

การพัฒนาต้นแบบระบบดักควันไฟฟ้าสถิตแบบการควบคุมวงจรปิด สำหรับเตาเผาขยะ

วิสูตร อาสนวิจิตร^{1*} และ กรพจน์ มะโนใจ²

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รับเมื่อ 15 พฤษภาคม 2560 ตอรับเมื่อ 29 มิถุนายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 1 กรกฎาคม 2560

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

บทความวิจัย

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงาน โดยใช้หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 10 kV เลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตกตะกอนและส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลเพื่อไปสั่งปรับสวิตช์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออก ซึ่งทำการทดสอบกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) = 19 × 20 × 32 cm และมีลวดเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.38 mm ผลการทดสอบวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 cm กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 - 24 kV พบว่าค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.026 - 0.332 mA และได้ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควันจากรูปเบื้องต้นพบว่าเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดทำงานสัมพันธ์กันแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ดี ซึ่งให้ผลเฉลี่ยของอนุภาคควันลดลงได้ร้อยละ 82.2

คำสำคัญ : ไฟฟ้าแรงดันสูง การควบคุมแบบวงปิด อนุภาคตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เตาเผาขยะ

*Corresponding author : iamvisut@gmail.com โทรศัพท์ 053-266518

¹ อาจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

² นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

Prototype Development of a Closed-Loop Control Type Electrostatic Precipitator for Smoke Removal of Incinerators

Visut Asanavijit^{1*} and Kornpod Manojai²

¹College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Received 15 May 2017; accepted 29 June 2017; published online 1 July 2017

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

Research Article

Abstract

The particulate matter collector for official incinerator by using an electrostatic precipitation technique with 10 kV DC high voltage was designed and developed in this paper. The ZX-MQ2 sensor is detecting the smoke concentration at the collector outlet and send signal to Arduino R3 microcontroller evaluate and also send a command to adjust appropriate frequency switch of DC high voltage for smoke concentration. In this study testing electrostatic precipitator in the form of plate sheet amount 6 couple size 19 × 20 × 32cm. (width x length x high) and the discharge electrode dimension is 0.38 mm. It was found that the distance between the collecting plate and the discharge electrode was about 2 cm and the applied corona voltage in the range of 0 to 24 kV corresponding to the discharge current in the range of 0.026 to 0.332 mA. Finally, the total collection efficiency of the developed electrostatic collector was shown that about 82.2 %.

Keyword: High Voltage, Closed-Loop Control, Particle, Electrostatic Precipitators, Incinerator

*Corresponding author : iamvisut@gmail.com, Tel. 053-266518

¹ Lecturer, College of Integrated Science and Technology.

² Student, Department of Electrical Engineering.

1. บทนำ

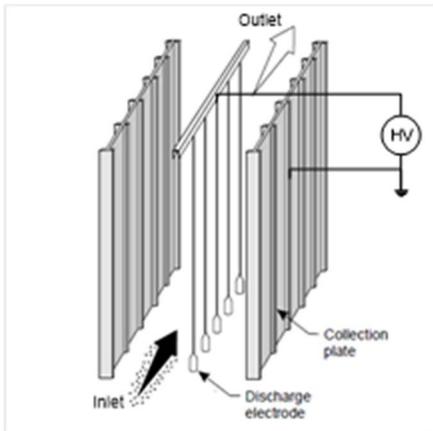
ในสถานการณ์ปี 2550 ถึงปัจจุบันจังหวัดเชียงใหม่จะประสบปัญหาด้านการเกิดหมอกควันซึ่งมีค่าเกิดมาตรฐานจากรายงานของ M. Rayanakorn [9] ในเดือนมีนาคม 2550 กรมควบคุมมลพิษได้รายงานปริมาณฝุ่นขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน $10\ \mu\text{m}$ (PM 10) ในเขตอำเภอเมืองจังหวัดเชียงใหม่สูงถึง $383\ \mu\text{g}$ ต่อปริมาตรอากาศ $1\ \text{m}^3$ ซึ่งสูงกว่าระดับมาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทยกำหนดไว้ถึง 3 เท่าตัว โดยปัญหาสำคัญคือไฟป่า การเผาในที่โล่งแจ้ง มลพิษจากยานยนต์ ซึ่งการเผาในที่โล่งแจ้งส่วนใหญ่แต่ละครั้งจะเผาโดยตรงไม่ผ่านปล่องหรือกระบวนการใด ที่จะกรองหรือบำบัดและกำจัดมลพิษที่ออกมา จึงเกิดฝุ่น ควัน ก๊าซ และสารพิษอื่นจากการเผาไหม้ แพร่กระจายไปได้ในบรรยากาศ ซึ่งทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศส่งผลทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศจากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2557 การเผาขยะยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยซึ่งทำให้เกิดปัญหาหมอกควันทำให้การขับเคลื่อนพาหนะทัศนวิสัยในการมองเห็นไม่ดี อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุตามมา อาจสูญเสียทั้งทรัพย์สินและร่างกายได้ [15] จากรายงานทางการแพทย์พบว่า PM 10 มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ทำให้เกิดการทำลายยีนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรคหอบหืด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการแพร่กระจาย PM 10 เหล่านี้ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

การใช้เตาเผาในการกำจัดขยะในพื้นที่ชุมชนเป็นการลงทุนที่สูงในระยะแรก โดยต้องมีระบบบำบัดอากาศเสียที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการใช้ความร้อนในการเผาไหม้ มวลสารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยชุมชน ประกอบด้วย ฝุ่น และก๊าซหลายชนิด ซึ่งต้องมีการนำมาบำบัดก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ [10 - 19] วิธีการกำจัดด้วยเครื่อง

ตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรือ ESP ที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้ากำจัดอนุภาคแขวนลอยในอากาศให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสำหรับอนุภาคสูงถึงร้อยละ 95 โดยไม่มีการสูญเสียของความดัน และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800°C

เนื่องจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ติดตั้งใช้งานกับเตาเผาขยะในปัจจุบัน [12] เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อน อีกทั้งยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีนำเข้าจากต่างประเทศใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ (ประมาณ 10 - 100 kV) ต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้เกิดการใช้กำลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องตลอด ซึ่งในขณะที่ไม่มีอนุภาคฝุ่นระบบจะทำงานตลอดส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เครื่องตกตะกอนมีอายุการใช้งานสั้นลงสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและซ่อมบำรุงมากขึ้น

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาและทดสอบระบบตรวจจับควันแบบวงปิดจากเตาเผาขยะที่ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ระบบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับควันจากการเผาขยะ และมีระบบที่ตรวจจับควันแบบวงปิดที่ต้องทำการศึกษาเพื่อให้การทำงานของเครื่องตรวจจับควันมีประสิทธิภาพที่สูงโดยให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้งาน ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นโดยในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยของ [17] โดยจะทำการพัฒนาระบบดักควันไฟฟ้าสถิตแบบการควบคุมวงจรปิดโดยใช้ตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 และทดสอบวัดความสัมพันธ์



รูปที่ 1 ตัวตกตะกอนแบบเพลตขนาน [4]

การทำงานของระบบร่วมกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตใช้งานที่ได้มีการพัฒนาลักษณะโครงสร้างแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (Discharge electrode) และ ขั้วตกตะกอน (Collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จ โดยที่ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ จึงทำให้ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอน (Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นละอองลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน โดยไอออนเกาะติดกับฝุ่นละอองลอยเหล่านั้นเป็นผลทำให้ฝุ่นละอองลอยได้รับประจุ และฝุ่นละอองลอยที่มีประจุ (Charged particulates) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้า

สถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอนโดยฝุ่นละอองลอยที่ตกตะกอนบนขั้วตกตะกอนจะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอนให้ฝุ่นหลุดออก[12]

2.2 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์

การควบคุมสัญญาณพัลส์ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม PWM (Pulse width modulation) ควบคุมการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานในโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าซึ่งวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานตามสมการ [6] ดังนี้

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times (V_{in} - V_{SAT}) \times t_{ON}}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (1)$$

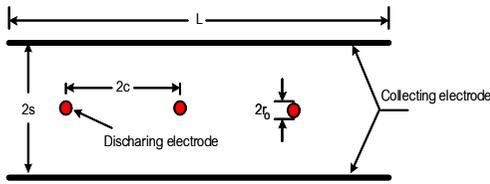
เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานมอสเฟต t_{ON} คือ ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำกระแส N_p คือ จำนวนรอบปฐมภูมิ N_s คือ จำนวนรอบทุติยภูมิ V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุต V_{in} คือ แรงดันที่อินพุต V_{SAT} คือ แรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่จุดอิ่มตัว V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด

2.3 สนามไฟฟ้าและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน (Current - Voltage relationship) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell ที่ครอบคลุมสมการ Poisson's ของสนามไฟฟ้า E คือ [10]

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของประจุ (C/m^3) และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ซึ่งสมการนี้



รูปที่ 2 ลักษณะการจัดวางของอิเล็กโทรด [13]

ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ ในการศึกษานี้ จะสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (Ion space charge) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตลักษณะแบบเส้นลวดแผ่นบาง (Wire-plate) มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (Average corona current) I_c ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรดเครื่องตกตะกอนแบบเส้นลวดแผ่นบาง [10] ดังรูปที่ 2

$$I_c = \frac{\pi \epsilon_0 Z_i h L}{c s^2 \ln(d/r_o)} V(V - V_c) \quad (3)$$

เมื่อ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (Ion electrical mobility) สำหรับในการศึกษานี้จะใช้ไอออนลบ (Negative ion) เนื่องจากมีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูง ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงตามไปด้วย โดยมีค่าเท่ากับ $2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ สำหรับไอออนลบในอากาศ d คือรัศมีทรงกระบอกสมมูล (Equivalent cylindrical-radius) ($d = 4s/\pi$ สำหรับ $s/c \leq 0.6$) r_o คือรัศมีของขั้วดิสชาร์จ h คือความสูงของขั้วตกตะกอน L คือความยาวของขั้วตกตะกอน V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรดและ V_c คือแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset voltage) หาได้จากสมการของ [10]

$$V_c = r_o E_c \ln(d/r_o) \quad (4)$$

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset field) E_c สำหรับโคโรนาลบในอากาศหาได้จาก [2-8]

$$E_c = \delta \left(32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{r_o \delta}} \right) \quad (5)$$

$$\delta = \frac{298}{(298 + T)} P \quad (6)$$

เมื่อ δ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (Gas density) T คือ อุณหภูมิทำงานของแก๊ส (Operating temperature) P คือ ความดันทำงาน (Operating pressure)

2.4 การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Particle charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusion) ในการศึกษานี้จำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาคจะได้มาจากการอัดประจุแบบสนาม (Field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $0.1 \mu\text{m}$ โดยการประมาณค่าจำนวนประจุอนุภาคนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการของ [19]

$$n_p = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{E d_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (7)$$

เมื่อ ϵ คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric constant of particle) E คือสนามไฟฟ้า K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมบ์ (มีค่าเท่ากับ $9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$) d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$) N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion number concentration) และ t คือเวลาในการอัดประจุ (Charging time) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย - แผ่น ค่าความ

เข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จาก [1] เมื่อ v_0 คือความเร็วของไหล

$$N_t = \frac{I_c d}{Z_i e v_0 V h} \quad (8)$$

2.5 ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (Overall collection efficiency) $\eta_{overall}$ ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นบาง [12,18] ที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 10 kV สามารถหาค่าได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดสอบซึ่งวัดน้ำหนักได้ทางขาเข้าและทางขาออก ทั้งก่อนผ่านและหลังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถคำนวณดังสมการนี้

$$\eta_{overall} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100\% \quad (9)$$

เมื่อ C_{inlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า และ C_{outlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด - แผ่นเพลตขนาน

3. วิธีการทดสอบระบบตรวจจับควันแบบวงปิด

3.1 เกณฑ์ในการทดสอบ

ในการทดสอบระบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานโดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 kV โดยได้ทำนำหลักการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมาควบคุมสัญญาณพัลส์วิตซ์แรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพื่อสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงนำเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ และส่งค่าปริมาณ

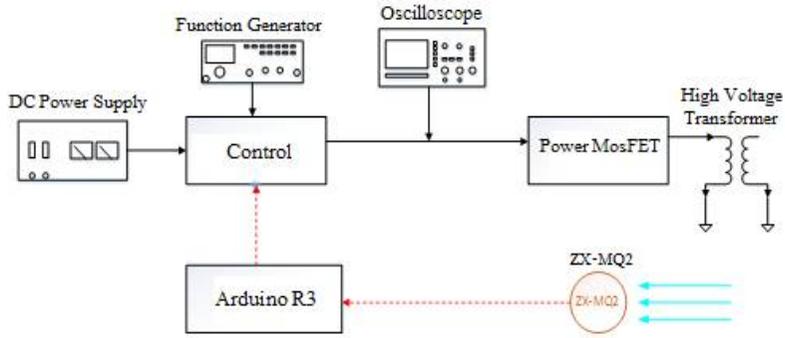
ตารางที่ 1 เกณฑ์ในการทดสอบระบบตรวจจับควัน

เกณฑ์ในการทดสอบ	คุณสมบัติ
ขนาดตัวตกตะกอน	ขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) 19 × 20 × 32 cm.
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว	ไม่เกิน 25 kV
ความถี่ใช้งาน	ไม่เกิน 30 kHz
ประจุอนุภาค	ประจุบวก
ศักย์ไฟฟ้า	ขั้วบวก
อิเล็กทรอนิกส์ใช้งาน	แบบเส้นลวด
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 300 °C
แรงดันไฟฟ้าอินพุต	220V ความถี่ 50Hz
เซนเซอร์ตรวจจับควัน	รุ่น ZX-MQ2
ตัวประมวลผล	MCU Arduino R3

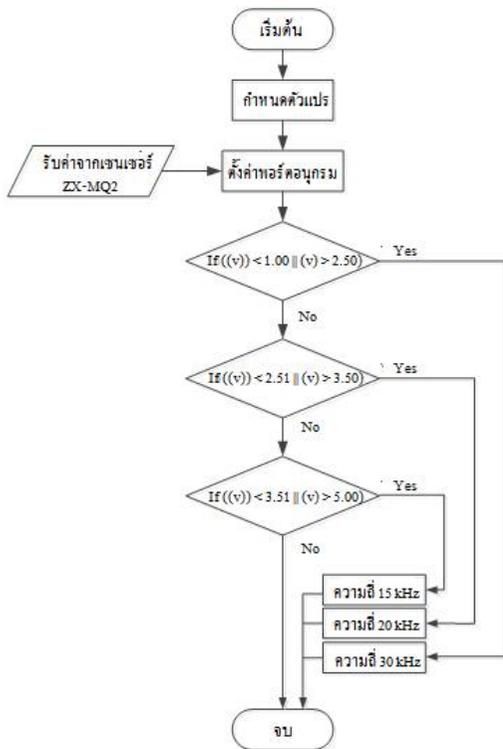
ควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลเพื่อไปสั่งปรับสวิทซ์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออก ดังนั้นเพื่อให้บรรลุเป้าหมายจึงได้มีการกำหนดรายละเอียดการทดสอบดังตารางที่ 1

3.2 รายละเอียดระบบตรวจจับควัน

เครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานแสดงในรูปที่ 5 ออกแบบให้มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) = 12×26×30 cm น้ำหนักโดยรวมประมาณ 1 kg ตกตะกอนที่ใช้สำหรับทดสอบได้ออกแบบโดยใช้แผ่นสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) = 19×20×32 cm โครงสร้างต้นแบบได้ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุงปรับเปลี่ยนแก้ไขอุปกรณ์ได้ง่ายวงจรของเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดจากเตาเผาขยะไร้ควันสำหรับสำนักงานจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage Power Supply) ตัวสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง (Pulse Generator)



รูปที่ 3 ไตอะแกรมการทำงาน Close loop control



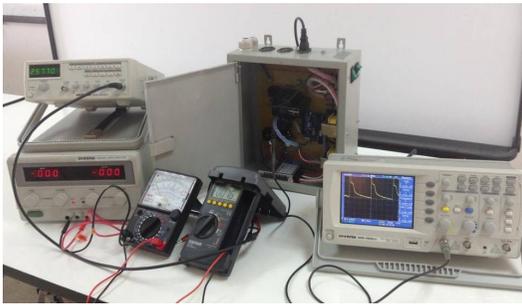
รูปที่ 4 ไตอะแกรมลำดับขั้นการประมวลผล และแสดงผล

มอสเฟตกำลัง (Power MosFET) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Transformer) ไดโอดเรียงแรงดันสูง (High Voltage Diode) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 และเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2

ดังแสดงตามไตอะแกรมการทำงาน Close loop control รูปที่ 3

หลักการการทำงานของ Close loop control คือ การวัดปริมาณของควันทางด้านขาออกของเตาเผาขยะไร้ควันโดยมีเซนเซอร์ตรวจจับควัน ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ออกมา แล้วส่งค่าของควันไปที่ Arduino R3 จากนั้นจะประมวลผลที่ได้ออกมาเป็นแรงดันตั้งแต่ 0 - 5V เพื่อไปสั่งปรับสวิตช์ความถี่ที่เหมาะสมกับปริมาณของควันเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุดดังรูปที่ 4

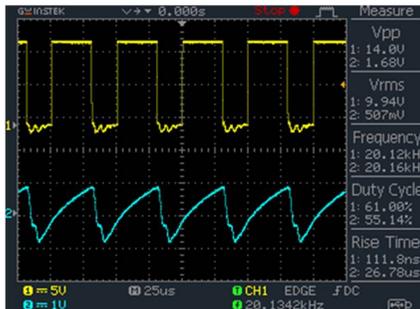
ลำดับขั้นการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลที่ใช้กับ Arduino R3 ดังแสดงในรูปที่ 4 เริ่มต้นการทำงานจะต้องมีการกำหนดค่าของตัวแปรก่อนและรับค่าจากเซนเซอร์ ZX-MQ2 โดยต้องมีการตั้งค่าให้เข้ากับพอร์ตอนุกรมเมื่อรับค่าจากเซนเซอร์แล้วมีเงื่อนไขการทำงานตามคำสั่งของโปรแกรมซึ่งกำหนดให้ค่าระหว่าง 1.00 - 2.50 V ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 1 ทำงานที่ 30 kHz ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงานค่าระหว่าง 2.51 - 3.50 V ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 2 ทำงานที่ 20 kHz ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงานและค่าระหว่าง 3.51 - 5.00 V ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 3 ทำงานที่ 15 kHz ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงาน



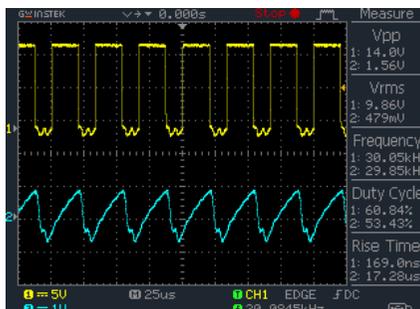
รูปที่ 5 อุปกรณ์การวัดทดสอบความถี่และแรงดันเอาต์พุต



(ก) ความถี่ 15 kHz, Duty cycle ที่ร้อยละ 60



(ข) ความถี่ 20 kHz, Duty cycle ที่ร้อยละ 60



(ค) ความถี่ 30 kHz, Duty cycle ที่ร้อยละ 60

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์รอบการทำงานและความถี่ใช้งาน

4. อภิปรายผลการวิจัย

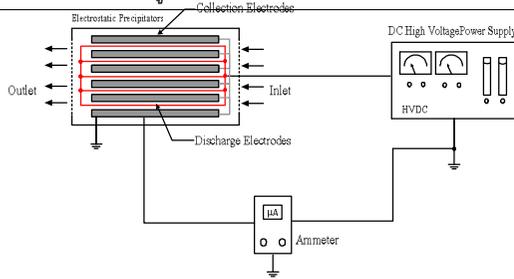
4.1 การศึกษาความสัมพันธ์ความถี่และแรงดันเอาต์พุต

ในการทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันเอาต์พุตได้นำหลักวิธีการของพัลส์วิดท์มอดูเลชันมาใช้ ซึ่งเป็นการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกันคือสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งสามารถปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้จากการปรับค่าความต้านทาน R_{adjust} ได้ตั้งแต่ 0 - 5 k Ω ในการออกแบบได้ใช้ความต้านทานปรับค่า 10 k Ω โดยทดสอบที่ระดับของความถี่ 15, 20 และ 30 kHz จากนั้นทำการวัดสัญญาณพัลส์ที่ขา 9 และขา 10 ของไอซีเบอร์ TL494 ดังแสดงในรูป 5 ด้วยออสซิลโลสโคปของ Digital Oscilloscope (ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GD5-1052-U) บันทึกข้อมูลของสัญญาณรูปคลื่นพัลส์ที่ได้จากการทดสอบปรับความค่าต้านทาน R_{adjust} จากการทดสอบปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) ตั้งแต่ร้อยละ 25 - 80 พบว่ารอบการทำงานที่ร้อยละ 60 เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมกับ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ไม่ทำให้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลังเกิดความร้อน และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 10 kV อย่างต่อเนื่อง

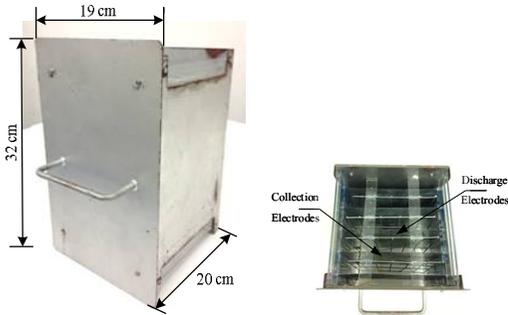
จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของรอบการทำงานและความถี่ใช้งานโดยการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้กำหนดให้มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 1V = 10kV พบว่าที่รอบทำงานร้อยละ 60 ที่ความถี่ 15, 20 และ 30 kHz มีค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} เท่ากับ 18.8, 16.8 และ 15.6 kV ตามลำดับ

4.2 การศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

การทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Current – Voltage Characteristics)



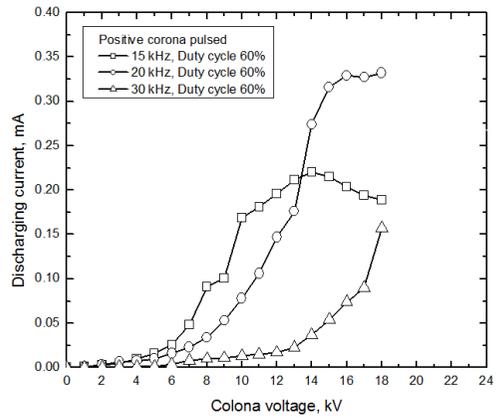
(ก) ไลอะแกรมของอุปกรณ์การวัดทดสอบ



(ข) ลักษณะโครงสร้างตัวตักตะกอนสำหรับวัดทดสอบ

รูปที่ 7 วงจรทดสอบและโครงสร้าง
ตัวตักตะกอนแบบเพลท

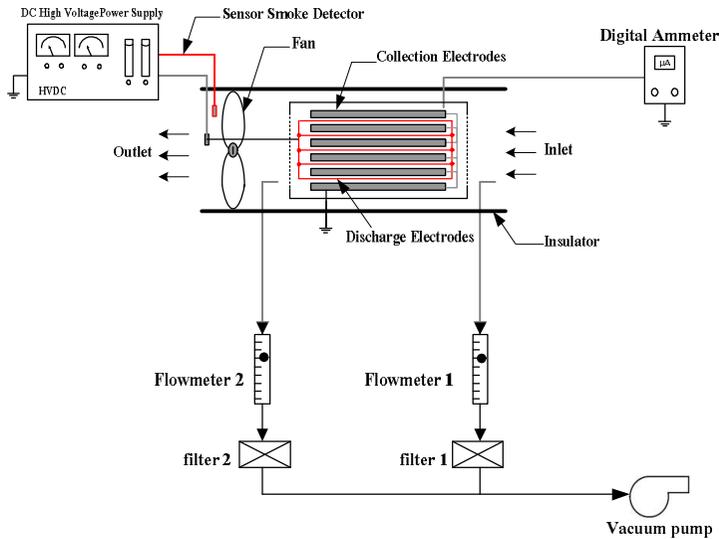
โดยมีไลอะแกรมอุปกรณ์และการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับเครื่องต้นแบบดักจับกลุ่มควันและการทำงานของระบบตรวจจับควันแบบวงปิดซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสดิสชาร์จ (Discharge Current) จากขั้วดิสชาร์จและขั้วตักตะกอนซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จที่ขั้วดิสชาร์จของเครื่องตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลทขนานมีขนาดเล็กเป็นขั้วดิสชาร์จ จะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลผ่านขั้วตักตะกอน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จต่อการเกิดโคโรนาดิสชาร์จภายในตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลท



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วดิสชาร์จในช่วง 0 - 24 kV เพื่อสร้างโคโรนาดิสชาร์จ(Corona Discharge) เพื่อหาตำแหน่งกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน

ขนานจำนวน 6 คู่ โดยกำหนดให้ขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก (Outer Electrode) มีความยาว 320 mm และขั้วอิเล็กโทรดด้านใน (Inner Electrode) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.38 mm โดยขั้วดิสชาร์จและขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกจะถูกแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ด้วยฉนวน ดังแสดงรูปที่ 7 (ข) สำหรับอุปกรณ์และไลอะแกรมการทดสอบ

ผลการทดสอบ เบื้องต้นวัดค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตักตะกอนเท่ากับ 2.0 cm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 – 24 kV ด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลผ่าน ขั้วตักตะกอนของตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลทขนานจำนวน 6 คู่พบว่าค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วง 0.026 - 0.332 mA เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 kV สำหรับนำมาใช้งาน พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ 15, 20 และ 30 kHz จะให้ค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จเท่ากับ 0.169 mA



รูปที่ 9 ไลอะแกรมและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอน

0.078 mA และ 0.013 mA ตามลำดับเมื่อทำการทดสอบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ได้ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จสูงขึ้นตาม จนถึงที่ระดับช่วงแรงดัน 19 – 24 kV จะเกิดการเบรคดาวน์ภายในตัวตกตะกอน ทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นที่รอบของการทำงานร้อยละ 60 ความถี่ 20 kHz จะให้ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่สูงกับเครื่องต้นแบบมากที่สุดผลจากการทดสอบสามารถนำมาใช้กำหนดการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขการทำงานของความถี่ทั้งสามได้ เพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับควันทงด้านขาออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้อย่างถูกต้อง

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควันทง

ในการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันทงจากรูปแสดงในรูปที่ 9 ประกอบด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับควันทงแบบวงปิดจากเตาเผาขยะ เซนเซอร์ตรวจจับควันทงรุ่น ZX-MQ2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 kV ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาด

มิติ(กว้าง×ยาว×สูง) = 19×20×32 cm พัดลมดูดอากาศมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ชุดปรับและวัดอัตราการไหลแผ่นกรองฝุ่นละอองขนาดอนุภาคและบีมสุญญากาศขั้นตอนทดสอบจะทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับควันทงรุ่น ZX-MQ2 ไว้ที่ทางขาออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนาน มีพัดลมดูดอากาศติดตั้งทางขาออกเพื่อดูดควันทงป้อนออกมาด้วยความเร็วอย่างสม่ำเสมอมีมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 วัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จเพื่อตรวจเช็คการเบรคดาวน์ระหว่างการทดสอบ เริ่มทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้กับขั้วดีสชาร์จที่มีขนาดขนาด 10 kV และต่อกราวนให้กับแผ่นเพลตที่ทำหน้าที่เป็นส่วนเก็บอนุภาคควันทงจากนั้นนำควันทงที่ได้จากควันทงรูปจำนวน 20 ก้าน ผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของอากาศของ Dwyer ที่อัตราการไหลของอากาศที่ 10 L/min เข้าสู่ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนาน และจึงเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้กับระบบตรวจเช็คระบบว่ามีจุดรั่วไหลของ

ตารางที่ 2 น้ำหนักอนุภาคก่อนและหลังผ่านเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิด

เวลาใช้ทดสอบ	น้ำหนักแผ่นกรอง (mg)						ประสิทธิภาพการตกตะกอนทั้งหมด $\eta_{overall}$ (%)
	แผ่นเปล่า	ก่อนเข้า	มวลอนุภาคขาเข้า(C_{inlet})	แผ่นเปล่า	หลังผ่าน	มวลอนุภาคขาออก(C_{outlet})	
15 นาที	47.8	56.1	8.3	45.2	46.4	1.2	85.5
30 นาที	49.7	64.5	14.8	47.2	49.8	2.6	82.4
45 นาที	47.9	64.4	16.5	47.5	50.7	3.2	80.6
60 นาที	47.2	67.0	19.8	45.9	49.8	3.9	80.3
ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคเฉลี่ย (Average)							82.2

ควันหรือเกิดการเบรกควานในระบบ หากพบต้องปรับแก้ไขให้เรียบร้อยก่อนเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงทำการสูมเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 min ซึ่งมีการทดสอบเก็บตัวอย่างซ้ำจำนวน 4 ครั้ง บริเวณทางเข้าและทางออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเพลตขนานด้วยวิธีการกรองอนุภาคจากแผ่นกรองฝุ่นละอองขนาดเฉลี่ย 3 μm โดยมีปั้มสุญญากาศดูดอนุภาควัณผ่านชุดปรับและวัดอัตราการไหลเข้าสู่แผ่นกรองฝุ่นละออง ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะจดบันทึกผลของกระแสโคโรนาดีสชาร์จผ่านมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ซึ่งพบว่าจะมีการทำงานสัมพันธ์กับการตรวจจับควันขาออกที่เซ็นเซอร์ทำการตรวจจับและนำไปประมวลผลเพื่อปรับความถี่ใช้งานจากนั้นจึงนำตัวอย่างอนุภาควัณไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนและทำการบันทึกผลการทดสอบสำหรับนำมาทำการวิเคราะห์ผล

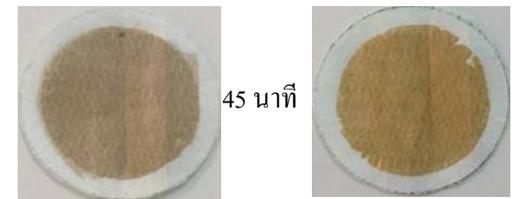
ผลการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดแสดงในตารางที่ 2 โดยนำสมการที่ (9) มาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมดพบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลาทดสอบ 15, 30, 45



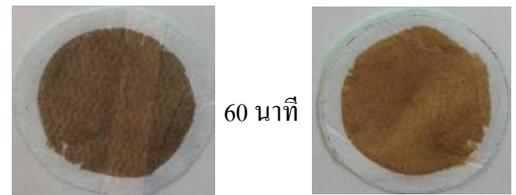
15 นาที
(ก) ก่อนผ่านตัวตกตะกอน (ข) หลังผ่านตัวตกตะกอน



30 นาที
(ก) ก่อนผ่านตัวตกตะกอน (ข) หลังผ่านตัวตกตะกอน



45 นาที
(ก) ก่อนผ่านตัวตกตะกอน (ข) หลังผ่านตัวตกตะกอน



60 นาที
(ก) ก่อนผ่านตัวตกตะกอน (ข) หลังผ่านตัวตกตะกอน

รูปที่ 10 ตัวอย่างอนุภาควัณบนแผ่นกรองจากการสูมเก็บ

และ 60 min เท่ากับร้อยละ 85.5, 82.4, 80.6 และ 80.3 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ยร้อยละ 82.2 ซึ่งผลอนุภาคที่แผ่นกรองก่อนผ่านมีตะกอนสะสมมากกว่าหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 kV และแผ่นกรองก่อนผ่านจะมีการสะสมตะกอนควินรูปมากกว่าแผ่นกรองหลังผ่านการทำงาน ของ ตัว ตก ตะ กอน เชน ึ่ง ไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตขนาดจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) = $19 \times 20 \times 32$ cm ดังแสดงรูปที่ 10 เนื่องจากอนุภาคควินได้ถูกอัดประจุให้เป็นประจุบวกในบริเวณช่องว่างระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 cm ที่ถูกสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มข้นสูงจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอนุภาคควินจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนาด (Collection electrodes) ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและเกาะติดอยู่กับขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนาดความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บนี้เรียกว่า Migration velocity ซึ่งขึ้นกับแรงไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคและแรงลาก (Drag force) ที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังขั้วเก็บนอกจากนี้เมื่ออนุภาคเกาะติดกับขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนาดแล้วจะค่อยๆ ถ่างเทประจุบวกสู่ขั้วเก็บทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคกับขั้วเก็บลดลงและยังพบว่าเครื่องต้นแบบตรวจจับควินแบบวงปิดสามารถทำงานสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ดี มีการตรวจจับควินขาออกและส่งไปที่ Arduino R3 และประมวลผลปรับแรงดันให้เหมาะสมกับควินขาออกได้ดี

5. วิจารณ์และสรุปผล

ในบทความนี้ได้นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับควินแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะโดยใช้หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 10 kV ใช้งานกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลต

ขนาดจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) = $19 \times 20 \times 32$ cm. มีลวดเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.38 mm จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันเอาต์พุตพบว่าที่รอบทำงานร้อยละ 60 เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ไม่ทำให้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลังเกิดความร้อน และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 10 kV อย่างต่อเนื่อง และทดสอบที่ความถี่ 15, 20 และ 30 kHz มีค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} เท่ากับ 18.8, 16.8 และ 15.6 kV ตามลำดับ สำหรับการทดสอบวัดค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 cm กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 - 24 kV พบว่าค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.026 - 0.332 mA และได้ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควินจากควินรูปเบื้องต้นพบว่าผลเฉลี่ยของอนุภาคควินลดลงได้ร้อยละ 82.2 โดยพบว่าระบบตรวจจับควินแบบวงปิดสามารถทำงานสัมพันธ์กันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงได้ดี ซึ่งจะทำการตรวจสอบในสภาวะที่ควินน้อยระบบจะทำงานจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงน้อยและหากเซนเซอร์ตรวจจับควินมีปริมาณมากระบบจะส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับตัวตกตะกอนมากขึ้นตามในการวิจัยต่อไปคณะผู้วิจัยจะได้ศึกษาผลกระทบตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ให้เหมาะสมเพื่อปรับแก้ไขและศึกษาวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ของเครื่องตรวจจับควินแบบวงปิดต้นแบบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 10 kV เพื่อจะวิเคราะห์ถึงพลังงานที่ใช้ต่อชั่วโมงการทำงาน เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ออกแบบตัวตกตะกอนและการปรับปรุงแก้ไขให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นได้และสามารถนำไปใช้งานในการทดสอบกับเตาเผาขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์และงานบริการวิชาการสู่ชุมชนชื่อทุน HRS (Hands-on Researcher (Small)) รหัส ทุน 58-HRS1-246 งบประมาณปี พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ดอยสะเก็ด)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Jaworek, A. Krupa and T. Czech. Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review. Journal of Electrostatics. 65. : 133 – 135., 2007.
- [2] A. Mizuno. Electrostatic Precipitation. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 7(5) : 615 – 624., 2000.
- [3] J. Chang, A. J. Kelly, J. Crowley. M Handbook of Electrostatic Processes. Marcel Dekker. Inc. New York. USA.,1995.
- [4] Engineering 360 Powered by IEEE GlobalSpec : http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/electrostatic_precipitators.
- [5] P. Haslerm, T. H. Nussbaumer. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. Biomass & Bioenergy. 16 : 385 - 395.,1999.
- [6] G. John, F. Martin, C. George. Principles of Power Electronics. Massachusetts Institute of Technology. Addison-Wesley Publishing Company.Inc.,1991.
- [7] J. R. Melcher, K. S. Sachar, E. P. Warren. Overview of electrostatic devices for control of submicrometer particles. Proceedings of the IEEE. 65(12) : 1659 - 1669., 1977.
- [8] K. J. McLean. Electrostatic precipitators. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings A. 135(6) : 347 - 361.,1988.
- [9] M. Rayanakorn. Haze and Air Pollution in Chiang Mai. Thai Health Promotion Foundation. March., 2010.
- [10] K. R. Parker. Applied Electrostatic Precipitation. Blackie Academic & Professional. New York., 1997.
- [11] P. Intra. Electrostatic precipitator for industrial air pollution control. Technic Magazine. 256(22) : 109 - 122., 2010.
- [12] P. Intra. Electrostatic System. National Science and Technology Development Agency: NSTDA Northern Network., 2010.
- [13] P. Intra and N. Dussadee. Approach to Predict the Total Collection Efficiency of a Wire-plate Electrostatic Precipitator for Particles Removal from Biomass Furnace. The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand. 17 - 19 October 2007.
- [14] Thailand State of Pollution Report 2014. Pollution Control Department. Ministry of Natural Resources and Environment., 2015.
- [15] U. Vinitketkumnuen, T. Chewonarin and K. Taneyhill. Oxidative damage to DNA from alveolar lung cell lines by air- borne

- particulate matter PM_{2.5}&PM₁₀ extractable from Chiang Mai and Lumphun. The Thailand Research Fund (TRF)., 2007.
- [16] V. Asanavijit, V. jumpa, N. promkasikon and K. srisawad. Development of a particulate matter collector from inhouse cooking by using electrostatic precipitation technique, 6th Rajamangala University of Technology National Conference, Ayutthaya Thailand.23 - 25 July 2014 : 584 – 594.
- [17] V. Asanavijit, W. Muangjai and P. Intra Development of Closed-Loop Control Detect Smoke System for Incinerator Offices by Principle of Precipitate High Voltage, Phayao Research Conference. 29 – 30 January 2015 : 524 – 535.
- [18] V. Asanavijit, S. Premrudeepreechacharn, A. Yawootti and P. Intra. Current–Voltage Characteristics of Positive Corona Pulsed Electrostatic Precipitator, The 9th PSU Engineering Conference, Merlin Beach Resort Hotel, Trirang Beach, Phuket, Thailand, 2 - 3 May 2011. : 359 – 363.
- [19] H. J. White. Industrial Electrostatic Precipitation. Addison-Wesley. Reading. Massachusetts., 1963.