

# การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตักตะกอนเชิงไฟฟ้า สถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารในครัวเรือน

## Development and Efficiency Evaluation of an Electrostatic Collector for Smoke Removal from the In-House Cooking Process

วิสูตร อาสนวิจิตร\* และพานิช อินต๊ะ

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
ตำบลป่าป๋อง อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

อนุกุล ปันสา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Visut Asanavijit\* and Panich Intra1

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,  
Papong, Doisaket, Chaing Mai 50220

Anukul Pansa

Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna,  
Chang Phueak, Muang, Chaing Mai, 50300

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารในครัวเรือน ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยตัวตักตะกอนแบบหลายท่อและแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 25 กิโลโวลต์ และระบบควบคุมแบบวงปิด การศึกษานี้ได้ประเมินและเปรียบเทียบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันและประสิทธิภาพการตักตะกอนทั้งการคำนวณและการทดลอง ตัวตักตะกอน 2 แบบ คือ ท่อทรงกระบอกซ้อนกันแบบลวดเส้นตรงและแบบลวดตาข่าย การประเมินประสิทธิภาพทางการทดลองได้หาอัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างมวลอนุภาคด้านทางเข้าและทางออกของเครื่องตักตะกอน จากผลทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันพบว่าค่ากระแสดีซิสชาร์จ์ของตัวตักตะกอนท่อทรงกระบอกซ้อนกันแบบลวดเส้นตรงและแบบลวดตาข่ายให้ค่ากระแสดีซิสชาร์จ์สูงสุด 1.08 และ 0.78 มิลลิ

แอมป์ ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพของการตกตะกอนเฉลี่ยทางการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าแบบเส้นลาดตรงและแบบลาดตาข่ายเท่ากับ 92.7 และ 67.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลทดสอบหาค่าประสิทธิภาพด้วยการสู่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันพบว่าตัวตกตะกอนแบบลาดเส้นตรงมีประสิทธิภาพ 84.3 เปอร์เซ็นต์ และแบบลาดตาข่าย 53.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิควัน 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และความเร็วของควัน 10 ลิตรต่อนาที

**คำสำคัญ :** สนามไฟฟ้า; อนุภาคควัน; การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต; เครื่องดูดควันอาหาร

## Abstract

In this paper, an electrostatic collector for smoke removal from the in-house cooking process was developed and efficiency evaluated. This developed prototype was consisted of the multi-tubes collector, 25 kV DC high voltage power supply and closed-loop control system. In this study, the wire-to-cylinder and mesh-to-cylinder collectors were evaluated and compared in the current-voltage characteristics as well as numerical and experimental collection efficiencies. The collection efficiency was experimentally evaluated as a mass loading ratio between the difference at the inlet and the outlet to the particulate loading at the inlet of the collector. In the current-voltage characteristics, it was found from the results that the maximum discharging currents from both collectors were about 1.08 and 0.78 mA for the wire-to-cylinder and the mesh-to-cylinder, respectively. For the numerical and experimental collection efficiencies, the numerical calculation results were showed that the average collection efficiency of the wire-to-cylinder and mesh-to-cylinder collectors were about 92.7 and 67.8 %, respectively, and the experimental results were showed that the average collection efficiency of the wire-to-cylinder and mesh-to-cylinder collectors were about 84.3 and 53.0 %, respectively, for the particulate size range between 10 nm and 2.5  $\mu\text{m}$  at the operating temperature of about 150 °C, the operating pressure of about 1 bar and the particulate flow rate of 10 L/min.

**Keywords:** electric field; particulate matter; electrostatic precipitation; hood

## 1. บทนำ

ปัญหาด้านมลพิษทางอากาศที่มีผลกระทบต่อสุขภาพที่สำคัญที่สุด คือ การเกิดมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ ได้แก่ เขม่าควัน ฝุ่นละออง ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ข้อมูลล่าสุดในปี พ.ศ. 2558 State of Global Air [1]

ระบุว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ก่อให้เกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรในประเทศไทยประมาณ 37,500 คน ซึ่งฝุ่นละอองขนาด PM2.5 เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศหลัก 5 ชนิด นอกเหนือจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) และฝุ่น

ละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) ฝุ่นละอองขนาด PM2.5 มีขนาดเล็กกว่า 1 ใน 25 ส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ สามารถแพร่กระจายเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ฝังลงในปอดและกระแสเลือดโดยตรง ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรครئةเรื้อรัง [2] โดยในปี พ.ศ. 2556 องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดอย่างเป็นทางการให้ PM2.5 จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ของสารก่อมะเร็ง ซึ่งฝุ่นละอองขนาด PM2.5 จะพบการประมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศออกมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ คือ การเผาในที่โล่งแจ้ง 209,937 ตันต่อปี อุตสาหกรรมการผลิต 65,140 ตันต่อปี การคมนาคมขนส่ง 50,240 ตันต่อปี การผลิตไฟฟ้า 31,793 ตันต่อปี และที่อยู่อาศัย-ธุรกิจการค้า 28,265 ตันต่อปี ซึ่งแหล่งกำเนิดจากที่อยู่อาศัย-ธุรกิจการค้า ส่วนหนึ่งเกิดจากในสังคมที่มีการแข่งขันที่สูงมีความเร่งรีบมาก คนส่วนใหญ่หันมาให้ความนิยมซื้อความสะดวกในเรื่องอาหารการกิน ด้วยการซื้ออาหารจากร้านขายอาหารตามสั่ง จึงทำให้จำนวนร้านมีมากขึ้นตามความต้องการของผู้ซื้อ ในการประกอบอาหารแต่ละครั้ง [3] ผลที่ได้นอกจากอาหารแล้วยังมีการระเหยออกมาในรูปของไอระเหย กลิ่น คิวบีนที่สามารถฟุ้งกระจายไปได้ไกล และสารทาร์ (Tar) เป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบที่ถูกสกัดออกมา ซึ่งวงการแพทย์ยอมรับว่าสารทาร์ คือ สารก่อมะเร็งตัวหนึ่ง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการปล่อยควันจากกระบวนการประกอบอาหารที่เกิดขึ้นก่อนออกมาสู่สาธารณะจากรายงานวิจัยของ เขียวรินทร์ และคณะ [4] ได้ศึกษาการพัฒนาเครื่องดักควันด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการและความพึงพอใจของลูกค้า โดยศึกษากับผู้ขายอาหารที่ใช้เครื่องดักควันแบบใช้ภายนอกอาคาร ในเขตอำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

ผลการศึกษาพบว่าลูกค้าให้ความสำคัญเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณควันก่อนที่ออกจากร้าน โดยให้ความสำคัญด้านความปลอดภัยในการใช้งานที่มีระดับความสำคัญ 4.17 ความสามารถในการดักควันได้หมดมีค่าระดับความสำคัญ 4.10 และราคามีค่าระดับความสำคัญ 4.04 ตามลำดับ จากข้อมูลคณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าปัจจัยที่สำคัญควรเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง ผ่านมาตรฐานรับรองความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และควรมีการพัฒนาการกำจัดควันก่อนออกสู่สาธารณะ

ปัจจุบันเครื่องดักควันที่ใช้กันตามร้านค้าเป็นเครื่องที่ดักควันออกจากร้านเท่านั้น โดยไม่ได้มีการควบคุมปริมาณควันที่ออกมา ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมฝุ่นละอองและมลพิษที่เกิดขึ้นนี้ ซึ่งมีหลากหลายระบบในการกำจัด คือ ระบบไซโคลน (cyclone) มีข้อดีค่าลงทุนต่ำ บำรุงรักษาน้อย กำจัดอนุภาคแบบแห้ง สามารถออกแบบให้เหมาะสมกับช่วงอนุภาคได้ ข้อจำกัด ประสิทธิภาพกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ค่อนข้างต่ำ ไม่สามารถใช้กับอนุภาคเหนียวเหนียวได้ มีการกักกรองสูง ระบบถุงกรองฝุ่นละออง (bag filter) มีข้อดีค่าลงทุนต่ำ มีประสิทธิภาพสูงในการกักเก็บอนุภาคขนาดใหญ่และเล็ก กำจัดอนุภาคแบบแห้ง ข้อจำกัดด้านอุณหภูมิถ้าเกิน 288 องศาเซลเซียส ต้องใช้ชนิดพิเศษราคาแพงขึ้น อายุใช้งานสั้นเมื่อเกิดกรด ความชื้นและอุณหภูมิสูง ระบบสกรับเบอร์ (scrubber) มีข้อดีมีประสิทธิภาพสูงในการกักเก็บอนุภาคขนาดใหญ่และเล็ก ควบคุมมลพิษทางอากาศได้ทั้งอนุภาค ก๊าซและไอพร้อมกันได้ กำจัดอนุภาคเหนียวได้ ข้อจำกัดเป็นระบบเปียกต้องบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาสูง และเครื่องดักฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) มีข้อดีอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้ากำจัดอนุภาค

แขวนลอยในอากาศให้ประสิทธิภาพการตกตะกอน สำหรับอนุภาคสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการสูญเสียของความดัน และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส

งานวิจัยของ พานิช และคณะ [5-7] ที่ผ่านมา ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบการทำงานเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล ประกอบด้วยอาร์เรย์ของท่อขนาดเล็ก 21 ท่อ พบว่าได้ประสิทธิภาพการตกตะกอนรวม 70 เปอร์เซ็นต์ มีรายงานว่าประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของขั้วอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของความเข้มข้นไอออน และปริมาณประจุที่อนุภาคได้รับ คณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าต้องมีการพัฒนาตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

งานวิจัยของ ชญาศักดิ์ และคณะ [8] ได้สร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พินที่มีขนาด  $0.5 \times 1 \times 0.5$  เมตร จำนวนแผ่นเรียบ 10 แผ่น จำนวนเส้นลวด 12 เส้น ต่อ 1 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด 1 มิลลิเมตร จากผลการทดลองเบื้องต้น การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด 12 กิโลโวลต์ โดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบสำหรับดักเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พินนี้ มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ย 58.43 เปอร์เซ็นต์ คณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าต้องมีการพัฒนาตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

งานวิจัยของ วชร และคณะ [9] ศึกษาประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิตแบบชนิดขั้วเดียวในการดักจับอนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง จากผลการทดลองประกอบด้วย คือ ส่วนที่ 1 การหาประสิทธิภาพของการดักจับเขม่าจะใช้

กระดาษกรองอากาศก่อนและหลังผ่านเครื่องตกตะกอน ซึ่งผลที่ได้พบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเขม่าและฝุ่นแป้งจะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ประสิทธิภาพจะมีค่าลดลงเนื่องจากการเกาะของเขม่าและฝุ่นแป้ง มีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยการดักอนุภาคมีค่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฝุ่นแป้ง และ 35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเขม่า ส่วนที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์เริ่มต้นและความต่างศักย์ด้านทุติยภูมิโดยผลที่ได้พบว่าค่าความต่างศักย์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแบบเชิงเส้น คณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าต้องมีการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพใช้งานที่สูงขึ้น

ในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทั้งภาคทฤษฎีและการทดลองในปัจจุบันมีอยู่ค่อนข้างแพร่หลาย ซึ่งมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องยาวนานจากงานวิจัย [10-14] โดยมีการประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดอนุภาคจากเตาเผาไหม้แบบต่าง ๆ ภายในประเทศจากงานวิจัย [15-19] มีการประยุกต์ใช้กำจัดไอเสียของเครื่องยนต์ [20] ยังได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงเสริมประสิทธิภาพการตกตะกอนสำหรับอนุภาคในระดับนาโนเมตร สำหรับการกำจัดน้ำมันดินหรือทาร์ [21] อย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยของ วิสูตร และคณะ [22] ได้พัฒนาต้นแบบระบบดักควันไฟฟ้าสถิตแบบการควบคุมวงจรปิดสำหรับเตาเผาขยะ โดยทดสอบหาประสิทธิภาพตกตะกอนอนุภาคควันรูปเบื้องต้น พบว่าผลเฉลี่ยลดลง 82.2 เปอร์เซ็นต์ คณะวิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่าควรพัฒนาตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น สำหรับการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดอนุภาคและความเป็นพิษยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัดไม่แพร่หลาย

การสืบค้นและตรวจสอบทรัพย์สินทางปัญญาที่

เกี่ยวข้องกับผลงานการประดิษฐ์ ดังต่อไปนี้ สิทธิบัตร US 3,665,679 สิทธิบัตร US 3,778,970 สิทธิบัตร US 3,812,370 สิทธิบัตร US 3,798,879 สิทธิบัตร US 3,985,525 สิทธิบัตร US 3,988,131 สิทธิบัตร US 4,231,766 สิทธิบัตร US 4,351,648 สิทธิบัตร US 4,317,661 สิทธิบัตร US 4,569,684 สิทธิบัตร US 5,055,115 สิทธิบัตร US 5,334,238 สิทธิบัตร US 5,669,963 จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา สิ่งสำคัญที่จะทำ ให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้น คือ ต้องมีการ ออกแบบและสร้างตัวตกตะกอน โดยต้องมีการเลือก ลักษณะ ขนาดของอิเล็กโทรด และมีออกแบบการจัด วางขั้วอิเล็กโทรดให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่ากระแสโคโรนา ดิสชาร์จที่สูงขึ้น โดยไม่ส่งผลต่อการเกิดสนามไฟฟ้า เบรกดาวน ทำให้สามารถสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า ความเข้มข้นไอออนและปริมาณประจุที่อนุภาคได้รับให้ มากขึ้น ซึ่งเป็นการส่งผลต่อประสิทธิภาพการตก ตะกอนสูงขึ้นตาม ควรมีการออกแบบและสร้างระบบ การทำความสะอาดตะกอนที่สะสมที่ขั้วตัวตกตะกอนที่มี ลักษณะเหนียวหนืด ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพ ลดลงตามระยะเวลาการสะสมของตะกอน โดยให้มี ระบบการทำงานที่ง่าย ถอดล้างทำความสะอาดได้ สะดวก

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการพัฒนาและ ทดสอบตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับ กำจัดวันจากกระบวนการประกอบอาหาร 2 แบบ ที่ สามารถถอดล้างทำความสะอาดง่าย คือ แบบเส้นลวด ตรงและแบบเส้นลวดตาข่าย โดยมีหลักการ คือ เมื่อ ควันไหลผ่านปล่องควัน อนุภาคของควันก็จะถูกอัด ประจุจากแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง อนุภาคที่มี ประจุนี้จะถูกผลักด้วยแรงไฟฟ้าสถิตไปติดกับผิวท่อตัว ตกตะกอน โดยจะมีการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ การทำงานตัวตกตะกอนทั้ง 2 แบบ และทดสอบ ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันจาก

กระบวนการประกอบอาหาร ด้วยการวิเคราะห์จาก โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ และทดลองสุ่ม ตัวอย่างควัน ผลทดสอบที่ได้สามารถนำไปใช้เป็น แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดอนุภาคควัน จากกระบวนการประกอบอาหาร และสามารถขยายผลไปใช้ งานต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอน สำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารใน ครัวเรือน

#### 2.1.1 ความต้องการในการออกแบบ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างตัวตก ตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันที่เกิด จากกระบวนการประกอบอาหาร โดยได้ออกแบบ โครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบท่อทรงกระบอกซ้อนแกน ร่วมแบบลวดเส้นตรงและแบบลวดตาข่าย นำหลักการ สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมาควบคุมสัญญาณพัลส์ สวิตซ์แรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรพลาสมาคอนเวอร์เตอร์ แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสร้างสนาม ไฟฟ้าความเข้มสูง สำหรับการออกแบบจะเลือก อุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการทำงานและราคา โดยใช้ เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศ ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุงหรือการถอดล้าง เปลี่ยน อุปกรณ์ในขณะทำงานได้ง่ายและมีราคาต้นทุนในการ สร้างถูก และที่สำคัญที่สุดจะต้องมีความปลอดภัยจาก ไฟฟ้าแรงสูงในขณะทำงาน ดังนั้นเพื่อให้บรรลุ เป้าหมายจึงได้มีการกำหนดรายละเอียดการออกแบบ ดังตารางที่ 1

#### 2.1.2 รายละเอียดการออกแบบและสร้าง

เป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อ ออกแบบและสร้างตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิต สำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหาร

โดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่เหมาะสมภายในประเทศ ดังนั้นเพื่อให้บรรลุ แรงดันสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ ซึ่งมีการเลือกใช้อุปกรณ์ เป้าหมายจึงมีการยึดหลักในการออกแบบ ดังนี้

**ตารางที่ 1** เกณฑ์ในการออกแบบของตัวตักตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการ ประกอบอาหาร

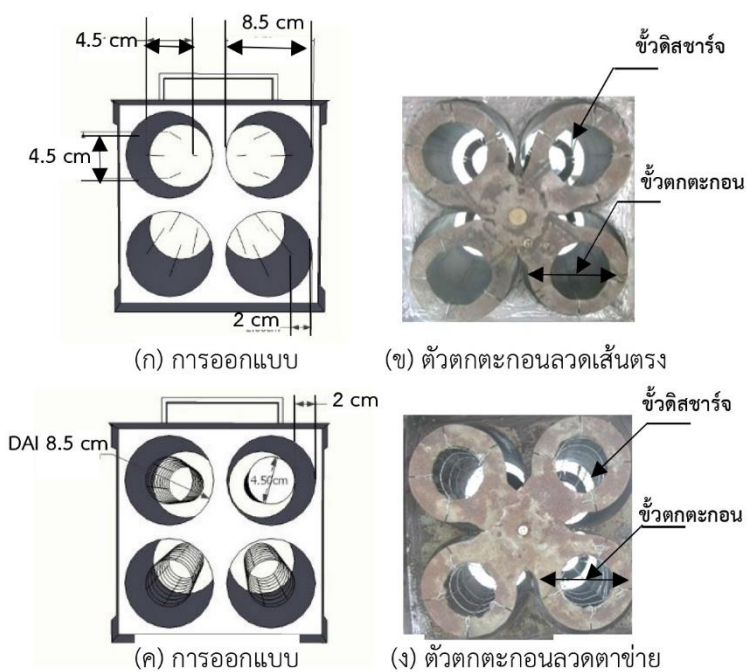
| เกณฑ์ออกแบบ                                  | คุณลักษณะ  |
|--|--|
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จ ( $2r_1$ ) | 0.57 มิลลิเมตร   |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วตักตะกอน ( $2r_2$ ) | 85 มิลลิเมตร   |
| ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตักตะกอน   | 20 มิลลิเมตร   |
| ความยาวของเครื่องตักตะกอน (L)                | 240 มิลลิเมตร  |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค               | ระหว่าง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร                    |
| ประจุอนุภาค                                  | ประจุบวก   |
| แรงดันขั้วอิเล็กโทรด                         | ไม่เกิน 25 กิโลโวลต์                                     |
| ความถี่ใช้งาน                                | ไม่เกิน 20 กิโลเฮิร์ต                                    |
| อิเล็กโทรดใช้งาน                             | แบบลวดเส้นตรง แบบลวดตาข่าย                               |
| อุณหภูมิของควัน                              | 60 ถึง 200 องศาเซลเซียส                                  |
| ศักย์ไฟฟ้า                                   | ขั้วบวก  |
| ความดัน                                      | 1 บาร์   |
| ลักษณะควัน                                   | ของแข็งและของเหลว  |
| ความเร็วของควัน                              | ไม่เกิน 10 ลิตร ต่อ นาที                                 |
| ขนาดเครื่องดักควันสำหรับทดสอบ                | ขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) 400 × 800 × 1,540 มิลลิเมตร |
| ขนาดต้นแบบตัวตักตะกอน                        | ขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) 195 × 195 × 320 มิลลิเมตร   |

ตัวตักตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิต สำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหารที่ พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (discharge electrode) และขั้วตักตะกอน (collection electrode) มีขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ 195 × 195 × 320 มิลลิเมตร น้ำหนัก โดยรวมประมาณ 1.5 กิโลกรัม ตักตะกอนได้ออกแบบ ใช้ท่ออะลูมิเนียมกลมทรงกระบอกซ้อนกันรวมโดยใช้ท่อเหล็กจำนวน 4 ท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

85 มิลลิเมตร ยาว 240 มิลลิเมตร ทำหน้าที่สำหรับ ตักตะกอน และมีขั้วอิเล็กโทรด 2 แบบ คือ แบบเส้น ลวดตรงและแบบลวดตาข่ายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.57 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น ระยะห่างระหว่างลวด กับท่อ 20 มิลลิเมตร ใช้งานร่วมกับแหล่งกำเนิด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น ขนาด 0 ถึง 25 กิโลโวลต์ เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับ ขั้วดิสชาร์จ โดยที่ขั้วตักตะกอนเป็นกราวด์จะทำให้เกิด ปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge)

ขึ้นโดยรอบ ๆ ขั้วดิสชาร์จ จึงทำให้ไอออน (ion) และอิเล็กตรอน (electron) จะสร้างชั้นที่จุดที่เกิดโคโรนา และทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นละอองลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน โดยไอออนจะเกาะติดกับฝุ่นละอองลอยเหล่านั้น เป็นผลทำให้ฝุ่นละอองลอยได้รับประจุ และฝุ่นละอองลอยที่มีประจุ (charged particulate) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอน โดยฝุ่นละอองลอยที่ตกตะกอนบนขั้ว

ตกตะกอนจะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอนเพื่อให้ฝุ่นหลุดออก [23] โครงสร้างต้นแบบได้ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุงหรือการถอดล้าง เปลี่ยนอุปกรณ์ในขณะที่ทำงานได้ง่าย และมีฉนวนป้องกันจากแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ดังแสดงรูปที่ 1 ในการทดสอบจะนำตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหารต้นแบบทั้ง 2 แบบ มาใช้งานร่วมกับเครื่องดักควัน (hood) ที่เกิดจากกระบวนการทำอาหารในครัวเรือนที่มีขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) 400 × 800 × 1,540 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิต

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (current-voltage relationship) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell ที่ครอบคลุมสมการ Poisson's ของสนามไฟฟ้า  $E$  คือ

$\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$  [12] เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของประจุ ( $C/m^3$ ) และ  $\epsilon_0$  คือ ค่าเปอร์มิททิวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร ซึ่งสมการนี้

ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ การศึกษานี้จะสมมติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (ion space charge) ในเครื่องตกตะกอนแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมมีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (average corona current)  $I_c$  ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าชั่วดิสชาร์จจือเล็กโทรดเครื่องตกตะกอนแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ดังรูปที่ 1 หาได้จากสมการดังนี้ คือ [12]

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

เมื่อ  $Z_i$  คือ ค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (ion electrical mobility) มีค่าเท่ากับ  $1.4 \times 10^{-4}$  ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที;  $r_1$  คือ รัศมีของขั้วดิสชาร์จ;  $r_2$  คือ รัศมีของขั้วตกตะกอนด้านนอก;  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรด;  $V_c$  คือ แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage)

หาได้จากสมการดังนี้ คือ [12]

$$V_c = E_c r_1 \ln(r_2/r_1) \quad (2)$$

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset field)  $E_c$  สำหรับโคโรนาในอากาศหาได้จาก [13]

$$E_c = \delta \left( 32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{298}{(298+T)} P \quad (4)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (gas density);  $T$  คือ อุณหภูมิทำงานของแก๊ส (operating temperature);  $P$  คือ ความดันทำงาน (operating pressure)

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (particle charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนา

ดิสชาร์จจือเล็กโทรด ไอออนจะเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (thermal diffusion) ในการศึกษาจำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาค  $n_p$  จะได้มาจากการอัดประจุแบบสนาม (field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร โดยการประมาณค่าจำนวนประจุนุภาคนี้สามารถคำนวณได้จาก สมการดังนี้ คือ [10,15]

$$n_p = \left( \frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left( \frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left( \frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (dielectric constant of particle);  $E$  คือ สนามไฟฟ้า;  $K_E$  คือ ค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ (มีค่าเท่ากับ  $9.0 \times 10^9$  N.m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>);  $d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค;  $e$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.61 \times 10^{-19}$  คูลอมป์;  $N_i$  คือ ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (ion number concentration);  $t$  คือ เวลาในการอัดประจุ (charging time) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จาก [14,17]

$$N_i t = \frac{I_c (r_2^2 - r_1^2)}{2r Z_i e E Q} \quad (6)$$

สามารถหาสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ได้จากสมการดังนี้ [15]

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

สำหรับประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค (collection efficiency)  $\eta$  ภายในตัวตกตะกอนนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ [15]



$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi r_2 L Z_p E}{Q}\right) \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda_c \left(\frac{101.3}{P}\right) \left(\frac{T}{293.15}\right) \left(\frac{1+110/293.15}{1+110/T}\right) \quad (11)$$

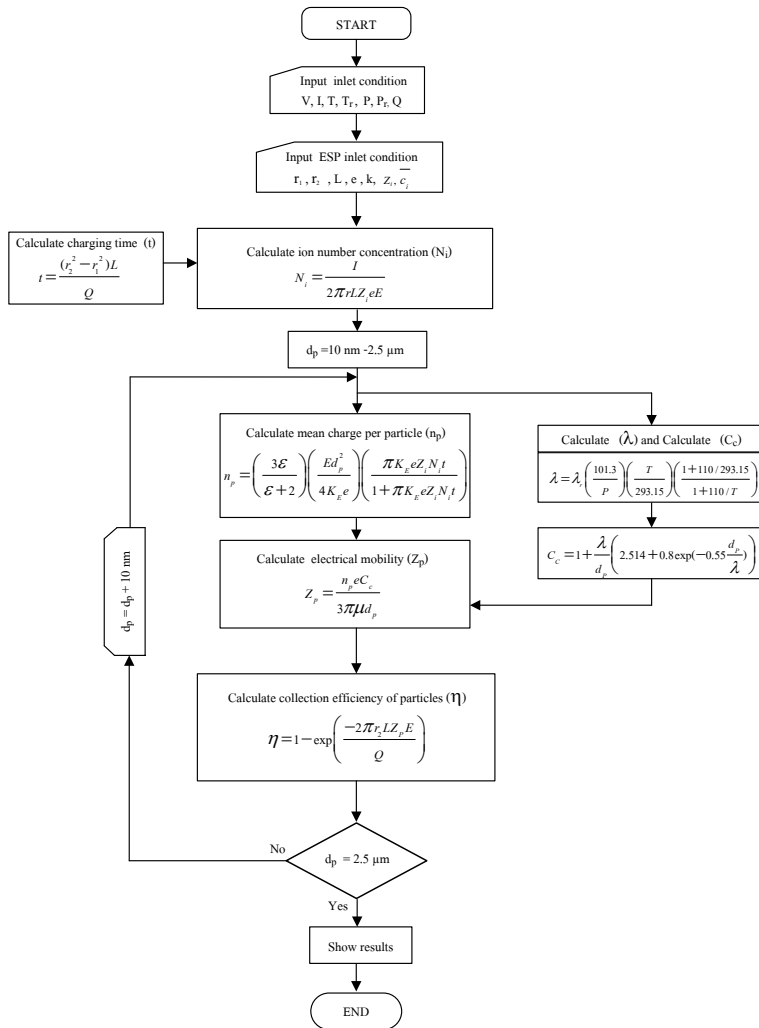
เมื่อ  $L$  คือ ความยาวของตัวตกตะกอน;  $E$  คือ สนามไฟฟ้าภายในตัวตกตะกอน;  $Q$  คือ อัตราการไหลของอนุภาค;  $Z_p$  คือ การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาคสามารถหาได้จาก [10,15]

$$Z_p = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (9)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left(2.514 + 0.8 \exp(-0.55 \frac{d_p}{\lambda})\right) \quad (10)$$

เมื่อ  $C_c$  คือ ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham correction factor);  $\lambda$  คือ ค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของก๊าซ;  $\mu$  คือ ความหนืดของก๊าซ

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังได้อะแกรมในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมลำดับขั้นการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาผลของประสิทธิภาพการตกตะกอนของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันรวมทั้ง 2 แบบ ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นจากการกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าโดยป้อนค่า  $V$  แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ 10-25 กิโลโวลต์ ป้อนค่า  $T_r, T, P_r$  และ  $P$  ตามเงื่อนไขตารางที่ 1 และป้อนค่าตัวแปรใช้งานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต คือ  $r_1$  รัศมีของขั้วดิสชาร์จ  $r_2$  รัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก  $L$  ความยาวขั้วตกตะกอน  $e$  ค่าประจุอิเล็กตรอนมีค่า  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์  $k$  ค่าคงที่โบริทมานน์  $Z_i$  ความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของไอออนมีค่า  $1.4 \times 10^{-4}$  ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที และ  $\bar{c}_i$  ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากผลอุณหภูมิของไอออนมีค่า 240 เมตรต่อวินาที จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่า  $N_p t$  ความเข้มข้นของไอออนที่มีการพิจารณาเวลาในการอัดประจุและนำผลของกระแสดิสชาร์จจากการทดสอบมาวิเคราะห์ การศึกษานี้กำหนดให้มีการวนซ้ำคำนวณโดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร เพื่อหาค่า  $N_p$  จำนวนประจุบนอนุภาค หาค่า  $Z_p$  การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค และ  $\eta$  ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในการทดสอบอยู่ระหว่าง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร และจะทำซ้ำจนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร โปรแกรมจึงหยุดการทำงานและแสดงผลกราฟประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค

## 2.2 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ดังรูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ประกอบด้วย

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage power supply) ตัวสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง (pulse generator) มอสเฟตกำลัง (power MosFET) เบอร์ IRFP460 มีแรงดันพังทลายระหว่างขา drain และ source สูงถึง 500 โวลต์ กระแสไฟไหล drain อย่างต่อเนื่องได้สูงถึง 20 แอมป์ ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage transformer) ไดโอดเรียงแรงดันสูง (high voltage diode) และไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ความถี่ 16 เมกะเฮิร์ตซ์ หน่วยความจำแฟลช 32 กิโลไบต์ แรม 2 กิโลไบต์ ใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 โวลต์ มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 โวลต์ และมี digital input และ output 14 ขา โดยจะออกแบบให้สามารถใช้งานกับระบบไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต และใช้หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ขนาด 24 โวลต์ เพื่อจ่ายที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงหลายแบบ รุ่น TLF14649F โดยนำหลักการทำงานของวงจรหลายแบบคอนเวอร์เตอร์ ทำงานในโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้า มาผลิตแรงดันสูง 10 กิโลโวลต์ ถึง 25 กิโลโวลต์ มีชุดสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูงในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งเลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เปิดเบิกลูเอ็มควบคุมการทำงานวงจรหลายแบบคอนเวอร์เตอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  ของหลายแบบคอนเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้ [24]

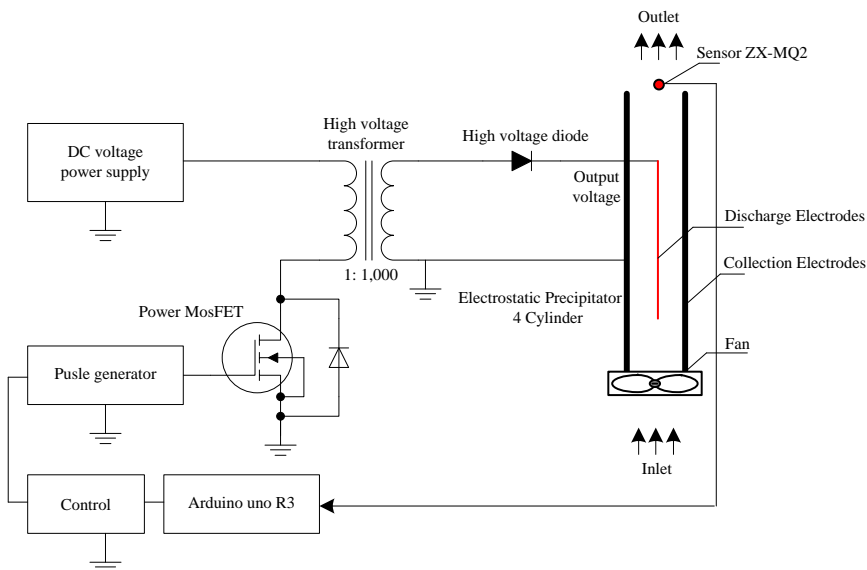
$$V_{out} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times (V_w - V_{SAT}) \times t_{ON}}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (12)$$

เมื่อ  $T$  คือ คาบเวลาการทำงานมอสเฟต;  $t_{ON}$  คือ ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำกระแส;  $N_p$  คือ จำนวนรอบปฐมภูมิ;  $N_s$  คือ จำนวนรอบทุติยภูมิ;  $V_{out}$  คือ แรงดัน

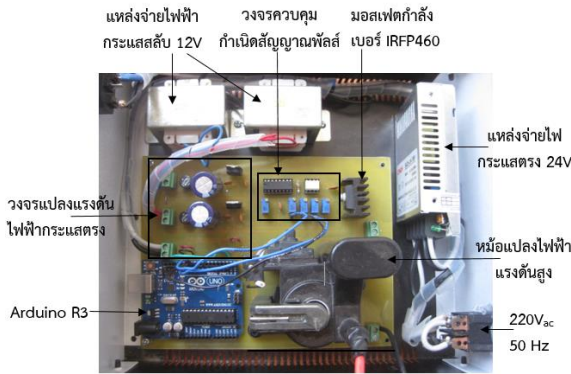
เอาต์พุต;  $V_{in}$  คือ แรงดันที่อินพุต;  $V_{SAT}$  คือ แรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่จุดอิ่มตัว;  $V_D$  คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด

และจะเลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับควัน รุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตักตะกอนเป็นเซนเซอร์ที่มีความไวในการตรวจจับสูง ปริมาณก๊าซที่ตรวจจับได้ในย่าน 100-5,000 พีพีเอ็ม และส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลโดยมีการรับค่าปริมาณควันที่ได้ในรูปแบบสัญญาณแอนะล็อก (analog signal) และจะแปลงเป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 (ปริมาณควัน 100-1,000 พีพีเอ็ม เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า 1.0-2.50 โวลต์) ช่วงที่ 2 (ปริมาณควัน 1,001-2,000 พีพีเอ็ม เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า 2.51-3.50 โวลต์) และช่วงที่ 3 (ปริมาณควัน 2,001-3,000 พีพีเอ็ม เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า 3.51-5.00 โวลต์) เพื่อนำไปทำตามเงื่อนไขของโปรแกรมที่กำหนดให้มีการทำงาน 3 ระดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อมีปริมาณควันน้อยอยู่ในช่วงที่ 1 ให้ใช้งานที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต เมื่อมี

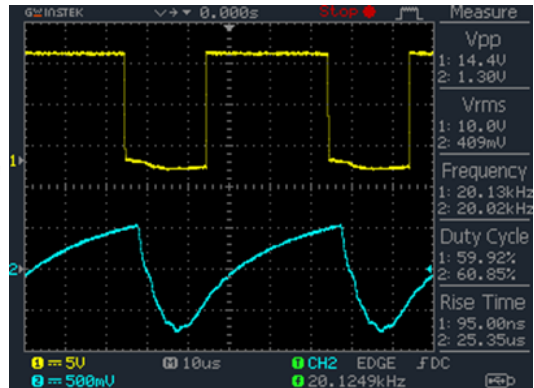
ปริมาณควันปานกลางอยู่ในช่วงที่ 2 ให้ใช้งานที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต และเมื่อมีปริมาณควันมากอยู่ในช่วงที่ 3 ให้ใช้งานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต เพื่อไปสั่งปรับสวิทช์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออกตามหลักการแบบวงปิด (closed-loop control) ดังแสดงตามไดอะแกรมรูปที่ 3 และส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงเลือกใช้อุปกรณ์ที่ผลิตภายในประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตซึ่งได้ทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปของ digital oscilloscope (ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GD5-1052-U) วัดผ่านโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 1 โวลต์ต่อ 10 กิโลโวลต์ มีลักษณะเป็นรูปคลื่นยอดปลายแหลม ดังแสดงรูปที่ 5 โดยในการออกแบบได้เลือกความถี่ใช้งานที่เหมาะสม 20 กิโลเฮิร์ตซ์ รอบการทำงานที่เหมาะสม 60 เฮอร์ตซ์ ซึ่งได้ทดลองหลังการออกแบบ พบว่าเป็นจุดที่สามารถทำงานได้ดีเป็นเวลานานโดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงตามที่ต้องการโดยอุปกรณ์ในวงจรมีความร้อนน้อย



รูปที่ 3 ไดอะแกรมแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง



รูปที่ 4 ส่วนประกอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง



รูปที่ 5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตใช้งานความถี่ 20 kHz Duty Cycle 60 เปอร์เซ็นต์

### 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 การศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (current-voltage characteristic) โดยมีไดอะแกรมของอุปกรณ์และการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทั้ง 2 แบบ สำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหาร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสและแรงดันจากขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอน ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จที่ขั้วดิสชาร์จของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่าย จะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ผ่านขั้วตกตะกอนของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่าย ซึ่งในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จต่อการเกิดโคโรนาดิสชาร์จภายในตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่าย โดยกำหนดให้ขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก

มีความยาว 240 มิลลิเมตร และขั้วอิเล็กโทรดด้านในหรือขั้วดิสชาร์จมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.57 มิลลิเมตร โดยขั้วดิสชาร์จและขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกจะถูกแยกจากกันทางไฟฟ้าด้วยฉนวนไฟฟ้า ดังรูปที่ 1 สำหรับอุปกรณ์และไดอะแกรมการทดสอบประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วดิสชาร์จในช่วง 0-25 กิโลโวลต์ เพื่อสร้างโคโรนาดิสชาร์จ มีการทดสอบกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับท่อตกตะกอนระยะ 20 มิลลิเมตร เพื่อหาการทำงาน ความถี่ และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบพัฒนาตัวตกตะกอนทั้ง 2 แบบ โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

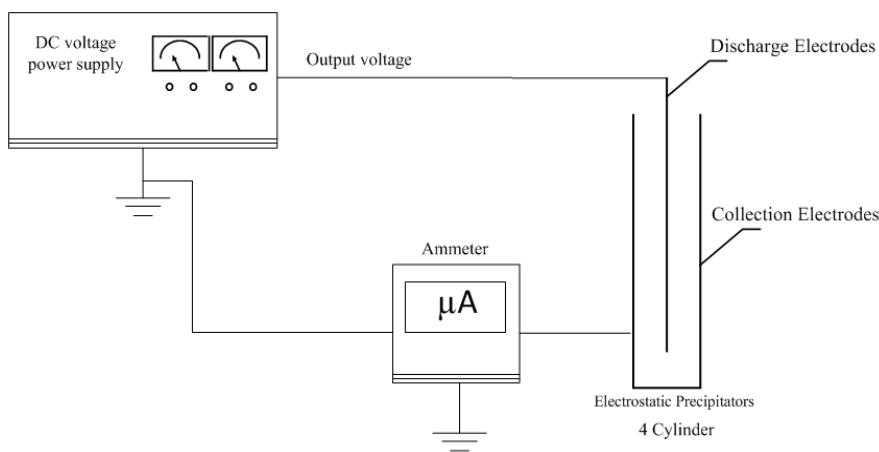
หลังจากนั้นนำผลของค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ขั้วดิสชาร์จในช่วง 0-25 กิโลโวลต์ มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค โดยต้องป้อนเงื่อนไขการวิเคราะห์ในโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามเงื่อนไขเกณฑ์การออกแบบตารางที่ 1 และป้อนค่าตัวแปรใช้งานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต คือ  $r_1$  รัศมีของขั้วดิสชาร์จ  $r_2$  รัศมีของขั้ว

ตกตะกอน L ความยาวเครื่องตกตะกอน ซึ่งกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค สำหรับในการทดสอบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ในช่วง 10 นาโน

เมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลทดสอบหาค่าประสิทธิภาพด้วยการสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันต่อไป

**ตารางที่ 2** เงื่อนไขในการทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

| รายละเอียด                     | เงื่อนไข   |
|--------------------------------|--|
| แรงดันที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรด | ระหว่าง 0 โวลต์ ถึง 25 กิโลโวลต์                       |
| ความถี่ใช้งาน                  | ไม่เกิน 20 กิโลเฮิร์ต                                  |
| อิเล็กโทรดใช้งาน               | แบบลวดเส้นตรง แบบลวดตาข่าย                             |
| อุณหภูมิของควัน                | 60 ถึง 200 องศาเซลเซียส                                |
| ศักย์ไฟฟ้า                     | ขั้วบวก  |
| ความดัน                        | 1 บาร์   |
| ขนาดต้นแบบตัวตกตะกอน           | ขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) 195 × 195 × 320 มิลลิเมตร |



**รูปที่ 6** ไดอะแกรมการทดสอบวัตกระแส-แรงดันไฟฟ้า

**3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค**

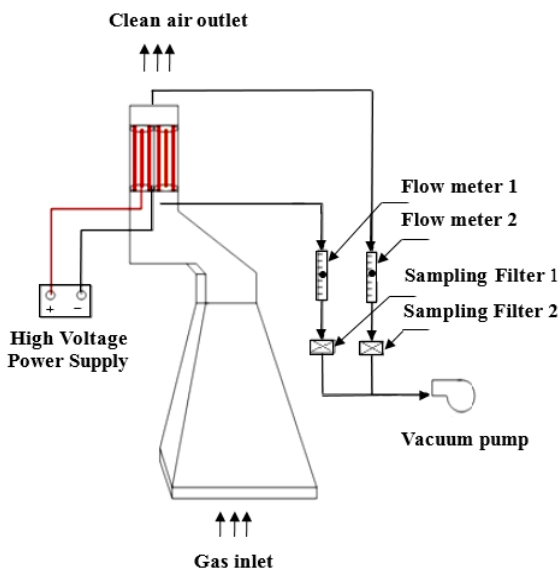
การศึกษานี้จะวัดความเข้มข้นของอนุภาคเชิงมวล (mass concentration of particle) ที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องตกตะกอนด้วยวิธีการกรองอนุภาค ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพเป็นแบบวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบที่มีจล

ศาสตร์เท่ากัน (isokinetic sampling) คือ การดึงเอาบางส่วนออกจากของไหลที่สนใจออกมาเพื่อวัดค่า ในที่นี้ค่าที่สนใจจะเป็นอนุภาคที่อยู่ภายในท่อขาเข้าและขาออกของเครื่องตกตะกอน โดยใช้แผ่นกรองที่อยู่ภายในชุดเก็บตัวอย่างเป็นตัวดักจับเมื่อได้ปริมาณของอนุภาคแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าประสิทธิภาพ ซึ่งการสุ่มตัวอย่างนี้เป็นแบบที่มีจลศาสตร์เท่ากันก็ต่อเมื่อทิศทางของ

ของไหลภายในท่อ และท่อเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกัน คือ ขนานกับเส้นการไหลของของไหล และความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าท่อเก็บตัวอย่าง มีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก ซึ่งมวลของอนุภาค  $m$  สามารถคำนวณได้จาก  $m = (CQ)t$  เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาค  $Q$  คือ อัตราการไหลของอนุภาคตัวอย่าง และ  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคแสดงในรูปที่ 7 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ชุดปรับและวัดอัตราการไหลของ Dwyer ขนาด 10-100 ลิตรต่อนาที และ 1-10 ลิตรต่อนาที สามารถทนอุณหภูมิได้ 98 องศาเซลเซียส และแรงดัน 100 พีเอสไอ แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (high efficiency particulate-free air filter) หรือที่เรียกว่า HEPA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างอนุภาค สำหรับการ

วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนอนุภาคเชิงมวลในการศึกษานี้ใช้แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบใยแก้ว (glass fiber) ของบริษัท Whatman โมเดล EPM 2000 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตรหนา 330 ไมโครเมตร มีอัตราการในการกักเก็บอนุภาคที่ 98 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคสร้างจากเหล็กหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ประกอบด้วยฝาประกบหัวท้ายและท่อสำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาค ซึ่งภายในจะประกอบด้วยยางรองและแผ่นตะแกรงสำหรับรองแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นกรองเกิดการสึกขาดขณะเก็บตัวอย่าง และปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีของ Busch โมเดล SV 1003 มีอัตราการดูดเชิงปริมาตร เท่ากับ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่มีความดัน 0.15 บาร์ สำหรับท่อที่ใช้ในการเชื่อมต่อในระบบการไหลจะใช้ท่อแบบ polyethylene



(ก) ไดอะแกรมของอุปกรณ์และการทดสอบ



แบบเส้นลวดตรง



แบบลวดตาข่าย

(ข) การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอน

รูปที่ 7 การทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอน

ขั้นตอนทดสอบจะจ่ายแรงดันสูงขนาด 10-25 กิโลโวลต์ โดยนำควันที่ได้จากกระบวนการแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วดิสชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำอาหารเข้าสู่เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต จากนั้นจึงเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ให้ระบบทำงานและตรวจเช็คระบบว่ามีจุดรั่วไหลของควันหรือเกิดการเบรกดาวนในระบบ หากพบต้องปรับแก้ไขให้ระบบทำงานได้ จากนั้นสู่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที บริเวณทางเข้าและทางออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีการกรองอนุภาคจากแผ่นกรองฝุ่นละอองขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอน จากนั้นจึงนำตัวอย่างอนุภาคควันไปชั่งน้ำหนัก ในการศึกษาใช้เครื่องชั่งน้ำหนักของ Mettler Toledo รุ่น PB302 ขนาด 300 กรัม โดยมีความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน ผลการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง มาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทั้ง 2 แบบ การหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (overall collection efficiency)  $\eta_{overall}$  ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงที่พัฒนาขึ้น สามารถประเมินได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดสอบวัดได้ทางขาเข้าและทางขาออก ทั้งก่อนผ่านและหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จ่ายให้กับขั้วขั้วอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงสำหรับดักจับควัน สามารถคำนวณจากสมการดังนี้ [23,25]

$$\eta_{overall} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100\% \quad (13)$$

เมื่อ  $C_{inlet}$  คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า;  $C_{outlet}$  คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

## 4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 4.1 คุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับท่อตกตะกอนเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 0-25 กิโลโวลต์ ด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล True RMS multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ผ่านขั้วตกตะกอนของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่าย พบว่าความถี่ใช้งานเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ รอบการทำงานที่เหมาะสม 60 เฮอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ได้ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จของตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่ายสูงสุดเท่ากับ 1.08 และ 0.78 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ขนาดระดับแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ จะเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนาขึ้น ซึ่งเป็นช่วงสำหรับนำมาใช้งานได้ เมื่อทดสอบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ได้ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จสูงขึ้นตาม จนถึงที่ระดับช่วงแรงดันไฟฟ้า 23-24 กิโลโวลต์ จะเกิดการสนามไฟฟ้าเบรกดาวนภายในตัวตกตะกอนทำให้ไม่สามารถวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จได้

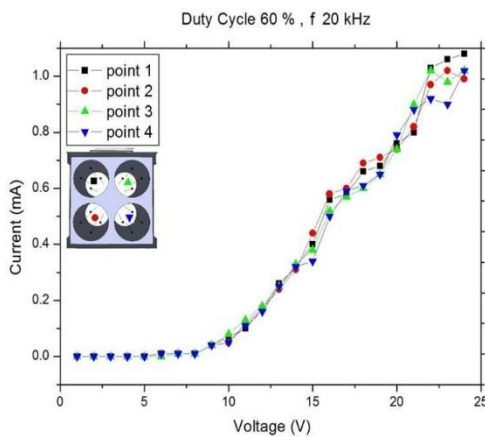
โดยพบว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับท่อตกตะกอนที่ระยะห่างช่องละ 20 มิลลิเมตร มีค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่เหมาะสมกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและลวดตาข่าย เพราะเป็นระยะที่ทดสอบไม่เกิดการเบรกดาวนระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับท่อตกตะกอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะ 20 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องในการออกแบบที่ได้กำหนดให้ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร ต่อแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างของขั้วดิสชาร์จ 20 มิลลิเมตร ทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุต 0-25 กิโลโวลต์ ให้ที่ขั้วดิสชาร์จ 0.57 มิลลิเมตร โดยผลทดสอบทำให้ทราบว่า

ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลวิจัยที่ผ่านมาของ พานิช และคณะ [5-7]

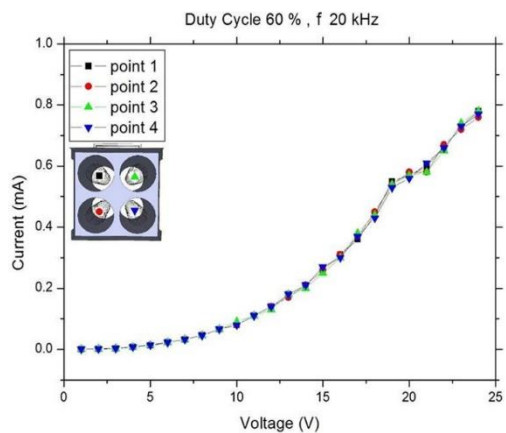
**4.2 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค**

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ตามการเปลี่ยนขนาดอนุภาคในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร โดยจะนำค่ากระแส

โคโรนาดีสชาร์จเฉลี่ยจากรูปที่ 8 ที่แรงดันไฟฟ้า 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์ ของตัวตกตะกอนแบบเส้นลวดตรง เท่ากับ 0.062, 0.39 และ 0.757 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ และของตัวตกตะกอนแบบลวดตาข่ายเท่ากับ 0.060, 0.26 และ 0.57 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ มาใช้ในโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนของตัวตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและแบบเส้นลวดตาข่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดีสชาร์จขนาด 10, 15

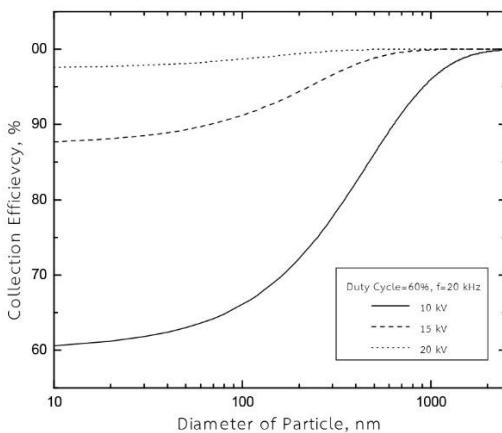


(ก) ตัวตกตะกอนเส้นลวดตรง

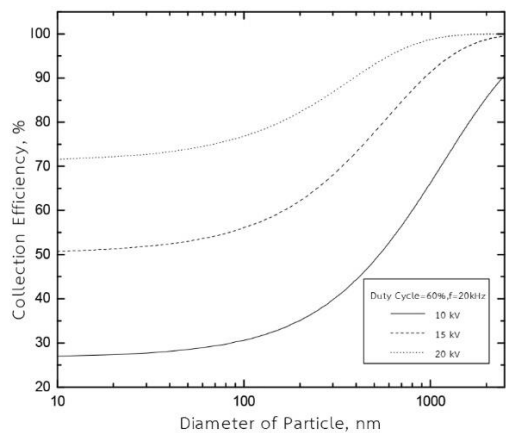


(ข) ตัวตกตะกอนลวดตาข่าย

**รูปที่ 8** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวตกตะกอน



(ก) ตัวตกตะกอนเส้นลวดตรง



(ข) ตัวตกตะกอนลวดตาข่าย

**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ( $d_p$ ) กับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค ( $\eta$ )



และ 20 กิโลโวลต์ ซึ่งเมื่อเพิ่มระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จมีผลทำให้กระแสโคโรนาดิสชาร์จสูงขึ้นตาม และจากการทดสอบปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร พบว่าที่ขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ 1,000-2,500 นาโนเมตร เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดและแบบลวดตาข่ายสามารถกำจัดได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาด 100 นาโนเมตร ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้า 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์ พบว่าเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดสามารถกำจัดได้ 66, 91 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และแบบเส้นลวดตาข่ายสามารถกำจัดได้ 30, 56 และ 76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการตกตะกอนเครื่อง

ตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงสูงกว่าแบบลวดตาข่ายดังรูปที่ 9

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค สำหรับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จขนาด 10 กิโลโวลต์ ของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดและแบบเส้นลวดตาข่าย จะให้ค่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนเฉลี่ย (average) เท่ากับ 92.7 และ 67.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของพานิช และคณะ [5-7] จากนั้นจะนำไปเปรียบเทียบกับผลทดสอบค่าประสิทธิภาพด้วยการสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 น้ำหนักอนุภาคก่อนและหลังผ่านตัวตกตะกอนทั้ง 2 แบบ สำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหาร

| เวลาใช้ทดสอบ (นาท)   | น้ำหนักแผ่นกรอง (มิลลิกรัม) |          |        |                                 |        |          |        |                                 |        |         | ประสิทธิภาพการตกตะกอนทั้งหมด $\eta_{overall}$ (%) |  |
|--|-----------------------------|----------|--------|---------------------------------|--------|----------|--------|---------------------------------|--------|---------|---|--|
|  | แผ่นเปล่า                   | ก่อนเข้า |        | มวลอนุภาคขาเข้า ( $C_{inlet}$ ) |        | หลังผ่าน |        | มวลอนุภาคขาออก ( $C_{outlet}$ ) |        | เส้นตรง | ตาข่าย  |  |
|  |                             | เส้นตรง  | ตาข่าย | เส้นตรง                         | ตาข่าย | เส้นตรง  | ตาข่าย | เส้นตรง                         | ตาข่าย |         |   |  |
| 10   | 22                          | 44.5     | 44.6   | 22.5                            | 22.6   | 24.2     | 30.9   | 2.2                             | 8.9    | 90.2    | 60.6  |  |
| 20   | 22                          | 50.2     | 50.2   | 28.2                            | 28.2   | 26.9     | 35.7   | 4.9                             | 13.7   | 82.6    | 51.4  |  |
| 30   | 22                          | 49.2     | 49.2   | 27.2                            | 27.2   | 27.4     | 36.4   | 5.4                             | 14.4   | 80.1    | 47.0  |  |
| ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคเฉลี่ย (average) จากการทดสอบ                     |                             |          |        |                                 |        |          |        |                                 |        | 84.3    | 53.0  |  |
| ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคเฉลี่ย (average) จากการโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ |                             |          |        |                                 |        |          |        |                                 |        | 92.7    | 67.8  |  |

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดตรงและแบบลวดตาข่าย โดยใช้งานร่วมกับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ได้สร้างขึ้น

พบว่าความถี่ใช้งานที่เหมาะสมเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ รอบการทำงานที่เหมาะสม 60 เปอร์เซ็นต์ สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่มีลักษณะปลายยอดแหลมขนาด 10 กิโลโวลต์ โดยสามารถทำงานได้ดีเป็น

เวลานานให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงตามที่ต้องการ ไม่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของ วงจรใช้งานทั้งหมด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่านี้งาน และทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนของ อนุภาคด้วยวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาควัน สำหรับ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทั้ง 2 แบบ

สุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาควันเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที บริเวณทางเข้าและทางออกของตัวตก ตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยวิธีการกรองอนุภาคจากแผ่น กรองฝุ่นละอองขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอน แสดงตามรูปที่ 7 จากนั้นจึงนำตัวอย่างอนุภาควันไปชั่งน้ำหนักเพื่อ หาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอน ผลการชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูง มาใช้คำนวณหาประสิทธิภาพการ ตกตะกอนโดยรวมทั้งหมดตามสมการที่ 13 แสดงผลใน ตารางที่ 3 พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลา ทดสอบ 10, 20 และ 30 นาที ของตัวตกตะกอนแบบ เส้นลวดตรงเท่ากับ 90.2, 82.6 และ 80.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ย 84.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวตกตะกอนแบบลวดตาข่ายเท่ากับ 60.6, 51.4 และ 47.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่า ประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ย 53.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง ผลอนุภาคที่แผ่นกรองก่อนผ่านมีตะกอนสะสมมากกว่า หลังผ่านตัวตกตะกอนอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตที่ทำงาน ร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง การ ควบคุมค่าความถี่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Arduino R3 สำหรับการประมวลผลเพื่อปรับระดับ แรงดันไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับ ควัน รุ่น ZX-MQ2 เพื่อทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขา ออกของตัวตกตะกอนและส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไป ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลเพื่อ ไปสั่งปรับสวิตช์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงสูงกระแสตรง ให้เหมาะสมกับปริมาณควันขาออก

ตามหลักการแบบวงปิด

การควบคุมค่าความถี่ใช้งานโดยใช้ไมโคร คอนโทรลเลอร์แบบ Arduino R3 สำหรับการประมวล ผลเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ กำหนดให้มีการทำงาน 3 ระดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อมีปริมาณควันมากให้ใช้งานที่ความถี่ 20 กิโล เฮิร์ต เมื่อมีปริมาณควันปานกลางให้ใช้งานที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต และเมื่อมีปริมาณควันน้อยให้ใช้งานที่ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับแผ่น กรองอนุภาคที่ได้จากการทดลองสุ่มตัวอย่างควันที่มี ปริมาณมากและน้อย

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบผล ทดสอบกับงานวิจัยของ พานิช และคณะ [5] ซึ่งได้ ออกแบบและทดสอบการทำงานเครื่องตกตะกอนเชิง ไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผา ชีวมวล ประกอบด้วยอาร์เรย์ท่อขนาดเล็ก 21 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วตกตะกอนเท่ากับ 23.4 มิลลิเมตร ความยาวเครื่องตกตะกอน 400 มิลลิเมตร และใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 8 กิโลโวลต์

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตก ตะกอนทั้งหมดกับผลงานของ พานิช และคณะ [5] ที่ ผ่านมา มีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนของ อนุภาคเฉลี่ยจากการโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการทดสอบ  $\eta_{overall}$  (%) ของ พานิช และคณะ [5] มีเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตใช้แรงดันไฟฟ้า ขนาด 8 กิโลโวลต์ ตัวตกตะกอน 21 ท่อ มีลักษณะ อิเล็กโทรดใช้งานแบบลวดเส้นตรง พบว่าได้ประสิทธิ ภาพการตกตะกอนทั้งหมดเท่ากับ 68 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลงานนี้เครื่องตกตะกอน เชิงไฟฟ้าสถิตใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 10 กิโลโวลต์ ตัว ตกตะกอน 4 ท่อ มีลักษณะอิเล็กโทรดใช้งานแบบลวด

เส้นตรง พบว่าได้ประสิทธิภาพการตกตะกอนทั้งหมดเท่ากับ 92.7 และ 84.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าที่สูงกว่า เนื่องจากผลงานนี้ได้ออกแบบให้มีการไหลของควันได้สะดวก มีพื้นที่การตกตะกอนผิวต่อมากขึ้น

และใช้แรงดันที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดสูงขึ้น ทำให้สามารถสร้างความเข้มข้นไฟฟ้า ความเข้มข้นไอออนปริมาณประจุที่อนุภาคได้รับให้มากขึ้น จึงเป็นการส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้นตาม

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนทั้งหมดกับผลงานวิจัยของ พานิช และคณะ [5]

| รายละเอียดการเปรียบเทียบ                                 | พานิช และคณะ [5]        | งานวิจัยนี้           |
|--|-------------------------|-----------------------|
| คุณลักษณะของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตใช้งาน            | ใช้กับเตาเผาชีวมวล      | ใช้กับควันประกอบอาหาร |
| แรงดันไฟฟ้าขั้วอิเล็กโทรด                                | 8 กิโลโวลต์             | 10 กิโลโวลต์          |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จ ( $2r_1$ )             | 2 มิลลิเมตร             | 0.57 มิลลิเมตร        |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วตกตะกอน ( $2r_2$ )              | 23.4 มิลลิเมตร (21 ท่อ) | 85 มิลลิเมตร (4 ท่อ)  |
| ความยาวของเครื่องตกตะกอน (L)                             | 400 มิลลิเมตร           | 240 มิลลิเมตร         |
| ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้าง/ติดตั้ง                        | สูง/ยาก                 | ต่ำ/ง่าย              |
| ใช้เวลาในการซ่อมบำรุงรักษา/ค่าใช้จ่าย                    | บ่อย/สูง                | ไม่บ่อย/ต่ำ           |
| ลักษณะอิเล็กโทรดใช้งานแบบลวด                             | เส้นตรง                 | เส้นตรง               |
| ประสิทธิภาพการตกตะกอนจำลองทางคณิตศาสตร์ $\eta_{overall}$ | 68 เปอร์เซ็นต์          | 92.7 เปอร์เซ็นต์      |
| ประสิทธิภาพการตกตะกอนจากการทดสอบ $\eta_{overall}$        | 70 เปอร์เซ็นต์          | 84.3 เปอร์เซ็นต์      |

## 5. สรุปและงานในอนาคต

บทความนี้ได้พัฒนาตัวตกตะกอนแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสำหรับดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหารขึ้น 2 แบบ คือ แบบเส้นลวดตรงและแบบลวดตาข่าย ที่มีขนาดกว้าง 195 มิลลิเมตร ยาว 195 มิลลิเมตร สูง 320 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมเท่ากับ 1.5 กิโลกรัม และได้ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารในครัวเรือน โดยการทดสอบปล่อยควันจากการประกอบอาหารขณะไม่ได้จ่ายแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง พบว่ามีควันทางด้านออกของตัวตกตะกอนในปริมาณที่มาก และเมื่อจ่ายแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง พบว่ามีควันทางด้านออกของตัวตกตะกอนมีปริมาณ

น้อยลงมาก ซึ่งหลักการประยุกต์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับดักจับกลุ่มควันจากการประกอบอาหาร โดยการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้สามารถนำไปใช้งาน

ผลการศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าพบว่าที่ความถี่ใช้งาน 20 กิโลเฮิรตซ์ รอบการทำงานที่ 60 เปอร์เซ็นต์ สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบพัลส์สูงที่สุดขนาด 10 กิโลโวลต์ การวัดค่ากระแสดิสชาร์จกับตัวตกตะกอนทั้ง 2 แบบ โดยเลือกใช้ระยะห่างระหว่างขั้ว 20 มิลลิเมตร พบว่าตัวตกตะกอนแบบท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบลวดเส้นตรงให้ค่ากระแสสูงสุดอยู่ 1.08 มิลลิแอมป์ ผลทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของตัวตกตะกอนทั้ง 2 แบบ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางอนุภาคกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสซาร์จขนาด 10 กิโลโวลต์ ของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด และแบบเส้นลวดตาข่าย พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนเฉลี่ย (average) เท่ากับ 92.7 และ 67.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลทดสอบหาค่าประสิทธิภาพด้วยการสู่มเก็บตัวอย่างอนุภาควันพบว่าตัวตกตะกอนแบบท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบลวดเส้นตรงมีประสิทธิภาพดีที่สุด 84.3 เปอร์เซ็นต์ แบบลวดตาข่าย 53.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์และผลงานของ พานิช และคณะ [5] สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีในการกำจัดอนุภาคควันจากกระบวนการประกอบอาหารให้มีประสิทธิภาพและขยายผลให้สามารถใช้งานได้ต่อไป

การวิจัยต่อไปคณะผู้วิจัยจะศึกษาและวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ของเครื่องตกตะกอนกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง วิเคราะห์ถึงพลังงานที่ใช้ต่อชั่วโมงการทำงาน ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ปรับปรุงแก้ไขตัวตกตะกอนให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น และนำไปใช้งานดักจับกลุ่มควันที่เกิดจากการประกอบอาหารอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน ชื่อทุน HRS [Hands-on Researcher (Small)] รหัสทุน 58-HRS1-246 งบประมาณปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัย

เทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดอยสะเก็ด

## 7. รายการอ้างอิง

- [1] กรีนพีซ (GreenPeace), 2560, มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ของเมืองในประเทศไทยช่วงเดือนมกราคม-มิถุนายน พ.ศ. 2560, กรุงเทพฯ.
- [2] กรมควบคุมมลพิษ, 2559, รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- [3] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2555, แนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทการเผาถ่านหรือการสะสมถ่านขององค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก, กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [4] Rodmanee, Y. and Kanchana, R., 2011, Electrostatic precipitator development by using quality function deployment, IE Network Conference, October 20-21.
- [5] Intra, P., Limueadphai, P. and Tippayawong, N., 2010, Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a multiple tubular electrostatic precipitator, Particulate Sci. Technol. 28: 547-565.
- [6] Intra, P. and Dussadee, N., 2007, 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, October 17-19.

- [7] Intra, P. and Dussadee, N., 2007, Characterisation of wire cylinder electrostatic precipitator for exhaust gas particles removal of biomass furnace, Eng. J. Chiang Mai Univ. 14(1): 29-39.
- [8] ชญาศักดิ์ รัตนโชติ, พีระพงษ์ ทีฆสกุล และ ยุทธนา ภูริระวินิชย์กุล, 2551, เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้พื้น, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, ปทุมธานี, 15-17 ตุลาคม.
- [9] วชร กาลาสี, นฤปดี ศรีสังข์, ภัทร สุพัตกุล และ พีระพงษ์ ทีฆสกุล, 2549, ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 1 : อนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม.
- [10] White, H.J., 1963, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- [11] Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M., 1995, Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [12] Parker, K.R., 1997, Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, New York.
- [13] Mizuno, A., 2000, Electrostatic precipitation, IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation 7(5): 615-624.
- [14] Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T., 2007, Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review, J. Electrostat. 65: 33-155.
- [15] พานิช อินต๊ะ, อุษณีย์ วินิจเขตคำนวณ, อาทิตย์ ยาวุฑฒิ และวิสูตร อาสนวิจิตร, 2554, การพัฒนาเครื่องบำบัดอากาศภายในอาคารสำหรับห้องปลอดความเป็นพิษโดยการผสมผสานเทคนิคเชิงไฟฟ้าสถิตและการกรอง, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ, เชียงใหม่.
- [16] พานิช อินต๊ะ และณัฐภูมิ ดุษฎี, 2550, ศักยภาพการดักจับอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 6, เชียงใหม่, 15-16 มีนาคม.
- [17] พานิช อินต๊ะ, 2548, เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมมลภาวะทางอากาศจากอุตสาหกรรม, Technic Magazine 22(252): 109-122.
- [18] ณัฐภูมิ ดุษฎี, พาวิน มะโนชัย, ญาณกร สุทัสน มาลี และวีระ ฟ้าเพ็องวิทยากุล, 2549, ระบบการใช้พลังงานชีวมวลแบบรวมศูนย์สำหรับอบแห้งลำไยด้วยเครื่องกระบะ, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยและพัฒนาภาครัฐร่วมเอกชนในเชิงพาณิชย์, สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, กรุงเทพฯ.
- [19] นฤปดี ศรีสังข์, จรัสชัย เย็นพลับ, พีระพงษ์ ทีฆสกุล และวชร กาลาสี, 2549, ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 2 : ผลกระทบของความต่างศักย์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม.
- [20] Tippayawong, N. and Kunanoppadon, J.,

- 2003, Application of electrostatic technique to diesel particulate aftertreatment, PSU-UNS International Conference Energy and the Environment, Hat Yai, Songkhla, December 11-12.
- [21] Nair, S.A., Pemen, A.J.M., Yan, K., van Heesch, E.J.M., Ptasinski, K.J. and Drinkenburg, A.A.H., 2004, Tar removal from biomass derived fuel gas by pulsed corona discharges a chemical kinetic study, *Ind. Eng. Chem. Res.* 43: 1649-1658.
- [22] วิสูตร อาสนวิจิตร และกรพจน์ มะโนใจ, 2560, การพัฒนาต้นแบบระบบดักควันไฟฟ้าสถิตแบบการควบคุมวงจรปิดสำหรับเตาเผาขยะ, *ว.วิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม* 1(1): 71-82.
- [23] Intra, P., 2010, *Electrostatic System*, National Science and Technology Development Agency (NSTDA) Northern Network, Chaing Mai.
- [24] John, G., Martin, F. and George, C., 1991, *Principles of Power Electronics*, Massachusetts Institute of Technology, Addison-Wesley Publishing Company.
- [25] Asanavijit, V., Premrudeepreechacharn, S., Yawootti, A. and Intra, P., 2011, Current-voltage characteristics of positive corona pulsed electrostatic precipitator, pp. 359-363, *The 9th PSU Engineering Conference*, Phuket, 2-3 May.