย 24 ชั่วโมงไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

เมื่อสูดดม NO_2 เข้าไป ก๊าซนี้จะผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง และสามารถทำให้เยื่อบุหลอดลมเกิดการระคายเคือง นำไปสู่การอักเสบของทางเดินหายใจ โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีโรคหอบหืด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) หรือโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง อาการที่พบได้ทั่วไปจากการสัมผัส NO_2 คือ ไอ หายใจหอบ หายใจไม่สะดวก แน่นหน้าอก และอาจมีเสมหะเพิ่มขึ้นในบางราย การสัมผัสในระดับที่สูงขึ้น

อาจทำให้เกิดการหดเกร็งของกล้ามเนื้อหลอดลม (bronchoconstriction) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการกำเริบของโรคหอบหืด

นอกจากนี้ มีงานวิจัยทางระบาดวิทยาจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่า การได้รับ NO_2 อย่างต่อเนื่องในระดับต่ำสามารถลดสมรรถภาพการทำงานของปอด โดยเฉพาะในเด็ก ซึ่งอยู่ในวัยที่ระบบหายใจกำลังเจริญเติบโต หากได้รับ NO_2 อย่างต่อเนื่องในระยะยาว อาจนำไปสู่ความผิดปกติของโครงสร้างเนื้อเยื่อปอดและเพิ่มความไวต่อการติดเชื้อของระบบหายใจ เช่น โรคปอดบวม และหลอดลมอักเสบเฉียบพลัน ในกลุ่มผู้ใหญ่ โดยเฉพาะผู้สูงอายุที่มีโรคประจำตัวทางหัวใจและหลอดเลือด การสัมผัส NO_2 ยังมีความเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดภาวะหัวใจขาดเลือด กล้ามเนื้อหัวใจตายเฉียบพลัน และโรคหลอดเลือดสมอง (stroke) จากกลไกการอักเสบในระดับเซลล์และความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ที่กระตุ้นโดย NO_2 ซึ่งมีผลต่อเยื่อบุหลอดเลือดและระบบไหลเวียนโลหิต

องค์การอนามัยโลก (WHO) และหน่วยงานด้านสาธารณสุขของหลายประเทศจึงได้กำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของ NO_2 ที่สามารถยอมรับได้ในอากาศ เช่น ประเทศไทยกำหนดค่ามาตรฐาน NO_2 ในบรรยากาศทั่วไปไว้ที่ไม่เกิน 320 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เฉลี่ย 1 ชั่วโมง) และไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เฉลี่ย 24 ชั่วโมง) เพื่อควบคุมและลดผลกระทบทางสุขภาพจากสารมลพิษชนิดนี้ (World Health Organization, 2021)

3.10 ผลของก๊าซโอโซนต่อสุขภาพ

โอโซน (Ozone: O_3) เป็นรูปแบบของก๊าซออกซิเจนที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนจำนวนสามอะตอม รวมกันเป็นโมเลกุลเดียว มีสูตรเคมีคือ O_3 ซึ่งแตกต่างจากออกซิเจนในบรรยากาศทั่วไปที่อยู่ในรูปของ O_2 (สองอะตอมของออกซิเจน) โอโซนจัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซออกซิแดนท์ (oxidants) ที่มีความว่องไวทางเคมีสูง มีบทบาทสำคัญทั้งในด้านปกป้องชีวิตบนโลก และในฐานะของมลพิษอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ในด้านลักษณะทางกายภาพ โอโซนเป็นก๊าซไม่มีสีในสภาพที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่จะปรากฏเป็นสีฟ้าอ่อนในรูปของของเหลวหรือของแข็ง มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัวซึ่งสามารถรับรู้ได้แม้ในระดับความเข้มข้นต่ำมาก (ประมาณ 0.01 ppm) กลิ่นของโอโซนมักถูกอธิบายว่า “สะอาดแบบโลหะ” และมักพบหลังพายุฟ้าคะนองหรือในบริเวณที่มีการปล่อยประจุไฟฟ้าแรงสูง ก๊าซโอโซนมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 48 กรัมต่อโมล และมีจุดเดือดที่ประมาณ –112°C และจุดหลอมเหลวที่ –192°C ทำให้ในธรรมชาติ โอโซนอยู่ในรูปก๊าซเกือบตลอดเวลา

ในด้านลักษณะทางเคมี โอโซนเป็นสารที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงมาก เนื่องจากมีพันธะระหว่างอะตอมที่ไม่เสถียร จึงสามารถแตกตัวได้ง่ายและทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และอนินทรีย์หลากหลายชนิด ตัวอย่างเช่น โอโซนสามารถทำลายพันธะคู่ของโมเลกุลอินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรุนแรง จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำ การฆ่าเชื้อ และในกระบวนการฟอกสี

โอโซนในบรรยากาศสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นหลัก คือ

1) โอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratospheric Ozone) โอโซนส่วนใหญ่ของโลก (~90%) อยู่ในชั้นบรรยากาศระดับสูงที่เรียกว่า "ชั้นสตราโตสเฟียร์" ซึ่งอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 10–50 กิโลเมตร โอโซนชั้นนี้มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตเพราะทำหน้าที่กรองรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) จากดวงอาทิตย์ โดยเฉพาะรังสี UV-B และ UV-C ซึ่งเป็นอันตรายต่อเซลล์สิ่งมีชีวิต การสลายตัวของโอโซนชั้นนี้โดยสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) เป็นสาเหตุของ "รูโหว่โอโซน" (ozone hole) ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก

2) โอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์ (Tropospheric Ozone) โอโซนในชั้นบรรยากาศระดับต่ำ (ต่ำกว่า 10 กิโลเมตร) เรียกว่าโอโซนระดับพื้นดิน หรือ Ground-level Ozone ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของปฏิกิริยาเคมีระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) กับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ภายใต้แสงแดด ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Photochemical Reaction และเป็นองค์ประกอบสำคัญของหมอกควันแบบโฟโตเคมี (Photochemical Smog) โอโซนในระดับนี้จัดเป็นมลพิษทางอากาศที่สำคัญ เนื่องจากเป็นก๊าซออกซิแดนท์ที่สามารถทำอันตรายต่อระบบหายใจ พืช และวัสดุต่าง ๆ ได้

โอโซนมีอายุการสลายตัวสั้นในบรรยากาศ (ประมาณ 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมงในสภาพธรรมชาติ) และสามารถสลายตัวได้โดยแสงอาทิตย์หรือการสัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุ โอโซนจึงไม่มีการสะสมในสิ่งแวดล้อมในระยะยาว แต่การสะสมแบบเฉียบพลันในพื้นที่ที่มีการปล่อยมลพิษมาก เช่น ในเขตเมือง หรือระหว่างสภาพอากาศร้อนและไม่มีลม อาจทำให้เกิดค่าความเข้มข้นของโอโซนที่สูงเกินมาตรฐาน และก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอย่างรุนแรง

เมื่อโอโซนเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเนื้อเยื่อเยื่อเมือกในทางเดินหายใจ ส่งผลให้เกิดการระคายเคือง อักเสบ และความเสียหายต่อเซลล์เยื่อบุผิว โดยผลกระทบที่พบได้ชัดเจน เช่น อาการไอ เจ็บคอ หายใจลำบาก หอบหืดกำเริบ และอาจเกิดภาวะหลอดลมอักเสบเฉียบพลัน นอกจากนี้โอโซนยังส่งผลให้การทำงานของปอดลดลง ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์แย่ลง กลุ่มผู้มีความเสี่ยงสูง ได้แก่ เด็กเล็ก ผู้สูงอายุ ผู้ที่มีโรคประจำตัวเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหอบหืด โรคถุงลมโป่งพอง และผู้ที่ทำงานหรือออกกำลังกายในที่ที่มีมลพิษสูง โอโซน

อาจทำให้อาการของโรครุนแรงขึ้นและเพิ่มโอกาสในการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล นอกจากนี้ยังพบว่าการสัมผัสโอโซนในระยะยาวเกี่ยวข้องกับการพัฒนาของโรคปอดเรื้อรัง และอาจเพิ่มความเสี่ยงของโรคหัวใจและหลอดเลือด เนื่องจากการอักเสบและความเครียดออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในระดับเซลล์

งานวิจัยหลายฉบับชี้ให้เห็นว่า การสัมผัสโอโซนที่ความเข้มข้นสูงในระยะสั้น อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพในระบบทางเดินหายใจ เช่น การเพิ่มขึ้นของสารอักเสบในปอด การบวมของเยื่อบุผิว และการลดประสิทธิภาพการทำงานของปอด ขณะที่การสัมผัสในระยะยาวส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของระบบทางเดินหายใจและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร (สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข, 2563)

3.11 ผลของตะกั่วต่อสุขภาพ

ตะกั่ว (Lead, Pb) เป็นธาตุโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีหมายเลขอะตอม 82 อยู่ในหมู่โลหะทรานซิชัน (Transition Metals) และจัดอยู่ในกลุ่ม 14 ของตารางธาตุ ซึ่งเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสูง มีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เฉพาะตัว โดยตะกั่วเป็นโลหะสีเทาเงินอมฟ้า มีความนุ่มและยืดหยุ่นสูง สามารถตัดและขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมและการผลิตต่าง ๆ มานานหลายร้อยปี

จากลักษณะทางกายภาพ ตะกั่วมีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 327.5 องศาเซลเซียส และจุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 1749 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของตะกั่วอยู่ที่ประมาณ 11.34 กรัมต่อเซนติเมตร^3 ซึ่งสูงกว่าโลหะทั่วไปหลายเท่า ส่งผลให้ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับปริมาตรเท่ากัน นอกจากนี้ตะกั่วยังมีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน

ในด้านลักษณะทางเคมี ตะกั่วเป็นโลหะที่มีสถานะออกซิเดชันหลักคือ +2 และ +4 แต่สถานะ +2 เป็นสถานะที่เสถียรและพบมากที่สุดในสารประกอบของตะกั่ว ตะกั่วมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ เช่น กรด ซัลไฟด์ และออกซิเจน ทำให้เกิดสารประกอบหลากหลายรูปแบบ เช่น ตะกั่วออกไซด์ (PbO), ตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) และตะกั่วคาร์บอเนต ($PbCO_3$) ซึ่งล้วนมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมและวิธีการเกิดสารเหล่านั้น

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตะกั่วยังส่งผลต่อความเป็นพิษและการแพร่กระจายของตะกั่วในธรรมชาติ ตะกั่วมักถูกปล่อยออกมาในรูปของฝุ่นละออง หรือสารละลายในน้ำ ซึ่งสามารถสะสมในสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ง่าย นอกจากนี้ ตะกั่วยังมีความเสถียรต่ำต่อการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีในร่างกายมนุษย์ โดยสามารถจับกับโปรตีนและสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษและทำลายระบบประสาท รวมถึงระบบต่าง ๆ ในร่างกาย

ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้หลัก ๆ ผ่านการสูดดมฝุ่นละอองที่มีตะกั่วปนเปื้อน และการรับประทานอาหารหรือน้ำที่มีสารตะกั่วเจือปน เมื่อเข้าสู่ร่างกาย ตะกั่วจะดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดและถูกลำเลียงไปสะสมในอวัยวะสำคัญต่าง ๆ เช่น กระดูก ฟัน ตับ ไต และสมอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระดูกซึ่งทำหน้าที่เก็บสะสมตะกั่วในระยะยาว และสามารถปล่อยตะกั่วกลับสู่กระแสเลือดได้เมื่อร่างกายต้องการแคลเซียมหรืออยู่ในสภาวะบางอย่าง เช่น การตั้งครรภ์

ผลกระทบต่อระบบประสาท หนึ่งในผลกระทบรุนแรงและเป็นที่กังวลมากที่สุดของตะกั่วคือผลต่อระบบประสาท โดยเฉพาะในเด็กที่มีการพัฒนาสมองอย่างต่อเนื่อง การได้รับตะกั่วในระดับต่ำเรื้อรังจะส่งผลกระทบต่อพัฒนาการทางสมองและความสามารถในการเรียนรู้ ทำให้เกิดความบกพร่องทางสติปัญญา (IQ ต่ำลง) ความผิดปกติทางพฤติกรรม เช่น สมาธิสั้น หรือปัญหาด้านการสื่อสารและอารมณ์ ในผู้ใหญ่ การได้รับตะกั่วมากเกินไปอาจนำไปสู่ภาวะสมองเสื่อม ความจำเสื่อม อาการชัก และความผิดปกติของระบบประสาทส่วนปลาย

ผลต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด การสัมผัสตะกั่วมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มความดันโลหิตสูงและความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด เนื่องจากตะกั่วมีผลต่อการทำงานของหลอดเลือดและสามารถกระตุ้นให้เกิดภาวะอักเสบของหลอดเลือด รวมทั้งเพิ่มความเครียดจากอนุมูลอิสระในเซลล์ผนังหลอดเลือด ส่งผลให้เส้นเลือดแข็งตัวและความดันโลหิตเพิ่มสูงขึ้น เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผู้ได้รับตะกั่วมีโอกาสเสี่ยงเป็นโรคหัวใจวายและโรคหลอดเลือดสมองสูงขึ้น

ผลกระทบต่อระบบไต ตะกั่วยังส่งผลเสียต่อไตโดยตรง ทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อไตและลดประสิทธิภาพการกรองของไต ซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคไตเรื้อรังในระยะยาวได้ โดยผู้ที่ได้รับตะกั่วอย่างต่อเนื่องอาจพบภาวะไตวายและการเสื่อมสภาพของการทำงานของไตได้

ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ในกรณีที่มีการสูดดมตะกั่วในรูปฝุ่นละอองขนาดเล็ก ตะกั่วสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองเยื่อบุทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ เจ็บคอ และอักเสบของทางเดินหายใจ ซึ่งเป็นปัจจัยเพิ่มความเสี่ยงในการติดเชื้อทางเดินหายใจ รวมทั้งอาจเพิ่มความรุนแรงของโรคหอบหืดหรือโรคปอดเรื้อรัง

ผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์และการตั้งครรภ์ การได้รับตะกั่วในหญิงตั้งครรภ์เป็นสิ่งที่น่ากังวลอย่างมาก เนื่องจากตะกั่วสามารถผ่านรกเข้าสู่ทารกในครรภ์ ส่งผลให้ทารกมีพัฒนาการผิดปกติ น้ำหนักแรกเกิดต่ำและเสี่ยงต่อการแท้งบุตร นอกจากนี้ ตะกั่วยังสามารถลดสมรรถภาพทางเพศและทำลายระบบสืบพันธุ์ในทั้งชายและหญิงได้

เนื่องจากตะกั่วมีผลเสียต่อสุขภาพอย่างรุนแรงและสะสมในร่างกายได้ยาวนาน การป้องกันไม่ให้สัมผัสตะกั่วตั้งแต่ต้นจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุด ซึ่งรวมถึงการควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษ เช่น การลดการใช้สีที่มีตะกั่ว การจัดการของเสียจากอุตสาหกรรม และการตรวจสอบคุณภาพน้ำและอาหารอย่างเคร่งครัด โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

3.12 การป้องกันและลดผลกระทบของสารมลพิษอากาศต่อสุขภาพ

การป้องกันและลดผลกระทบของสารมลพิษอากาศต่อสุขภาพเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสารมลพิษเหล่านี้ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด รวมถึงระบบอื่น ๆ ของร่างกาย มาตรการป้องกันจึงต้องดำเนินการในหลายระดับ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1) ในระดับบุคคล การหลีกเลี่ยงการสัมผัสสารมลพิษในช่วงที่ความเข้มข้นสูง เช่น ช่วงเวลาที่มีดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) อยู่ในระดับไม่ปลอดภัย ถือเป็นวิธีแรกที่ช่วยลดความเสี่ยงได้อย่างมาก นอกจากนี้ การใช้หน้ากากอนามัยชนิดที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น หน้ากาก N95 สามารถกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ดี ช่วยป้องกันไม่ให้สารพิษเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการปรับปรุงระบบระบายอากาศภายในบ้านด้วยการเปิดหน้าต่างหรือใช้เครื่องฟอกอากาศ ก็เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการสะสมของฝุ่นและสารมลพิษในอากาศภายในอาคารได้เป็นอย่างดี สำหรับผู้ที่สูบบุหรี่ ควรเลิกสูบและหลีกเลี่ยงการสัมผัสควันบุหรี่ เนื่องจากควันบุหรี่เป็นแหล่งรวมสารพิษที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพในระยะยาว

2) ในระดับชุมชนและสถานที่ทำงาน การส่งเสริมการปลูกต้นไม้และเพิ่มพื้นที่สีเขียวเป็นมาตรการสำคัญที่ช่วยกรองฝุ่นละอองและดูดซับก๊าซพิษบางชนิด ส่งผลให้คุณภาพอากาศดีขึ้น การควบคุมและลดการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมและยานพาหนะ มีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณสารมลพิษในอากาศ การจัดการขยะและการเผาขยะอย่างถูกวิธีเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปล่อยสารพิษ เช่น ฝุ่นละอองและก๊าซอันตรายออกสู่บรรยากาศ รวมถึงการจัดระบบแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในชุมชน เพื่อให้ประชาชนได้รับทราบข้อมูลและสามารถเตรียมตัวป้องกันเมื่อคุณภาพอากาศลดลง

3) ในระดับนโยบายและภาครัฐ การกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศและมาตรฐานการปล่อยมลพิษที่เข้มงวดเป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมสารมลพิษอากาศให้ไม่เกินระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ การส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดและพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารพิษอื่น ๆ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ภาครัฐยังควรสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น รถไฟฟ้าและรถประจำทางที่ใช้พลังงานสะอาด เพื่อลดการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ นอกจากนี้ การส่งเสริมการวิจัยและการศึกษาด้านมลพิษอากาศและสุขภาพ จะ

ช่วยพัฒนาแนวทางแก้ไขและมาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมทั้งการสร้างความตระหนักรู้และมีส่วนร่วมของประชาชนผ่านการรณรงค์เผยแพร่ความรู้ ถือเป็นการสร้างพื้นฐานที่มั่นคงให้สังคมสามารถร่วมกันแก้ไขปัญหาได้อย่างยั่งยืน (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2564)

3.13 ข้อมูลสถิติและกรณีศึกษาผลกระทบของมลพิษอากาศในประเทศไทย

ประเทศไทยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเผชิญกับปัญหามลพิษทางอากาศในระดับรุนแรง โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและก่อให้เกิดโรคร้ายแรงจำนวนมาก เช่น โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหลอดเลือดหัวใจ มะเร็งปอด และโรคระบบประสาท ปัญหานี้ไม่ได้กระจุกอยู่เฉพาะในพื้นที่เมืองใหญ่ แต่ยังแผ่ขยายไปยังภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศ โดยเฉพาะภาคเหนือซึ่งได้รับผลกระทบจากการเผาในที่โล่งอย่างหนักในช่วงฤดูแล้ง

ในปีงบประมาณ 2567 (ตุลาคม 2566 – กันยายน 2567) กระทรวงสาธารณสุขรายงานว่า มีผู้ป่วยเข้ารับการรักษาโรคที่เกี่ยวข้องกับฝุ่น PM2.5 รวมกว่า 1 ล้านรายทั่วประเทศ โดยกลุ่มโรคที่พบมากที่สุด ได้แก่ ผื่นแพ้ผิวหนัง (Dermatitis), เยื่อบุตาอักเสบ, หอบหืด, โรคหัวใจขาดเลือดเฉียบพลัน และโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) ค่าใช้จ่ายโดยรวมจากการรักษาโรคที่เกี่ยวข้องกับฝุ่นพิษอยู่ในระดับสูงเฉลี่ยถึงหลายพันล้านบาทต่อปี โดยบางโรคมีค่าใช้จ่ายต่อรายสูงถึงเกือบ 200,000 บาท เช่น มะเร็งปอด ซึ่งเป็นผลระยะยาวของการสัมผัสมลพิษอากาศอย่างต่อเนื่อง

ในพื้นที่ภาคเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ มีการบันทึกคุณภาพอากาศที่เลวร้ายที่สุดในโลกหลายครั้งในช่วงต้นปี 2025 โดยค่าฝุ่น PM2.5 สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลกถึง 20 เท่า มีการรายงานว่าบางอำเภอ เช่น อำเภอเชียงดาว มีอัตราการเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้นจากโรคหัวใจและทางเดินหายใจ โดยกลุ่มเสี่ยงที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือผู้สูงอายุ เด็กเล็ก และผู้มีโรคประจำตัว ไม่เพียงแต่ผลกระทบต่อสุขภาพ ปัญหามลพิษอากาศยังสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล โดยรายงานจากสถาบันวิจัยเศรษฐกิจเพื่อสังคม (Puey Ungphakorn Institute) ในปี 2024 ประเมินว่า มลพิษทางอากาศจาก PM2.5 และ PM10 สร้างภาระทางเศรษฐกิจให้กับกรุงเทพมหานครมากกว่า 436,000 ล้านบาทต่อปี และในจังหวัดใหญ่ ๆ เช่น ชลบุรี นครราชสีมา เชียงใหม่ และขอนแก่น ต่างก็มีความเสียหายสะสมในระดับหมื่นล้านบาทต่อปีเช่นกัน

ในระดับชุมชน งานวิจัยในจังหวัดเชียงใหม่พบว่า ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับฝุ่นพิษส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการป้องกันและการเข้ารับการรักษา พบว่าผู้ที่มีความรู้ด้านสุขภาพเกี่ยวกับมลพิษอากาศน้อยมักจะมีพฤติกรรมการป้องกันตนเองที่ไม่เหมาะสม เช่น ไม่สวมหน้ากากอนามัย หรือเลี่ยงการเข้ารับการรักษาจากแพทย์

นอกจากนี้ องค์การยูนิเซฟยังระบุว่า มีเด็กไทยกว่า 13.6 ล้านคนที่มีความเสี่ยงสูงจากการสัมผัสฝุ่น PM2.5 โดยเฉพาะเด็กที่อยู่ในเมืองใหญ่หรือใกล้พื้นที่อุตสาหกรรม ซึ่งอาจส่งผลต่อพัฒนาการทางสมอง ระบบหายใจ และภูมิคุ้มกันของร่างกาย ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

กรณีศึกษาที่เกิดขึ้นในจังหวัดสมุทรสาครก็แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมหนาแน่น เช่น โรงงานหลอมโลหะ โรงงานพลาสติก หรือโรงงานเคมี ล้วนเป็นแหล่งปล่อยมลพิษหลักในพื้นที่ โดยรายงานจากกรมควบคุมมลพิษระบุว่า สารอันตรายที่พบในอากาศ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์ และสารโลหะหนักในเขตนิคมอุตสาหกรรมของจังหวัดนี้อยู่ในระดับเกินมาตรฐานเกือบตลอดทั้งปี

จากข้อมูลข้างต้นสะท้อนชัดเจนว่าปัญหามลพิษทางอากาศในประเทศไทยไม่เพียงเป็นภัยคุกคามทางสิ่งแวดล้อม แต่ยังเป็นวิกฤตด้านสาธารณสุขและเศรษฐกิจที่ต้องการการจัดการอย่างจริงจัง การบูรณาการข้อมูลทางวิชาการกับนโยบายภาครัฐ และการสร้างความตระหนักรู้ในระดับชุมชนจะเป็นกลไกสำคัญในการลดผลกระทบและป้องกันปัญหาในระยะยาว (กระทรวงสาธารณสุข, 2567)

3.14 สรุป

สารมลพิษอากาศพื้นฐาน เช่น ฝุ่นละออง PM10 และ PM2.5 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ โอโซน และตะกั่ว ล้วนส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ในหลากหลายรูปแบบ ทั้งระยะสั้นและระยะยาว โดยระบบทางเดินหายใจเป็นด่านแรกที่ได้รับผลกระทบ เนื่องจากเป็นช่องทางหลักในการรับมลพิษเข้าสู่ร่างกาย มลพิษเหล่านี้สามารถทำให้เกิดอาการเฉียบพลัน เช่น การระคายเคืองตา จมูก และคอ อาการไอ หายใจลำบาก ไปจนถึงโรคเรื้อรัง เช่น หลอดลมอักเสบ ถุงลมโป่งพอง โรคหอบหืด มะเร็งปอด และโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยเฉพาะกลุ่มประชากรเปราะบาง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้มีโรคประจำตัว จะได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าคนทั่วไป

จากข้อมูลเชิงสถิติในประเทศไทยพบว่ามีจำนวนผู้ป่วยจากผลกระทบของฝุ่น PM2.5 เพิ่มสูงขึ้นทุกปี และภาระค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพและเศรษฐกิจมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความรู้แก่ประชาชน ส่งเสริมพฤติกรรมป้องกันตนเอง และผลักดันมาตรการลดมลพิษอย่างเป็นระบบ เพื่อปกป้องสุขภาพของประชาชนในระยะยาว

3.13 คำถามท้ายบท

1. อธิบายความแตกต่างระหว่างฝุ่นละอองขนาด PM_{10}, $PM_{2.5}$ และ $PM_{0.1}$ ในแง่ของแหล่งกำเนิดและผลกระทบต่อสุขภาพ

2. วิเคราะห์กลไกที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์

3. อธิบายว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) สามารถเพิ่มความเสี่ยงของโรคทางเดินหายใจได้อย่างไร

4. บรรยายถึงผลกระทบทางสุขภาพที่เกิดจากการสัมผัสโอโซน (O_3) ในชั้นบรรยากาศต่ำ

5. อธิบายถึงอันตรายของตะกั่ว (Pb) ต่อสุขภาพ โดยเน้นถึงผลกระทบในเด็กและกลุ่มเสี่ยงอื่น ๆ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2563). *รายงานสถานการณ์มลพิษตะกั่วในสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพ*. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2565). *รายงานผลกระทบของมลพิษทางอากาศต่อสุขภาพประชาชนในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.

กรมควบคุมมลพิษ. (2566). *รายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย ปี 2566*. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://www.pcd.go.th

กรมควบคุมมลพิษ. (2566). *ภาวะมลพิษทางอากาศ* [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก http://www.pcd.go.th

กรมควบคุมมลพิษ. (น.ป.). *ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (ฉบับที่ 24, 28, 30, 33, 36)*. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://www.pcd.go.th

กรมอนามัย. (2563). *แนวทางการป้องกันสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5*. กระทรวงสาธารณสุข. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://www.anamai.moph.go.th

กรมอนามัย. (2564). *แนวทางการป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5*. กระทรวงสาธารณสุข. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://www.anamai.moph.go.th

กระทรวงสาธารณสุข. (2567). *รายงานผู้ป่วยโรคจากมลพิษทางอากาศ ปีงบประมาณ 2567*. สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://ddc.moph.go.th

สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข. (2563). *ผลกระทบของโอโซนต่อระบบทางเดินหายใจในประเทศไทย*. *วารสารวิจัยระบบสุขภาพ*, 18(2), 45–58.

สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข. (2564). *การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษอากาศและโรคระบบทางเดินหายใจในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. (2564). *การจัดการมลพิษทางอากาศเพื่อสุขภาพที่ดี*. สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2567 จาก https://www.thaihealth.or.th

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. (2563). *ผลกระทบของมลพิษทางอากาศต่อสุขภาพในกลุ่มผู้ป่วยเรื้อรัง*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Hazardous air pollutants*. Retrieved March 10, 2024, from https://www.epa.gov/haps

United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Pollutants and sources*. Retrieved March 10, 2024, from https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Nitrogen dioxide and health risks*.