

การออกแบบและประเมินตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อสำหรับดักฝุ่นละอองขนาดเล็กจากโรงบ่มใบยาสูบ

Design and Evaluation of a Multiple-tube Electrostatic Collector for Particulate Matter Removal from Tobacco Monopoly Exhaust

วิสูตร อาสนวิจิตร^{1*}, ฐิติวัฒน์ ปันผาง², พานิช อินตะ¹

Visut Asanavijit^{1*}, Thitiwat Panpang², Panich Intra¹

Received : 17 April 2018 ; Accepted : 2 July 2018

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและประเมินทดสอบตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อสำหรับดักฝุ่นละอองขนาดเล็กจากโรงบ่มใบยาสูบ ตัวตกตะกอนที่ออกแบบประกอบด้วยอาคารอย่างง่ายของท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมกับอิเล็กโทรดดิซชาร์จจำนวน 6 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 613.6 มิลลิเมตร และใช้เส้นลวดกลมเป็นอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มิลลิเมตร มีลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร สูง 88.9 มิลลิเมตร ในการศึกษานี้ได้ทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 30 กิโลโวลต์ จ่ายไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดขนาด 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ ขณะที่ท่อทรงกระบอกเป็นกราวด์ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าร่วมกับตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต พบว่าค่ากระแสดิซชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 26 ถึง 332 ไมโครแอมป์ ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบที่มีผลศาสตร์เท่ากัน ที่อัตราการไหลของควัน 10 ลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ สุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 15 นาทีต่อตัวอย่าง พบว่าได้ค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมเฉลี่ย 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตกตะกอนที่ได้ออกแบบนี้มีแนวโน้มที่ดีสำหรับการกำจัดฝุ่นควันจากโรงบ่มใบยาสูบ

คำสำคัญ: อนุภาค ฝุ่น โรงบ่มใบยาสูบ ไฟฟ้าสถิต

Abstract

In this paper, a multiple-tube electrostatic collector for removal of particulate matter from the tobacco monopoly exhaust was designed and theoretically and experimentally evaluated. The designed collector consisted of a simple array of coaxial discharge electrodes placed along the axis of six cylindrical collection tubes with a diameter of 50.8 mm and 613.6 mm in length; the discharging electrode with diameters of 1.1 mm and the insulator was used to electrical insulate between electrodes and cylindrical collection. The diameter of the insulator was 80 mm and 88.9 mm in height. In this study, a 30 kV DC power supply was used to apply DC high voltage to the discharging electrode in the range of about 0 to 30 kV, while the collection electrode was grounded. The current-voltage characteristics of the multiple-tube electrostatic collector were analytically calculated. It was shown that the discharged current increased with increasing

¹ อาจารย์, รองศาสตราจารย์, วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

² นิสิตปริญญาตรี, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

¹ Lecturer, Assoc. Prof. College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, A.Doisaket, Chaing-Mai 50220.

² Bachelor degree student, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Muang District, Chaing Mai, 50300.

* Corresponding author; Visut Asanavijit, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, A.Doisaket, ChaingMai 50220, Thailand. imavisut@gmail.com

applied corona voltage, in the range between 26 and 332 μA . In order to study the collection efficiency of the collector, the particulate mass concentration at inlet and outlet of the precipitator was sampled by the isokinetic sampling at the particulate flow rate of about 10 L/min and the operating pressure of about 1 bar for 15 min per sample. The overall collection efficiency of the present precipitator was found to be about 75 %. Finally, the designed electrostatic precipitator appeared to be a promising apparatus for collection of particulate matter from tobacco monopoly exhaust.

Keywords: Particle, Dust, Tobacco Monopoly, Electrostatic

บทนำ

การบ่มใบยาสูบจะมีขั้นตอนการบ่มเพื่อเปลี่ยนสภาพ ใบสดให้เป็นใบแห้งโดยการนำวัสดุเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ชังข้าวโพด ไม้พิน และอื่นๆ มาใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อน ในการบ่มใบยาเป็นระยะเวลาสั้นๆ น้อย 10 ถึง 14 ชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมเชื้อเพลิงในมีความร้อนตลอด จากกลไกขั้นตอนในการบ่มใบยาที่มีการเผาไหม้ส่งผลทำให้มีปัจจัยเสี่ยงด้านมลพิษทางอากาศที่มีผลต่อสุขภาพจากการเผาไหม้ ที่ปล่อยออกมา ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เขม่าควัน ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ขนาดเล็กกว่า 1 ใน 25 ส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นผมมนุษย์ สามารถแพร่กระจายเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ถูกลมในปอด และกระแสเลือดโดยตรง ส่งผลอันตรายต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะต่างๆ ในร่างกายและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเรื้อรังได้ จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ อลงกรณ์ ผาทอง¹ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการบ่มใบยาสูบของสถานีบ่มใบยาสูบสันกลาง โดยเปรียบเทียบต้นทุนและปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่เกิดจากการใช้ถ่านหินลิกไนต์ ชังข้าวโพด และถ่านหินลิกไนต์ผสมกับชังข้าวโพด เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการบ่ม พบว่าใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 252 พีพีเอ็ม การใช้ชังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวไม่พบก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินลิกไนต์กับชังข้าวโพด ในสัดส่วน 1:2, 1:1, และ 2:1 มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 9.50, 87.50 และ 182.50 พีพีเอ็ม ซึ่งในการศึกษาพบว่าจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเกิดควันและฝุ่นละอองขนาดเล็กออกมา คณะผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรมีการศึกษาเพื่อกำจัดควันและฝุ่นละอองขนาดเล็กก่อนปล่อยออกสู่สาธารณะ จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ สรวุฒิ พวงคต² ได้ศึกษาเกี่ยวกับอาการและอาการแสดงของระบบทางเดินหายใจและสมรรถภาพปอดของผู้สัมผัสการเผาไหม้ลิกไนท์ในกระบวนการบ่มใบยาสูบ หมู่บ้านร่องก้อ ตำบลแม่คำ อำเภ

แม่จัน จังหวัดเชียงราย จากการเผาไหม้ลิกไนต์ก่อให้เกิดฝุ่นละอองและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ จึงได้ศึกษากับกลุ่มตัวอย่างผู้สัมผัสการเผาไหม้ลิกไนต์โดยตรงที่ประกอบอาชีพบ่มใบยาสูบนานเฉลี่ย 15.53 ปี ทำงานเฉลี่ยวันละ 10.3 ชั่วโมง จำนวน 82 คน และผู้สัมผัสทางอ้อมจำนวน 86 คน พบว่าผู้สัมผัสโดยตรงเสี่ยงต่อมีอาการระบบทางเดินหายใจ และสมรรถภาพปอดอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ผู้สัมผัสทางอ้อมมีผลใกล้เคียงกับผู้สัมผัสโดยตรง ผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรมีการศึกษาหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่อันตรายต่อสุขภาพน้อยกว่ามาใช้ และหาวิธีกำจัดควันและฝุ่นละอองที่ปล่อยออกมา

โดยปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีที่มีความหลากหลาย สำหรับสามารถนำมาใช้ในการกำจัดควันและละอองฝุ่นขนาดเล็กได้ ซึ่งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator; ESP) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถกำจัดอนุภาคแขวนลอย (Particulate matter) โดยใช้หลักการทางไฟฟ้าสถิต³ นิยมนำมาใช้กำจัดอนุภาคอย่างแพร่หลาย เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม เตาเผาซีเมนต์ เตาเผาชีวมวล และใช้ทำความสะอาดอากาศในที่อาศัย ซึ่งมีข้อดีที่กว่าอุปกรณ์ควบคุมอนุภาคอื่นๆ เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ มีค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุงต่ำกว่า มีความดันสูญเสียของก๊าซต่ำ สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคสูง 99 ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขนาดอนุภาคระดับต่ำกว่า 1 ไมครอน จึงได้มีการประยุกต์ใช้กำจัดฝุ่นควันเพื่อลดปัญหาการแพร่กระจายของฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กที่ออกไปสู่บรรยากาศ โดยได้มีการศึกษาวิจัยต่างๆ เพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกันอย่างต่อเนื่อง จากการวิจัยที่ผ่านมาของพานิช อินตะและคณะ³⁻⁵ ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบการทำงานเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล ประกอบด้วยอาร์เรย์ของท่อขนาดเล็ก 21 ท่อ พบว่าได้ประสิทธิภาพการตกตะกอนรวม 70 เปอร์เซ็นต์ มีรายงานที่ ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของขั้วอิเล็กโทรด ความเข้มข้นไฟฟ้า ความเข้ม

ชั้นไอออน และปริมาณประจุที่อนุภาคได้รับ คณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าต้องมีการพัฒนาตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ชญาศักดิ์ รัตนโชติและคณะ⁶ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พิน ขนาด $0.5 \times 1 \times 0.5$ เมตร จำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น จำนวนเส้นลวด 12 ต่อ 1 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 1 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 58.43% ที่แรงดันสูงกระแสตรง 12 กิโลโวลต์ พทวีร์ ศรีโหมดและคณะ⁷ ได้การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องบำบัดกลิ่นที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ มีระดับแรงดันเอาต์พุต ถึง 30 กิโลโวลต์ มีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (Fly back Transformer) ทำหน้าที่ให้แรงดันสูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำงานได้ดีกับเครื่องต้นแบบโดยมีการรายงานว่าการมีกรนำมาประยุกต์ใช้งานให้แพร่หลายมากขึ้น และ Jaworek และคณะ⁸ ได้สรุปเกี่ยวกับวิธีการทำความสะอาดก๊าซไอเสียโดยวิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ระยะห่างแผ่นตกตะกอนที่เหมาะสมมีค่า 450 มิลลิเมตรจะได้ประสิทธิภาพและการใช้พลังงานที่เหมาะสม ได้นำเสนอวิธีการแบ่งช่วงของการอัดประจุและส่วนของการรวมตัวกันของอนุภาค (Agglomeration) จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาสิ่งสำคัญที่จะทำให้สมรรถนะในการทำงานตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสูงขึ้น จะต้องมีการออกแบบและสร้างตัวตกตะกอนให้มีการไหลของควันได้สะดวก มีการเลือกลักษณะขนาดของอิเล็กโทรด การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดให้เหมาะสม ออกแบบให้ตัวตกตะกอนใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อให้สามารถสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า ความเข้มข้นไอออน และปริมาณประจุที่อนุภาคได้รับให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของควันและละอองฝุ่นได้สูงขึ้นตาม ควรมีการออกแบบและสร้างระบบการทำความสะอาดตะกอนที่สะสมที่ขั้วตัวตกตะกอนที่มีลักษณะเหนียวหนืด ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพลดลงตามระยะเวลาการสะสมของตะกอน โดยให้มีระบบการทำงานที่ง่าย ทำการถอดล้างทำความสะอาดได้สะดวก

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องดักควันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงสำหรับโรงบ่มใบยาสูบ โดยมีหลักการคือ เมื่อควันไหลผ่านปล่องควัน และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จ โดยที่ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ จึงทำให้ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอน (Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic

current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นละอองลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน โดยไอออนเกาะติดกับฝุ่นละอองลอยเหล่านั้นเป็นผลทำให้ฝุ่นละอองลอยได้รับประจุ และฝุ่นละอองลอยที่มีประจุ (Charged particulates) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตไปติดกับผิวท่อตัวตกตะกอน โดยจะมีการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต และทดสอบสมรรถนะการทำงานตัวตกตะกอนอนุภาคควันจากโรงบ่มใบยาสูบ ผลทดสอบที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดอนุภาคควันจากการโรงบ่มใบยาสูบ และสามารถขยายผลในการใช้งานต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สนามไฟฟ้าและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน (Current - Voltage relationship) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell⁹ ในการศึกษาจะสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (Ion space charge) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต มีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (Average corona current) I_c ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรดเครื่องตกตะกอน⁹ ดังแสดงใน (Figure 1)

$$I_c = \frac{8\pi\epsilon_0 Z_i V(V - V_0)L}{r_2^2 \ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

เมื่อ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของไอออน (Ion electrical mobility) สำหรับในการศึกษานี้จะใช้ไอออนลบ (Negative ion) เนื่องจากมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าสูง ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงตามไปด้วย r_1 คือรัศมีของขั้วดิสชาร์จ r_2 คือรัศมีของขั้วตกตะกอนด้านนอก L คือความยาวของขั้วตกตะกอน E_c สนามไฟฟ้าเริ่มเกิด โคโรนา (Corona onset field) สำหรับโคโรนาในอากาศ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรด และ V_0 คือแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา⁹ (Corona onset voltage) คือ $V_0 = E_c r_1 \ln(r_2/r_1)$

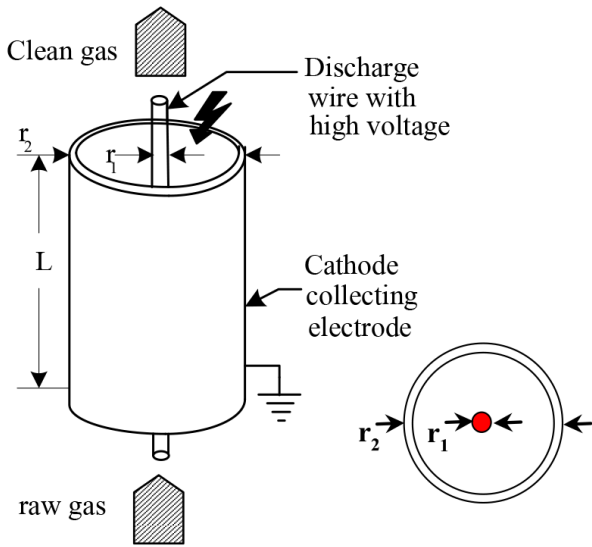


Figure 1 Electrode arrangements¹²

2. การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Particle charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusion) ในการศึกษานี้จำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาคจะได้รับการอัดประจุแบบสนาม (Field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร โดยการประมาณค่าจำนวนประจุอนุภาคนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการของ^{17,18}

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

เมื่อ ϵ คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric constant of particle) E คือสนามไฟฟ้า K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ (มีค่าเท่ากับ $9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$) d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$) N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion number concentration) และ t คือเวลาในการอัดประจุ (Charging time) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุหาได้จาก³⁻⁵

$$N_i t = \frac{I_c (r_2^2 - r_1^2)}{2r Z_i e E Q} \quad (3)$$

3. การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า

อนุภาคได้รับประจุไฟฟ้าสถิตสุทธิ (Net electrostatic charge) เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม E อนุภาคที่มีประจุเหล่านั้นจะได้รับแรงเชิงไฟฟ้าสถิตสุทธิ (Net electrostatic force) F_E กระทำต่ออนุภาคสามารถคำนวณได้จาก^{10,11}

$$F_e = neE \quad (4)$$

โดยที่ n คือ จำนวนประจุที่อยู่บนอนุภาค e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน เท่ากับ $(1.61 \times 10^{-19} \text{ C})$ E คือ ความเคียดสนามไฟฟ้า (V/m) ในการศึกษานี้จำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาค n จะได้มาจากการใส่ประจุด้วยวิธีการแพร่กระจาย (Diffusion charging) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร การประมาณค่าการกระจายตัวประจุของอนุภาค (Particle charge distribution) ด้วยวิธีการนี้สามารถคำนวณได้จากสมการของไวท์¹¹

$$n(t) = \frac{d_p k T}{2 K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2 k T} \right] \quad (5)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบริทมานน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ $1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ \bar{c}_i คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากผลของอุณหภูมิของไอออน (Mean thermal speed of ion) มีค่าเท่ากับ 240 m/s N_i คือ ค่าความเข้มข้นของไอออนอิสระ (Ions/m³) t คือ เวลาในการอัดประจุ (s) K_E คือ ค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ มีค่าเท่ากับ $9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ ถ้าไม่มีแรงภายนอกอื่นใด ๆ มากกระทำ (ปกติแล้ว $F_e \gg F_g$) แรงเชิงไฟฟ้าสถิตจะเร่งให้อนุภาควิ่งเร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุด ความสามารถของอนุภาคที่ได้รับประจุเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า ความสามารถในการเคลื่อนที่ตัวเชิงไฟฟ้าของอนุภาค (Electrical particle mobility) Z_p (m²/V.s) คือความเร็วของอนุภาคที่มีประจุต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าสามารถหาได้จาก^{10,11}

$$Z_p = \frac{neC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.514 + 0.8 \exp \left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (7)$$

โดยที่ d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m) C_c คือตัวชดเชยของคันทิงแอม λ คือ ค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของก๊าซ (μm) λ_r คือ ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่อิสระของอากาศ ที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ $0.0665 \mu\text{m}$

4. การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าจะสมมติให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุบวก (Positive charge) เข้าไปในสนามไฟฟ้ามีลักษณะดังแสดงไว้ใน Figure 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นขั้วอิเล็กโทรดซ้อนแกนร่วม (Coaxial electrodes) ที่มีช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร มีการไหลภายในแบบราบเรียบในทิศทางแนวแกน z และตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าในทิศทางแนวรัศมี r เมื่ออนุภาคตัวอย่างเข้าไปในท่อด้วยการไหลของของไหลในแนวแกน z และอนุภาคที่มีประจุจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตามแนวรัศมี r ด้วยแรงของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุ^{10,11} นี้คือ

$$\frac{dr}{dt} = u_r + Z_p E_r \text{ และ } \frac{dz}{dt} = u_z + Z_p E_z \quad (8)$$

โดยที่ u_r คือ ความเร็วในแนวรัศมี (m/s) u_z คือ ความเร็วในแนวแกน (m/s) E_r คือ สนามไฟฟ้าในแนวรัศมี (V/m) E_z คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน (V/m) ถ้าสมมติให้การสูญเสียของสนามไฟฟ้าที่ขอบมุมของขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมาก ๆ และสนามไฟฟ้าภายในท่อทรงกระบอกสม่ำเสมอ (Uniform electric field) สนามไฟฟ้าจะหาได้จากความสัมพันธ์^{10,11}

$$E_r = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \text{ และ } E_z \approx 0 \quad (9)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านในและด้านนอกของทรงกระบอก (V) r_1 คือ ขนาดรัศมีของทรงกระบอกด้านใน (m) r_2 คือ ขนาดรัศมีทรงกระบอกด้านนอก (m) โดยสมมติให้การไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบสมมาตรกับแกน (Axisymmetric) แบบราบเรียบ (Laminar) แบบรูปร่างของความเร็วพัฒนาไปจากเดิมอย่างเต็มที่ (Fully developed) และแบบไม่ยุบตัวตามความดัน (Incompressible) ดังนั้นความเร็วในแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบมีค่าเท่ากับศูนย์และความเร็วในแนวแกนเท่ากับความเร็วของของไหลในท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม^{10,11} คือ

$$u_r = 0 \text{ และ } u_z(r) = Ar^2 + B \ln(r) + C \quad (10)$$

$$A = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \quad (11)$$

$$B = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (12)$$

$$C = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left[\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r_1) - r_1^2 \right] \quad (13)$$

และ $\frac{dp}{dz}$ คือ ค่าคงที่ของ Pressure gradient รวมสมการที่ (8) (9) และ (10) จะได้เส้นทางโคจรของอนุภาค (Particle trajectory)^{10,11} คือ

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\frac{dr}{dt}}{\frac{dz}{dt}} = \frac{Z_p V}{ru_z \ln(r_2/r_1)} \quad (14)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (14) เพื่อหาเส้นทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุจากความยาวของทรงกระบอก L ความเร็วของของไหล u_z และความเข้มของสนามไฟฟ้า^{10,11} E_r คือ

$$\int_r^{r_2} ru_z(r) dr = \int_0^L \frac{VZ_p}{\ln(r_2/r_1)} dz \quad (15)$$

จะได้เส้นทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เข้าไปในท่อที่ตำแหน่งรัศมี^{10,11} r_1 คือ

$$z(r) = -\frac{1}{4Z_p V} \left[\ln(r_2/r_1) \left[Br_1^2 - 2Cr_1^2 - Ar_1^4 - Br^2 + 2Cr^2 \right] + Ar^4 - 2Br_1^2 \ln(r_1) + 2Br^2 \ln(r) \right] \quad (16)$$

Figure 2 แสดงอัลกอริทึมการวิเคราะห์ตำแหน่งระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ตำแหน่งระยะในแนวแกนและในแนวรัศมีที่แต่ละโนดของตารางสามารถหาได้จากสมการที่ (16) โดยการรู้ตำแหน่งเริ่มต้นคือ ตำแหน่งระยะแนวแกนของขั้วอิเล็กโทรดด้านใน (Inner electrode) และตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้าของอนุภาค (Particle inlet) และทำการจะคำนวณหาตำแหน่งระยะในแนวแกน และในแนวรัศมี

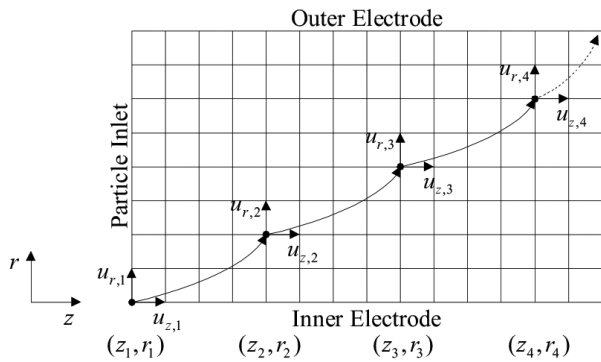


Figure 2 Algorithm for determining the particle trajectory^{10,11}

อนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ และทำการคำนวณเข้าไปเรื่อยๆ ไปจนถึงตำแหน่งระยะรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก (Outer electrode) จะได้ระยะเคลื่อนที่อนุภาคจากจุดทางเข้าไปจนถึงจุดอนุภาคตกที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก

5. ประสิทธิภาพการตกตะกอน

สำหรับประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค (collection efficiency) η ภายในตัวตกตะกอนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ³⁻⁷ ดังนี้

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi r_2 L Z_p E}{Q}\right) \tag{17}$$

เมื่อ L คือความยาวของตัวตกตะกอน E คือสนามไฟฟ้าในตัวตกตะกอน Q คืออัตราการไหลของอนุภาค และ Z_p คือการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค

การออกแบบเครื่องดักควันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับโรงบ่มใบยาสูบ

1. วัตถุประสงค์และเป้าหมายในการออกแบบ

ในการออกแบบงานวิจัยนี้ จะการออกแบบและสร้างตัวตัวเก็บรวบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการโรงบ่มใบยาสูบ โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมลวดเส้นตรง เลือกใช้ท่ออะลูมิเนียมกลม ทรงกระบอก ซึ่งหาได้ง่าย มีการเกิดสนามไฟฟ้าภายในได้สม่ำเสมอ และทำความสะอาดได้ง่าย นำหลักการสร้างสัญญาณ พีดับเบิลยูเอ็ม มาควบคุมสัญญาณพัลส์สวิตซ์แรงดันไฟฟ้าผ่านวงจร ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูง สำหรับการออกแบบจะเลือก

Table 1 Design criteria for the electrostatic smoke collector for the tobacco monopoly exhaust

Design criteria	Details
Discharge electrode diameter	1.1 mm (6 line)
Collection electrode diameter	50.8 mm (6 pipes)
Distance of the discharge electrode and collection electrode	25.4 mm
Length of the precipitator	613.6 mm
Particle diameter range	10 nm - 2.5 μ m
Particle charge	Positive charge
Electric polarity	Positive
Discharge Voltage	~ 30 kV
Frequency	~ 40 kHz
Discharge electrode type	Wire
Smoke temperature	60 - 300 °C
Operating pressure	1 bar
Smoke characteristics	Solid and Liquid
Velocity	10 L/min
Electrical insulator	88.9 mm
Dimensions of the prototype	240x1320 mm

อุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการทำงานและราคา โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศ ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุงหรือการถอดล้าง/เปลี่ยนอุปกรณ์ในขณะทำงานได้ง่ายและมีราคาต้นทุนในการสร้างถูก และที่สำคัญที่สุดจะต้องมีความปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูงในขณะทำงาน ดังนั้นเพื่อให้บรรลุเป้าหมายจึงได้มีการกำหนดรายละเอียดแสดงดังใน Table 1

2. การออกแบบตัวเก็บรวบรวมอนุภาค

ตัวเก็บรวบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีลักษณะโครงสร้างดังแสดง(Figure 3) ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (Discharge electrode)และขั้วตกตะกอน (Collection electrode) ความต้องการพื้นฐานของการออกแบบตัวเก็บรวบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตในการศึกษานี้คือจะต้องมีประสิทธิภาพในการตกตะกอน (Collection efficiency) ที่สูง โดยไม่มีการสูญเสียของความดันอากาศ (Pressure drop) ภายในและสามารถทำงานได้ตามเกณฑ์คุณสมบัติที่ได้กล่าวไว้ใน Table 1 ชุดตัวเก็บรวบรวมอนุภาคที่จะสร้างขึ้นนี้จะต้องมีการป้องกันหรือความปลอดภัยอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูง

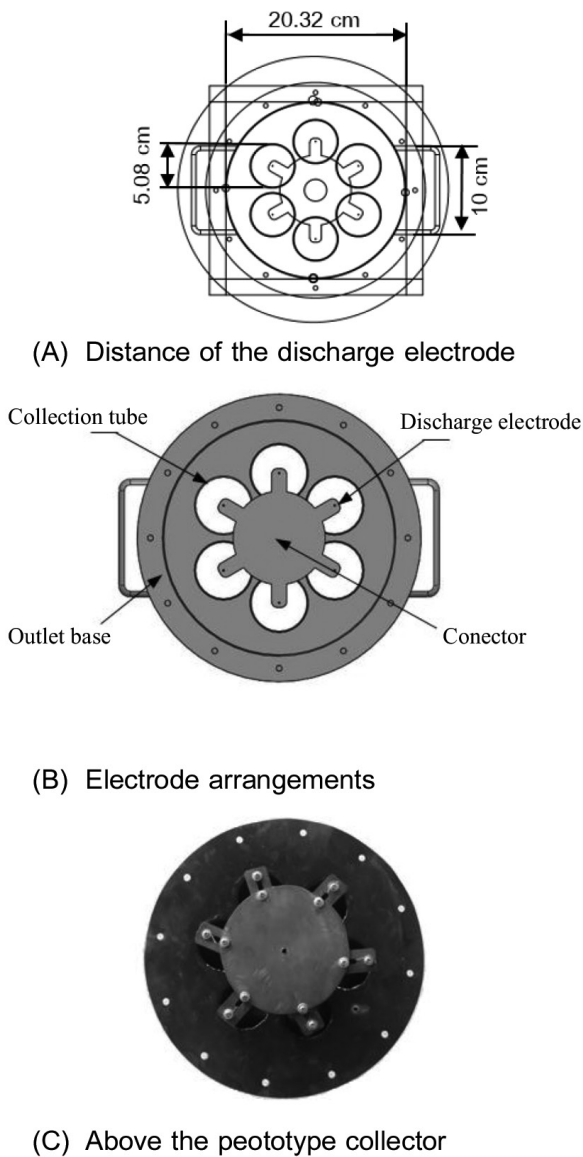


Figure 3 Schematic of the discharge electrode

ด้วยการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน โดยเลือกใช้ฉนวนด้วยไฟฟ้าเป็นฉนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร สูง 88.9 มิลลิเมตร เป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟและการลัดวงจรไฟฟ้า ในการออกแบบชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ในการศึกษานี้จะเป็นชุดตัวเก็บรวบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแบบรวม (Wire-to-cylinder collector) ที่ประกอบด้วยท่อตกตะกอนซึ่งมีลักษณะเป็นการนำท่อหลาย

อันมารวมกันวางเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการตกตะกอน (Collection area) ดังแสดงไว้ใน Figure 3 ชุดตัวเก็บรวบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ทำจากท่อสแตนเลส ที่ทนต่อการกัดกร่อนประกอบด้วยท่อตกตะกอนแบบหลายท่อ (Multiple-tube type) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร มีความยาว 613.6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ท่อ ซึ่งจะมีพื้นที่ในการตกตะกอนเท่ากับ 0.0075 ตารางเมตร และแต่ละท่อตกตะกอนจะมีและขั้วดิสชาร์จ ที่ทำจากสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.1 มิลลิเมตร มีความยาว 600 มิลลิเมตร วางซ้อนกันแบบแกนร่วม ในการศึกษานี้จะออกแบบให้ขั้วดิสชาร์จ 1 เส้นต่อ 1 ท่อตกตะกอน ระยะรัศมีของระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอนเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร Figure 4 แสดงรูปของชุดตกตะกอนที่สร้างขึ้น โดยขั้วดิสชาร์จจะถูกเชื่อมต่อกันทั้งทางไฟฟ้าทุกขั้วและต่อเข้าขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่แยกออกจากกันด้วยลูกถ้วยไฟฟ้า โดยขั้วดิสชาร์จจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและขั้วตกตะกอนจะถูกต่อลงกราวด์ ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ ทำให้ไอออนและอิเล็กตรอนถูกสร้างขึ้นและทำให้เกิดการไหลกระแสไอออน ผ่านช่องระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นผ่านเข้าในช่องนี้จะเกิดการชนกัน โดยไอออนเกาะติดกับฝุ่นทำให้ฝุ่นได้รับประจุ และถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต สะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอน จะถูกกำจัดออกโดยการเคาะให้ฝุ่นหลุดออก¹² จากสมการที่ (10-16) สามารถคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 20 และ 30 กิโลโวลต์ ดังแสดงใน Figure 5,6 ทำการทดสอบกับขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตรถึง 10 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงของอนุภาคควันที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม²² พบว่าที่ระดับแรงดันสูงเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ตกตะกอนได้เร็วขึ้น โดยเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเล็ก 10 นาโนเมตร ที่ระยะรัศมีระหว่างผิวท่อและขั้วดิสชาร์จ 0.0253 เมตร แรงดันไฟฟ้า 20 และ 30 กิโลโวลต์สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปตกตะกอนที่ภายในท่อได้ตำแหน่ง 0.00202 และ 0.00112 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นระยะตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปตกตะกอนได้ทั้งหมด จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้งานวิจัยนี้จึงเลือกออกแบบแหล่งจ่ายใช้งานที่ 20 กิโลโวลต์เป็นขนาดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

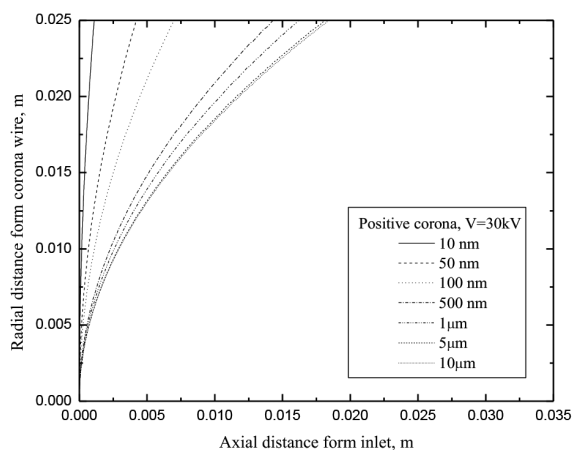
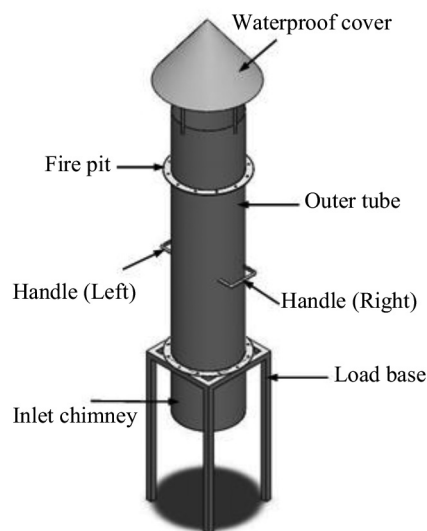


Figure 6 Particle trajectory at 30 kV

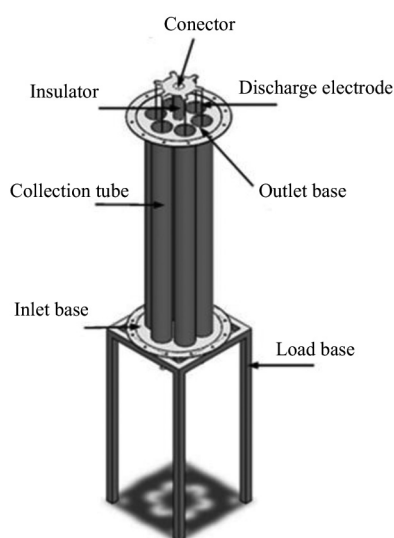


Figure 4 Schematic of the electrostatic particle collector and electrode arrangements

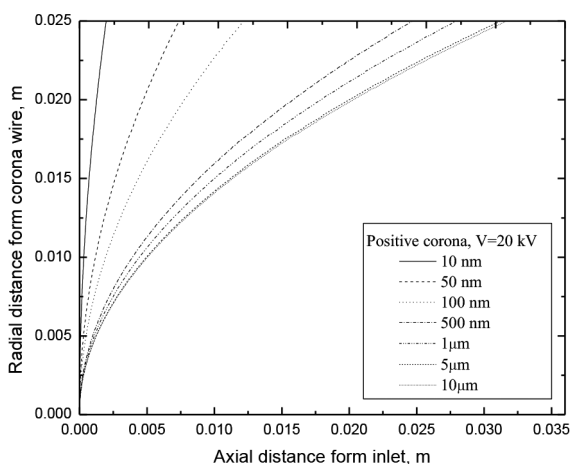


Figure 5 Particle trajectory at 20 kV

3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง

สำหรับการออกแบบจะเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการทำงานและราคา โดยใช้เทคโนโลยีที่ผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุงได้ง่าย และปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูงในขณะทำงาน จึงกำหนดรายละเอียดการออกแบบดัง Table 2

Table 2 Design requirements

Variable	Description
DC input voltage	12 V
Discharge voltage	0V - 30 kV
Frequency	~ 30 kHz
Corona discharge	Wire
Electric polarity	Positive
High Voltage Transformer	110 Watts
Electric insulator	Height 88.9 mm

ในการออกแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (1) โดยคำนวณหาแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา และค่ากระแสโคโรนา ซึ่งทำให้ทราบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 14.5 กิโลโวลต์ จะเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนา มีค่ากระแสเริ่มเกิดโคโรนา 88.65 ไมโครแอมป์ และที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ มีค่ากระแสโคโรนาประมาณ 870 ไมโครแอมป์ต่อ 1 ท่อ และให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 6 ท่อ $P=IV \times (6)$ เท่ากับ 104 วัตต์ มีพื้นที่สำหรับตกตะกอนเท่ากับ 0.0075 ตารางเมตร ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกได้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงฟลายแบคของ TBE รุ่น TLF 14689 ที่มีขนาด 37.5 วัตต์ สามารถให้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาด 25 กิโลโวลต์ (± 0.4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่ากระแส 1.5 มิลลิ

แอมป์ จำนวน 3 ตัว ดังแสดงใน Figure 7 เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังงานได้ $P=37.5 \times (3)$ เท่ากับ 112.5 วัตต์ มาต่อวงจรแบบขนานเพื่อใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ความต้องการพื้นฐานของชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงคือ สร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงภายในตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดการโคโรนาดีสชาร์จ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพราะเป็นกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคตามสมการที่ (2-3) โดยสนามไฟฟ้าภายในตัวตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดีสชาร์จและลักษณะของรูปทรง (Geometry) ของตัวตกตะกอน ซึ่งสนามไฟฟ้าภายในตัวเก็บรวบรวมอนุภาคจะถูกจำกัดโดยแรงดันเบรกดาวนของแก๊สปกติแล้วที่แก๊สอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 1 บาร์เท่ากับ 3,000 โวลต์ ต่อ เซนติเมตร งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม PWM (Pulse width modulation) มาใช้ในการ

ควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟส (Power MosFET) เบอร์ IRFP460 ที่ความถี่สูงผ่านวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานในโหมดของการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงใน Figure 8 ซึ่งจะทำงานได้ตามการคำนวณในสมการ¹³

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times (V_{in} - V_{SAT}) \times t_{ON}}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (18)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานของมอสเฟต T_{ON} คือ ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำกระแส N_p คือ จำนวนรอบปฐมภูมิ N_s คือ จำนวนรอบทุติยภูมิ V_{in} คือ แรงดันที่อินพุต C_{SAT} คือ แรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่จุดอิ่มตัว V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุต โดยจะคำนวณเริ่ม

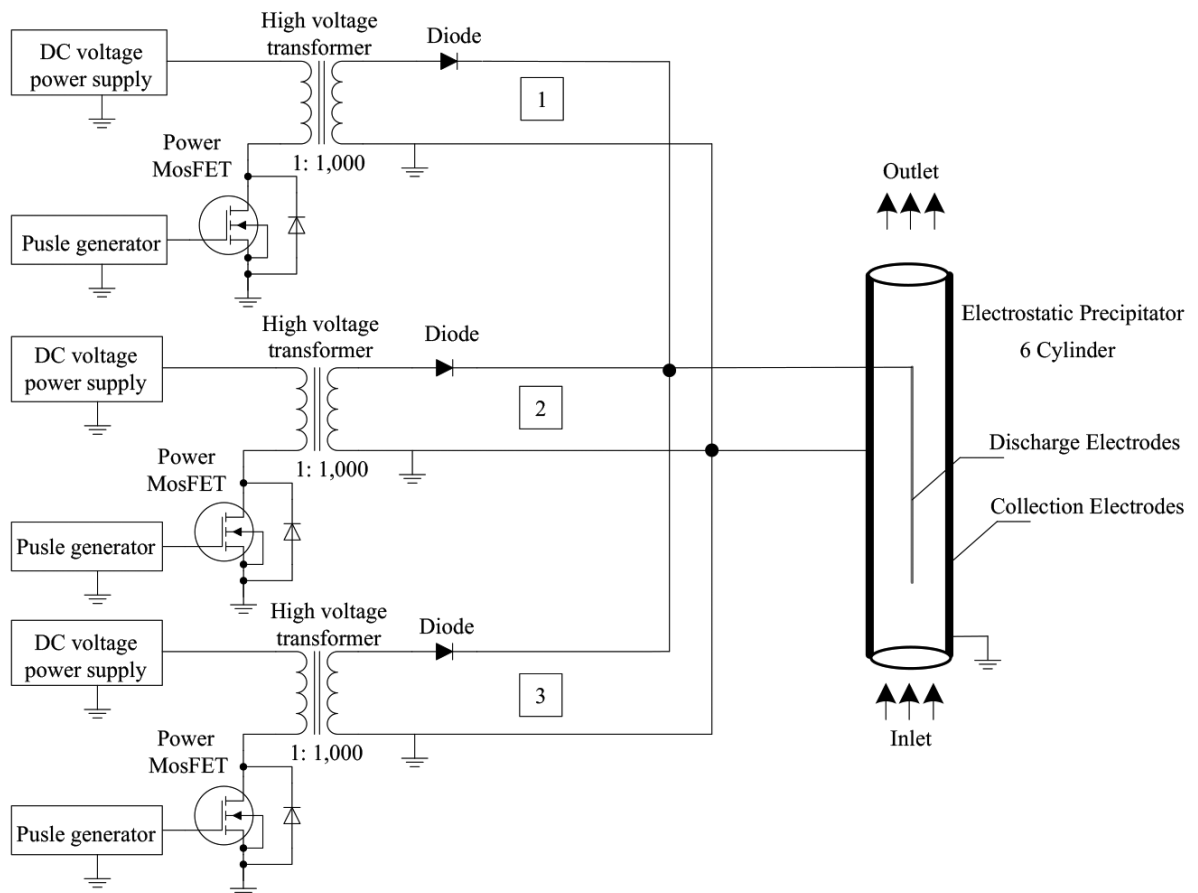


Figure 7 Schematic diagram of the DC high voltage power supply

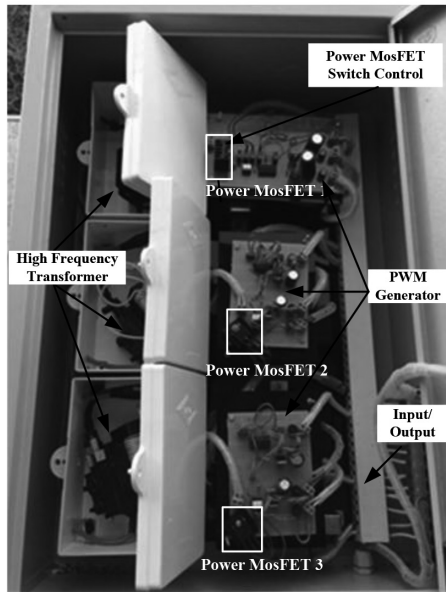


Figure 8 30 kV DC high voltage power supply

จากหาค่าจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ ด้วยสมการ $N_s = ((10 \times 10^3 V) \times 10) / 12V$ เท่ากับ 8,333 รอบ เนื่องจากวงจรไอซีเบอร์ TL494 ที่ใช้ในการออกแบบให้ค่า t_{ON} ได้สูงสุดเพียง 17 ไมโครวินาที จึงได้เลือกใช้งาน t_{ON} 15 ไมโครวินาที จึงนำค่ามาคำนวณหาแรงดันเอาต์พุต $V_{out} = [((8,333/10) \times (12 - (-16)) \times (15 \times 10^{-6})) / ((50 \times 10^{-6}) - (15 \times 10^{-6}))] - 1$ ได้ค่าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ จึงออกแบบใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 ตัว เพื่อให้ได้แรงดันขนาด 30 กิโลโวลต์ ในการทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันเอาต์พุต ได้นำหลักวิธีการของพัลส์วิดท์มอดูเลชันมาใช้ ซึ่งเป็นการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกับคือ สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งสามารถปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้จากการปรับค่าความต้านทาน R_{adjust} เพื่อทดสอบปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) ตั้งแต่ 25 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่ารอบการทำงานที่ 65 เปอร์เซ็นต์ เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลังเกิดความร้อน และออกแบบให้ขาที่ 6 ของไอซีเบอร์ TL494 มีความต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์มเพื่อใช้สำหรับปรับค่าความถี่ใช้งานได้สูงสุดถึง 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับใช้งานวัดด้วยออสซิลโลสโคปของ Digital Oscilloscope (ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GD5-1052-U) ความสัมพันธ์ของรอบการทำงานและความถี่ใช้งานจาก Figure 9 โดยการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้กำหนดให้มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ เท่ากับ 10 กิโลโวลต์ พบว่าที่รอบทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และที่สัญญาณขาขึ้น (Rise time) มีค่ากับ 17.64 ไมโครวินาที แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีลักษณะแบบพัลส์ปลายแหลม วัดค่า

V_{pp} และ V_{rms} เท่ากับ 10.6 และ 3.43 กิโลโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณตามสมการที่ (18)

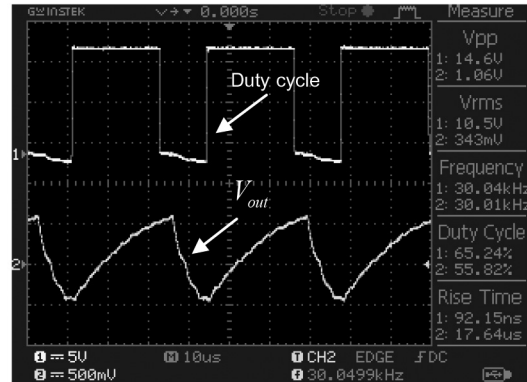


Figure 9 Output voltage - Duty cycle

4. ต้นแบบเครื่องดักควันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับโรงบ่มใบยาสูบ

ต้นแบบเครื่องดักควันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับโรงบ่มใบยาสูบโดยใช้เทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตที่ประกอบอุปกรณ์ต่างๆ รวมกันเสร็จสมบูรณ์ดัง (Figure 10) โดยโครงสร้างของเครื่องต้นแบบนี้ ออกแบบให้สามารถนำไปติดตั้งตรงปลายปล่องของโรงบ่มใบยาสูบได้ โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนปล่องของเดิม เคลื่อนย้ายได้ง่าย และบำรุงรักษา ถอด ล้าง ทำความสะอาดได้สะดวก



Figure 10 Prototype of the developed electrostatic collector for tobacco monopoly exhaust

ระเบียบวิธีการทดลอง

1. การศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ในการทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Current - Voltage Characteristics) โดยมีไดอะแกรมของอุปกรณ์และการทดสอบ ดังแสดงใน Figure 11 เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากโรงบ่มใบยาสูบ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสดิสชาร์จ (Discharge Current) จากขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอน ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการปรากฏการณ์โคโรนาที่ขั้วดิสชาร์จของตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบเส้นลวดตรง จะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ผลที่ได้ทำให้สามารถประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ความเข้มข้นไอออน และปริมาณประจุที่อนุภาคจะได้รับตามการคำนวณสมการที่ (4-9) ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันที่ทดสอบภายในผิวท่อได้ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จต่อการเกิดโคโรนาดิสชาร์จภายในตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรง โดยกำหนดให้ขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก มีความยาว 613.6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ท่อ และขั้วดิสชาร์จมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.1 มิลลิเมตรต่อ 1 ท่อ โดยขั้วดิสชาร์จและขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกจะถูกแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ด้วยฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ความสูง 88.9 มิลลิเมตร สำหรับอุปกรณ์และไดอะแกรมการทดสอบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วดิสชาร์จทดสอบในช่วง 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ เพื่อสร้างโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) มีการทดสอบกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับท่อตกตะกอนระยะ 25 มิลลิเมตร เพื่อหา แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา รอบ ค่ากระแสโคโรนา รอบการทำงาน และความถี่ ที่เหมาะสม ด้วยออสซิลโลสโคป Digital Oscilloscope (ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GD5-1052-U) ส่งผลการวัดค่าผ่านทางสายสัญญาณแบบ RS232 เพื่อบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ สำหรับการนำมาวิเคราะห์

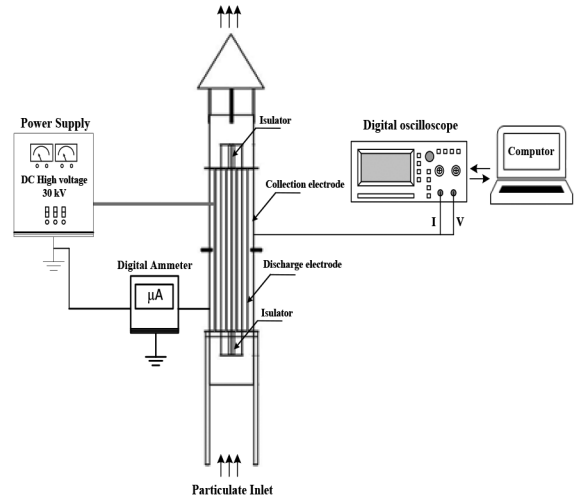


Figure 11 Experimental setup for investigating the current - voltage characteristics

2. การศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนของควัน

ในการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค แสดงใน Figure 12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ชุดปรับและวัดอัตราการไหลของ Dwyer แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง HEPA (High Efficiency Particulate-free Air Filter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างอนุภาคสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนอนุภาคเชิงมวล โดยในการศึกษานี้ใช้แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบใยแก้ว (glass fiber) ของบริษัท Whatman โมเดล EPM 2000 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร หนา 330 ไมโครเมตร มีอัตราการในการกักเก็บอนุภาค (Particle Retention Rating) ที่ 98 เปอร์เซ็นต์ และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส และมีสมรรถนะของ Busch โมเดล SV 1003 ขั้นตอนในการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วดิสชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบที่ปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับทดสอบอยู่ในช่วงขนาด 0 โวลต์ ถึง 30 กิโลโวลต์ โดยจะทำการทดสอบกับอนุภาคของควันโรงบ่มใบยาสูบที่ใช้ชีวมวลแห้งจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาเป็นเชื้อเพลิงในการเผา มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงประมาณ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบให้ระบบทำงานและตรวจเช็คการทำงานของระบบว่ามีจุดรั่วไหลของควันหรือเกิดการเบรกดาวน์ในส่วนไหนของระบบ หากพบต้องทำการปรับแก้ไขเพื่อให้ระบบทำงานต่อไปได้ จากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 1 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่าง 3 ซ้ำ เวลาในการดูดเข้ามา 15 นาที ในเวลาที่ 15, 30

, 45 และ 60 นาที ผุ่นที่เก็บอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ทดสอบเก็บผุ่นในตำแหน่งทางเข้า (Inlet) และทางออก (Outlet) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตติดตั้งแสดงใน (Figure 12) ด้วยวิธีการกรองอนุภาค โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการตกตะกอนดัง Table 3

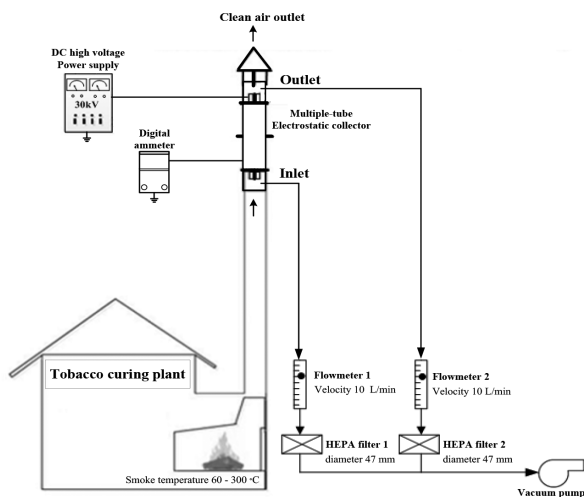


Figure 12 Experimental setup for testing the collection efficiency

Table 3 Condition variable used to analyze the collection efficiency of the developed collector from the tobacco

Variable	Description
Discharge voltage	0V - 30 kV
Frequency	~ 30 kHz
Corona discharge electrode	Wire
Electric polarity	Positive
Smoke temperature	60 - 300 oC
Operating pressure	1 bar
Smoke characteristics	Solid and Liquid
Velocity	10 L/min

สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบที่มีจลศาสตร์เท่ากัน (Isokinetic Sampling) คือ การดึงเอาบางส่วนของของไหลที่เราสนใจออกมาเพื่อวัดค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค โดยทำการศึกษาตามมาตรฐานของ EPA (Environmental Protection Agency) ในที่นี้ค่าที่สนใจจะเป็นอนุภาคที่อยู่ภายในท่อตกตะกอน ที่ผ่านชุดปรับและวัดอัตราการไหล

ของควัน 10 ลิตรต่อหน้าที่ โดยใช้แผ่นกรองที่อยู่ภายในชุดเก็บตัวอย่างเป็นตัวดักจับ เมื่อได้ปริมาณของอนุภาคแล้วจึงนำชุดแผ่นกรองอนุภาคออกมาทำการชั่งน้ำหนักแผ่นกรองอนุภาคเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนของระบบโดยประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (Overall collection efficiency) $\eta_{overall}$ ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต¹² สามารถหาค่าได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดสอบซึ่งวัดน้ำหนักได้จากทางขาเข้าและทางขาออก มาคำนวณดังสมการนี้¹²

$$\eta_{overall} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100\% \tag{19}$$

เมื่อ c คือ Particulate Mass Concentration (mg/m^3) C_{inlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า และ C_{outlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า จากนั้นนำผลการทดสอบความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ได้มาทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์เพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมต่อเวลาในการทำงาน และการเคาะทำความสะอาดต่อไป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การวิเคราะห์คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้า ร่วมกับตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ กระแสและแรงดันโคโรนา แสดงใน Figure 13 ทดสอบกับจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตในช่วง 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มิลลิเมตร ความยาว 613.6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ท่อ ศักย์ไฟฟ้าชนิดขั้วบวก รอบการทำงาน 65 เฮอร์เซ็นต์ และปรับความถี่ทดสอบที่ 20, 30 และ 40 กิโลโวลต์ ตามลำดับ พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้น ค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่ได้ในช่วง 26 ถึง 332 ไมโครแอมป์ โดยที่ความถี่ 20, 30 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จสูงสุดเท่ากับ 228 ไมโครแอมป์ 332 ไมโครแอมป์ และ 210 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นถึงช่วงแรงดัน 22 ถึง 24 กิโลโวลต์ จะเริ่มเกิดการเบรกดาวนภายในตัวตกตะกอน ซึ่งเป็นจุดใช้งานที่ควรระวัง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกการทำงานที่ 65 เฮอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ที่ให้กระแสโคโรนาดิสชาร์จที่สูง

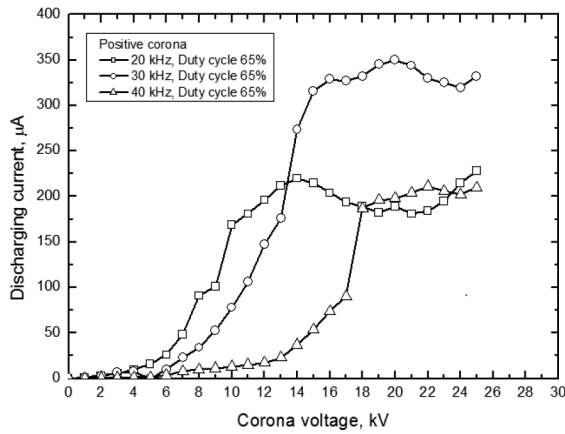


Figure 13 Variations of the charging current with corona voltage at different frequency

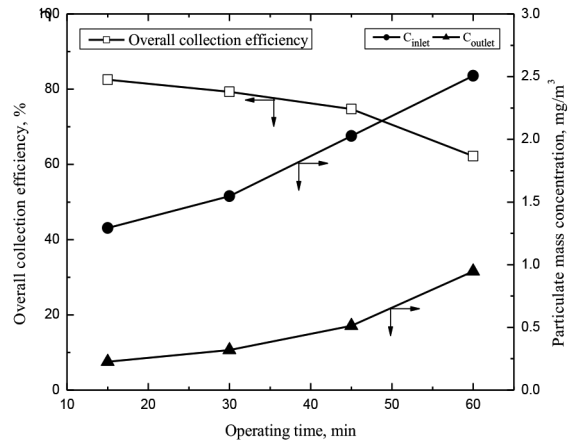


Figure 14 Variations of the particle mass concentration with particle diameter

2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ผลการซึ่งน้ำหนักตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต แสดงใน Figure 14 โดยนำสมการที่ (19) มาใช้ในการคำนวณหา พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลาทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะได้ค่าเท่ากับ 82.5, 79.3, 74.7 และ 62.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมเฉลี่ย 74.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของพานิช อินต๊ะและคณะ³ ที่ผ่านมา พบว่าผลความเข้มข้นมวลอนุภาคทางเข้า C_{inlet} จะมีค่ามากกว่าความเข้มข้นมวลอนุภาคทางออก C_{outlet} หลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการที่ (17) และจากการทดสอบยัง พบว่ามีการสะสมของอนุภาคเกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดและผิวท่อตกตะกอน ที่มาจากการเผาไหม้ โดยมีทาร์และอนุภาครวมตัวกันเป็นคราบที่ผิวของท่อตกตะกอน ซึ่งเมื่อใช้งานไปการสะสมจะยิ่งมากขึ้นจึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตลดลง ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปต้องมีการทำความสะอาด เพื่อให้ตัวเก็บรวบรวมอนุภาคทำงานได้ประสิทธิภาพสูงตลอดใช้งาน

สรุปและแนวทางพัฒนาต่อในอนาคต

บทความได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องดักควันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงสำหรับโรงบ่มยาสูบที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 30 กิโลโวลต์ ใช้งานกับตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต ที่มีขนาด (กว้าง×สูง) 240 × 1,320 มิลลิเมตร มีลวดเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.1 มิลลิเมตร จากการทดสอบความสัมพันธ์ของเวลาที่ กระแสและแรงดันเอาต์พุต พบว่าที่รอบทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ให้ค่ากระแสโคโรนาดีซาร์จสูงสุดเท่ากับ 332 ไมโครแอมป์ เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งไม่ทำให้สวิตช์มอเตอร์กำลังเกิดความร้อน และได้ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควันจากควันโรงบ่มยาสูบ พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมเฉลี่ย 74.6 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับผลงานวิจัยพานิช อินต๊ะและคณะ³ ที่ผ่านมา จากการทดสอบพบว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงที่ได้ออกแบบใช้งานมีข้อจำกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านพลังงานที่จ่ายให้อิเล็กโทรด ทำให้สามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้น้อย พบว่าความไม่สมดุลของผิวท่อภายในและการจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดจะส่งผลทำให้การรั่วไหลระหว่างฉนวนบางตำแหน่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และจากกระบวนการเผาไหม้จะเกิดความชื้นขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเกิด

สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมเฉลี่ยที่ได้โดยตรง ในการวิจัยต่อไปคณะผู้วิจัยจะได้ศึกษาถึงการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงให้ได้พลังงานที่เหมาะสม การเลือกอิเล็กทรอนิกส์ การจัดวางอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาผลความชื้นต่อการเกิดสนามไฟฟ้า วิเคราะห์ถึงพลังงานที่ใช้ต่อชั่วโมงการทำงาน เพื่อจะนำมาใช้กับตัวเก็บรวบรวมอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในทางวิศวกรรม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

1. อลงกรณ์ ผาทอง. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการบ่มไบโอบาสุบของสถานีบ่มไบโอบาสุบสันกลาง (การค้นคว้าแบบอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต การจัดการอุตสาหกรรมเกษตร). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2549.
2. สรวุฒิ พวงคต. อาการและอาการแสดงของระบบทางเดินหายใจและสมรรถภาพปอดของผู้สัมผัสสารเคมีในท่อนในกระบวนการบ่มไบโอบาสุบ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย (การค้นคว้าแบบอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2547.
3. Intra P, Limueadphai P and Tippayawong N. Particulate Emission Reduction from Biomass Burning in Small Combustion Systems with a Multiple Tubular Electrostatic Precipitator. *Particulate Science and Technology*. 2010; 28(6): 547-565.
4. Intra P and Dussadee N. 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*. 2007; October, 17-19.
5. Intra P and Dussadee N. Characterisation of Wire Cylinder Electrostatic Precipitator for Exhaust Gas Particles Removal of Biomass Furnace, *Engineering Journal Chiang Mai University*. 2007; 14(1), 29-39.
6. ชญาศักดิ์ รัตนโชติ, พีระพงศ์ ทีฆสกุล และยุทธนา ภูริระวินิชย์กุล. เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พื้น, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, จังหวัดปทุมธานี. 2551; ตุลาคม, 15-17. 59-63.
7. พศวีร์ ศรีโหมด, เอกราช พลน้อย, ธนภัทร พรหมวัฒน์ ภัคดี และวิชุด เครื่องสูช. การประยุกต์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับการบำบัดกลิ่นที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S). การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32, จังหวัดปราจีนบุรี, 2552; ตุลาคม, 28-30.
8. Jaworek A, Krupa A and Czech T. Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning A brief review, *Journal of Electrostatics*. 2006; 65, 133-155.
9. Parker K.R. *Applied Electrostatic Precipitation*. Blackie Academic & Professional. New York, 1997.
10. พานิช อินตะ และ นคร ทิพยาวงศ์. การวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า, การประชุมประจำปี สวทช. 2548, ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย. 2548; มีนาคม, 28-30.
11. Kudpa C, Uppama O, Thatui A, Yodthip P, Fungom S, Yawootti A, and Intra P. Analysis of behavior and collection efficiency of particles in two-stage electrostatic precipitators for particulate matter removal from coffee roasting process. *Journal of KMUTNB*. 2016; 26(3): 359-374.
12. Intra P. *Electrostatic System*, National Science and Technology Development Agency NSTDA Northern Network. 2010.
13. John G, Martin F and George C. *Principles of Power Electronics*. Massachusetts Institute of Technology, Addison - Wesley Publishing Company. 1991.
14. Hinds W.C. *Aerosol Technology*. John Wiley and Sons, New York, USA, 1999.
15. USEPA, PM 2.5 general information, Office of Air Quality Planning and Standards, 1998.
16. Chang J, Kelly A.J and Crowley J.M. *Handbook of Electrostatic Processes*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1995.
17. White H.J. *Industrial Electrostatic Precipitation*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 1963.

18. Haslerm P. and Nussbaumer T.H., Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification, *Biomass & Bioenergy*.1999; 16: 385-395.
19. Mizuno A. Electrostatic Precipitation. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000; 7(5): 615-624.
20. Nóbrega S.W, Arnosti Jr S and Coury J.R. Evaluation of the Performance of a wire-plate electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. 2001; 55: 3-25.
21. Saiyasitpanic P, Keener T, Khang S and Lu M. Removal of diesel particulate matter (DPM) in a tubular wet electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatics*. 2007; 90: 1-7.
22. พานิช อินต๊ะ. เทคโนโลยีการวัดและความคุมฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิต. พิมพ์ครั้งที่ 3. เชียงใหม่: เจริญก๊อปปี้ เซ็นเตอร์; 2557.