บทที่ 5
สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซีน ภายใต้การจำลองการทดสอบการขับขี่ตามสภาวะในเมือง (Urban condition) และสภาวะนอกเมือง (Extra Urban condition) สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ดีเซล

การกระจายตัวเชิงจำนวนของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลทั้งในการทดสอบการขับขี่รถยนต์ตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง พบว่ามีการกระจายตัวเชิงจำนวนของอนุภาคอยู่ในช่วง 10-100 nm และมีความแตกต่างที่การกระจายตัวของอนุภาคจากสภาวะนอกเมืองมีความเข้มข้นสูงกว่าสภาวะในเมืองทุกขนาดและอนุภาคส่วนใหญ่เป็นอนุภาคโหมดนิวเคลียสที่มีการกระจายตัวสูงในช่วง 10-30 nm

ความเข้มข้นเชิงจำนวนจากสภาวะการขับขี่ในเมือง พบความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงสุดที่ความเร็ว 0-50 km/h ที่อนุภาคขนาด 17.24 nm และมีความเข้มข้นเชิงจำนวน 2.49×10^7 particles/cm^3 ขณะที่สภาวะนอกเมืองพบความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงสุดที่ความเร็ว 70-100 km/h ที่อนุภาคขนาด 29.51 nm และมีความเข้มข้น 7.02×10^7 particles/cm^3 โดยแนวโน้มความเข้มข้นเชิงจำนวนขณะขับขี่ในทั้งสองสภาวะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วที่ใช้ เมื่อใช้ความเร็วที่สูงขึ้นความเข้มข้นเชิงจำนวนจะสูงขึ้นตามและเมื่อลดความเร็วความเข้มข้นก็จะลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามในสภาวะนอกเมือง ขั้นตอนลดความเร็วจาก 70 km/h มายัง 50 km/h พบความเข้มข้นเชิงจำนวนยังคงเพิ่มสูงขึ้นจากขั้นตอนเร่งความเร็วจาก 50 km/h มายัง 70 km/h

ในส่วนของการกระจายตัวเชิงมวล พบว่าสภาวะในเมือง อนุภาคมีการกระจายตัวเชิงมวลเฉลี่ยในช่วง 10-111.37 nm สูงสุด โดยกระจายตัวสูงที่สุดที่อนุภาคขนาด 111.37 nm ที่ความเข้มข้นเชิงมวลเท่ากับ 67.16 μg/m^3 ขณะที่สภาวะนอกเมืองมีการกระจายตัวเชิงมวลเฉลี่ยสูงในช่วง 10-111.37 nm โดยกระจายตัวสูงที่สุดที่อนุภาคขนาด 51.18 nm ที่ความเข้มข้นเชิงมวลเท่ากับ 78.78 μg/m^3 สภาวะนอกเมืองมีการกระจายตัวเชิงมวลที่สูงกว่าสภาวะในเมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ช่วง 10-100 nm

ขณะที่ความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยในทั้งสองสภาวะจากการจำแนกตาม Environmental Parameters พบว่า TSP มีความเข้มข้นเชิงมวลสูงที่สุด รองลงมาคือ PM_{10}, PM_4, $PM_{2.5}$ และ PM_1 ตามลำดับ โดย TSP มีความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยตามสภาวะในเมืองเท่ากับ 46.72 μg/m^3 และสภาวะนอกเมืองเท่ากับ 43.05 μg/m^3 ในส่วนของอนุภาคที่จำแนกตาม Occupational

Parameters พบว่า Inhalable dust มีความเข้มข้นเชิงมวลสูงที่สุด รองลงมาคือ Thoracic dust และ Respirable dust ตามลำดับ โดย Inhalable dust มีความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยตามสภาวะในเมืองเท่ากับ 46.25 μg/m^3 และสภาวะนอกเมืองเท่ากับ 41.93 μg/m^3 ในส่วนของแนวโน้มความเข้มข้นเชิงมวลขณะขับขี่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเร่งความเร็วและลดลงเมื่อลดความเร็ว เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลของทั้งสองสภาวะพบว่าความเข้มข้นเชิงมวลจากการจำลองการขับขี่ตามสภาวะในเมืองสูงกว่าการจำลองการขับขี่ตามสภาวะนอกเมืองอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในทุกพารามิเตอร์

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคดีเซล พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ไปจนถึงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ขึ้นไป โดยอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลในทั้งสองสภาวะมีรูปทรงไม่แน่นอนและที่สภาวะในเมืองส่วนใหญ่พบอนุภาคที่เป็นอนุภาคโหมดนิวเคลียสที่มีการสะสมเกาะกลุ่มรวมกันเป็นสายโซ่ ในขณะที่สภาวะนอกเมืองส่วนใหญ่พบอนุภาคโหมดสะสมที่มีการซ้อนทับเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

องค์ประกอบธาตุของอนุภาคการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งในการทดสอบการขับขี่รถยนต์ตามสภาวะในเมือง และสภาวะนอกเมือง พบองค์ประกอบธาตุที่เหมือนกัน คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) ซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) โดยปริมาณคาร์บอนจากสภาวะการขับขี่ในเมืองมีปริมาณที่สูงกว่าสภาวะการขับขี่นอกเมืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value=0.008) ขณะที่องค์ประกอบธาตุประเภทอื่นมีปริมาณที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

5.1.2 ลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์เบนซิน

การกระจายตัวเชิงจำนวนของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เบนซินจากการจำลองการขับขี่ตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง พบว่าการกระจายตัวเชิงจำนวนของอนุภาคขณะขับขี่อยู่ในช่วง 10-111.37 nm โดยอนุภาคส่วนใหญ่เป็นอนุภาคโหมดสะสมที่มีการกระจายตัวสูงในช่วง 30-500 nm อย่างไรก็ตามพบอนุภาคบางขนาดที่มีการกระจายตัวสูงที่เป็นอนุภาคโหมดนิวเคลียสและทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างที่สภาวะนอกเมืองมีการกระจายตัวของอนุภาคสูงกว่าสภาวะในเมืองที่ช่วง 10-30 nm

ความเข้มข้นเชิงจำนวนจากสภาวะการขับขี่ในเมือง พบความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงสุดที่ความเร็ว 0-50 km/h ที่อนุภาคขนาด 111.37 nm และมีความเข้มข้นเชิงจำนวน 1.58 x 10^4 particles/cm^3 ขณะที่สภาวะนอกเมืองพบความเข้มข้นเชิงจำนวนสูงสุดที่ความเร็ว 70-100 km/h ที่อนุภาคขนาด 12.10 nm และมีความเข้มข้น 1.81 x 10^4 particles/cm^3 ขณะที่ความเข้มข้นเชิงจำนวนขณะขับขี่ในทั้งสองสภาวะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเร่งความเร็ว และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ความเร็วจาก 70-100 km ในการขับขี่ที่สภาวะนอกเมือง นอกจากนี้ความเข้มข้นเชิงจำนวนยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็ว

ในส่วนของการกระจายตัวเชิงมวล พบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวสูงสุดในสองช่วง ได้แก่ ช่วงที่หนึ่งขนาดของอนุภาคเท่ากับ 91.05-737.02 nm มีการกระจายตัวสูงที่สุดที่อนุภาคขนาด 351 nm ที่ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 42.95 μg/m^3 และช่วงที่สองขนาดของอนุภาคเท่ากับ

1.42-23.3 μm มีการกระจายตัวสูงสุดที่อนุภาคขนาด 7.36 μm ที่ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 29.20 μg/m^3 โดยพบว่าช่วงที่หนึ่ง (91.05-737.02 nm) มีการกระจายตัวเชิงมวลที่ใกล้เคียงกันและช่วงที่สอง (1.42-23.3 μm) สภาวะนอกเมืองมีการกระจายตัวเชิงมวลที่สูงกว่าสภาวะในเมือง

ขณะที่ความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยในทั้งสองสภาวะจากการจำแนกตาม Environmental Parameters พบว่า TSP มีความเข้มข้นเชิงมวลสูงที่สุด รองลงมาคือ PM_{10}, PM_4, $PM_{2.5}$ และ PM_1 ตามลำดับ โดย TSP มีความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยตามสภาวะในเมืองเท่ากับ 76.56 μg/m^3 และสภาวะนอกเมืองเท่ากับ 85.49 μg/m^3 เมื่อจำแนกตาม Occupational Parameters พบว่า Inhalable dust มีความเข้มข้นเชิงมวลสูงที่สุด รองลงมาคือ Thoracic dust และ Respirable dust ตามลำดับ โดย Inhalable dust มีความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยตามสภาวะในเมืองเท่ากับ 72.82 μg/m^3 และสภาวะนอกเมืองเท่ากับ 79.00 μg/m^3 ในส่วนของแนวโน้มความเข้มข้นเชิงมวลขณะขับขี่พบว่ามีความเข้มข้นเชิงมวลเพิ่มเมื่อทำการเร่งความเร็วและลดลงเมื่อลดความเร็ว ยกเว้นในสภาวะนอกเมืองที่ขั้นตอนลดความเร็วจาก 70-50 km/h พบว่าความเข้มข้นเชิงมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วและเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลของทั้งสองสภาวะพบว่าความเข้มข้นแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคดีเซล พบว่าอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลในทั้งสองสภาวะมีรูปทรงไม่แน่นอนและมีการสะสมเกาะกลุ่มรวมกันของอนุภาค โดยพบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ไปจนถึงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ขึ้นไป โดยอนุภาคส่วนมากที่เกิดจากการเผาไหม้ในทั้งสองสภาวะเป็นอนุภาคโหมดสะสม

องค์ประกอบธาตุของอนุภาคการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เบนซิน ทั้งในการทดสอบการขับขี่รถยนต์ตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง พบองค์ประกอบธาตุที่เหมือนกัน คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) และ แคลเซียม (Ca) โดยพบว่าองค์ประกอบธาตุที่จากเครื่องยนต์เบนซินในทั้งสองสภาวะการขับขี่อยู่ในระดับที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

5.1.3 การเปรียบเทียบลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซินตามสภาวะในเมือง

อนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซินตามสภาวะในเมืองมีการกระจายตัวเชิงจำนวนอยู่ในช่วง 10-100 nm โดยอนุภาคดีเซลมีการกระจายตัวในช่วง 10-30 nm มากที่สุด ในขณะที่อนุภาคเบนซินพบการกระจายตัวในช่วงที่มากกว่า 30 nm ขึ้นไป เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงจำนวนขณะขับขี่ พบว่าอนุภาคมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกขั้นตอน ยกเว้นขั้นตอนสตาร์ทเครื่องยนต์และขั้นตอนเร่งความเร็วจาก 0-32 km/h ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ในส่วนของการกระจายตัวเชิงมวลและความเข้มข้นเชิงมวล พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีการกระจายตัวเชิงมวลที่สูงกว่าเครื่องยนต์เบนซินในช่วง 10-100 nm แต่อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 100 nm ขึ้นไป เครื่องยนต์เบนซินมีการกระจายตัวเชิงมวลสูงกว่าเครื่องยนต์

ดีเซล จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยของอนุภาคดีเซลและเบนซีน พบว่า TSP และ Inhalable dust มีความเข้มข้นเชิงมวลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < 0.05)

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนพบว่า อนุภาคจากการเผาไหม้ของทั้งสองเครื่องยนต์มีทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30 nm หรืออนุภาคโหมดนิวเคลียสและพบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 nm หรืออนุภาคโหมดสะสม โดยอนุภาคของเครื่องยนต์เบนซีนจากการขับขี่ในสภาวะในเมืองมีขนาดที่ใหญ่กว่าเครื่องยนต์ดีเซล

องค์ประกอบธาตุของอนุภาคการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีน พบว่ามีองค์ประกอบธาตุที่คล้ายกันประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) ซิลิกอน (Si) และ แคลเซียม (Ca) โดยพบว่าองค์ประกอบธาตุที่จากเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนในทั้งสองสภาวะการขับขี่อยู่ในระดับที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

5.1.4 การเปรียบเทียบลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซีนตามสภาวะนอกเมือง

อนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนตามสภาวะนอกเมืองมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 10-100 nm อนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลมีการกระจายตัวสูงที่ช่วง 10-30 nm และอนุภาคจากเครื่องยนต์เบนซีนมีการกระจายตัวสูงที่ช่วงมากกว่า 30 nm โดยอนุภาคจากทั้งสองเครื่องยนต์มีช่วงการกระจายตัวคล้ายกับสภาวะในเมือง

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงจำนวนขณะขับขี่ พบว่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ขั้นตอนลดความเร็วจาก 70-50 km/h ถึงขั้นตอนหลังการขับ (P-value < 0.05) ในขณะที่ขั้นตอนสตาร์ทเครื่องยนต์และขั้นตอนเร่งความเร็วจาก 0-70 km/h อนุภาคที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซีนอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ในส่วนของการกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงมวล พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีการกระจายตัวเชิงมวลที่สูงกว่าเครื่องยนต์เบนซีนในช่วง 10-100 nm อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 351 nm ขึ้นไป เครื่องยนต์เบนซีนจะมีการกระจายตัวที่สูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซล

การเปรียบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลเฉลี่ยของอนุภาคดีเซลและเบนซีน พบว่า TSP PM_{10} Inhalable dust Thoracic dust และ Respirable dust จากเครื่องยนต์เบนซีนที่เกิดจากการจำลองการขับขี่ตามสภาวะนอกเมืองสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < 0.05)

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีน พบว่าอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ทั้งสองประเภทมีรูปทรงไม่แน่นอนและอนุภาคที่เกิดขึ้นมีการสะสมเกาะกลุ่มซ้อนทับกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ โดยพบทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30 nm หรืออนุภาคโหมดนิวเคลียสและพบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 nm หรืออนุภาคโหมดสะสม

องค์ประกอบธาตุของอนุภาคการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีน พบว่า มีองค์ประกอบธาตุที่คล้ายกันประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) ซิลิกอน (Si) และ แคลเซียม (Ca) โดยทั้งสองเครื่องยนต์มีองค์ประกอบ

ของธาตุคาร์บอน และออกซิเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < 0.004 และ p-value <0.012 ตามลำดับ)

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

5.2.1 การอภิปรายผลการกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนจากเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง

ผลการศึกษาที่ได้พบว่าอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลมีการกระจายตัวสูงในช่วง 10-100 nm โดยเฉพาะช่วง 10-30 nm ที่เป็นอนุภาคโหมดนิวเคลียสซึ่งเป็นอนุภาคเดี่ยว และพบอนุภาคบางส่วนที่เป็นอนุภาคโหมดสะสม (Accumulation zone) ที่เป็นอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 30 nm ขึ้นไป สอดคล้องกับการศึกษาของ Ristovski, Z et al. (2012) และการศึกษาของ Rossomando, B et al. (2021) ที่ทำการศึกษาลักษณะของอนุภาคขนาดเล็กจากรถยนต์ดีเซล โดยพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคที่มาจากการเผาไหม้มีขนาดตั้งแต่ 4.5 nm จนไปถึง 160 nm ในขณะที่ความเข้มข้นเชิงจำนวน พบว่าสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมืองมีความเข้มข้นที่ต่างกัน และความเข้มข้นที่สูงที่สุดอยู่ในสภาวะนอกเมือง โดยระดับความเข้มข้นขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wang, Y et al. (2017) และ Peckham, M et al. (2011) ที่ทำการศึกษามลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ภาระงานของเครื่องยนต์ที่ต่างกัน พบว่าอัตราการปล่ออนุภาคที่สูงขึ้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการเร่งความเร็วและเมื่อใช้ความเร็วที่สูงขึ้น โดยความเข้มข้นของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10-100 nm และสอดคล้องกับการศึกษาของ Jung et al. (2017) ที่ทำการศึกษาลักษณะของอนุภาคดีเซลจากการทดสอบบนเครื่องทดสอบสมรรถนะยานยนต์ (Chassis dynamometer) พบว่าอนุภาคจะมีความเข้มข้นที่เพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็ว โดยเฉพาะอนุภาคนาโน หรือ Ultrafine Particle

ผลการศึกษาที่ได้ พบว่าอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เบนซีนมีการกระจายตัวสูงในช่วง 10-111.37 nm สอดคล้องกับการศึกษาของ Peckham, M et al. (2011) ที่ทำการศึกษาความเข้มข้นเชิงจำนวนของเครื่องยนต์เบนซีนจากการจำลองการขับขี่ตามมาตรฐาน New European Driving Cycle (NEDC) และการศึกษาของ Raza, M et al. (2018) ที่ศึกษาความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคเบนซีนพบว่าอนุภาคจากเครื่องยนต์เบนซีนมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 50 nm ไปจนถึง 200 nm ในขณะที่ความเข้มข้นเชิงจำนวนพบว่าระดับความเข้มข้นขึ้นอยู่กับความเร็วและที่ใช้ในการขับขี่ นอกจากนี้ผลการศึกษาที่ได้พบว่าเครื่องยนต์เบนซีนมีการปล่อยอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเร็วในการขับขี่ สอดคล้องกับการศึกษาของ Shen, X et al. (2021) ที่ได้ทำการศึกษาการปล่อยมลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์เบนซีนในประเทศจีนพบว่าเครื่องยนต์ที่ต้องผ่านช่วงเวลาเร่งความเร็ว ชะลอความเร็ว สามารถนำไปสู่การปล่อยอนุภาคที่สูงขึ้นและการศึกษาของ Bermúdez et al. (2015) ที่ทำการศึกษาอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์โดยเชื้อเพลิงขนิดต่าง ๆ จากการจำลองการขับขี่ตามมาตรฐาน New European Driving Cycle (NEDC) พบว่าอนุภาคสามารถสะสมและปล่อยออกมาได้ในขณะลดความเร็วในการขับขี่

จากผลการเปรียบเทียบมีการกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนที่ได้ พบว่าอนุภาคจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนมีการกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงจำนวนที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนการขับขี่ สอดคล้องกับการศึกษาของ Mathis et al. (2005) ที่ทำการศึกษาการปล่อยอนุภาคในไอเสียของรถยนต์ดีเซลและเบนซีนประเภท EURO 3 โดยพบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นระหว่างสองเครื่องยนต์ความแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเครื่องยนต์และรอบที่ใช้ในการขับขี่ โดยสอดคล้องกับ Kotek et al. (2017) ที่ทำการศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคของรถยนต์ดีเซลและเบนซีนภายใต้การจำลองการขับขี่ในห้องปฏิบัติการ พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีการปล่อยอนุภาคเชิงจำนวนที่มากกว่าเครื่องยนต์เบนซีน

ผลกระทบต่อสุขภาพจากการสัมผัสอนุภาคจากเครื่องยนต์ทั้งสองประเภทสามารถส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจส่วนบน รวมถึงก่อให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) เนื่องจากอนุภาคสามารถเข้าถึงโพรงจมูก คอ หลอดลม และแม้แต่ถุงลมปอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงขนาด 10-100 nm ที่มีโอกาสร้อยละ 58 ที่จะสะสมในถุงลมปอด (William, 2012) จะเพิ่มโอกาสในการที่อนุภาคจะเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือด และแพร่กระจายไปยังส่วนอื่น ๆ ของร่างกายทำให้เกิดปัญหาสุขภาพต่าง ๆ ตามมา (IARC, 2012; WHO, 2013)

5.2.2 การอภิปรายผลการกระจายตัวและความเข้มข้นมวลจากเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง

ผลการศึกษาที่ได้ พบว่าการกระจายตัวเชิงมวลของเครื่องยนต์ดีเซลมีการการจายตัวสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซีนในช่วง 10-100 nm ทั้งในสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์เบนซีนมีการกระจายตัวเชิงมวลในช่วง >100 nm มากกว่าเครื่องยนต์ดีเซลในทั้งสองสภาวะ โดยแนวโน้มของความเข้มข้นเชิงมวลที่เพิ่มขึ้นขณะลดความเร็วเกิดได้จากการสะสมของอนุภาคในระบบท่อไอเสียขณะเร่งความเร็วและปลดปล่อยออกมาเมื่อลดความเร็วในการขับขี่ (Bermúdez, V et al. 2015) ในส่วนของความเข้มข้นเฉลี่ยที่พบว่าของ TSP มีค่าสูงที่สุด ตามด้วย PM10, PM4, PM2.5 และ PM1 ตามลำดับ สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า TSP ครอบคลุมอนุภาคฝุ่นละอองทุกขนาด เช่นเดียวกันกับ Inhalable dust ที่พบว่ามีความเข้มข้นสูงที่สุดเนื่องจาก Inhalable dust ครอบคลุมทั้ง Thoracic dust และ Respirable dust

จากการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีน พบว่า Environmental Parameters และ Occupational Parameters จากการจำลองการขับขี่ตามสภาวะในเมืองมีค่าความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP และ Inhalable dust โดยเครื่องยนต์เบนซีนมีความเข้มข้นเชิงมวลที่สูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การขับขี่ในสภาวะนอกเมือง ความเข้มข้นเชิงมวลของ TSP, PM10, Inhalable dust, Thoracic dust และ Respirable dust ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Chatain, M et al. (2021) ที่พบว่าความเข้มข้นเชิงมวลที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับการขนาดอนุภาคอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่มีมวลที่สูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

5.2.3 การอภิปรายผลสัณฐานวิทยาของอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง

ผลการศึกษาที่ได้ พบว่าอนุภาคที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนจากการขับขี่ตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมืองมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน โดยพบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30 nm อีกทั้งพบอนุภาคขนาดเล็กซ้อนทับกันจนทำให้เกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 100 nm ในทั้งสองสภาวะการจำลองการขับขี่ สอดคล้องกับการศึกษาของ Raza, M et al. (2018) และ Ristovski, Z et al. (2012) ที่ทำการศึกษาลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยพบว่าอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สามารถเกิดเป็นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 30 nm (อนุภาคโหมดนิวเคลียส) และอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ประมาณ 30 ถึง 500 nm (อนุภาคโหมดสะสม)

นอกจากนี้ผลการศึกษาที่พบว่า อนุภาคในสภาวะในเมืองจากเครื่องยนต์ดีเซลมีการเกาะกลุ่มเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Wang, S et al. (2019) ที่พบว่าอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลมีการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นสายโซ่และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Liati, A et al. (2012, 2018) ที่พบว่าอนุภาคที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนสามารถซ้อนทับกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ ขณะเดียวกันผลการศึกษาที่สภาวะนอกเมืองสอดคล้องกับการศึกษาของ Fujitani, Y et al. (2016), Savic, N et al. (2016) และ Verma, P et al. (2019) ที่พบว่าการใช้ความเร็วในการขับขี่ที่สูงส่งผลให้อนุภาคที่มากจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีขนาดใหญ่ขึ้น

5.2.4 การอภิปรายผลองค์ประกอบธาตุของอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซีนตามสภาวะในเมืองและสภาวะนอกเมือง

ผลการศึกษาที่ได้ พบว่าองค์ประกอบธาตุของอนุภาคดีเซลและเบนซีนประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) ซิลิกอน (Si) และ แคลเซียม (Ca) สอดคล้องกับการศึกษาของ Liati et al. (2018), Lu et al. (2021) และ Yang et al. (2019) ที่ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซีน พบว่าอนุภาคจากเครื่องยนต์มีองค์ประกอบของ มีส่วนประกอบหลักคือคาร์บอนและออกซิเจน โดยพบธาตุที่เป็นโลหะ เช่น อลูมิเนียมและเหล็กที่มาจากส่วนประกอบของเครื่องยนต์หรือการสึกกร่อนของท่อไอเสีย ในขณะที่องค์ประกอบธาตุชนิดอื่นอย่าง คลอรีน ซิลิคอน โพแทสเซียมและแคลเซียมมาจากสารเติมแต่งน้ำมันหล่อลื่น แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ไม่พบธาตุประเภท P, Mg, Zn, S และ Sn รวมถึงธาตุที่เป็นโลหะหนัก เช่น Cd, Cr, Pb และ Sb เนื่องจากความแตกต่างของรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบและส่วนผสมน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ทำให้พบธาตุที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้จากผลการศึกษาที่พบว่าอัตราส่วนของเหล็กและซิลิกอนในสภาวะนอกเมืองสูงกว่าสภาวะในเมือง มีผลมาจากลักษณะการขับขี่ที่ใช้ความเร็วสูง (Ashraful et al., 2015) ขณะที่อัตราส่วนของอลูมิเนียมที่พบในสภาวะในเมืองมีอัตราส่วนที่สูงกว่าสภาวะนอกเมือง เกิดได้จาก

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ลดลงในขณะที่ลดความเร็ว ทำให้มีผลต่ออัตราส่วนของอลูมิเนียม (Agarwal et al., 2011)

โดยอนุภาคที่มีองค์ประกอบของโลหะ เช่น อะลูมิเนียมและเหล็ก สามารถเป็นอันตรายต่อสุขภาพเมื่อได้รับในปริมาณมาก การสัมผัสกับธาตุเหล็กมากเกินไปอาจนำไปสู่ภาวะดื้อต่อการออกฤทธิ์ของอินซูลิน การสะสมของเหล็กในเซลล์ตับและการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ขณะที่การสัมผัสกับอะลูมิเนียมอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อมะเร็งปอดและมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (Fortoul et al., 2015) นอกจากนี้การสัมผัสกับซิลิกาอาจนำไปสู่โรคปอดซิลิโคสิสที่เป็นโรคปอดเรื้อรังที่ไม่สามารถรักษาให้หายได้และอาจทำให้พิการหรือเสียชีวิต รวมถึงโรคมะเร็งปอด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) และโรคไต (OSHA, 2016)

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.3.1 ข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการศึกษา

5.3.1.1 จากผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ในการกำหนดมาตรฐานการปล่อยมลพิษ สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซิน โดยเฉพาะในส่วนของการปล่อยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm รวมไปถึงใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดแนวทางในการเฝ้าระวังสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสสัมผัสอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์เบนซิน

2.3.1.2 จากผลการศึกษา พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เป็นอนุภาคนาโน ส่งผลให้การวัดความเข้มข้นของอนุภาคจากรถยนต์โดยใช้ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ดังนั้น ข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาวิธีการตรวจวัดมลพิษจากรถยนต์โดยเพิ่มการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวน เพื่อให้สามารถครอบคลุมมลพิษที่เกิดขึ้นได้อย่างทั่วถึง

5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งถัดไป

5.3.2.1 จากข้อจำกัดของห้องปฏิบัติการทำให้การทดสอบการขับขี่มีปัจจัยแทรก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแรงลม การศึกษาในอนาคตควรมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีระบบปิดเพื่อให้การเก็บข้อมูลมีความเที่ยงตรงสูงขึ้น

5.3.2.2 การทดสองในครั้งนี้ใช้ตัวแทนรถยนต์ดีเซลและเบนซินอย่างละหนึ่งตัวอย่าง ทำให้ได้ข้อมูลอย่างจำกัด ดังนั้น การศึกษาในครั้งถัดไปควรมีการเพิ่มจำนวนตัวอย่างรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

5.3.2.3 รถยนต์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นรถยนต์ที่มีอายุการใช้งาน 10 ปี ขึ้นไป การศึกษาในครั้งหน้าควรมีการทดสอบในรถยนต์ที่มีอายุการใช้งานที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบอนุภาคที่เกิดจากรถยนต์เก่าและรถยนต์ใหม่