

การออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า

Design and preliminary testing of a particulate matter sensor using electrical conductivity analysis technique

วิสาขน์นัสต์ รัตนจันทร์¹,ธีรโชติ หล้าวงษ์², วิสูตร อาสนวิจิตร¹, วณัสสุดา คำพุ่ม¹, พานิช อินทะ¹
Wisapanat Rattanachan¹, Theerachot Lawong², Visut Asanavijit¹, Wanasuda Khamput¹, Panich Intra¹
รับบทความ 19 พฤษภาคม 2568 แก้ไขบทความ 16 กันยายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 20 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ เซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง วงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัลและระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล หัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมวางซ้อนกันร่วมกันอิเล็กโทรดแบบ T-pipe อิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ และส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์และการทดสอบการวัดเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียงมีสหสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นแบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นสูงแบบเวลาจริง

คำสำคัญ: อนุภาค, ฝุ่นละออง, เซนเซอร์, ความนำไฟฟ้า

¹หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
จังหวัดเชียงใหม่ 50220 ประเทศไทย

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50220 ประเทศไทย

Abstract

This research article presents the design and preliminary testing of a particulate matter sensor that employs the principle of analyzing particle conductivity using readily available household equipment materials. The sensor comprises a sensor head, a DC high-voltage power supply, a signal amplifier, and signal mixing circuits. These components collectively convert an analog-to-digital signal, record the data, and process it. The sensor head features a needle electrode that overlaps with a T-pipe electrode. The needle electrode is connected to a high-voltage power supply, while the T-pipe electrode is connected to the signal amplifier and mixing circuit. This connection transmits the analog converter to a digital signal, which is then transmitted to the recording and processing system for data storage and processing. In this research, the sensor's current and voltage measurement properties were compared to those of a comparable method detector that measures particle mass concentration. The results were satisfactory, indicating a linear correlation between the current of the developed sensor and the particle mass concentration of the comparative method detector. This suggests that the developed sensor prototype can be effectively utilized to measure high-concentration exhaust dust in real time.

Keywords: Particle, Particulate matter, Sensor, Conductivity

¹Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Intrgrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220, Thailand

²Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220, Thailand

*Corresponding author e-mail address: panich.intra@rmutl.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันมีความสนใจมากขึ้นเกี่ยวกับภัยสุขภาพและผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละออง (Particulate matter) หรือ PM จึงทำให้มีการเข้มงวดมากขึ้นในการปลดปล่อย PM จากรถยนต์ส่วนบุคคลและรถบรรทุกให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ที่ผ่านมา นักวิจัยทางการแพทย์โดยทั่วไปได้ยอมรับว่าอนุภาคของฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน (μm) เป็นอันตรายต่อสุขภาพมากเพราะอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถผ่านทะลุระบบกรองธรรมชาติ (Natural filtration system) ของระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ (Human respiratory system) ได้ [1] โดยแหล่งที่มาของการปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะมาจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) ของรถยนต์งานเบา และงานหนัก (Light and heavy-duty vehicles) การปลดปล่อยอนุภาคจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายในมีความเข้มข้นสูง โดยงานวิจัยของ Yang et al. [2] ได้รายงานค่าปัจจัยการปลดปล่อย (Emission factors) หรือค่า EF ของก๊าซมลพิษและ PM_{2.5} จากไอเสียของรถยนต์รุ่นปี 2008 – 2012 พบว่ารถ Gasoline Sedan, Gasoline SUV, Gasoline Light truck, Diesel SUV, Diesel Light truck และ Diesel Heavy truck มีปัจจัยการปลดปล่อย PM_{2.5} จากไอเสียประมาณ 1.25, 3.28, 0.64, 2, 13 และ 31 mg/km ตามลำดับ ถ้าหากคิดเป็นค่าเฉลี่ยของปัจจัยการปลดปล่อย PM_{2.5} จากไอเสียของรถทุกชนิดจะได้ประมาณ 8.52 mg/km

การปรับปรุงเทคโนโลยีการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันยังมีผลทำให้ขนาดของอนุภาค (Particulate size) ที่ปล่อยออกมามีผลทำให้ขนาดอนุภาคมีผลทำให้อนุภาคมวลรวม (Total particulate mass) ลดลงและจำนวนของอนุภาค (Particulate number) ที่ปล่อยออกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่การลดลงของอนุภาคมวลรวมได้มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ (Reliably) ของการวัดการปล่อยของ PM ด้วยเครื่องมือวัดควันดำระบบวัดความทึบแสง (Smoke opacity meter) ที่มีการใช้งานในปัจจุบันเนื่องจากทำให้ค่าความทึบแสงของอนุภาคลดลงไปด้วย และสำหรับกระบวนการวัดของ Gravimetric ในปัจจุบันการซึ่งตัวอย่างไอเสียบนกระดาษกรอง (Filter paper) อาจทำไม่ได้ เพราะจำเป็นต้องใช้เวลานานในการเก็บตัวอย่างมวลให้เพียงพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง ปัญหาของขนาดและจำนวนของอนุภาคเหล่านี้จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากในการตรวจวัดและการควบคุมการปล่อยอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ที่มีการปล่อยอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Transients engine) ได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้วิธีการกระดาษกรองไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากไม่สามารถวัดด้วยเวลาจริง (Real time) ได้

ในปัจจุบันเครื่องมือในการตรวจวัด PM จากไอเสียของเครื่องยนต์ที่มีการใช้งานอยู่ยังมีราคาสูง [3-10] และมีระบบที่ซับซ้อนในการติดตั้งและใช้งานในระดับภาคสนาม ไม่สามารถติดตั้งกับรถยนต์เพื่อศึกษาค่า EF ตามลักษณะการขับเคลื่อนของการจราจรจริงได้ สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดควันดำยังมีจำนวนเครื่องวัดที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถขยายหรือเพิ่มจุดตรวจวัดได้มากขึ้น นอกจากนี้เครื่องมือวัดดังกล่าว ยังมีความต้องการในการศึกษาในรายวิชาการควบคุมมลภาวะจากรถยนต์ (Automotive emission control) และเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engines) ในสถานศึกษาที่มีการเปิดสอนในสาขาวิชาช่างยนต์วิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ และยังเป็นในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาในเรื่องของการเผาไหม้ การปรับปรุงเชื้อเพลิง การพัฒนาน้ำมันหรือพลังงานทางเลือกใหม่ที่ไม่ม่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

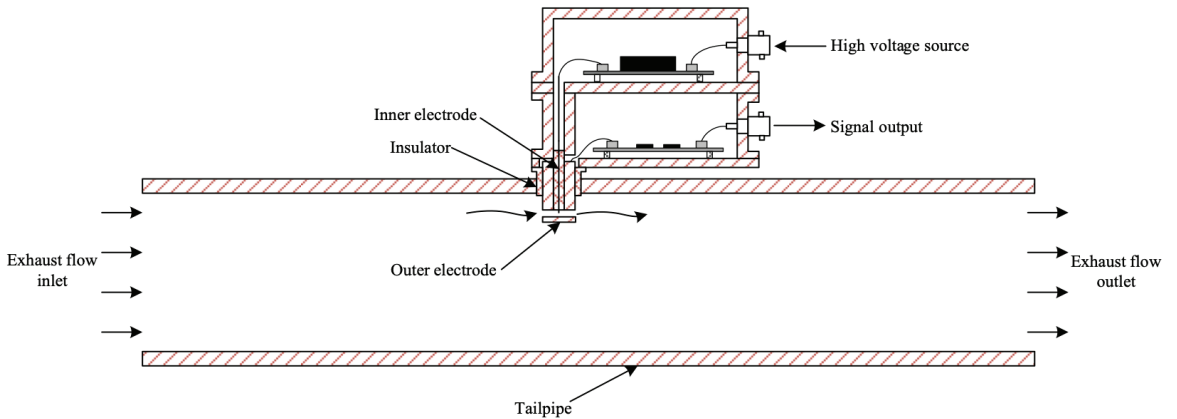
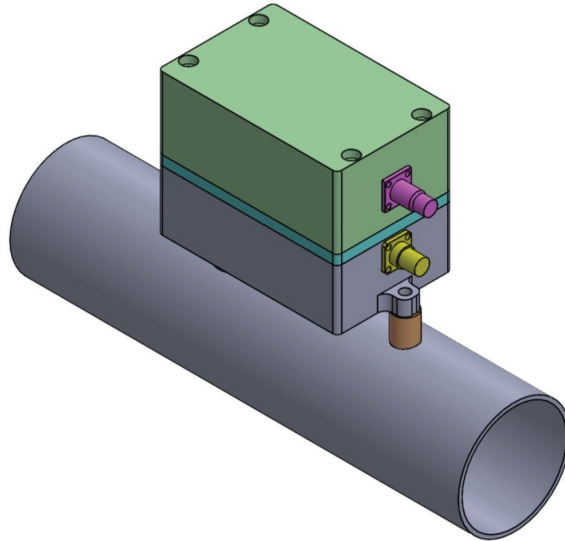
ดังนั้น เครื่องวัดที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย และมีขนาดเล็กกว่าจึงมีความต้องการพัฒนา ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงแบบเวลาจริงและเคลื่อนย้ายได้ ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ สามารถทดแทนและลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ การวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดควันดำ เช่น กองบังคับการตำรวจจราจรและตำรวจทางหลวงสำนักงานขนส่งจังหวัด กรมการขนส่งทางบกและสถานตรวจสภาพรถเอกชน (ตรอ.) ซึ่งมีหน้าที่โดยตรงในการบังคับ ควบคุม และตรวจจับควันดำของรถ กลุ่มนักวิจัย นักวิชาการหรือบริษัทที่พัฒนาในเรื่องของการเผาไหม้ การปรับปรุงเชื้อเพลิง การพัฒนาน้ำมันหรือพลังงานทางเลือกใหม่ที่ไม่ม่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อุปกรณ์วัดการปล่อยอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ และองค์การขนส่งมวลชนและกลุ่มบริษัทขนส่ง เช่น องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) สหกรณ์เดินรถ รวมถึงเป็น

เครื่องมือที่ใช้เพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการระบายมลพิษอากาศจากไอเสียของรถยนต์ประเภทต่าง ๆ แบบเวลาจริงตามลักษณะการขับเคลื่อนของรถในสภาพการจราจรจริงหรือการขับเคลื่อนตามวงจรการขับเคลื่อน (Driving Cycle) แบบต่าง ๆ สามารถนำไปใช้ในการพัฒนา EF สำหรับรถประเภทต่าง ๆ ตามสภาพของประเทศไทยสามารถนำไปใช้ในการหาอัตราการระบายฝุ่นจากภาคการจราจรตามลักษณะการขับเคลื่อนของการจราจรในแต่ละพื้นที่ได้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

ในการออกแบบเซนเซอร์ได้ประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคของฝุ่นละอองภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตระหว่างอิเล็กโทรดสองขั้ว ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงในรูปที่ 1 เซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ (Sensor head) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง (DC high voltage power supply) วงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ (Electrometer) วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล (Analog to digital converter) และระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล (Data acquisition system) โดยหัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีขนาดประมาณหัวเทียนยานยนต์มาตรฐาน (Standard automotive spark plug) หรือเซนเซอร์ออกซิเจน (Oxygen sensor) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมวางซ้อนกันร่วมกับอิเล็กโทรดแบบ T-pipe โดยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมทำมาจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm อิเล็กโทรดเข็มมีมุมของปลายแหลมประมาณ 10 องศา ส่วนอิเล็กโทรดด้านนอกของเซนเซอร์นี้จะมีลักษณะเป็น T-pipe ทำจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6 mm ฉนวนไฟฟ้า PTFE ใช้ยึดอิเล็กโทรดเข็มกับอิเล็กโทรดแบบ T-pipe ซึ่งอิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ เซนเซอร์นี้ใช้การนำไฟฟ้าที่จำกัดของเศษส่วนฝุ่นละออง (Fraction of particulate matter) กลไกทั่วไปที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์นี้คือการก่อตัวของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้า (Electrically conductive channel) ที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า ขนาดของกระแสที่ได้จากเซนเซอร์อยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-9} A

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับกลไกทางกายภาพที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์คือเศษส่วนของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ที่ส่งผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า การอาศัยพลังงานผกผัน (Inverse power) ของสัญญาณเซนเซอร์ระหว่างอิเล็กโทรดคือกลไกการแพร่กระจาย (Diffusion mechanism) และล่องลอยหรือเคลื่อนที่ (Drift) ตามแนวสนามไฟฟ้าของแรง แรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏอิเล็กโทรดทำให้อนุภาคที่มีประจุ (Charged particles) เคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณ (Signal electrode) ที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยมีการเสนอสมมติฐานการแพร่กระจายแบบล่องลอย (Drift-diffusion hypothesis) เพื่ออธิบายกลไกที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์ตามสมมติฐานนี้มี 3 ทางที่เป็นไปได้สำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณ ประการแรกคือ อนุภาคที่มีประจุบวก (Positively charged particles) เกิดจากการชนกันของอนุภาคที่มีประจุเป็นกลาง (Charge neutral particles) กับอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงบวก จากนั้นประจุแพร่กระจายระหว่างอนุภาคผ่านการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค (particle-to-particle collisions) ประการที่สองคือ อนุภาคที่มีประจุตามธรรมชาติ (Naturally charged particles) กระจายไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณเนื่องจากการไล่ระดับความเข้มข้น (Concentration gradients) ระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์ทั้งสอง และสุดท้ายคือ การส่งประจุ (Charge transport) เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเนื่องจากการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ อิเล็กตรอนจะถูกสกัดเมื่ออนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ชนกับอิเล็กโทรดสัญญาณ พลักซ์สุทธิ (Net flux) ของประจุเนื่องจากการแพร่กระจายสามารถแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจจับฝุ่นละอองเทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

$$\Lambda_{diffusion} = u [n_c(X_{2o} - \Delta X_2) - n_c(X_{2o} + \Delta X_2)] \quad (1)$$

โดยที่ n_c คือ จำนวนความหนาแน่น (Density) ของอนุภาคที่มีประจุ และ u คือความเร็ว (Velocity) ของอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบ Brownian การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Langevin ดังแสดงในสมการที่ 2

$$m \frac{du}{dt} = -\zeta u + F(t) \quad (2)$$

โดยที่ u คือ ความเร็วทันที (Instantaneous velocity) ของอนุภาค ในเทอม ζu ให้แรงลาก (Drag force) ของกฎของ Stokes $\zeta = 6\pi\mu R$ โดยที่ R คือ รัศมีของอนุภาค และ μ คือ ความหนืดของอากาศ (Air viscosity) การใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) ในสมการ 1 จะได้สมการที่ 3

$$n_c(X_{2o} - \Delta X) = n_c(X_{2o}) - \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2$$

$$n_c(X_{2o} - \Delta X) = n_c(X_{2o}) + \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2$$

$$\therefore [n_c(X_{2o} - \Delta X_2) - n_c(X_{2o} + \Delta X_2)] = -2 \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2 \quad (3)$$

$$\therefore \Lambda_{diffusion} = -2 \frac{dn_c}{dX_2} \cdot \Delta X_2 \cdot u$$

$\Delta X = \lambda$ โดยที่ λ คือ เส้นทางการอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของอนุภาคที่มีประจุ เช่น ระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคที่มีประจุเดินทางก่อนชนกับอนุภาคอื่น โดยองค์ประกอบการแพร่กระจาย (Diffusion component) สามารถแสดงเป็นสมการที่ 4

$$\Lambda_{diffusion} = -\beta_c u \lambda \frac{dn_c}{dX_2} \quad (4)$$

องค์ประกอบการล่องลอย (Drift component) สามารถแสดงเป็นสมการที่ 5

$$\Lambda_{drift} = -\mu_c n_c E \quad (5)$$

โดยที่ E คือ ความแรงของสนามไฟฟ้า n_c คือ จำนวนความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุและ μ_c คือ การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้น ฟลักซ์ทั้งหมด (Total flux) ของอนุภาคที่มีประจุ ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\Lambda_{total} = \Lambda_{diffusion} + \Lambda_{drift} \quad (6)$$

$$\therefore \Lambda_{total} = -\beta_c u \lambda \frac{dn_c}{dX_2} - \mu_c n_c E \quad (7)$$

สัญญาณเชิงเส้นของเซนเซอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของอิเล็กโทรดที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สะสม (Collection area) สำหรับอนุภาคที่มีประจุที่ไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณ สัญญาณเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพาหะประจุ (Charge carriers) เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถอธิบายได้จากสมการที่ควบคุม (สมการที่ 5) สำหรับการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้าถูกกำหนดให้เป็นสมการที่ 8

$$E = \frac{V_0}{S} \quad (8)$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และ S คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองสามารถหาได้โดยใช้กฎของโอห์ม ดังแสดงในสมการที่ 9

$$V_0 = IR \quad (9)$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ I คือ กระแสที่วัดได้ และ R คือ ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าที่เกิดจากฝุ่นละอองระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ความต้านทาน (ρ) ของช่องถูกกำหนดในสมการที่ 10

$$\rho = \frac{RA}{S} \quad (10)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ผิว (Surface area) ของอิเล็กโทรดเซนเซอร์ และ S คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง การนำไฟฟ้า (σ) ของช่องนำไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\sigma = \frac{I}{\rho} \quad (11)$$

ถ้านิยามค่าการนำไฟฟ้าใหม่เพื่อรวมค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละอองเข้าไป ตั้งแต่การส่งอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์สองตัวเกิดขึ้นผ่านอนุภาคฝุ่นละอองเหล่านี้ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละอองที่กำหนดค่าการนำไฟฟ้าของช่องนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของมวลเฉพาะ (σ') สามารถกำหนดให้เป็นสมการที่ 12

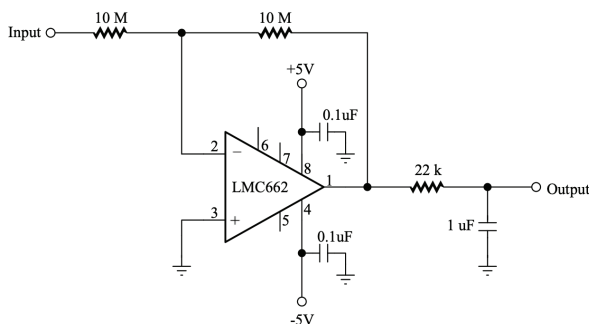
$$\sigma' = \frac{S}{RA \cdot C} \quad (12)$$

โดยที่ C คือความเข้มข้นของฝุ่นละอองในหน่วย g/m^3

ในการวิจัยนี้ใช้วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า (Current to voltage converter circuit) ที่สร้างขึ้นเองในการขยายสัญญาณ เอาต์พุตของตัวแปลงกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าจะถูกผสมสัญญาณและส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital converter) เพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล เพื่อประมวลผลข้อมูลที่ได้จากนั้นก็นำไปแสดงผลการวัดและบันทึกลงหน่วยความจำสำหรับวงจรถ่ายสัญญาณที่ออกแบบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรถ่ายสัญญาณที่ออกแบบประกอบด้วยวงจรถ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า (Current-to-voltage converter circuit) โดยวงจรถ่ายสัญญาณนี้ถูกสร้างขึ้นโดยวงจรถ่ายแบบป้อนกลับขั้วลบ (Negative feedback amplifier) ออปแอมป์ (Opamp) ที่ใช้สำหรับวงจรถ่ายสัญญาณนี้มีอัตราขยายสูงมาก ๆ หรือที่มีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมาก ๆ (Ultra-low bias current input) ในการศึกษานี้ได้เลือกออปแอมป์เบอร์ LMC662 ที่ถูกออกแบบมาใช้สำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำมาก ๆ โดยมีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมาก ๆ คือ 40 fA หรือ 40×10^{-15} แอมป์และสัญญาณรบกวนทางด้านอินพุตเนื่องจากการเหนี่ยวนำต่ำ (400 μA) ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรถ่ายนี้ V_o สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13

$$V_o = I_i R_f \quad (13)$$

เมื่อ I_i คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้า R_f คือ ความต้านทานป้อนกลับของออปแอมป์ จากสมการที่ 13 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายนี้ คือ 0.1 V ต่อ 20 nA ในการศึกษาใช้วงจรถ่ายความถี่แบบ RC low-pass เพื่อตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงและเพื่อป้องกันการแกว่งของเอาต์พุตของวงจรถ่าย ซึ่งการตัดสัญญาณความถี่ (Cut-off frequency) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของวงจรถ่ายสัญญาณ

$$\text{Cut-off-frequency} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานตัวต้านทาน และ C คือ ความจุของตัวเก็บประจุจากวงจร ใช้ตัวต้านทานขนาด $22 \text{ k}\Omega$ และตัวเก็บประจุขนาด $1 \text{ }\mu\text{F}$ จะได้การตัดสัญญาณความถี่สูงที่ 7.23 Hz สำหรับค่าคงตัวของเวลา (Time constant) t ของวงจรนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$t = RC \quad (15)$$

ดังนั้น ค่าคงตัวของเวลาของวงจรนี้จะมีค่าประมาณ 22 ms ซึ่งตามที่ได้กำหนดไว้ในความต้องการของการออกแบบวงจรเบื้องต้น คือ 1 min ซึ่งเร็วกว่าที่กำหนดไว้

คุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประมวลผลได้ในเวลา (Sensitivity) อันสั้นใกล้เวลาจริง จึงทำให้ได้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีข้อได้เปรียบดังต่อไปนี้

(1) เนื่องจากอาศัยหลักการวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคของฝุ่นละอองภายใต้สนามไฟฟ้าสถิต จึงทำให้เทคโนโลยีที่นำเสนอนี้สามารถวัดฝุ่นละอองได้ทั้งอนุภาคมวลรวมและความเข้มข้นเชิงจำนวนในเวลาเดียวกันได้ด้วยเวลาจริงโดยมีเวลาในการวัดและประมวลผล < 1 วินาที สามารถรายงานผลได้ทันที

(2) มีความง่ายในการใช้งาน มีการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากมีการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองที่หัวเซนเซอร์น้อย และสามารถถอดล้างหรือทำความสะอาดได้ง่ายโดยใช้น้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง

(3) ด้วยคุณสมบัติของค่าความนำไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่นละออง จึงทำให้สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิของแก๊สสูงถึง $600 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบเจือจาง (Dilution system) หรือระบบทำความเย็น (Cooling system) ที่ซับซ้อน

(4) ระบบที่พัฒนาขึ้นมีขนาดเล็กกว่า ทนทาน อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า โดยสามารถให้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ และเหมาะสำหรับงานตรวจวัดนอกสถานที่เพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการระบายมลพิษอากาศจากไอเสียของรถยนต์ประเภทต่าง ๆ แบบเวลาจริงตามลักษณะการขับเคลื่อนของรถในสภาพการจราจรจริงหรือการขับเคลื่อนตามวงจรการขับเคลื่อน (Driving cycle) แบบต่าง ๆ

(5) เครื่องมือวัดฝุ่นละอองจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับงานตรวจวัดควันดำและการตรวจสภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีราคาถูกลง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

| | คุณสมบัติ |
|--------------------|-----------------------------------|
| เทคนิคการวัด | การวิเคราะห์ความนำไฟฟ้า |
| ขนาดฝุ่นละออง | TSP |
| ความเข้มข้นเชิงมวล | $1 - 100 \text{ mg/m}^3$ |
| เวลาในการประมวลผล | $< 1 \text{ s}$ |
| ความเร็วการไหล | $0.1 - 5 \text{ m/s}$ |
| อุณหภูมิทำงาน | $20 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| อุณหภูมิแก๊ส | $\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ |

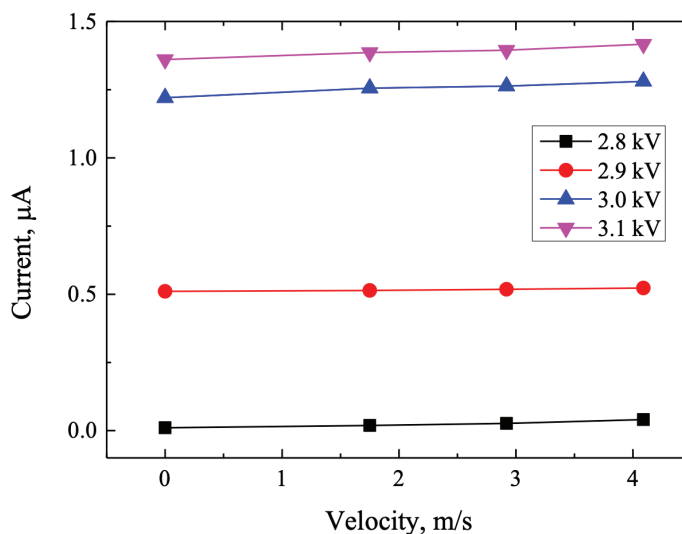
ในการทดสอบนี้ใช้อนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือในการทดสอบ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ คือ 2.1 – 2.3 และ 5.9 – 6.1 ตามลำดับ ทำการจ่ายอนุภาคน้ำมัน/อนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล้ความชื้นแบบแพร์ (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก หลังจากตัวไล้ความชื้น อนุภาคจะถูกทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann equilibrium charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับได้ด้วยชุดปรับความเข้มข้น (Dilutor) ด้านหลังตัวไล้ความชื้น อนุภาคเกลือและอนุภาคน้ำมันจากแหล่งกำเนิดละอองลอยอะตอมไมเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Count Median Diameter, CMD) เท่ากับ 57.4 นาโนเมตร และ 263 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (Mass median aerodynamic diameter, MMAD) ของอนุภาคเกลือเท่ากับ 264.1 นาโนเมตร และอนุภาคน้ำมันเท่ากับ 610 นาโนเมตร โดยอนุภาคเกลือที่มีค่า Geometric standard deviation ของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.83 และ 1.84 ตามลำดับ และอนุภาคน้ำมันที่มีค่า Geometric standard deviation ของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.85 และ 1.88 ตามลำดับ จากนั้นจ่ายอนุภาคในช่วงความเข้มข้น 0 – 70 mg/m³ ให้กับเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นพร้อมกับเครื่องตรวจวัดฝุ่นอ้างอิงพร้อมกันด้วยการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ดังแสดงในรูปที่ 3 ในการศึกษาที่ใช้เครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงหลักการไฟฟ้าสถิต (EDM, PICO Innovation model 0025) ซึ่งเป็นเครื่องมีวัดฝุ่นแบบเทียบเคียงที่ได้มาตรฐาน มอก. 3030-2563 การควบคุมความเร็วการไหลของอากาศในการทดสอบใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow controller) และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ความเร็วการไหลที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 0 – 5 m/s ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมขณะทดสอบไม่เกิน 60%RH และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบควบคุมที่ไม่เกิน 25 °C ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้ นำค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องวัดฝุ่นอ้างอิงมาหาค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน ดังตารางที่ 2 แสดงช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบในการวิจัยนี้

ตารางที่ 2 ช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ

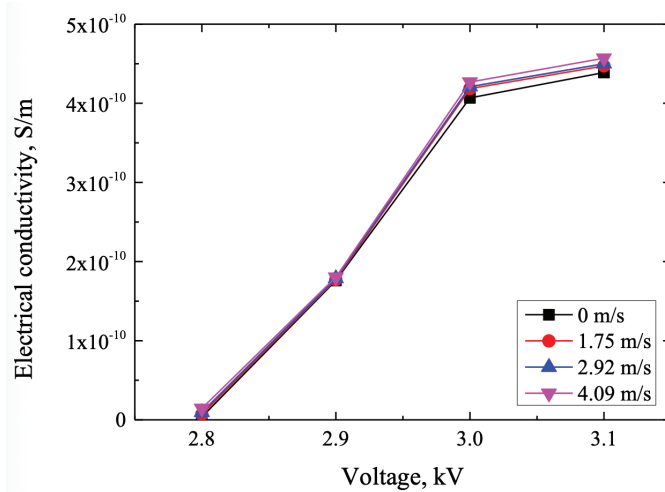
| ตัวแปร | ช่วงการวิเคราะห์ |
|----------------------------------|------------------------------|
| ชนิดอนุภาค | อนุภาคน้ำมัน และ อนุภาคเกลือ |
| ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอนุภาคน้ำมัน | 2.1 – 2.3 |
| ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอนุภาคเกลือ | 5.9 – 6.1 |
| MMAD อนุภาคน้ำมัน | 264.1 nm |
| MMAD อนุภาคเกลือ | 610 nm |
| ความเข้มข้นของอนุภาค | 0 – 70 mg/m ³ |
| แรงดันไฟฟ้า | 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV |
| ความเร็วของของไหล | 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s |
| ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมขณะทดสอบ | < 60%RH |
| ความดันอากาศขณะทดสอบ | 1 atm |
| อุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ | ~25 °C |

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับความเร็วการไหลของอากาศสะอาดที่ปราศจากอนุภาค คือ 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์จะทำให้ทราบถึงช่วงของกระแสที่วัดได้และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด จากรูปเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของกระแสนี้อาจเนื่องมาจากการไหลของอากาศทำให้เกิดการล่องลอยของประจุไฟฟ้าไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณด้วยแรงของของไหลที่เกิดขึ้นที่ช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง และการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ายังส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างช่องนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามสมการที่ 8 และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศสะอาดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้อิเล็กโทรดสูงขึ้น มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของประจุไฟฟ้า จึงทำให้ประจุไฟฟ้ามีความเร็วในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.01 - 1.3 μA ที่สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดในช่วง 2.8 - 3.1 kV ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV กระแสที่วัดได้ 0.010, 0.0191, 0.0264 และ 0.040 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV กระแสที่วัดได้ 0.510, 0.513, 0.518 และ 0.522 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV กระแสที่วัดได้ 1.220, 1.255, 1.263 และ 1.280 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV กระแสที่วัดได้ 1.360, 1.386, 1.394 และ 1.416 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

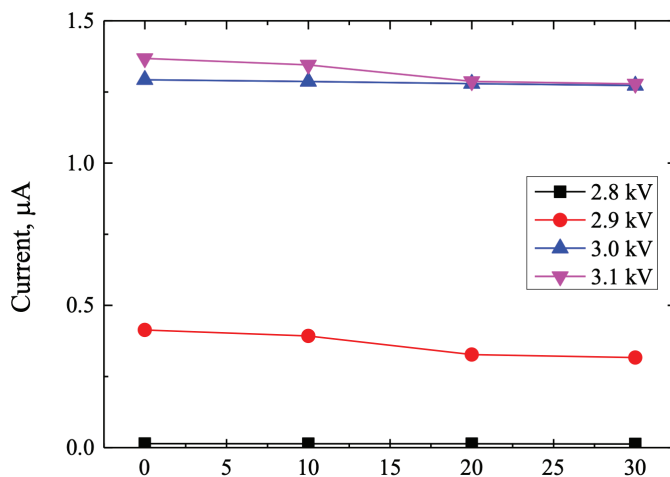


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับอัตราการไหลของอากาศสะอาดที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่ชองนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศสะอาดต่าง ๆ

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในช่วง 0 – 30 นาทีที่ความเร็วการไหลอากาศ 0 m/s แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาถึงความเสถียรภาพของกระแสไฟฟ้าที่เวลาเปลี่ยนไป จากรูปทำให้เห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่เวลานานขึ้นคือมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 0.014, 0.013, 0.013 และ 0.012 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 0.413, 0.392, 0.327 และ 0.316 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 1.292, 1.286, 1.279 และ 1.272 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 1.367, 1.344, 1.287 และ 1.278 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเล็กน้อยนี้อาจเกิดจากเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการลดลงของกระแสไฟฟ้านี้ไม่มีผลต่อการวัดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าต่ออมวลที่ต้องการวัด

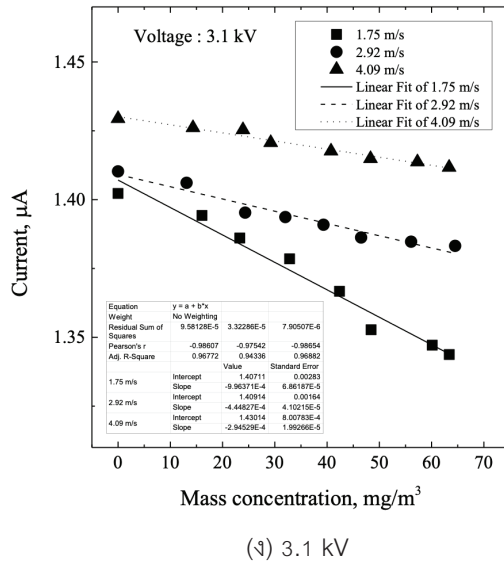
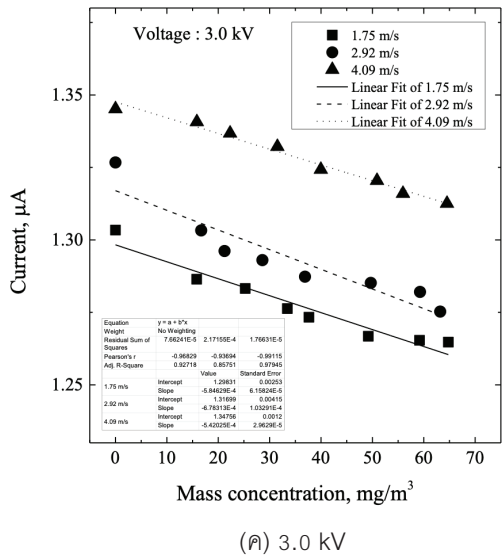
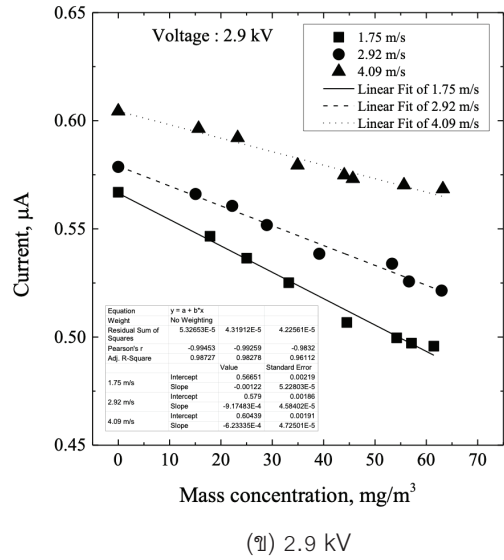
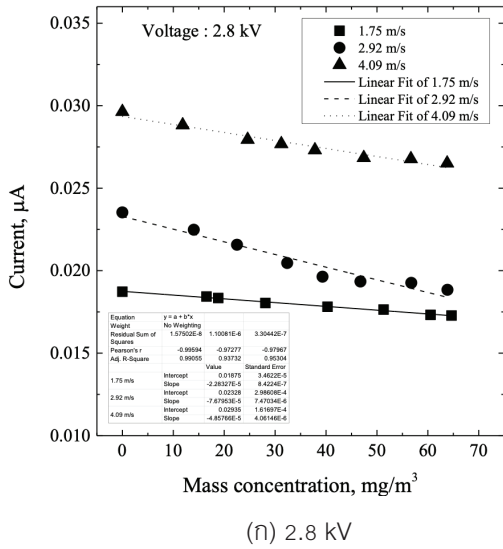


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในช่วง 0 – 30 นาทีที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

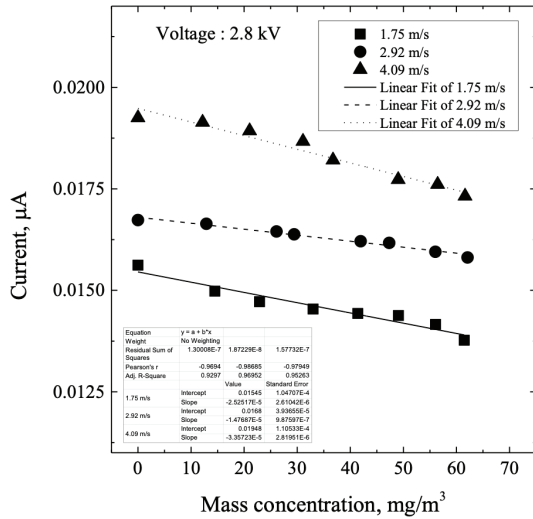
รูปที่ 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบในหน่วย μA เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียงในหน่วย mg/m^3 เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบที่ความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือในช่วง $0 - 70 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s และแรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ จากรูปพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคสูงขึ้น เนื่องจากการกีดขวางของอนุภาคฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ อนุภาคฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ดังนั้น ที่ความเข้มข้นของอนุภาคสูงมีผลทำให้ความต้านทานที่ช่องนำไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้งสองสูงขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ลดลง โดยที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกันอนุภาคน้ำมันมีความชันของการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้ามากกว่าอนุภาคเกลือ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำกว่าจึงมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่าส่วนอนุภาคเกลือมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูงกว่าจึงมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่า

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบสูงขึ้นทั้งอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือเนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีผลต่อความเร็วของอนุภาค (Particle velocity) ที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสองสูงขึ้น อนุภาคที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจึงมีผลทำให้ค่าความต้านทานระหว่างช่องนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสองลดลงและกระแสที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าสูงขึ้นตาม จากรูปยังสังเกตได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกันเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบมีค่าลดลงเนื่องจากที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นมีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้าโดยอนุภาคที่มีประจุบวกเกิดจากการชนกันของอนุภาคที่ประจุเป็นกลางกับอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงบวกจากนั้นประจุแพร่กระจายระหว่างอนุภาคผ่านการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค หรืออนุภาคที่มีประจุตามธรรมชาติกระจายไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณเนื่องจากการไล่ระดับความเข้มข้นระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์ทั้งสอง และเกิดจากการส่งประจุเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเนื่องจากการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดอิเล็กตรอนจะถูกสกัดเมื่ออนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ชนกับอิเล็กโทรดสัญญาณ ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลต่อความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าที่สอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

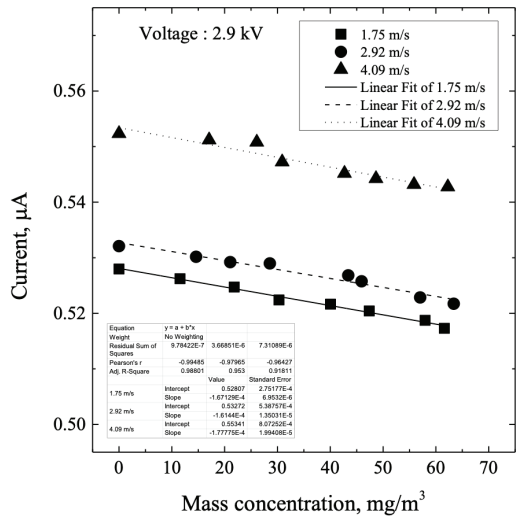
จากผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงที่แรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหลต่าง ๆ ของทั้งอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ พบว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคที่วัดได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยอนุภาคน้ำมันที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99055, 0.93732 และ 0.95304 ค่า Intercept เท่ากับ 0.01875, 0.02328 และ 0.02935 และค่า Slope เท่ากับ -2.2832×10^{-5} , -7.67953×10^{-5} และ -4.85766×10^{-5} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98727, 0.98278 และ 0.96112 ค่า Intercept เท่ากับ 0.56651, 0.579 และ 0.60439 และ ค่า Slope เท่ากับ -1.220×10^{-3} , -9.17483×10^{-4} และ -6.23335×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.92718, 0.85751 และ 0.97945



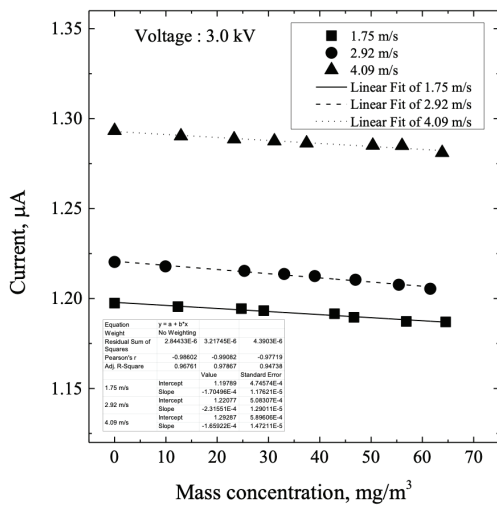
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียง



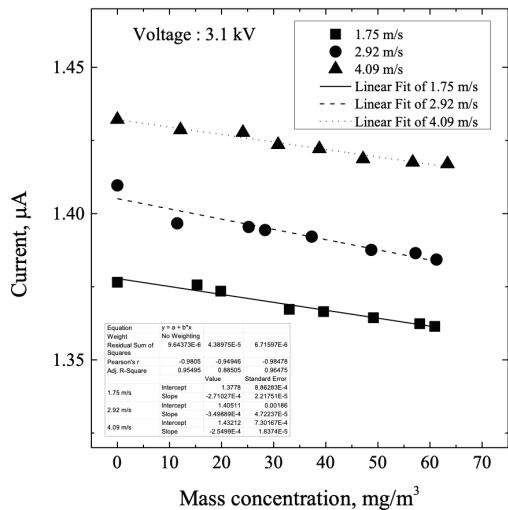
(ก) 2.8 kV



(ข) 2.9 kV



(ค) 3.0 kV



(ง) 3.1 kV

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคเกลือที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียง

ค่า Intercept เท่ากับ 1.29831, 1.31699 และ 1.34756 และ ค่า Slope เท่ากับ -5.84629×10^{-4} , -6.78313×10^{-4} และ -5.42025×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96772, 0.94336 และ 0.96882 ค่า Intercept เท่ากับ 1.40711, 1.40914 และ 1.43014 และ ค่า Slope เท่ากับ -9.96371×10^{-4} , -4.44827×10^{-4} และ -2.94529×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ส่วนอนุภาคเกลือที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9297, 0.96952 และ 0.95263 ค่า Intercept เท่ากับ 0.01545, 0.0168 และ 0.01948 และค่า Slope เท่ากับ -2.52517×10^{-5} , -1.47687×10^{-5} และ -3.35723×10^{-5} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98801, 0.953 และ 0.91811 ค่า Intercept เท่ากับ 0.52807, 0.53272 และ 0.55341 และค่า Slope เท่ากับ -1.67129×10^{-4} , -1.6144×10^{-4} และ -1.77775×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96761, 0.97867 และ 0.94738 ค่า Intercept เท่ากับ 1.19789, 1.22077 และ 1.29287 และค่า Slope เท่ากับ -1.70496×10^{-4} , -2.31551×10^{-4} และ -1.65922×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า

3.1 kV มีค่า R² เท่ากับ 0.95495, 0.88505 และ 0.96475 ค่า Intercept เท่ากับ 1.3778, 1.40511 และ 1.43212 และค่า Slope เท่ากับ -2.71027×10^{-4} , -3.49889×10^{-4} และ -2.5499×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

| อนุภาคน้ำมัน | | | |
|------------------|---|------------------------|------------------------|
| แรงดันไฟฟ้า (kV) | Mean sensitivity ($\mu\text{A}/\text{mg}/\text{m}^3$) | | |
| | 1.75 m/s | 2.92 m/s | 4.09 m/s |
| 2.8 | 2.283×10^{-5} | 7.680×10^{-5} | 4.857×10^{-5} |
| 2.9 | 1.220×10^{-3} | 9.175×10^{-4} | 6.233×10^{-4} |
| 3.0 | 5.846×10^{-4} | 6.783×10^{-4} | 5.420×10^{-4} |
| 3.1 | 9.964×10^{-4} | 4.448×10^{-4} | 2.945×10^{-4} |
| อนุภาคเกลือ | | | |
| แรงดันไฟฟ้า (kV) | Mean sensitivity ($\mu\text{A}/\text{mg}/\text{m}^3$) | | |
| | 1.75 m/s | 2.92 m/s | 4.09 m/s |
| 2.8 | 2.525×10^{-5} | 1.477×10^{-5} | 3.357×10^{-5} |
| 2.9 | 1.671×10^{-4} | 1.614×10^{-4} | 1.778×10^{-4} |
| 3.0 | 1.705×10^{-4} | 2.315×10^{-4} | 1.660×10^{-4} |
| 3.1 | 2.710×10^{-4} | 3.498×10^{-4} | 2.550×10^{-4} |

จาก Curve fitting ในรูปที่ 7, 8 และข้อมูลตารางที่ 3 พบว่า อนุภาคน้ำมันที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีความไวเฉลี่ย (Mean sensitivity) ของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นคือ 2.283×10^{-5} , 7.680×10^{-5} และ 4.857×10^{-5} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.220×10^{-3} , 9.175×10^{-4} และ 6.233×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 5.846×10^{-4} , 6.783×10^{-4} และ 5.420×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 9.964×10^{-4} , 4.448×10^{-4} และ 2.945×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ส่วนอนุภาคเกลือที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์คือ 2.525×10^{-5} , 1.477×10^{-5} และ 3.357×10^{-5} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.671×10^{-4} , 1.614×10^{-4} และ 1.778×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.705×10^{-4} , 2.315×10^{-4} และ 1.660×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 2.710×10^{-4} , 3.498×10^{-4} และ 2.550×10^{-4} μA ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

4. สรุป (Conclusion)

บทความวิจัยนี้ได้ออกแบบและทดสอบเบื้องต้นแบบเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองของหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ เซนเซอร์นี้ใช้การนำไฟฟ้าที่จำกัดของเศษส่วนฝุ่นละอองกลไกทั่วไปที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์นี้คือการก่อตัวของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า โดยเซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง วงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัลและระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูลหัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีประกอบด้วยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมวางซ้อนกันกับอิเล็กโทรดแบบ T-pipe อิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ และส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ต้นแบบ 2 ส่วนหลัก คือ คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์และการทดสอบการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียงกับอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือในช่วง $0 - 70 \text{ mg/m}^3$ ที่ความเร็วการไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงมีสหสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าต้นแบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นสูงแบบเวลาจริงได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากโครงการวิจัยทุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และผู้วิจัยขออุทิศส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับ นางเอ้ย กันต๊ะ และ อ้ายเล็ก ผู้ล่วงลับ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] United States Environmental Protection Agency (EPA). Health assessment document for engine diesel exhaust. EPA/600/8-90/057F [Internet]. Springfield (VA): United States Environmental Protection Agency; 2002 [cited 2025 Mar 5]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=300055PV.txt>
- [2] Yang HH, Dhital NB, Wang LC, Hsieh YS, Lee KT, Hsu YT, et al. Chemical characterization of fine particulate matter in gasoline and diesel vehicle exhaust. *Aerosol Air Qual Res.* 2019;19(6):1439-49. doi: 10.4209/aaqr.2018.12.0495.
- [3] Mehta D. The development of a nephelometer system for time-resolved particulate measurements from direct injection spark ignition engines [master's thesis]. Austin (TX): The University of Texas at Austin; 2000.
- [4] Witze PO. Diagnostics for the measurement of particulate matter emissions from reciprocating engines. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001)*; 2001 Jul 1-4; Nagoya, Japan.
- [5] Okrent DA. Optimization of a third generation TEOM monitor for measuring diesel particulate in real time. *SAE Technical Paper.* 1998;980409. doi: 10.4271/980409.

- [6] United States Environmental Protection Agency (EPA). Procedures for cascade impactor calibration and operation in process streams. EPA/600/2-77-004 [Internet]. Springfield (VA): United States Environmental Protection Agency; 1977 [cited 2025 Mar 5]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=300055PV.txt>
- [7] Smallwood GJ, Snelling DR, Neill WS, Liu F, Bachalo WD, Gülder ÖL. Laser-induced incandescence measurements of particulate matter emissions in the exhaust of a diesel engine. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001); 2001 Jul 1-4; Nagoya, Japan.
- [8] Allan W, Freeman R, Pucher G, Faux D, Bardon M, Gardiner D. Development of a smoke sensor for diesel engines. SAE Technical Paper. 2003;2003-01-3084 doi: 10.4271/2003-01-3084.
- [9] Goyen Controls Co Pty Ltd. Pentair [Internet]. 2010 [cited 2025 Apr 2]. Available from: <http://www.cleanairsystems.com>
- [10] Roessler DM, Faxvog FR. Opacity of black smoke: Calculated variation with particle size and refractive index. Appl Opt. 1979;18(9):1399-403. doi: 10.1364/AO.18.001399.