

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปและอภิปรายผลการศึกษาลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมในอัตราส่วนต่างกัน ได้แก่ B7, B20 และ B30 ทดสอบกับรถยนต์ที่มีอายุมากกว่า 10 ปี ภายใต้เงื่อนไขการขับสี่สองระดับความเร็ว คือ ความเร็วต่ำ (50 km/hr) และความเร็วสูง (100 km/hr) สรุปและอภิปรายผลถูกนำเสนอและเปรียบเทียบออกเป็น 5 ส่วนในแต่ละน้ำมันข้างต้น ดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล
- 2) การวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค (Particle Number Concentration and Size Distribution)
- 3) การวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงมวล (Particle Mass Concentration and Size Distribution)
- 4) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาค (Morphology)
- 5) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Element composition)
- 6) ผลกระทบต่อสุขภาพ และมาตรการป้องกัน

5.1.1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิง B7 และ B20 ค่าพารามิเตอร์ที่ทดสอบในงานวิจัย ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, ค่าสีเทน, ค่าความหนืด และจุดวาบไฟ ค่าทั้งหมดอยู่ในช่วงมาตรฐาน ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ.2567 และในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลชนิด B30 มีค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นไปตามกระทรวงพลังงานและทรัพยากรแร่ธาตุ ประเทศอินโดนีเซีย 2563

เชื้อเพลิง 3 ประเภท มีคุณภาพเหมาะสมต่อการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นและลดการเกิดเขม่าจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพและลักษณะของการเผาไหม้แปรผันตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น ภาระเครื่องยนต์ อุณหภูมิ อัตราการฉีดเชื้อเพลิง และภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคนาโนได้จากกระบวนการก่อตัวใหม่ (nucleation) และการรวมตัวของอนุภาค (coagulation) ส่งผลให้ขนาดและจำนวนของอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนของไบโอดีเซลทำให้เชื้อเพลิงมีออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุลมากขึ้น มีส่วนช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ แต่ในขณะเดียวกันก็มีผลต่อการก่อตัวของอนุภาค

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค (Particle Number Concentration and Size Distribution)

ขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลจากน้ำมัน 3 ประเภท มีการกระจายตัวภายในท่อไอเสียลักษณะสองโหมด คือ ช่วงขนาดระหว่าง 6-20 nm ที่จัดอยู่ในโหมดการก่อตัว (Nucleation mode) และช่วงขนาดระหว่าง 25-100 nm จัดอยู่ในโหมดการสะสม (Accumulation mode) การกระจายตัวของอนุภาคภายนอกท่อไอเสีย มีช่วงขนาดอนุภาคเท่ากับ 10-1,000 nm อนุภาคขนาดใหญ่เกิดจากกระบวนการก่อตัวของอนุภาคขนาดเล็กในขณะที่มีการควบแน่นของสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาสถานะการทำงานของเครื่องยนต์ พบว่าความเข้มข้นของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องยนต์เริ่มทำงานและเข้าสู่ช่วงการขับขี่ โดยเฉพาะสถานะความเร็วสูงมีค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงกว่าสถานะความเร็วต่ำ จากการเพิ่มขึ้นของภาระการทำงานของเครื่องยนต์ทำให้อัตราการฉีดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคปฐมภูมิ (Primary Particle) ในปริมาณมากขึ้น

การประเมินความเข้มข้นเชิงจำนวนจากการตรวจวัดอนุภาคภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 50 km/hr ใช้ น้ำมัน B7 (1.24×10^6 particles/cm³) มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ B30 และต่ำสุด คือ B20 โดยขนาดอนุภาค มี GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B20 (36.60 nm) รองลงมา คือ B7 และขนาดเล็กที่สุด คือ B30 ในขณะทำการตรวจวัดภายนอกท่อพบว่าความเข้มข้นเชิงจำนวนมีค่าลดลง โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด คือ น้ำมัน B30 (2.04×10^6 particles/cm³) รองลงมาคือ B7 และน้อยที่สุดคือ B20 โดยขนาดอนุภาค GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B20 (29.50 nm) รองลงมา คือ B7 และขนาดเล็กที่สุด คือ B30

ความเข้มข้นเชิงจำนวนจากการตรวจวัดอนุภาคภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 100 km/hr การใช้ น้ำมัน B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (1.87×10^7 particles/cm³) รองลงมาคือ B20 และต่ำที่สุด คือ น้ำมัน B30 โดยขนาดอนุภาค ค่า GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B30 (34.14 nm) รองลงมาคือ B20 และขนาดเล็กที่สุด คือ B7 (33.74 nm) ในขณะทำการตรวจวัดภายนอกท่อพบว่าความเข้มข้นเชิงจำนวนมีค่าลดลง โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด คือ น้ำมัน B7 (1.37×10^6 particles/cm³) รองลงมาคือ B30 และน้อยที่สุด คือ B20 โดยขนาดอนุภาค GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B20 (28.59 nm) รองลงมา คือ B7 และขนาดเล็กที่สุด คือ B30

5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงมวล (Particle Mass Concentration and Size Distribution)

ผลการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลจากน้ำมัน 3 ประเภท มีการกระจายตัวภายในท่อไอเสีย ช่วงขนาดระหว่าง 6.04-523.3 nm จัดอยู่ในโหมดการก่อตัว (Nucleation mode) และช่วงขนาดระหว่าง 25-100 nm โดยเฉพาะ 25-250 nm ในขณะที่ภายนอกท่อไอเสียมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเชิงมวลช่วง 10.18-1,000 nm โดยเฉพาะ 15-380 nm

ความเข้มข้นเชิงมวลจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 50 km/hr การใช้น้ำมัน B7 ($2,644.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$) มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ B20 และต่ำสุด คือ B30 โดยขนาดอนุภาค ค่า GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B20 (102.13 nm) รองลงมา คือ B7 และขนาดเล็กที่สุด คือ B30 ในขณะทำการตรวจวัดภายนอกท่อพบว่าความเข้มข้นเชิงมวลมีค่าลดลง โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยสูง

ที่สุด คือ น้ำมัน B7 ($184.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B30 และน้อยที่สุดคือ B20 โดยขนาดอนุภาค GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B20 (280.49 nm) รองลงมา คือ B30 และขนาดเล็กที่สุด คือ B20

ความเข้มข้นเชิงมวลจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 100 km/hr การใช้น้ำมัน B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด ($1,952.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B20 และต่ำที่สุด คือน้ำมัน B30 โดยขนาดอนุภาค ค่า GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B7 (87.22 nm) รองลงมาคือ B30 และขนาดเล็กที่สุด คือ B20 ในขณะทำการตรวจวัดภายนอกท่อพบว่าความเข้มข้นเชิงมวลมีค่าลดลง โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด คือ น้ำมัน B7 ($108.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B20 และน้อยที่สุด คือ B7 โดยขนาดอนุภาค GMD ใหญ่ที่สุดจากการใช้น้ำมัน B30 (284.78 nm) รองลงมา คือ B20 และขนาดเล็กที่สุด คือ B7

ความเข้มข้นเชิงมวลแยกตาม Environmental Parameters และ Occupational Parameters พบความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP และ Inhalable dust สูงที่สุด ของน้ำมัน 3 ประเภท ในขณะทำการขับขี่ในสภาวะความเร็วสูงและความเร็วต่ำพบความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP, PM₁₀, PM₄, PM_{2.5}, PM₁, Inhalable dust, Thoracic dust และ Respirable dust มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

พารามิเตอร์ความเข้มข้นของฝุ่นรวม TSP ในขณะทำการขับขี่ด้วยความเร็วต่ำ พบความเข้มข้นเชิงมวลสูงสุดที่สุด คือ น้ำมัน B30 ($44.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาน้ำมัน B7 และต่ำที่สุดน้ำมัน B20 ในขณะทำการขับขี่ด้วยความเร็วสูงมีแนวโน้มในลักษณะคล้ายกัน ความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงสุดที่สุด คือ น้ำมัน B30 ($60.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาน้ำมัน B7 และต่ำที่สุด คือ น้ำมัน B20

สำหรับพารามิเตอร์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในขณะทำการขับขี่ด้วยความเร็วต่ำ พบความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงสุดที่สุด คือ น้ำมัน B30 ($27.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาน้ำมัน B7 และต่ำที่สุดน้ำมัน B20 ในขณะทำการขับขี่ด้วยความเร็วสูง ความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงสุดที่สุด คือ น้ำมัน B30 ($36.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาน้ำมัน B7 และต่ำที่สุดน้ำมัน B20

5.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาค (Morphology)

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคลักษณะเป็นการรวมตัวของอนุภาคปฐมภูมิขนาดเล็ก (agglomerates) ซึ่งเกิดจากกระบวนการรวมตัวของอนุภาคระหว่างการเผาไหม้และการไหลของก๊าซไอเสีย โดยในสภาวะความเร็วต่ำ อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนรวมตัวที่ค่อนข้างทึบ ขณะที่ในสภาวะความเร็วสูง โครงสร้างของอนุภาคมีลักษณะเป็นแบบแฟรกทัลที่มีความโปร่งและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น

ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคจากเชื้อเพลิง B20 ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคเกาะกลุ่ม (agglomerates/aggregates) ที่ประกอบด้วยอนุภาคปฐมภูมิขนาดเล็กจำนวนมาก โดยโครงสร้างของอนุภาคมีลักษณะกึ่งหนาแน่นถึงกึ่งโปร่ง (semi-compact to chain-like structure) เป็นผลมาจากการเปลี่ยนผ่านจากโครงสร้างแบบหนาแน่นไปสู่โครงสร้างที่มีความพรุนมากขึ้น เมื่อพิจารณาตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ พบว่าในสภาวะความเร็วต่ำ อนุภาคมีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันแน่นมากกว่า ขณะที่ในสภาวะความเร็วสูง อนุภาคมีลักษณะเป็นสายโซ่ที่เปิดมากขึ้นและมี

ความพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการก่อตัวของอนุภาคปฐภูมิและการรวมตัวแบบ diffusion-limited aggregation

อนุภาคจากเชื้อเพลิง B30 ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคเกาะกลุ่ม (agglomerates) ที่ประกอบด้วยอนุภาคปฐภูมิขนาดเล็กจำนวนมาก โดยโครงสร้างของอนุภาคมีลักษณะเป็นสายโซ่ที่เปิดมากขึ้น (open-chain structure) และมีความพรุนสูง (fractal-like structure) เกิดจากการก่อตัวของอนุภาคภายใต้สภาวะที่มีการเกิดอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากและการรวมตัวแบบ diffusion-limited aggregation เมื่อพิจารณาตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ พบว่าในสภาวะความเร็วต่ำ อนุภาคมีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันแน่นมากกว่า ขณะที่ในสภาวะความเร็วสูง อนุภาคมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่เปิดและมีความพรุนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการก่อตัวของอนุภาคปฐภูมิและการรวมตัวของอนุภาคในลักษณะที่ไม่สมบูรณ์

ลักษณะพื้นฐานวิทยา พบว่าอนุภาคจากทุกเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็น agglomerates/aggregates แต่มีความแตกต่างของโครงสร้างตามสัดส่วนของไบโอดีเซล โดย B7 มีโครงสร้างที่หนาแน่น ขณะที่ B20 มีลักษณะไม่หนาแน่นและเริ่มแสดงโครงสร้างแบบสายโซ่ ส่วน B30 มีลักษณะเป็นโครงสร้างเปิดและมีความพรุนสูง ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น

5.1.5 สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Element Composition)

องค์ประกอบธาตุของอนุภาค B7 พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเขม่าดีเซล นอกจากนี้ยังตรวจพบธาตุอื่น เช่น Mg, Si, S และ Fe ซึ่งอาจมีแหล่งกำเนิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่น หรือการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ โดยเฉพาะธาตุเหล็ก (Fe) ซึ่งสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในร่างกายและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการอักเสบของระบบทางเดินหายใจ

องค์ประกอบธาตุของอนุภาค B20 พบว่าธาตุหลักที่ตรวจพบ ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเขม่าและสารอินทรีย์จากกระบวนการเผาไหม้ นอกจากนี้ ยังพบธาตุรอง เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ในบางสภาวะ โดยธาตุเหล็กมีแนวโน้มมาจากการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ขณะที่กำมะถันมีแหล่งกำเนิดจากเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น และสามารถเกิดการควบแน่นบนผิวอนุภาคได้

องค์ประกอบธาตุของอนุภาค B30 พบว่าธาตุหลักที่ตรวจพบ ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) โดยมีแนวโน้มของปริมาณออกซิเจนบนผิวอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนไบโอดีเซลต่ำกว่า ส่งผลให้เกิดสารประกอบออกซิไดซ์และสารกึ่งระเหยจาก Fatty Acid Methyl Esters (FAME) ที่ควบแน่นบนผิวอนุภาค นอกจากนี้ ยังพบธาตุรอง เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) โดยเฉพาะในสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์สูง ซึ่งอาจมีแหล่งกำเนิดจากการสึกหรอของเครื่องยนต์และน้ำมันหล่อลื่น และสามารถเกิดการสะสมบนผิวอนุภาคได้มากขึ้นในกรณีของ B30 เนื่องจากมีปริมาณสารกึ่งระเหยสูง

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

5.2.1 อภิปรายผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดี B7, B20 และ B30 ที่ใช้ในการศึกษานี้ พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญสอดคล้องกับสัดส่วนการผสมไบโอดีเซล โดยค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) อยู่ในช่วง 0.845–0.86 และความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) ณ อุณหภูมิ 40°C เพิ่มขึ้นจาก 3.5 cSt ของ B7 และ B20 เป็น 4.0 cSt ใน B30 ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานและ ASTM แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนืดและความหนาแน่นตามสัดส่วนของ Fatty Acid Methyl Esters (FAME) นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Szabados & Bereczky, (2018) และ Sethin et al., (2024) ซึ่งอธิบายว่าเป็นผลจากโครงสร้างโมเลกุลของ FAME ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงกว่าไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม

ในมิติของกระบวนการเผาไหม้ ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนไบโอดีเซลส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการฉีดพ่นเชื้อเพลิง (Spray Characteristics) โดยในกรณีของ B7 และ B20 ซึ่งมีความหนืดใกล้เคียงกับดีเซลทั่วไป 3.5 cSt ยังส่งผลต่อการแตกตัวเป็นละอองฝอย (Atomization) ได้ดี การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงมีความสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น B30 ความหนืดเพิ่มถึงระดับ 4.0 cSt อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการแตกตัวลดลงและเกิดหยดเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตของ Sathiyamoorthi et al., (2021) และ Gupta & Sharma, (2023) ที่ระบุว่าความหนืดที่สูงเกินไปอาจขัดขวางการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและส่งผลต่อการเผาไหม้ในช่วง Diffusion Phase เป็นช่วงที่ไฟเผาไหม้เกิดจากการที่น้ำมันกับอากาศค่อย ๆ แพร่เข้าหากัน แล้วจึงติดไฟ

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านความหนืดใน B20 และ B30 ถูกชดเชยด้วยคุณสมบัติทางเคมีคือ เลขซีเทน (Cetane Number) ที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม B7 มีค่า 58.37 ในส่วนของ B30 เท่ากับ 60.91 ซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพการจุดระเบิดที่ดีขึ้นและระยะหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นลง Guan et al., (2019) ; Nguyen et al., (2023) ประกอบกับการมีออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุลของ FAME (ออกซิเจนเชิงมวลประมาณร้อยละ 11) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมกระบวนการออกซิเดชันและลดการก่อตัวของอนุภาคเขม่าในระหว่างการเผาไหม้ แม้ในเครื่องยนต์ที่มีอายุการใช้งานนานกว่า 10 ปี ดังเช่นในการศึกษานี้ Aljaafari et al., (2022) รายงานว่า การมีออกซิเจนในองค์ประกอบของ FAME ใน biodiesel blends ส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อเทียบกับ diesel ปกติ และสามารถปรับปรุงคุณภาพการเผาไหม้ได้ โดยเฉพาะในเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพลดลงจากการใช้งานระยะยาว

นอกจากนี้ ผลการทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนไบโอดีเซล โดยเพิ่มจาก 80°C ใน B7 เป็น 98°C ใน B30 ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความปลอดภัยในการจัดเก็บและขนส่งแล้ว ยังองค์ประกอบของ FAME ที่มีจุดเดือดสูงกว่าไฮโดรคาร์บอนปกติ Lamba & Chen, (2022) ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายเคมีที่สังเกตได้ในระดับ B7 ถึง B30 ยืนยันถึงอิทธิพลของสัดส่วนไบโอดีเซลที่มีต่อลักษณะการไหล การระเหย และกลไกการจุดระเบิด ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์ลักษณะการปลดปล่อยมลพิษอนุภาค

5.2.2 อภิปรายผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค (Particle Number Concentration and Size Distribution)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ที่ปลดปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งใช้เชื้อเพลิง B7, B20 และ B30 พบว่าตำแหน่งการตรวจวัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมเชิงขนาดของอนุภาค

การตรวจวัดภายในท่อไอเสียของน้ำมัน 3 ประเภท พบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในลักษณะสองโหมด (Bimodal distribution) คือ ช่วงขนาดระหว่าง 6-20 nm ที่จัดอยู่ในโหมดการก่อตัว (Nucleation mode) และช่วงขนาดระหว่าง 25-100 nm จัดอยู่ในโหมดการสะสม (Accumulation mode) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan et al., (2009) ที่พบว่าลักษณะการกระจายตัวเชิงจำนวนและขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวแบบสองโหมด โดยจุดสูงสุดของโหมดการก่อตัวอยู่ระหว่างช่วงขนาด 6.04 ถึง 16 nm ในขณะที่จุดสูงสุดของโหมดการสะสมช่วงขนาด 30 ถึง 61 nm

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำมัน 3 ประเภท บริเวณภายนอกท่อไอเสียพบช่วงขนาดอนุภาค 10-1,000 nm ซึ่งอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและความเข้มข้นเชิงจำนวนที่ลดลงเป็นผลจากการปล่อยออกสู่บรรยากาศและเกิดปัจจัย เช่น การเจือจาง (Dilution) และการรวมตัวกันของอนุภาค (Coagulation) ในอากาศ อย่างไรก็ตามการปล่อยอนุภาคในช่วงการขับที่ความเร็วสูงทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคในช่วงขนาด 10-100 nm เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Jung et al. (2017) ที่รายงานว่า การเพิ่มภาระเครื่องยนต์ผ่านการเพิ่มความเร็วส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการวิจัยนี้ยืนยันว่าทั้งปัจจัยด้านสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์และกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายหลังการปล่อยไอเสีย มีผลต่อลักษณะการแพร่กระจายของอนุภาคในอากาศ

ความเข้มข้นเชิงจำนวนจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 50 km/hr การใช้น้ำมัน B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงที่สุด (1.47×10^7 particles/cm³) รองลงมาคือ B30 (1.20×10^7 particles/cm³) และ B20 มีค่าต่ำสุด (1.06×10^7 particles/cm³) ขนาดอนุภาคค่า GMD ของ B20 (36.60 nm) สูงกว่า B7 (36.22 nm) และ B30 (35.31 nm) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang et al., (2022) พบว่าการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีสัดส่วนไบโอดีเซลต่ำ จะส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดความไม่สมบูรณ์ ก่อให้เกิดการปล่อยอนุภาคออกจากท่อไอเสียได้สูงกว่าน้ำมันที่มีสัดส่วนไบโอดีเซลสูง ในขณะที่การตรวจวัดภายนอกท่อความเข้มข้นเชิงจำนวนมีค่าลดลง โดยภายนอกท่อไอเสีย B30 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงที่สุด B30 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงที่สุด (2.04×10^6 particles/cm³) รองลงมาคือ B7 (1.24×10^6 particles/cm³) และ B20 มีค่าต่ำสุด (1.24×10^6 particles/cm³) ขนาดอนุภาค GMD ของ B20 (29.50 nm) สูงกว่า B7 (26.70 nm) และ B30 (22.10 nm) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vansevenant et al., (2021) ที่พบว่าความเข้มข้นเชิงจำนวนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นในท่อ เป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) การแพร่กระจายและเจือจางไปกับมวลอากาศภายนอก (Dilution and Dispersion) และ 2) การเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (Coagulation) ของอนุภาคนาโนที่ชนกันจนกลายเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

ความเข้มข้นเชิงจำนวนจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 100 km/hr การใช้น้ำมัน B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (1.87×10^7 particles/cm³) รองลงมาคือ B20 (1.70×10^7 particles/cm³) และ B30 มีค่าต่ำที่สุด (1.38×10^7 particles/cm³) ค่า GMD ของ B30 (34.14 nm) สูงกว่า B20 (33.79nm) และ B7 (33.74 nm) ในขณะที่การตรวจวัดภายนอกท่อความเข้มข้นเชิงจำนวนมีค่าลดลง โดยการใช้ น้ำมัน B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (1.37×10^6 particles/cm³) รองลงมาคือ B30 (8.68×10^5 particles/cm³) และ B20 มีค่าต่ำสุด (7.45×10^5 particles/cm³) ขนาดอนุภาค GMD ของ B20 (28.59 nm) สูงกว่า B7 (28.32 nm) และ B30 (21.01 nm) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dangsunthonchai et al., (2022) การใช้น้ำมันไบโอดีเซล (เช่น B30) ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนในตัวเชื้อเพลิงสูงกว่าน้ำมันดีเซลทั่วไป (B7) จะก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น และลดการเกิดอนุภาคคาร์บอน อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ ความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคลดลง และผลการทดลองบางครั้งไม่เป็นไปตามทฤษฎีซึ่งในงานวิจัยของ Thitipatanapong et al., (2022) ได้กล่าวไว้ว่าแม้ไบโอดีเซลจะทำให้ปริมาณฝุ่นลดลง แต่ในบางสภาวะ (โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิในท่ออย่างสูงอยู่และอนุภาคเล็ก ๆ ยังเป็นสถานะก๊าซระเหย) อนุภาคของแข็งที่หลงเหลืออยู่มักจะเกิดการชนและรวมตัวกัน (Coagulation) ได้ดีกว่า ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ขึ้น และการเผาไหม้ของน้ำมัน B30 จะก่อให้เกิดความเข้มข้นของอนุภาคในกลุ่มโหมดการสร้างนิวเคลียส (Nucleation mode) ซึ่งมีขนาดเล็กมากในช่วง 5–50 nm เพิ่มสูงขึ้น

5.2.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงมวล (Particle Mass Concentration and Size Distribution)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวขนาดของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิง B7, B20 และ B30 พบว่าภายในท่อไอเสียมีขนาดอนุภาคช่วง 6.04-523.3 nm โดยเฉพาะ 25-250 nm ในขณะที่ภายนอกท่อไอเสียมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเชิงมวลช่วง 10.18-1,000 nm โดยเฉพาะ 15-380 nm ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Giechaskiel et al., (2019) ที่ระบุว่าการกระจายตัวเชิงขนาดของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลมักอยู่ในช่วง 10-300 nm และขยายขนาดได้หลายร้อยนาโนเมตร ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์และตำแหน่งการตรวจวัด นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ F.Zhang et al., (2025) ที่รายงานว่าอนุภาคภายนอกท่อไอเสียมีแนวโน้มขยายช่วงขนาดกว้างขึ้นเนื่องจากกระบวนการเจือจาง (Dilution) และการควบแน่นของสารกึ่งระเหย (Semi-volatile compounds) ซึ่งไม่เพียงแต่ส่งเสริมการก่อตัวของอนุภาคใหม่ในโหมดนิวเคลียส (ในขนาด <50 nm) แต่ยังกระตุ้นการสะสมมวลและการรวมตัวของอนุภาคจนเกิดการกระจายตัวไปสู่ช่วงขนาดที่ใหญ่ขึ้น

ความเข้มข้นเชิงมวลจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 50 km/hr ภายในท่อไอเสีย B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (2,644.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B20 (1,247.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และ B30 มีค่าต่ำสุด (1,189.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ขนาดอนุภาค GMD ของ B20 (102.13 nm) สูงกว่า B7 (91.45 nm) และ B30 (76.7 nm) ในขณะที่การตรวจวัดภายนอกท่อความเข้มข้นเชิงมวลมีค่าลดลง โดยภายนอกท่อไอเสีย B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (184.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B30 (154.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และ B20 มีค่าต่ำสุด (105.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ขนาดอนุภาค GMD ของ B7 (280.49 nm) สูงกว่า B30 (214.29 nm) และ B20 (175.28 nm) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dangsunthonchai et al., (2022) ที่กล่าวว่าการลดลงของมวลและขนาด GMD ภายในท่อไอเสียของ B30 เป็นผลมาจากอิทธิพลของออกซิเจนที่ปลดปล่อยคาร์บอน แต่เมื่อไอเสียแพร่กระจายออกสู่ภายนอกท่อ อุณหภูมิที่ลดต่ำลงจะกระตุ้นให้ไอระเหยอินทรีย์ (VOCs) ที่เกิดจากข้อจำกัดด้านความหนืดของ B30 เกิดการควบแน่น กลายเป็นมวลอนุภาคทำให้มวลฝุ่นของ B30 กลับมาสูงกว่า B20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า B20 คือสัดส่วนผสมที่ให้ความสมดุลสูงสุดในการจำกัดมวลฝุ่นละอองที่ลอยอยู่ในบรรยากาศภายนอกท่อ (Agarwal et al., 2017)

ความเข้มข้นเชิงมวลจากการตรวจวัดภายในท่อไอเสียที่ความเร็ว 100 km/hr ภายในท่อไอเสีย B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (1,952.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B20 (1,543.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และ B30 มีค่าต่ำสุด (1,289.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ขนาดอนุภาค GMD ของ B7 (87.22 nm) สูงกว่า B30 (85.96 nm) และ B20 (87.01 nm) ในขณะที่การตรวจวัดภายนอกท่อความเข้มข้นเชิงมวลมีค่าลดลง โดยภายนอกท่อไอเสีย B7 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด (108.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาคือ B20 (86.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และ B7 มีค่าต่ำสุด (83.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ขนาดอนุภาค GMD ของ B30 (284.78 nm) สูงกว่า B20 (263.3 nm) และ B7 (200.31 nm) จากงานวิจัยของ Hodovny et al., (2025) พบว่าเมื่อไอเสียออกมาภายนอกท่อ ไอระเหยคาร์บอนอินทรีย์ของไบโอดีเซลที่มีอัตราส่วนที่สูงจะเกิดการควบแน่น

เมื่อเจออากาศภายนอกท่อ แต่เนื่องจากมวลเขมาน้อย ไอระเหยจึงมีการทับถมและเกิดความหนาแน่น ส่งผลให้ขนาดฝุ่น B30 มีขนาดใหญ่ ในขณะที่ B7 มีจำนวนเขมาที่มากกว่า ไอระเหยจึงกระจายตัวไป เกาะได้บางกว่า ทำให้ฝุ่น B7 มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า และ จากงานวิจัยของ B. Wang et al., (2021) พบว่าในสภาวะที่เครื่องยนต์มีภาระและอุณหภูมิสูง การลดลงของจำนวนอนุภาคภายนอกท่อ จะมาพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ซึ่งเกิดจากกระบวนการควบแน่นสะสมและการเกาะกลุ่มกัน (Enhanced condensation and aggregation)

ความเข้มข้นเชิงมวลแยกตาม Environmental Parameters และ Occupational Parameters พบความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP และ Inhalable dust สูงที่สุด ของน้ำมัน 3 ประเภท ในขณะที่การขับขึ้นในสภาวะความเร็วสูงและความเร็วต่ำพบความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP, PM10, PM4, PM2.5, PM1, Inhalable dust, Thoracic dust และ Respirable dust มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Zare et al., (2022) ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและขนาดอนุภาคอย่างชัดเจน โดยพบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 nm จะส่งผลต่อมวลรวมและ อนุภาคที่ใหญ่กว่า 100 nm เมื่อเปรียบเทียบ 3 น้ำมันพบว่าในสภาวะการขับขึ้นที่ความเร็ว 50 km/h และ 100 km/h ซึ่ง น้ำมัน B30 มีค่าความเข้มข้นสูงกว่า B7 และ B20 ในทุกพารามิเตอร์ ซึ่งเกิดจากสัดส่วนผสมไบโอดีเซลที่สูงถึงร้อยละ 30 ส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้ในเชิงมวลรวมมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นเมื่อปล่อยออกมาภายนอกท่อ พารามิเตอร์ความเข้มข้นของฝุ่นรวม TSP ในขณะที่การขับขึ้นด้วยความเร็วต่ำ พบความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงที่สุด คือ น้ำมัน B30 (44.56 ug/m^3) รองลงมาน้ำมัน B7 (28.34 ug/m^3) และต่ำที่สูบน้ำมัน B20 (16.06 ug/m^3) ในขณะที่การขับขึ้นด้วยความเร็วสูงมีแนวโน้มในลักษณะคล้ายกัน ความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงที่สุด คือ น้ำมัน B30 (60.79 ug/m^3) รองลงมาน้ำมัน B7 (32.73 ug/m^3) และต่ำที่สูบน้ำมัน B20 (30.39 ug/m^3) สำหรับพารามิเตอร์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในขณะที่การขับขึ้นด้วยความเร็วต่ำ พบความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงที่สุด คือ น้ำมัน B30 (27.66 ug/m^3) รองลงมาน้ำมัน B7 (12.61 ug/m^3) และต่ำที่สูบน้ำมัน B20 (12.31 ug/m^3) ในขณะที่การขับขึ้นด้วยความเร็วสูง ความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวลสูงที่สุด คือ น้ำมัน B30 (36.39 ug/m^3) รองลงมาน้ำมัน B7 (25.40 ug/m^3) และต่ำที่สูบน้ำมัน B20 (18.18 ug/m^3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu et al., (2025) ที่ระบุว่า การปล่อยไอเสียจากไบโอดีเซลสามารถก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอนุภาคทุติยภูมิ ผ่านกระบวนการ nucleation และการควบแน่นของสารกึ่งระเหย โดยเฉพาะเมื่อไอเสียร้อนผสมกับอากาศภายนอก ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อออกสู่ภายนอกท่อไอเสีย

5.2.4 อภิปรายผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาค (Morphology)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล B7, B20 และ B30 พบว่าที่ความเร็วต่ำ อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะการจับตัวกันแบบก้อนเกาะหลวม (Agglomeration) โดยการจับตัวกันของอนุภาคนาโนแบบหลวม ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวมาก และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มาก สอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ X. Zhang et al., (2020) และ Verma et al., (2019) ที่พบว่าเขม่ามีรูปแบบและโครงสร้างของอนุภาคที่เกิดจากการจับตัวกันแบบเกาะหลวม มีผลต่อพื้นที่ผิว หากอนุภาคเกาะกลุ่มกันเป็นสายโซ่หรือกิ่งก้านสาขา (Fractal-like agglomerates) จะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น เป็นจุดรับปฏิกิริยา (Active sites) ทำให้โครงสร้างแบบหลวม ๆ มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่สูงกว่าอนุภาคที่อัดแน่นเป็นก้อนกลมทึบ

ในขณะที่การขับขึ้นด้วยความเร็วสูงจะพบลักษณะซ้อนทับกันมากกว่าความเร็วต่ำ มีลักษณะการจับตัวกันแบบก้อนรวม (Aggregation) โดยจับตัวกันของอนุภาคนาโนด้วยพันธะที่แข็งแรง จึงยากที่จะแยกอนุภาคนี้ออกจากกัน การเกาะกันของอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Kawassaki et al., (2021) ที่พบว่าเครื่องยนต์มีอุณหภูมิและความดันในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ส่งผลให้ ความถี่และพลังงานจลน์ในการชนกันของอนุภาคนาโนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน อนุภาคจึงเกิดการอัดแน่น และซ้อนทับกัน (Compact morphology) นำไปสู่การสร้างโครงสร้างแบบ ก้อนรวม (Aggregation)

5.2.5 อภิปรายผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Element Composition)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM-EDS พบว่าอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง B7 ประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเขม่าดีเซล (diesel soot) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังตรวจพบธาตุอื่น ๆ ได้แก่ Mg, Si, S, Cl และ Fe ซึ่งอาจมีแหล่งกำเนิดจากหลายปัจจัย เช่น สารเติมแต่งในเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่น การสึกหรอของชิ้นส่วนโลหะภายในเครื่องยนต์ และสิ่งปนเปื้อนที่เข้าสู่ระบบการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาในด้านสุขภาพ พบว่าธาตุบางชนิดที่ตรวจพบในอนุภาคดีเซลจัดอยู่ในกลุ่มโลหะหนักก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะธาตุเหล็ก (Fe) ซึ่งจัดเป็นโลหะทรานซิชันที่สามารถกระตุ้นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในร่างกายผ่านกลไกการสร้างอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species; ROS) ส่งผลให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในเซลล์ของระบบทางเดินหายใจ การได้รับอนุภาคที่มีโลหะดังกล่าวในระยะยาวอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคระบบทางเดินหายใจเรื้อรัง เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (Chronic Obstructive Pulmonary Disease; COPD) และมีโอกาสในการกระตุ้นกระบวนการอักเสบของเนื้อเยื่อปอด นอกจากนี้ ธาตุกำมะถัน (S) ที่ตรวจพบในอนุภาคสามารถมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบซัลเฟตในบรรยากาศ ซึ่งอาจเพิ่มความเป็นกรดของอนุภาคและส่งผลระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ขณะที่ธาตุซิลิกอน (Si) แม้จะพบในปริมาณไม่สูงมาก แต่หากเข้าสู่ร่างกายในรูปแบบของอนุภาคนาขนาดเล็กก็อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคปอดบางชนิดในกรณีที่มีการรับสัมผัสเป็นระยะเวลานาน (IARC, 2012)

ความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง อนุภาคจากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลได้รับการจัดประเภทโดยองค์การระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยโรคมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer; IARC) ให้อยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (Group 1 carcinogen) เนื่องจากอนุภาคเขม่าดีเซลสามารถทำหน้าที่เป็นตัวพาสารพิษหลายชนิด เช่น สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) และโลหะบางชนิดเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ โดยอนุภาคขนาดเล็กโดยเฉพาะในช่วงขนาดต่ำกว่า 100 nm สามารถแทรกซึมลึกเข้าสู่ถุงลมปอดและอาจเข้าสู่กระแสเลือด ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ระบบทางเดินหายใจ ระบบหัวใจและหลอดเลือด รวมถึงเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอดในระยะยาว (Program, 2021)

องค์ประกอบธาตุของ B20 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าธาตุหลักยังคงเป็นคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบของเขม่าและสารอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ B30 พบแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของธาตุออกซิเจนบนผิวอนุภาค ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเกิดสารประกอบออกไซด์และสารกึ่งระเหยที่ควบแน่นบนผิวอนุภาค นอกจากนี้ ยังพบธาตุรอง เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ในบางสถานะ โดยเฉพาะในช่วงการทำงานที่ความเร็วสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ธาตุเหล็กอาจมีแหล่งกำเนิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ขณะที่กำมะถันอาจมีแหล่งกำเนิดจากเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น โดยในกรณีของ B30 การมีสัดส่วนของสารกึ่งระเหยสูงส่งผลต่อการควบแน่นของสารประกอบซัลเฟตและสารอินทรีย์บนผิวอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคมีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนมากขึ้น (M. Wang et al., 2026)

องค์ประกอบธาตุของอนุภาค B30 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าธาตุหลักที่ตรวจพบ ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคเขม่า นอกจากนี้ ยังพบธาตุรอง เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ในบางสถานะ โดยเฉพาะในช่วงการทำงานที่ความเร็วสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ธาตุเหล็ก (Fe) ที่ตรวจพบในอนุภาคสามารถมีแหล่งกำเนิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์และการปนเปื้อนจากน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของโลหะในอนุภาคไอเสีย โดยมีรายงานของคุณ Chu-Van et al., (2020) ว่าองค์ประกอบโลหะในอนุภาคดีเซลมีที่มาจาก engine wear, lubricating oil และเชื้อเพลิง

ธาตุหลักที่ตรวจพบในทุกชนิดเชื้อเพลิง ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเขม่าและสารอินทรีย์จากกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น พบแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบออกซิเจนบนผิวอนุภาคมากขึ้น โดยเฉพาะใน B20 และ B30 มีสารประกอบออกไซด์และสารกึ่งระเหยที่ควบแน่นบนผิวอนุภาค นอกจากนี้ ยังพบธาตุรอง เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ในบางสถานะ โดยเฉพาะในช่วงการทำงานที่ความเร็วสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ธาตุเหล็กมีแหล่งกำเนิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ขณะที่กำมะถันมีแหล่งกำเนิดจากเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบซัลเฟตที่ควบแน่นบนผิวอนุภาค โดยในกรณีของ B30 การมีสารกึ่งระเหยในปริมาณสูงอาจส่งเสริมการสะสมของสารเหล่านี้บนผิวอนุภาคมากขึ้น

5.2.6 อภิปรายผลผลกระทบต่อสุขภาพ และมาตรการป้องกัน

จากผลการศึกษาพบว่า อนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลอายุมากกว่า 10 ปี ภายใต้การใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสม (B7, B20 และ B30) มีการกระจายตัวหลักอยู่ในช่วงขนาด 10-1,000 nm ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอนุภาคนาโนในระดับนาโน (Nanoparticle) อนุภาคนาโนเมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจในส่วนปลายหรือในส่วนของถุงลมปอด สามารถเคลื่อนที่ไปยังระบบไหลเวียนโลหิต และระบบน้ำเหลือง แล้วเคลื่อนที่ไปยังอวัยวะเป้าหมายอื่นที่สำคัญ เช่น ระบบภูมิคุ้มกัน หัวใจ, สมอง, ตับ, ตัวย่อน และ ไต อนุภาคนาโนบางส่วนขับออกทางไตมาพร้อมกับปัสสาวะ (Kreyling WG, 2010) (Raftis & Miller, 2019)

ความเข้มข้นเชิงมวล คือปริมาณการรับสัมผัส ซึ่งในปัจจุบันมีการโฟกัสไปที่ค่า PM_{2.5} โดยองค์การ WHO, (2021) ที่กำหนดค่ามาตรฐานการรับสัมผัส PM_{2.5} ไม่เกิน 15 ug/m³ หากเกินค่าที่กำหนด มีโอกาสเสี่ยง โดยในระยะสั้นจะเกิดอาการ เช่น อาการระคายเคือง ไอ และแน่นหน้าอก หากปล่อยไว้ในระยะยาวมีโอกาสกระตุ้นให้เกิดโรคร้ายแรง เช่น โรคหัวใจ มะเร็งปอด และโรคหลอดเลือดสมอง Fukagawa et al., (2013) ในระดับเซลล์ อนุภาคระดับนาโนที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในช่วง nucleation mode 10–50 nm มีศักยภาพสูงในการก่อให้เกิดภาวะ oxidative stress เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูงและการตรวจพบองค์ประกอบของธาตุ เช่น เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ซึ่งสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเซลล์และก่อให้เกิด reactive oxygen species (ROS) เช่น ไฮโดรอกซิลเรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์ การเพิ่มขึ้นของ ROS จะนำไปสู่การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ความผิดปกติของไมโทคอนเดรีย และกระตุ้นกระบวนการอักเสบ และส่งผลให้เกิดการอักเสบเรื้อรังในเนื้อเยื่อปอด ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่เชื่อมโยงกับการเกิดโรคปอดอุดกั้นเรื้อรังและโรคมะเร็งปอดในระยะยาว นอกจากนี้ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่พบในงานวิจัยนี้มีผลกระทบต่อผลกระทบด้านสุขภาพ โดยพบว่าในสภาวะความเร็วต่ำ อนุภาคมีลักษณะโครงสร้างค่อนข้างหนาแน่น ขณะที่ในสภาวะความเร็วสูงมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบซ้อนทับกัน ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น อนุภาคที่มีโครงสร้างแบบเปิดดังกล่าวสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อปอดได้ง่ายและมีแนวโน้มก่อให้เกิดการตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน

แนวทางการป้องกัน ผลการศึกษาที่พบว่า อนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลอายุมากกว่า 10 ปี มีขนาดส่วนใหญ่อยู่ในระดับนาโน และมีความเข้มข้นเชิงจำนวนและความเข้มข้นเชิงมวลสูง เมื่อมีการขับชี้ที่ความเร็วต่ำและความเร็วสูง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในหลายระบบของร่างกาย ดังนั้น การควบคุมและป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนดังกล่าวจึงควรดำเนินการตามหลักการ Hierarchy of Control ซึ่งเป็นแนวทางการจัดการความเสี่ยงที่เรียงลำดับตามประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมจากต้นทางสู่ผู้รับสัมผัส ดังนี้

การกำจัด (Elimination) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมุ่งเน้นการลดหรือกำจัดแหล่งกำเนิดมลพิษโดยตรง ในบริบทของการศึกษานี้สามารถดำเนินการได้โดยการลดหรือเลิกใช้เครื่องยนต์ดีเซลที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี ซึ่งมักไม่มีระบบควบคุมการปล่อยไอเสียที่มี

ประสิทธิภาพ เช่น Diesel Particulate Filter (DPF) และ Exhaust Gas Recirculation (EGR) การเปลี่ยนไปใช้ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles: EVs) หรือระบบขนส่งที่ไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้จะสามารถลดการปล่อยอนุภาคได้อย่างมีนัยสำคัญในระดับต้นทาง

การทดแทน (Substitution) ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงโดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของแหล่งกำเนิดมลพิษให้มีอันตรายน้อยลง จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซล (จาก B7 เป็น B20 และ B30) มีแนวโน้มช่วยลดความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคได้ เนื่องจากองค์ประกอบของ FAME มีออกซิเจนช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณา ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคขนาดเล็กมากที่อาจเพิ่มขึ้นในบางสภาวะ ดังนั้น การเลือกใช้เชื้อเพลิงควรคำนึงถึงทั้งปริมาณและลักษณะของอนุภาค รวมถึงการพัฒนาเชื้อเพลิงสะอาด เช่น renewable diesel หรือเชื้อเพลิงที่มี sulfur ต่ำ เพื่อช่วยลดการก่อตัวของอนุภาค

การควบคุมทางวิศวกรรม (Engineering Controls) ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญในการลดการแพร่กระจายของอนุภาคจากแหล่งกำเนิดไปสู่ผู้รับสัมผัส โดยในกรณีของเครื่องยนต์ดีเซลสามารถดำเนินการได้ เช่น การติดตั้งระบบกรองอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) การใช้ Diesel Oxidation Catalyst (DOC) และ Selective Catalytic Reduction (SCR) เพื่อควบคุมการปล่อย PM และ NOx รวมถึงการออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่ (local exhaust ventilation) ในพื้นที่ปิด เช่น โรงซ่อมรถยนต์ หรืออุโมงค์ เพื่อป้องกันการสะสมของอนุภาคในระดับความเข้มข้นสูง นอกจากนี้ การควบคุมตำแหน่งการปล่อยไอเสียและการเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับผู้ปฏิบัติงานยังช่วยลดการรับสัมผัสในบริเวณ near-field ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมทางการบริหาร (Administrative Controls) ซึ่งมุ่งเน้นการจัดการพฤติกรรมและรูปแบบการทำงานเพื่อลดการรับสัมผัส เช่น การกำหนดระยะเวลาการทำงานในพื้นที่ที่มีการปล่อยไอเสีย การหลีกเลี่ยงการอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดในช่วงที่มีการปล่อยอนุภาคสูง เช่น ช่วงสตาร์ทเครื่องยนต์ หรือช่วงเร่งเครื่อง การวางแผนเส้นทางการจราจรเพื่อลดความแออัดและการหยุดออกตัวบ่อยครั้ง รวมถึงการฝึกอบรมให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับความเสี่ยงของอนุภาคระดับนาโนและแนวทางการป้องกันตนเอง

การใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment: PPE) ซึ่งเป็นมาตรการขั้นสุดท้ายเมื่อไม่สามารถควบคุมความเสี่ยงได้เพียงพอในระดับต้นทางและทางผ่าน สำหรับอนุภาคขนาดเล็กมาก ควรเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่มีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระดับนาโน เช่น หน้ากากชนิด R95 หรือ R100 มาตรฐานสหรัฐอเมริกา และ มาตรฐานยุโรป แนะนำ P95 หรือ P100 เนื่องจากหน้ากากช่วยป้องกันอนุภาคนาโนขนาดเล็กสำหรับงานที่มีไอระเหยน้ำมันหรือฝุ่นละอองผสมละอองน้ำมันเจือจาง (Burton, 2016)

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.3.1 ข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการศึกษา

1. จากผลการศึกษาที่พบว่าอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลอายุมากกว่า 10 ปีมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงขนาดระดับนาโน (10–300 nm) และมีความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงในบางสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น ช่วงการสตาร์ทและการขับที่ความเร็วสูง
2. การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพควรให้ความสำคัญกับความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคควบคู่กับความเข้มข้นเชิงมวล โดยเฉพาะในบริบทของอนุภาคระดับนาโนที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพสูง ดังนั้น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรนำตัวชี้วัดด้าน particle number concentration มาใช้ประกอบในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศหรือแนวทางการเฝ้าระวังสุขภาพเพิ่มเติมจากค่ามาตรฐาน PM_{2.5}
3. จากแนวโน้มที่พบว่า การเพิ่มสัดส่วนไบโอดีเซลสามารถลดความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคได้ แต่ยังอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคขนาดเล็กมากในบางสภาวะ การเลือกใช้เชื้อเพลิงควรพิจารณาอย่างรอบด้าน โดยไม่พิจารณาเฉพาะการลดมวลของอนุภาคเท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและผลกระทบต่อสุขภาพควบคู่กัน
4. ในด้านการควบคุมมลพิษจากแหล่งกำเนิด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงหรือควบคุมเครื่องยนต์ดีเซลอายุมากกว่า 10 ปี ซึ่งยังขาดระบบควบคุมการปล่อยอนุภาค เช่น Diesel Particulate Filter (DPF) โดยควรมีมาตรการสนับสนุนหรือกำหนดนโยบายเพื่อปรับปรุงสภาพเครื่องยนต์ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ หรือการจำกัดการใช้งานในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง เช่น เขตเมืองหรือพื้นที่ปิด

5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Biomarkers) เช่น การอักเสบและภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) เพื่อเชื่อมโยงคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนเข้ากับผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์โดยตรง
2. ควรศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคในสภาพแวดล้อมจริง (Real-world conditions) และปัจจัยทางอุณหภูมิตามวิถี (อุณหภูมิ, ความชื้น, ความเร็วลม) เพื่อประเมินพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคภายหลังการปล่อยออกสู่บรรยากาศให้แม่นยำยิ่งขึ้น
3. ควรทดสอบไบโอดีเซลในสัดส่วนที่หลากหลาย รวมถึงเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงสังเคราะห์หรือ Renewable diesel เพื่อประเมินศักยภาพในการลดมลพิษและผลกระทบต่อสุขภาพในภาพรวม
4. ควรสร้างแบบจำลอง (Exposure Modeling) ที่เชื่อมโยงตั้งแต่แหล่งกำเนิดการแพร่กระจาย ไปจนถึงผู้รับสัมผัส เพื่อใช้คาดการณ์ความเสี่ยงและกำหนดนโยบายการควบคุมมลพิษในสถานการณ์ต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่ออนุภาคไอเสียถูกปล่อย ควรมีการเพิ่มระยะห่างและจุดตรวจวัดบริเวณปลายท่อ รวมถึงการตรวจวัดอนุภาคภายในท่อและนอกท่อควรทำแยกกันเพื่อลดการรบกวนของเครื่องมือที่จะส่งผลต่อปริมาณไอเสีย