

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทเครื่องยนต์

2.2.1 เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine)

เครื่องยนต์ดีเซล หรือ เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยกำลังอัด (Compression Ignition Engine) ลักษณะการทำงานคือ อัดอากาศภายในกระบอกสูบด้วยกำลังสูง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นชนิดที่ระเหยตัวยาก มีจุดเดือดที่อุณหภูมิสูง ไม่ใช่ประกายไฟเป็นตัวจุดระเบิด แต่จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงฉีดเข้าไปในกระบอกสูบอย่างแรงทางหัวฉีด ทำให้เกิดการระเบิดขึ้นภายในกระบอกสูบและได้กำลังงานออกมาใช้ หลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะมีการทำงาน ดังนี้ (Woodford, C, 2022)

(1) จังหวะดูด (Suction Stroke) เมื่อลูกสูบเลื่อนจากศูนย์ตายบน (Top Dead Center) ลงสู่ศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center) ลิ้นไอดีเปิด ลิ้นไอเสียปิดอากาศจะถูกดูดเข้าทางช่องไอดีผ่านลิ้นไอดีเข้าบรรจุในกระบอกสูบจนลูกสูบเลื่อนลงถึงศูนย์ตายล่าง

(2) จังหวะอัด (Compression Stroke) จะทำงานต่อเนื่องจากจังหวะดูดคือ เมื่อเลื่อนจากศูนย์ตายล่างขึ้นสู่ศูนย์ตายบน จะอัดอากาศให้เหลือน้อยลงและมีความดันประมาณ 400 -700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีอุณหภูมิสูงประมาณ 400 องศาเซลเซียส

(3) จังหวะระเบิด (Power Stroke) ก่อนลูกสูบเลื่อนถึงศูนย์ตายบนเล็กน้อย หัวฉีด (Injection) จะฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นฝอยเข้าไปกระทบกับอากาศที่ร้อนจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้น แรงดันจากการระเบิดจะผลักดันให้ลูกสูบเลื่อนลงสู่ศูนย์ตายล่าง ทำให้เกิดกำลังงานในจังหวะนี้

(4) จังหวะคาย (Exhaust Stroke) เมื่อลูกสูบเลื่อนถึงศูนย์ตายล่าง ลิ้นไอเสียจะเปิด ลิ้นไอดีปิด ลูกสูบจะเลื่อนขึ้นจากศูนย์ตายล่างขึ้นสู่ศูนย์ตายบนและขับไล่ไอเสียในกระบอกสูบให้ออกไปทางลิ้นไอเสียเมื่อลูกสูบเลื่อนถึงศูนย์ตายบน ลิ้นไอเสียจะปิด ลิ้นไอดีจะเปิดเมื่อลูกสูบเลื่อนลง ซึ่งจะเริ่มต้นจังหวะดูดใหม่ต่อไป

2.2.2 เครื่องยนต์เบนซิน

เครื่องยนต์เบนซินเป็น เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันในคาร์บูเรเตอร์ โดยไอดีจะถูกป้อนเข้าไปในกระบอกสูบทางช่องไอดี (Inlet valve) ไอดีจะถูกอัดและถูกจุดระเบิดภายในกระบอกสูบโดยประกายไฟจากหัวเทียน โดยหลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ มีดังนี้ (Orville, C, 2007)

(1) จังหวะดูด (Suction stroke) เมื่อลูกสูบเลื่อนจากศูนย์ตายบน (Top Dead Center) ลงสู่ศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center) ลิ้นไอดีจะเปิดโดยกลไกบังคับลิ้นไอดี ลิ้นไอเสียจะปิด ส่วนผสมของไอดีจะถูกดูดเข้าไปในกระบอกสูบ จนลูกสูบถึงศูนย์ตายล่าง ลิ้นไอดีก็จะเริ่มปิด เพลาค้อเหวี่ยงหมุนครึ่งรอบ

(2) จังหวะอัด (Compression stroke) เมื่อลูกสูบเลื่อนจากศูนย์ตายล่างขึ้นสู่ศูนย์ตายบน ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียจะปิด ลูกสูบจะอัดไอดีในกระบอกสูบขึ้นให้มีแรงดันในกระบอกสูบประมาณ 100 – 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในจังหวะนี้เพลาค้อเหวี่ยงหมุนครึ่งรอบ

(3) จังหวะระเบิด (Power stroke) ก่อนลูกสูบเลื่อนถึงศูนย์ตายบนเล็กน้อย หัวเทียนจะจุดประกายไฟไอดีก็จะเกิดการระเบิดลุกไหม้ ซึ่งกำลังดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าและผลักดันให้ลูกสูบเลื่อนลงสู่ศูนย์ตายล่างทำให้เกิดพลังงานในจังหวะนี้ ในจังหวะนี้เพลาค้อเหวี่ยงหมุนครึ่งรอบ

(4) จังหวะคาย (Exhaust stroke) ขณะที่ลูกสูบจะเลื่อนลงถึงศูนย์ตายล่างเล็กน้อย ลิ้นไอเสียจะเปิดด้วยกลไกบังคับลิ้น ไอเสียจะถูกดันออกจากกระบอกสูบด้วยกำลังดันของตัวเอง จนลูกสูบเลื่อนถึงศูนย์ตายล่างจากนั้นลูกสูบจะเลื่อนขึ้นสู่ศูนย์ตายบน ไอดีไอเสียที่อยู่ในกระบอกสูบออกทางช่องไอเสียและจะเริ่มต้นจังหวะดูดใหม่ เมื่อลูกสูบเลื่อนลง จังหวะนี้เพลาค้อเหวี่ยงหมุนครึ่งรอบ

2.2 ลักษณะอนุภาคและแหล่งกำเนิด

องค์กรนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (American Conference of Governmental Industrial Hygienist : ACGIH) (ACGIH, 2009) ได้จำแนกประเภทของอนุภาคตามขนาดของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ โดยแบ่งอนุภาคออกเป็น 3 ประเภท คือ

(1) อนุภาคที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนต้นได้ (Inhalable dust) หมายถึงอนุภาคที่อาจก่อให้เกิดอันตรายเมื่อสะสมในบริเวณต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจส่วนต้น เช่น จมูกหรือปากและเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 100 μm

(2) อนุภาคที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนกลางได้ (Thoracic dust) หมายถึงอนุภาคที่อาจก่อให้เกิดอันตรายเมื่อสะสมอยู่บนตำแหน่งใด ๆ ของท่อนลมและบริเวณแลกเปลี่ยนก๊าซของปอดและจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 25 μm

(3) อนุภาคที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจบริเวณแลกเปลี่ยนก๊าซ (Respirable dust) อนุภาคที่อาจก่อให้เกิดอันตรายเมื่อสะสมอยู่ในบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซของปอด และเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 10 μm

ในขณะที่ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา หรือ U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA) ได้จำแนกอนุภาคตามขนาดของอนุภาคไว้ ดังนี้ (US EPA, 2016)

(1) PM₁₀ หมายถึง ฝุ่นหยาบ (Course Particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากการจราจรบนถนนที่ไม่ได้ลาดยางจากการขนส่งวัสดุ ฝุ่นจากกิจกรรม บด ย่อย หิน

(2) PM_{2.5} หมายถึง ฝุ่นละเอียด (Fine Particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ฝุ่นละเอียดมีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงาน อุตสาหกรรม ควันที่เกิดจากหุงต้มอาหารโดยใช้ฟืน นอกจากนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดเป็นฝุ่นละเอียดได้

อนุภาคนาโน (Nano Particle) หรือ Ultrafine Particle หมายถึง อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 nm และ 100 nm มีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม จากแหล่งธรรมชาติ เช่น ไฟป่าหรือภูเขาไฟ (Dianna, 2020; ISO/TS 27687, 2008; OSHA, 2013; Winkel et al., 2014)

2.3 การก่อตัวของอนุภาคภายในเครื่องยนต์

Raza, M et al. (2018) ได้ศึกษาถึงการก่อตัวของอนุภาค (Particulate Matter: PM) ในเครื่องยนต์เป็นการทำปฏิกิริยาของทางสารเคมีและทางกายภาพ เริ่มต้น ที่กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการหลักในการเกิดอนุภาค โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการการสลายตัวด้วยความร้อน มีการเปลี่ยนโครงสร้างของ เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงและไม่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส โมเลกุลเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นไฮโดรเจน (H), ไฮดรอกไซด์ (OH) เมทิล (CH₃) และสารอินทรีย์สารประกอบ เช่น เอทิลีน (C₂H₄) และอะเซทิลีน (C₂H₂) หลังจากกระบวนการ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำ (Dehydration) และสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะเริ่มสร้าง Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) ซึ่งก่อกำเนิดอนุภาคที่เรียกว่าสารตั้งต้นของเขม่า อนุภาคเขม่าสามารถเกิดกระบวนการรวมกันของอนุภาคโดยการชนกัน (Coalescence) ผลมาจากการปะทะกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดการรวมตัวกัน (Agglomerates) ในกระบวนการเกิดของอนุภาคฝุ่นละอองภายในเครื่องยนต์ก่อให้เกิดอนุภาคฝุ่นละอองที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โหมด ดังนี้

(1) อนุภาคโหมดนิวเคลียส (Nucleation Mode) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 30 nm จะประกอบด้วยอนุภาคที่เกิดขึ้นจากสารตั้งต้นระเหยเป็นไอเสีย ไปผสมกับอากาศในระหว่างการเจือจางและกระบวนการระบายความร้อน โดยประกอบด้วยสารประกอบโลหะธาตุคาร์บอนและสารประกอบอินทรีย์

(2) อนุภาคโหมตสะสม (Accumulation Mode) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 30 ถึง 500 nm โดยประกอบด้วยสารคาร์บอนที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้แล้วจับตัวกันเป็นก้อนคาร์บอน

(3) อนุภาคโหมตหยาบ (Coarse Mode) ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1,000 nm

Ristovski et al. (2012) พบว่าการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์สันดาปภายในจะให้ CO_2 และ H_2O เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เท่านั้น ในขณะที่เครื่องยนต์ที่จุดระเบิดตัวเอง (self-ignition) ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงและร้อยละ 98 เปอร์เซ็นต์ของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ 8 เศษส่วนของเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้และน้ำมันหล่อลื่นเพียงเล็กน้อยทำให้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จำนวนมาก โดยส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ ทำให้ส่วนมากอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในอากาศ มาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่เป็นเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดตัวเอง (self-ignition) รถยนต์ที่มีเครื่องยนต์ที่ใหญ่ ระยะทางสะสมที่สูง มีปัจจัยการปล่อยก๊าซมลพิษที่สูงกว่า ปัจจัยด้านการทำงานของเครื่องยนต์มีผลต่อการปล่อยอนุภาค นอกจากนี้ปัจจัยการปล่อย NO_x โดยเฉลี่ยสำหรับรถยนต์ดีเซลสูงกว่ารถยนต์เบนซินประมาณ 30 เท่า ปัจจัยการปล่อย $\text{PM}_{2.5}$ เฉลี่ยสำหรับรถยนต์เบนซินและดีเซลคือ 1.57 mg/km และ 57.8 mg/km ตามลำดับ Yang, H et al. (2019) พบว่าองค์ประกอบของอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยสารประกอบ Na, Ca, P, Mg, Zn, Fe, S และ Sn องค์ประกอบส่วนใหญ่มาจากสารเติมแตงน้ำมันหล่อลื่น รวมไปถึง Sn และ Fe ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการสึกกร่อนของเครื่องยนต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liati, A et al. (2018) โดย Na, Ca, Fe และ Zn เป็นองค์ประกอบโลหะสีอันดับแรกของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซิน ในขณะที่ Cd, Cr, Pb และ Sb เป็นองค์ประกอบของโลหะหนักที่เป็นพิษ

2.4 ผลกระทบต่อสุขภาพ

การสัมผัสอนุภาคสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพได้หลายระบบในร่างกาย โดยระบบที่ได้รับผลกระทบเป็นหลักคือ ระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด รวมไปถึงระบบการมองเห็น ระบบภูมิคุ้มกัน ระบบต่อมไร้ท่อ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีบทความจากหน่วยงานและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากการสัมผัสอนุภาค ดังนี้

2.4.1 องค์การอนามัยโลก หรือ World Health Organization (WHO) ได้กล่าวว่า PM_{10} และ $\text{PM}_{2.5}$ รวมถึงอนุภาคที่หายใจเข้าไปที่มีขนาดเล็กพอที่จะทะลุผ่านทรวงอกและเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจมีผลต่อสุขภาพ ในส่วนของระบบทางเดินหายใจและระบบหัวใจและหลอดเลือด นอกจากนี้พบหลักฐานเกี่ยวกับผลกระทบของการสัมผัส PM_{10} และ $\text{PM}_{2.5}$ ในระยะสั้นส่งผลกระทบต่อสุขภาพทางเดินหายใจแบบฉับพลันต่อประชากรที่มีกลุ่มเสี่ยง เช่น ผู้ที่มีโรคเกี่ยวกับระบบทางเดิน

หายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด กลุ่มผู้สูงอายุและเด็กมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเพิ่มขึ้นเป็นพิเศษจากการสัมผัสอนุภาค โดยสามารถส่งผลต่อการพัฒนาของปอดในเด็กรวมถึงการฟื้นฟูของการทำงานของปอด สภาพของปอดที่ลดลงแบบฉับพลัน/เรื้อรัง รวมถึงมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คาร์บอนดำ (carbon black) จาก PM_{2.5} ที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากการศึกษาที่มีหลักฐานบ่งชี้ว่า carbon black มีส่วนทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพรวมถึงเป็นสารก่อมะเร็งรวมถึงเป็นพิษโดยตรงต่อเซลล์และอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลถูกจำแนกโดย International Agency for Research on Cancer (IARC) ให้เป็นสารก่อมะเร็งกลุ่มที่ 1 (IARC, 2012; WHO, 2013;)

2.4.2 องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency : US EPA) ระบุว่าขนาดของอนุภาคมีผลโดยตรงกับการก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพ อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 µm ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดเพราะสามารถเข้าไปในปอดได้ลึกและบางส่วนอาจเข้าสู่กระแสเลือด การสัมผัสกับอนุภาคดังกล่าวอาจส่งผลต่อทั้งระบบทางเดินหายใจและระบบหัวใจและหลอดเลือด เช่น โรคหอบหืด การทำงานของปอดลดลง ระบายเคืองของทางเดินหายใจ ไอ หรือหายใจลำบาก อาการหัวใจวาย หัวใจเต้นผิดปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่มีโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด ผู้สูงอายุและเด็กมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากการสัมผัสมลพิษจากฝุ่นละอองมากที่สุด (US EPA, 2016)

2.4.3 สมาคมโรคปอดแห่งสหรัฐอเมริกา (American Lung Association) ได้กล่าวถึงผลกระทบจากการสัมผัสอนุภาคสะสมไปเป็นระยะเวลานาน ดังนี้ (American Lung Association, 2022)

- (1) โรคหัวใจ หลอดเลือดรวมถึงอาการหัวใจวายและโรคหลอดเลือดสมอง
- (2) มีการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลที่เพิ่มขึ้นและการเข้ารับการตรวจในแผนกฉุกเฉินสำหรับโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD)
- (3) พัฒนาการของปอดและการทำงานของปอดบกพร่องในเด็ก
- (4) เพิ่มโอกาสการเป็นโรคหอบหืดในเด็ก
- (5) เพิ่มความรุนแรงของโรคหอบหืดและมีการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลสำหรับโรคหอบหืดในเด็ก
- (6) เพิ่มความเสี่ยงของการคลอดก่อนกำหนดและน้ำหนักแรกเกิดต่ำ
- (7) เพิ่มการตายของทารกในครรภ์และทารก
- (8) เพิ่มโอกาสในการเป็นโรคเบาหวาน
- (9) เพิ่มโอกาสในการเป็นมะเร็งปอดและเสียชีวิต
- (10) การรับรู้บกพร่องและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรคพาร์กินสัน โรคอัลไซเมอร์และโรคสมองเสื่อมอื่น ๆ

2.4.4 ผลกระทบด้านอื่น ๆ จากการสัมผัสอนุภาค

(1) จากการศึกษาของ Ristovski et al. (2012) พบว่าอนุภาคสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางระบบทางเดินหายใจ โดยการสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ขึ้นกับขนาดของอนุภาค ดังนั้นขนาดอนุภาคจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา เมื่อต้องการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในระบบทางเดินหายใจ

(2) จากการศึกษาของ Deng, X et al. (2013) พบว่า $PM_{2.5}$ รบกวนสมดุลของสารอนุมูลอิสระและกระตุ้นให้เกิดการสูญเสียการทำงานของเซลล์ส่งผลให้เซลล์ตายและก่อให้เกิดกระบวนการอักเสบเกิดขึ้น เซลล์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการอักเสบจะเคลื่อนที่มายังบริเวณที่มีการตายของเซลล์ปอดและปลดปล่อยสารสื่อกลางของกระบวนการอักเสบ (Inflammatory Mediator) เช่น ไซโตไคน์ (cytokine) ทำให้เกิดการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อปอดและนำไปสู่ภาวะปอดแฟบ (Lung atelectasis) ทำให้ผนังหลอดเลือดฝอยและการเกิดพังผืดในเนื้อเยื่อปอด (Bronchial remodeling) มีความหนาตัวมากขึ้น อีกทั้งพบว่าปริมาณการตายของเซลล์ปอดสัมพันธ์กับปริมาณ $PM_{2.5}$ ที่สัมผัส รวมทั้งมีการเพิ่มปริมาณของเอนไซม์แลคเตตดีไฮโดรจีเนส (Lactate dehydrogenase) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อเซลล์ได้รับบาดเจ็บหรือมีการตายเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์เยื่อปอดที่สัมผัสฝุ่น $PM_{2.5}$ ยังมีปริมาณอนุมูลอิสระภายในเซลล์เพิ่มสูงกว่าสารต้านอนุมูลอิสระภายในเซลล์ อาจนำไปสู่การกระตุ้นการทำงานของกระบวนการกลืนตัวเองของเซลล์ (Autophagy) กลไกเหล่านี้เหนี่ยวนำให้การทำงานของปอดมีประสิทธิภาพลดลงและอาจนำไปสู่การเกิดมะเร็งปอดได้ (Deng, X et al., 2017)

(3) Z. Yang et al. (2022) พบว่าการสัมผัส $PM_{2.5}$ ในระยะยาวสามารถทำให้ความเสี่ยงต่อโรคเบาหวานประเภท 2 โรคไต โรคสมองเสื่อม มะเร็งปอดและเสียชีวิตได้ซึ่งสอดคล้องกับ Hamanaka & Mutlu, (2018) ที่พบว่ามลพิษในอากาศที่เป็นอนุภาคมีผลกระทบต่อสุขภาพมากกว่ามลพิษในอากาศที่เป็นก๊าซและมีผลเสียในวงกว้างต่อสุขภาพของมนุษย์ นอกจากนี้อนุภาคยังเป็นตัวทำลายต่อมไร้ท่อที่สำคัญและมีส่วนทำให้เกิดโรคทางเมตาบอลิซึม เช่น โรคอ้วนและโรคเบาหวาน

(4) การสัมผัสกับอนุภาค $PM_{2.5}$ ระหว่างตั้งครรภ์มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลลัพธ์อันไม่พึงประสงค์ระหว่างการตั้งครรภ์ เช่น การคลอดทารกก่อนกำหนด การคลอดทารกที่มีน้ำหนักตัวต่ำกว่าเกณฑ์ อัตราการเสียชีวิตของทารกหลังคลอด โดยคาดว่าเกิดจากกลไกทางชีววิทยา เช่น ภาวะไม่สมดุลของการเกิดอนุมูลอิสระ การกระตุ้นให้เกิดกระบวนการอักเสบ ความผิดปกติของกลไกการแข็งตัวของเลือด การรบกวนการทำงานของเซลล์เยื่อหลอดเลือด (Endothelial Function) และการรบกวนการทำงานของระบบหมุนเวียนโลหิต โดยความผิดปกติเหล่านี้ในหญิงตั้งครรภ์ที่สัมผัสกับอนุภาค $PM_{2.5}$ สามารถนำไปสู่ความเสียหายของระบบไร้ท่อและความผิดปกติของระบบขนส่งออกซิเจนและสารอาหารผ่านรกเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะทารกคลอดก่อนกำหนดและภาวะทารกน้ำหนักตัวต่ำกว่าเกณฑ์ (Ha, S et al., 2014)

(5) จากงานวิจัยของ Li et al. (2016) พบว่าอนุภาคขนาดเล็กกว่า 100 nm ส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันและยังมีบทบาทในการไวต่อสารก่อภูมิแพ้ อีกทั้งยังสามารถเป็นสารสื่อกลางได้โดย

กลไกต่าง ๆ มากมาย รวมถึงความสามารถในการผลิตสารอนุมูลอิสระที่นำไปสู่การสร้างไซโตไคน์ ก่อให้เกิดการอักเสบของทางเดินหายใจและสามารถกระจายได้ทั่วในระบบทางเดินหายใจและระบบไหลเวียนโลหิต ส่งผลให้การส่งสัญญาณของเซลล์ผิดปกติ นอกจากนี้อนุภาคสามารถเจาะเข้าไปในเซลล์และอาจทำให้ DNA เสียหายได้

(6) จากการศึกษาของ Yang et al. (2019) และ Liati et al. (2018) พบว่าองค์ประกอบของธาตุของอนุภาคที่มาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย สารประกอบ Na, Ca, P, Mg, Zn, Fe, S และ Sn โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่มาจากสารเติมแตงน้ำมันหล่อลื่น ขณะที่ Sn และ Fe เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสึกกร่อนของเครื่องยนต์ รวมถึงโลหะหนัก เช่น Cd, Cr, Pb และ Sb ที่มีความเป็นพิษของโลหะหนักที่ผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย รวมถึงการทำงานของระบบเอ็นไซม์ของเซลล์และสามารถจับยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การควบคุมการลำเลียงของสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป โลหะหนักบางชนิดมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านโครงสร้างหรือเคมีไฟฟ้าของเซลล์ โดยความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุนั้น ๆ และเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และผิวหนัง ผลของความเป็นพิษของโลหะหนักส่งผลต่อกลไกระดับเซลล์ 5 แบบ คือ ทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ เป็นตัวการชักนำให้เกิดมะเร็ง เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมและสุดท้ายคือทำความเสียหายต่อโครโมโซมที่เป็นปัจจัยทางพันธุกรรม

2.5 การตรวจวัดอนุภาคในอากาศ

2.5.1 เครื่องมือตรวจวัดอนุภาค

Jankowska (2010) ศึกษาความเข้มข้นเชิงมวล ความเข้มข้นเชิงจำนวนและการกระจายตัวของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล จากการจำลองการสัมผัสของพนักงานในรถโดยสาร ทดสอบโดยทำการสตาร์ทเครื่องยนต์และดับเครื่องยนต์ทุกสี่ชั่วโมงในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือคือ Aerosol Monitor DUST-TRAK model 8520 (TSI) (รูปที่ 2.1) วัดความเข้มข้นเชิงมวลในช่วง 0.1-10 μm , Ultrafine Particle Counter P-TRAK model 8525 (TSI) (รูปที่ 2.2) วัดความเข้มข้นเชิงจำนวนช่วง 0.02-1 μm , Aerosol Spectrometer and Dust Monitor model 1.108 (GRIMM) (รูปที่ 2.3) วัดความเข้มข้นเชิงจำนวน ช่วง 0.4-10 μm และ Scanning Mobility Particle Sizer SMPS (CPC 3022A and long DMA, TSI) เพื่อวัดการกระจายตัวของอนุภาคในช่วง 15-102 nm พบว่าเมื่อทำการสตาร์ทเครื่องยนต์ ความเข้มข้นเชิงมวล ความเข้มข้นเชิงจำนวน และการกระจายตัวของอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.1 Aerosol Monitor DUST-TRAK model 8520 (TSI) (Ning, 2005)



รูปที่ 2.2 Ultrafine Particle Counter P-TRAK model 8525 (TSI) (TSI, 2023)



รูปที่ 2.3 Grimm Aerosol Spectrometer model 1.108 (GRIMM, 2010)



รูปที่ 2.4 SMPS model 3080, TSI with Long DMA TSI. Model 3081 (ENVCO, 2023)

ชญาพร พิซฟู และสุรัตน์ บัวเรศ (2557) ใช้ SMPS model 3080, TSI และ Differential Mobility Analyzer (Long DMA) TSI. Model 3081 (รูปที่ 2.1) ในการศึกษาการกระจายตัวตามขนาดของฝุ่นละอองและความเข้มข้นเชิงมวลในบรรยากาศในบริเวณกรุงเทพมหานคร พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเชิงจำนวนของฝุ่นละออง (30-250 nm) ในรอบวันพบฝุ่นละอองขนาด 30-100 nm มีความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงในช่วงเวลากลางวัน (06.00-18.00 น.) ในขณะที่ฝุ่นละอองขนาด 150-250 nm มีความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงในช่วงเวลากลางคืน (18.00-06.00 น.) โดยส่วนใหญ่มาจากไอเสียยานพาหนะ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gani et al. (2020) ที่ใช้ SMPS model 3080, TSI และ Differential Mobility Analyzer (Long DMA) TSI. Model 3081 ในการศึกษาความเข้มข้นเชิงจำนวนและการกระจายตัวของอนุภาคในกรุงเทพฯ เมืองหลวงของอินเดีย พบว่าอนุภาคมีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาเร่งด่วนของการจราจรและสำหรับช่วงกลางวันที่อากาศอบอุ่น Kim et al. (2008) ใช้ SMPS model 3080, TSI ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและความเข้มข้นเชิงจำนวนของเครื่องยนต์ดีเซล ในช่วง 10-385 nm และพบว่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคขนาดนาโนเมตรเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงาน Habil et al. (2019) มีการนำ Aerosol Spectrometer and Dust Monitor model 1.109 (GRIMM) ใช้ศึกษาความเข้มข้นเชิงมวล ความเข้มข้นเชิงจำนวนและการกระจายตัวของอนุภาคที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น PM₁₀, PM_{5.0}, PM_{2.5}, PM_{1.0} และ PM_{0.5} เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Alam et al. (2011) ที่มีการนำ Aerosol Spectrometer and Dust Monitor model 1.109 (GRIMM) มาใช้ในการศึกษา ความเข้มข้นเชิงจำนวนและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ อย่าง PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} จากเมืองต่าง ๆ ของปากีสถาน เช่น จากการจราจร แหล่งเผาไหม้อื่น ๆ และอนุภาคที่แขวนลอยบนท้องถนน นอกจากนี้ยังมีการนำ Grimm Aerosol Spectrometer model (1.108) ใช้ในการติดตามอนุภาคในอากาศ โดยศึกษา ความเข้มข้นเชิงมวลของ PM₁₀, PM_{2.5}, และ PM_{1.0} ที่ถูกปล่อยออกมาจากยานพาหนะและไซต์ก่อสร้าง (Kumar et al., 2014)



รูปที่ 2.5 Grimm Aerosol Spectrometer model 1.109 (GRIMM, 2010)

ตารางที่ 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดอนุภาค

เครื่องมือตรวจวัด	ลักษณะการศึกษา	ช่วงในการวัด	อ้างอิง
Aerosol Monitor DUST-TRAK model 8520 (TSI)	ความเข้มข้นเชิงมวล	0.1-10 μm	Jankowska, (2010)
Ultrafine Particle Counter P-TRAK model 8525 (TSI)	ความเข้มข้นเชิงจำนวน	0.02-1 μm	Jankowska, (2010)
Aerosol Spectrometer and Dust Monitor model 1.108 (GRIMM)	ความเข้มข้นเชิงจำนวน ความเข้มข้นเชิงมวล การกระจายตัวของ อนุภาค	0.3-20 μm	Jankowska, (2010) Kumar et al., (2014)
Aerosol Spectrometer and Dust Monitor model 1.109 (GRIMM)	ความเข้มข้นเชิงจำนวน ความเข้มข้นเชิงมวล การกระจายตัวของ อนุภาค	0.25-32 μm	Alam et al., (2011) Habil et al., (2019)
SMPS model 3080, TSI with Differential Mobility Analyser (Long DMA) TSI. Model 3081	วัดการกระจายตัวของ อนุภาค ความเข้มข้นเชิงมวล	10-1094 μm	ชญาพร และสุรัตน์, (2557) Gani et al., (2020) H. Kim et al., (2008)

2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและสัณฐานวิทยา

2.6.1 Field Emission Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive Spectroscopy (FESEM-EDS) (อารีญา เอี่ยมบุ๋, 2554; Girão et al., 2017)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope) พร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectroscopy) (รูปที่ 2.6) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นผิวตัวอย่างได้ถึงระดับนาโน ซึ่งภายใต้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ และสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุนบนผิวตัวอย่างได้ มีกำลังขยาย 25 ถึง 1,000,000 เท่า มีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพจาก secondary electron 0.8 nm ที่ 15 kV และ 1.2 nm ที่ 1 kV

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 2.7) เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ภายในห้องสุญญากาศโดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการทำให้คาโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อย

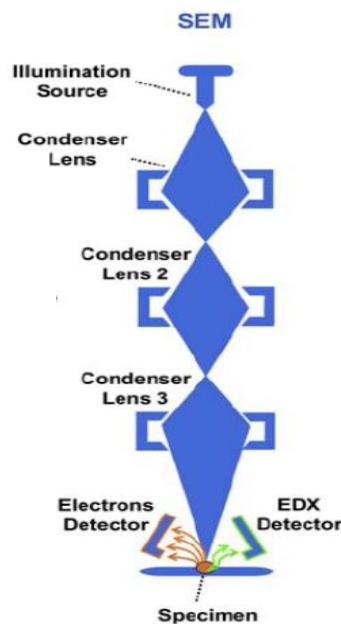
อิเล็กตรอนให้หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็ก โดยทิศทางเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง มีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่ที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมินี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจรและเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยสามารถศึกษาลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างได้จากการใช้หัววัดสัญญาณ (Detector) รั่วอิเล็กตรอนทุติยภูมิและนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพ

ในส่วนเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์มีหลักการทำงาน คือ การลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตกกระทบกับอะตอมพื้นผิวของสารตัวอย่าง จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในหลุดออกจากวงโคจร โดยอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะมาแทนที่และคายพลังงานที่มีความถี่สูงออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ โดยพลังงานที่คายออกมาจะมีความเฉพาะเจาะจงกับชนิดของอะตอมหรือลักษณะเฉพาะของธาตุ ทำให้สามารถใช้หาองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างได้



รูปที่ 2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (STREC, 2023)



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Girão et al., 2017)

2.7 มาตรฐานการทดสอบรถยนต์

2.7.1 New European Driving Cycle (NEDC)

เป็นหน่วยงานของยุโรปที่ทำหน้าที่ตรวจสอบอัตราการปล่อยไอเสียและอัตราการใช้พลังงานของรถที่วางจำหน่ายในยุโรปทุกคัน วิธีการทดสอบของ NEDC จะแบ่งการทดสอบเป็นในเมืองและนอกเมือง โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยจะควบคุมอุณหภูมิของห้องทดสอบให้อยู่ระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส ไม่มีลม ใช้วิธีการทดสอบดังนี้ (ลีละหุต พิสน, 2565; International Council on Clean Transportation, 2018)

2.7.1.1 วิ่งทดสอบในเมือง (Urban driving Cycle) คือ การจำลองการขับไปในสภาพแวดล้อมในเมือง ที่ทำความเร็วได้ต่ำ มีการเร่งความเร็วและหยุดรถบ่อยครั้ง จากการจราจรที่ติดขัด มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษที่ยานพาหนะจะประสบในการจราจรในเมือง โดย เริ่มจากสตาร์ทรถ 11 วินาที จากนั้นใช้เกียร์ N 6 วินาที เข้าเกียร์และเร่งความเร็วจนถึง 15 km/h ภายใน 4 วินาที วิ่งไปรวม 8 วินาที และเบรกจนหยุดภายใน 5 วินาที จอดนิ่ง 21 วินาที เร่งความเร็วช้า ๆ ให้ถึง 32 วินาที ในระยะเวลา 12 วินาที ขับต่อไปอีก 24 วินาที เบรกช้า ๆ จนหยุดนิ่งภายใน 11 วินาที และหยุดนิ่งอีก 21 วินาที จากนั้นเร่งความเร็วช้า ๆ จนไปถึงความเร็ว 50 วินาที ในระยะเวลา 26 วินาที และวิ่งต่ออีก 12 วินาที จากนั้นลดความเร็วมาถึง 35 km/h ในระยะเวลา 8 วินาที วิ่งต่อไปอีก 13 วินาที และเบรกจนหยุดนิ่งภายใน 12 วินาที

หยุดนิ่งอีก 7 วินาที ทำการขับซ้ำอีก 4 รอบต่อเนื่อง ถือเป็น 1 วงรอบการทดสอบ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 780 วินาที ระยะทาง 3,976.1 m และวิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 18.35 km/h

2.7.1.2 วิ่งทดสอบนอกเมือง (Extra-urban driving Cycle) คือ การจำลองการขับขี่บนทางหลวงด้วยความเร็วที่สูงขึ้น สภาพการขับขี่ในสภาวะคงที่ และการหยุดรถน้อยลง ออกแบบให้สะท้อนถึงสภาพการขับขี่ทั่วไปของทางหลวง และมีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษที่ยานพาหนะจะประสบบนทางหลวง โดย สตาร์ทรถและหยุดนิ่งเป็นเวลา 20 วินาที และเริ่มกดคันเร่งจนไปถึง 70 km/h ภายใน 41 วินาที วิ่งต่อไปอีก 50 วินาที แล้วลดความเร็วลงมาถึง 50 km/h ภายใน 8 วินาที วิ่งต่อไปอีก 69 วินาที และเร่งความเร็วขึ้นไปถึง 70 km/h 13 วินาที วิ่งต่อไปอีก 50 วินาที แล้วเร่งความเร็วขึ้นไปช้า ๆ จนถึง 100 km/h ใน 35 วินาที จากนั้น วิ่งต่อไปอีก 30 วินาที แล้วเร่งความเร็วไปจนถึง 120 km/h ใน 20 วินาที วิ่งต่อไปอีก 10 วินาที จากนั้น ก็กดเบรกจนรถหยุดนิ่งภายใน 34 วินาที จอดหยุดนิ่งอีก 20 วินาที นับเป็น 1 รอบการทดสอบ รวมระยะเวลา 400 วินาที ระยะทาง 6,956 m และใช้ความเร็วเฉลี่ย 62.6 km/h

2.7.2 United Nation Regulation 83 (UN R83)

คือ การทดสอบมาตรฐานมลพิษของรถยนต์สำหรับรถยนต์นั่ง รถยนต์บรรทุกและรถยนต์นั่งที่ดัดแปลงมาจากรถยนต์บรรทุก ในส่วนของประเทศไทย สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดให้รถยนต์ทุกคันจะต้องผ่านการทดสอบมาตรฐานมลพิษตาม มอก. (มาตรฐานบังคับ) โดยมีสารมลพิษ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ก๊าซมีเทน ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน และอนุภาค ขั้นตอนการทดสอบจะกระทำในห้องปฏิบัติการที่ได้ควบคุมจะกระทำโดยการนำรถยนต์ทดสอบ มาวิ่งบนเครื่องทดสอบสมรรถนะยานยนต์ (Chassis dynamometer) ในห้องปฏิบัติการ ระดับความเร็วต่าง ๆ ตามช่วงเวลาที่กำหนด (UNITED NATIONS, 2015; สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2022)

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะเป็นการจำลองการขับรถยนต์ตามสภาวะในเมือง จำนวน 4 วัฏจักร รวมระยะเวลา 780 s ส่วนช่วงที่สอง เป็นการจำลองการขับรถยนต์ตามสภาวะนอกเมือง จำนวน 1 วัฏจักร รวมระยะเวลา 400 s รวมเวลาที่ใช้ทั้งสิ้นเป็น 1,180 s ซึ่งคล้ายกับการทดสอบตามมาตรฐาน New European Driving Cycle (NEDC)