วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26 ฉบับที่ 3 ก.ย.–ธ.ค. 2559
The Journal of KMUTNB., Vol. 26, No. 3, Sep.–Dec. 2016

บทความวิจัย

การวิเคราะห์พฤติกรรมและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต 2 ขั้นสำหรับการกำจัดอนุภาคจากกระบวนการคั่วกาแฟ

ชนิกานต์ ขัดปา อรอนงค์ อุปมา ไอลดา ถาตุ้ย ปภัสรา ยอดทิพย์ และ สุภาวดี ฟั่นก้อม
นักศึกษา วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
อาทิตย์ ยาวุฑฒิ
อาจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
พานิช อินต๊ะ*
รองศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9755-1985 อีเมล: panich_intra@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.08.004
รับเมื่อ 6 พฤษภาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 14 สิงหาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 21 ธันวาคม 2558
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมอนุภาคและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต 2 ขั้นสำหรับการกำจัดอนุภาคจากกระบวนการคั่วกาแฟ โดยจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องตกตะกอนแบบ 2 มิติได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics™ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยสมการ Poisson's สมการ Navier-Stokes และสมการแรง Khan and Richardson และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นสำหรับทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ MATLAB 7.0 ในการคำนวณจะถูกประเมินสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จอยู่ในช่วง 10 ถึง 30 กิโลโวลต์ และอุณหภูมิขณะทำงานของไอเสียอยู่ในช่วง 60 ถึง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์พฤติกรรมอนุภาคและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า

คำสำคัญ: ฝุ่นควัน การคั่วกาแฟ ประสิทธิภาพ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ฝุ่นละออง

การอ้างอิงบทความ: ชนิกานต์ ขัดปา, อรอนงค์ อุปมา, ไอลดา ถาตุ้ย, ปภัสรา ยอดทิพย์, สุภาวดี ฟั่นก้อม, อาทิตย์ ยาวุฑฒิ และ พานิช อินต๊ะ, "การวิเคราะห์พฤติกรรมและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต 2 ขั้นสำหรับการกำจัดอนุภาคจากกระบวนการคั่วกาแฟ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 359–374, ก.ย.–ธ.ค. 2559

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26 ฉบับที่ 3 ก.ย.–ธ.ค. 2559
The Journal of KMUTNB., Vol. 26, No. 3, Sep.–Dec. 2016

Research Article

Analysis of Behavior and Collection Efficiency of Particles in Two-stage Electrostatic Precipitators for Particulate Matter Removal from Coffee Roasting Process

Chanikarn Kudpa, Onanong Uppama, Ailada Thatui, Papassara Yodthip and Supawadee Fungom
Student, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

Artit Yawootti
Lecturer, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

Panich Intra*
Associate Professor, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-9755-1985, E-mail: panich_intra@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.08.004
Received 6 May 2015; Accepted 14 August 2015; Published online: 21 December 2015
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

In this research paper, the behavior and collection efficiency of particles in two-stage electrostatic precipitators (ESPs) for removing particulate matter during the coffee roasting process were analyzed. A 2D numerical model of ESP was developed using a commercial computational fluid dynamic software package, COMSOL Multiphysics™ to numerically study the particle behavior and collection efficiency inside the ESP. The Navier-Stokes equation, the Laplace equation, and the Khan and Richardson equation were solved . The mathematical model for predicting the particle collection efficiency of the ESP was also developed using MATLAB 7.0. These calculations were evaluated for a particulate diameter of 0.1–100 μm using an applied voltage for discharge electrode of 10–30 kV and a controlled exhaust temperature of 60–120°C. The analysis of particle behavior and the collection efficiency of particles in the ESP were particularly useful in the wire-plate ESP design.

Keywords: Dust, Coffee Roasting, Collection Efficiency, Electrostatic Precipitator, PM

Please cite this article as: C. Kudpa, O. Uppama, A. Thatui, P. Yodthip, S. Fungom, A. Yawootti, and P. Intra, "Analysis of behavior and collection efficiency of particles in two-stage electrostatic precipitators for particulate matter removal from coffee roasting process," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 26, no. 3, pp. 359–374, Sep.–Dec. 2016 (in Thai).

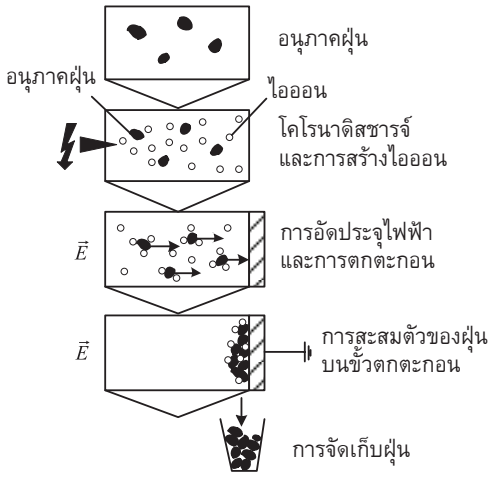
1. บทนำ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลกและด้วยความนิยมที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้กาแฟเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของโลก โดยในปี ค.ศ. 2004 กาแฟเป็นสินค้าการเกษตรส่งออกของไทยที่ทำรายได้เป็นอันดับหนึ่งในจำนวน 12 ประเทศและเป็นพืชที่มีการส่งออกอย่างถูกต้องตามกฎหมายซึ่งมีมูลค่าสูงที่สุดเป็นอันดับ 7 ของโลก ในปี ค.ศ. 2005 ซึ่งกาแฟ คือ เครื่องดื่มที่ผลิตจากเมล็ดกาแฟ โดยผ่านกระบวนการคั่วให้มีขนาดที่พองออกเป็นสองเท่า แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านสีของเมล็ดกาแฟ จากสีเขียวเป็นสีเหลืองและกลายเป็นสีน้ำตาลอ่อน หากใช้ระยะเวลาในการคั่วนานทำให้กาแฟมีสีเข้มมากขึ้น

เครื่องคั่วกาแฟเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการคั่ว แต่การคั่วกาแฟด้วยเครื่องคั่วกาแฟทั่วไปพบว่ามีข้อจำกัดในการใช้งานในส่วนของ Roasting Cyclone เนื่องจากไม่สามารถกำจัดอนุภาคควันที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถผ่านออกไปได้ ก่อให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของอนุภาคฝุ่นควันที่ปนไปกับอากาศร้อนส่งผลเสียต่อคุณภาพอากาศในบริเวณใกล้เคียงและสุขภาพของพนักงาน โดยอนุภาคฝุ่นควันและกลิ่นเหล่านี้สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานาน สามารถที่จะผ่านเข้าไปยังระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ [1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการแพร่กระจายของอนุภาคฝุ่นควันและกลิ่นจากกระบวนการคั่วกาแฟเหล่านี้ การควบคุมปริมาณการแพร่กระจายของอนุภาคฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟในปัจจุบันมีหลายวิธีการ เช่น ผ้ากรอง (Fabric Filter) เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) โดยแต่ละวิธีการมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไปสำหรับผ้ากรองจะให้ประสิทธิภาพการดักกรองสูงที่สุด แต่การใช้งานพบปัญหาในการบำรุงรักษาและการสูญเสียความดันของแก๊สร้อน หากต้องการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจำเป็นต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงทำให้เสี่ยงต่อการหลอมละลาย ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟที่มีอุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส [1]

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟเนื่องจากสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ความดันสูญเสียน้อยกว่า 1000 ปาสคาล และมีประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมสำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร สูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ [2]–[13] เนื่องด้วยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้กับควันจากการคั่วกาแฟนั้นยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย อยู่ในวงกำจัด ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต และการจัดวางตำแหน่งต่างๆ ของขั้วอิเล็กโทรด

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคควันกาแฟภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล COMSOL Multiphysics 3.5 และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ MATLAB 7.0 โดยในการคำนวณจะใช้เงื่อนไขและสภาวะการทำงานจริงของเครื่องคั่วกาแฟ Probatone12 มาคำนวณ ผลที่ได้ทำให้ทราบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคควันกาแฟ และสามารถนำข้อมูลดังกล่าวเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้มีประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุภาคควันกาแฟ ลดระยะเวลาในการผลิต เนื่องจากสามารถหาคำตอบและคาดการณ์สิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและทันการณ์ เพื่อที่จะเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจและช่วยลดความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นจากการสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจริง

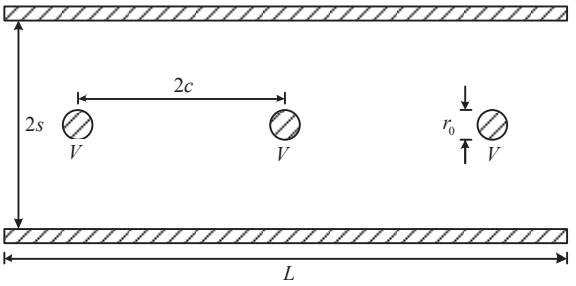


รูปที่ 1 หลักการของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [5]

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากการไหลของแก๊สโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า รูปที่ 1 แสดงหลักการของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge Electrode) และคอลเลกชันอิเล็กโทรด (Collection Electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรดโดยใช้คอลเลกชันอิเล็กโทรดเป็นกราวนด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด ไอออน (Ion) และอิเล็กตรอน (Electron) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณที่เกิดโคโรนาดิสชาร์จและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับคอลเลกชันอิเล็กโทรด เมื่อมีอากาศหรือแก๊สไอเสียที่มีอนุภาคแขวนลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างจะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนก็จะเกาะติดกับอนุภาคที่ไหลเข้ามาหรือที่เรียกว่าการอัดประจุอนุภาค เป็นผลทำให้อนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่วิถีโค้งด้วยแรงไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ไปตกบนคอลเลกชันอิเล็กโทรดและถูกสะสมตัวอยู่บนคอลเลกชันอิเล็กโทรด



รูปที่ 2 การจัดวางอิเล็กโทรดของเครื่องตกตะกอนแบบเส้นลวด-แผ่นระนาบ

โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากคอลเลกชันอิเล็กโทรดโดยการเคาะคอลเลกชันอิเล็กโทรดด้วยค้อนหรือระบบการสั่นสะเทือนเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงไป

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน (Current-Voltage Relationship) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell ที่ครอบคลุมสมการ Poisson's ของสนามไฟฟ้า E คือ [14]

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของประจุ (C/m^3) และ ε_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ซึ่งสมการนี้ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ ในการศึกษานี้จะสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (Ion Space Charge) ในเครื่องตกตะกอนแบบสาย-แผ่นมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (Average Corona Current) I_c ที่เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรดของเครื่องตกตะกอนแบบสาย-แผ่นดังรูปที่ 2 คือ [5]

$$I_c = \frac{\pi \varepsilon_0 Z_i h L}{cs^2 \ln\left(d / r_o\right)} V\left(V - V_c\right) \tag{2}$$

เมื่อ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (Ion Electrical Mobility) สำหรับในการศึกษานี้จะใช้ไอออนลบ (Negative Ion) เนื่องจะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูง ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมสูงตามไปด้วย [15]–[17] โดยมีค่าเท่ากับ 2.1×10^{-4} $m^2/V.s$ สำหรับไอออนลบในอากาศ d คือรัศมีทรงกระบอกสมมูล (Equivalent Cylindrical Radius) ($d = 4s/\pi$ สำหรับ $s/c \leq 0.6$) r_0 คือรัศมีของขั้วดิสชาร์จ h คือความสูงของขั้วตกตะกอน L คือความยาวของขั้วตกตะกอน V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จอิเล็กโทรด และ V_c คือแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona Onset Voltage) หาได้จาก [5]

$$V_c = r_o E_c \ln(d / r_o) \tag{3}$$

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona Onset Field) E_c สำหรับโคโรนาลบในอากาศหาได้จาก [5]

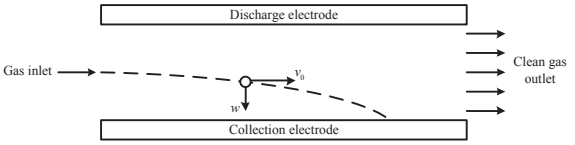
$$E_c = \delta\left(32.2 + \frac{0.864\times10^5}{\sqrt{r_o\delta}}\right) \tag{4}$$

$$\delta = \frac{298}{(298+T)}P \tag{5}$$

เมื่อ δ คือความหนาแน่นของแก๊ส (Gas Density) T คืออุณหภูมิทำงานของแก๊ส (Operating Temperature) P คือความดันทำงาน (Operating Pressure)

2.3 การอัดประจุอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Particle Charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (Thermal Diffusion) ในการศึกษานี้จำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาคจะได้มาจากการอัดประจุ



รูปที่ 3 ลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคในสนามไฟฟ้า

แบบสนาม (Field Charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 100 นาโนเมตร – 100 ไมโครเมตร [15] โดยการประมาณค่าจำนวนประจุของอนุภาคด้วยวิธีการนี้สามารถคำนวณได้จาก [15], [16]

$$n_p = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2}\right)\left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e}\right)\left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1+\pi K_E e Z_i N_i t}\right) \tag{6}$$

เมื่อ ε คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric Constant of Particle) E คือสนามไฟฟ้า K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ (มีค่าเท่ากับ 9.0×10^9 $N.m^2/C^2$) d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19}C) N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion Number Concentration) และ t คือเวลาในการอัดประจุ (Charging Time) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่น ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จาก [16]

$$N_i t = \frac{I_c d}{Z_i e v_0 V h} \tag{7}$$

เมื่อ v_0 คือความเร็วของของไหล

2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Motion) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตดังรูปที่ 3 จำเป็นต้องรู้สมดุลของแรงทั้งหมดที่กระทำบนอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยแรงโมเมนตัม (Momentum Force) $\vec{F}_T$ แรงทางไฟฟ้า (Electrical Force) $\vec{F}_E$ และแรงเสียดลาก (Drag Force) $\vec{F}_D$ [5]

$$\vec{F}_T = -m\vec{a} \quad (8)$$

$$\vec{F}_E = n_p e\vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{F}_D = \frac{3\pi\mu d_p w}{C_c} \quad (10)$$

เมื่อ m คือมวลของอนุภาค $\vec{a}$ คืออัตราเร่ง μ คือความหนืดของของไหล w คือความเร็วไฟฟ้าสถิตบั้นปลาย (Terminal Electrostatic Velocity) และ C_c คือตัวชดเชยของคันนิงแฮม (Cunningham Correction Factor) [17] โดยผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคทั้งหมดจะเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ 11

$$\vec{F}_T + \vec{F}_E + \vec{F}_D = \vec{0} \quad (11)$$

จากกฎของนิวตัน (Newton's Law) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ

$$m\frac{dw}{dt} = n_p eE - \frac{3\pi\mu d_p w}{C_c} \quad (12)$$

เมื่อ t คือเวลา โดยพิจารณาให้มวลของอนุภาคมีค่าน้อยมากๆ และเวลามีค่ามากกว่า 10^{-2} วินาที จะได้ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนคือ [5]

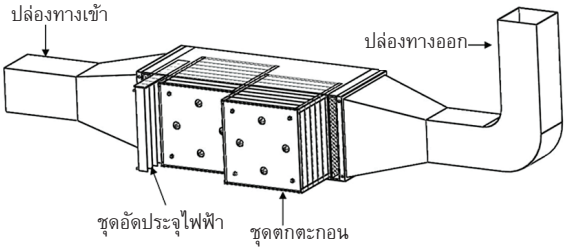
$$w = \frac{n_p eEC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (13)$$

2.5 ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของอนุภาค

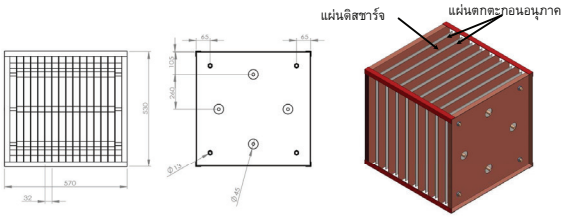
ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของอนุภาค (Collection Efficiency) η ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นระนาบ สามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch คือ [5]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{wL}{v_0 s}\right) \quad (14)$$

เมื่อ L คือความยาวของขั้วตกตะกอน



(ก) เครื่องตกตะกอนที่ออกแบบ



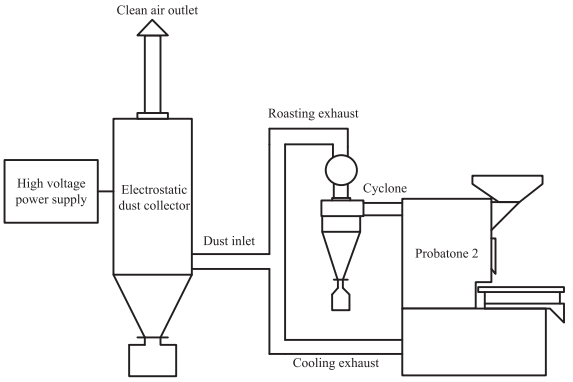
(ข) ชุดตกตะกอนที่ออกแบบ

รูปที่ 4 ลักษณะและส่วนประกอบหลักของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบ 2 ขั้นที่ออกแบบ

3. ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ในการศึกษานี้ลักษณะโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะเป็นแบบ 2 ขั้นคือ ชุดอัดประจุอนุภาคไฟฟ้า (Particle Charger) และชุดตกตะกอน (Collector) โดยจะใช้โคโรนาดิสชาร์จสำหรับอัดประจุให้อนุภาคก่อน จากนั้นให้อนุภาคตกตะกอนบนแผ่นตกตะกอน ซึ่งจะทำการพัฒนาระบบกำจัดควันและกลิ่นจากกระบวนการคั่วกาแฟ ด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 4 ที่ประกอบด้วยห้องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ภายในห้องตกตะกอนประกอบด้วยขั้วดิสชาร์จ และขั้วตกตะกอน เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จโดยที่ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ ไอออน และอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับ



รูปที่ 5 ระบบกำจัดควันและกลิ่นจากกระบวนการคั่วกาแฟด้วยเทคนิคไฟฟ้าสถิตที่ต่อเข้ากับเครื่องคั่วกาแฟ

แผ่นตกตะกอน เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุ และอนุภาคที่มีประจุถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์และถูกสะสมตัวอยู่บนแผ่นตกตะกอน โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ ซึ่งระบบกำจัดควันและกลิ่นจากกระบวนการคั่วกาแฟสามารถใช้งานง่ายและมีราคาถูก สามารถลดปัญหามลพิษทางอากาศได้ โดยระบบกำจัดควันและกลิ่นจากกระบวนการคั่วกาแฟด้วยเทคนิคไฟฟ้าสถิตที่ต่อเข้ากับเครื่องคั่วกาแฟดังรูปที่ 5 โดยเป้าหมายในการออกแบบในบทความนี้คือเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่อนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics 3.5 และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ MATLAB 7.0 และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องตกตะกอนในอนาคต ในการทำนายประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคของเครื่องตกตะกอนจะกำหนดให้เครื่องตกตะกอนสามารถตกตะกอนฝุ่นควันที่เกิดจากการคั่วกาแฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1–200 ไมโครเมตร มีอนุภาคควันและน้ำมันดินเชิงมวลรวม (Mass Concentration) อยู่ในช่วงประมาณ 200–150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย 89.6 องศาเซลเซียส มีความเร็วของควันกาแฟประมาณ 1.856 เมตรต่อวินาที โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.15 เมตร จะมีตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 324 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ ทำการวิเคราะห์และแสดงผลการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้จริง

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการคำนวณเชิงตัวเลขพฤติกรรมการเคลื่อนที่อนุภาค

ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Model) ขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า การไหลและการเคลื่อนที่อนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนอนุภาคผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics™ โดยแบบจำลองจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แบบจำลองสนามไฟฟ้า (Electric Field Model) และแบบจำลองสนามการไหลและการเคลื่อนที่อนุภาค (Flow Field and Particle Motion Models) โดยสมมุติให้การไหลของของไหลภายในเครื่องตกตะกอนอนุภาคสมมาตรกับแกน (Axisymmetric) เป็นลักษณะราบเรียบ (Laminar) มีรูปร่างของความเร็วพัฒนาจนคงตัว (Fully Developed) และไม่ยุบตัวตามความดัน (Incompressible) ไม่มีผลของประจุในอวกาศว่าง (Space Charge Effect) ภายในเครื่องตกตะกอนอนุภาค ดังนั้น สมการ Poisson's สมการ Navier-Stokes และสมการแรง Khan and Richardson จึงนำมาใช้ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้า การไหลและการเคลื่อนที่อนุภาคแบบสองมิติ (2D)

สมการ Poisson's:

$$\rho = -\nabla \cdot (\varepsilon V) \tag{15}$$

สมการแรง Navier-Stokes, F_u:

$$F_u = \rho\frac{\partial u}{\partial t} - \nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla u + (\nabla u)^T\right)\right] + \rho(u\cdot\nabla)u + \nabla p \quad (16)$$

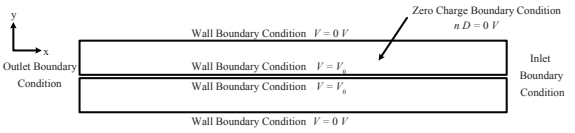
$$\nabla\cdot u = 0 \quad (17)$$

สมการแรง Khan and Richardson, F_p:

$$F_p = \pi {r_p}^2 \rho\left(\overline{u} - \overline{u}_p\right)^2 (1.84\left(R_{e_p}\right)^{-0.3} + 0.293\left(R_{e_p}\right)^{0.06})^{3.45} \quad (18)$$

$$R_{e_p} = \frac{(\left|\overline{u} - \overline{u}_p\right| 2r_p\rho)}{\mu} \quad (19)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า ε คือค่าสภาพยอม V คือศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า u คือความเร็วแก๊ส p คือความดันแก๊ส η ความหนืดแก๊ส $\overline{u}$ คือความเร็วเฉลี่ยแก๊ส $\overline{u}_p$ ความเร็วเฉลี่ยอนุภาค R_{e_p} คือตัวเลขเรย์โนลด์อนุภาคและ r_p รัศมีอนุภาค รูปที่ 6 แสดงโดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Computational Domain) ของเครื่องตกตะกอนอนุภาคตามรูปที่ 4 ในส่วนระหว่างแผ่นดิสชาร์จและแผ่นตกตะกอน รูปที่ 7 แสดงการกระจายเมช (Mesh Distribution) ของโดเมนปัญหาเครื่องตกตะกอน โดยเมชจะถูกสร้างขึ้นอัตโนมัติด้วยโปรแกรม COMSOL และทำเมชละเอียดในส่วนที่สำคัญ เช่น บริเวณใกล้แผ่นดิสชาร์จและบริเวณขอบมุมระหว่างแผ่นดิสชาร์จและแผ่นตกตะกอน ซึ่งผลการทดสอบการลู่เข้า (Convergence Test) จะได้จำนวนของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular Elements) ประมาณ 7,424 เอลิเมนต์ทั้งโดเมน โดยเงื่อนไขการทำงานของเครื่องตกตะกอนอนุภาคที่ใช้ในการคำนวณกำหนดให้อากาศมีความหนาแน่นเท่ากับอากาศคือ 1.165 kg/m^3 และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศเท่ากับ 1.00059 และกำหนดให้ความเร็วของแก๊ส 1.856 m/s ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เส้นลวดโคโรนามีค่าอยู่ในช่วง 10 kV และที่แผ่นขนานมีค่าเท่ากับ 0 V โดยเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 6 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเครื่องตกตะกอน

รูปที่ 7 การกระจายเมชของโดเมนปัญหาเครื่องตกตะกอน

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการคำนวณ

เงื่อนไขในการทำงาน	ค่าที่กำหนด
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วดิสชาร์จ	10-20 kV
แรงดันไฟฟ้าที่แผ่นขนาน	0 V
ชนิดแก๊ส	อากาศ
ความเร็วของแก๊สทางเข้า	1.856 m/s
ความหนาแน่นของแก๊ส	1.1614 kg/m^3
ลักษณะการไหล	แบบราบเรียบ
การลื่นไถลที่ผนัง	ไม่มี
ค่าสภาพยอม	1.00059
ผลของประจุค้าง	ไม่มี

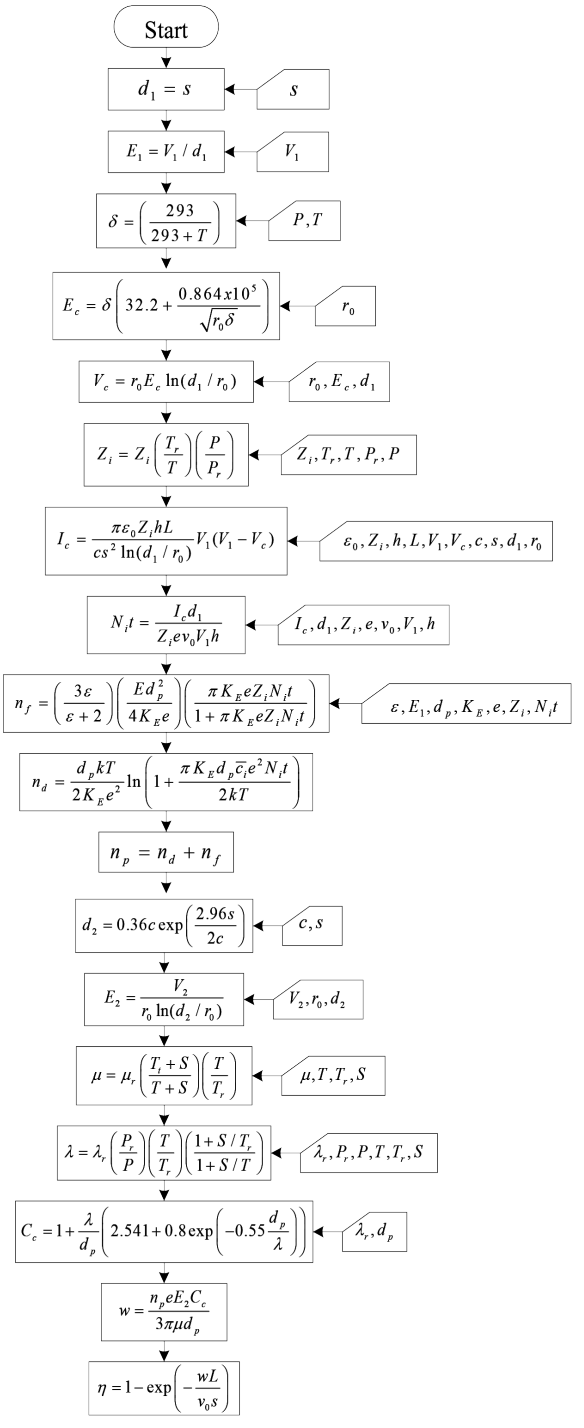
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการคำนวณเชิงตัวเลขประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาค

ในบทความวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายประสิทธิภาพรวมการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB โดยเครื่องตกตะกอนมีลักษณะการจัดวางอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2 โดยสมมุติให้คุณสมบัติของแก๊สร้อนมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอากาศ คือความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 1.1614 kg/m^3 และความหนืด เท่ากับ 1.846×10^{-5} m^2/s และสมมุติให้รูปร่างของความเร็วของของไหลสม่ำเสมอ (Uniform Velocity Profile) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุลบ ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์จะมีลำดับ

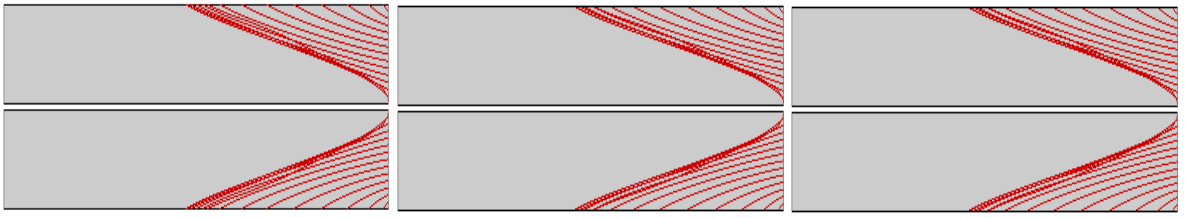
ขั้นตอนดังแสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยอันดับแรกจะต้องกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าของเครื่องตกตะกอนคือ ช่วงขนาดของอนุภาค การไหลของแก๊ส ความดันและอุณหภูมิขณะทำงาน จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขภายในเครื่องตกตะกอนคือ ขนาดทางเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดและสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาด้วยสมการที่ (3)–(5) และทำการคำนวณค่ากระแสโคโรนาจากสมการที่ (2) พร้อมกับกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศของอากาศภายในเครื่องตกตะกอน และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับความเข้มข้นจำนวนของไอออน ต่อจากนั้นจะคำนวณหาค่าการอัดประจุของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ 6 และ 7 เมื่อได้ค่าประจุของอนุภาคแล้ว ก็จะทำการคำนวณหาค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของอนุภาค และความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ (12) ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ (13)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปร	ช่วงการคำนวณ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จ ($2r_0$)	0.5–1 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จ ($2c$)	100–340 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน (s)	200–680 มิลลิเมตร
ความยาวของเครื่องตกตะกอน (L)	600 มิลลิเมตร
ความสูงของขั้วตกตะกอน (h)	600 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	0.1–100 ไมโครเมตร
ประจุอนุภาค	ประจุบวก
แรงดันไฟฟ้า	10–30 กิโลโวลต์
อุณหภูมิแก๊ส	60–120°C
ศักย์ไฟฟ้า	ขั้วบวก
ความดัน	1 บาร์
ลักษณะการไหลของแก๊ส	สม่ำเสมอตลอดทางเข้า
ความเร็วของแก๊ส	1.856 เมตร ต่อ วินาที



รูปที่ 8 แผนภูมิลำดับการคำนวณประสิทธิภาพการเก็บรวบรวม



(ก) 65.2 องศาเซลเซียส (ข) 106 องศาเซลเซียส (ค) 150 องศาเซลเซียส

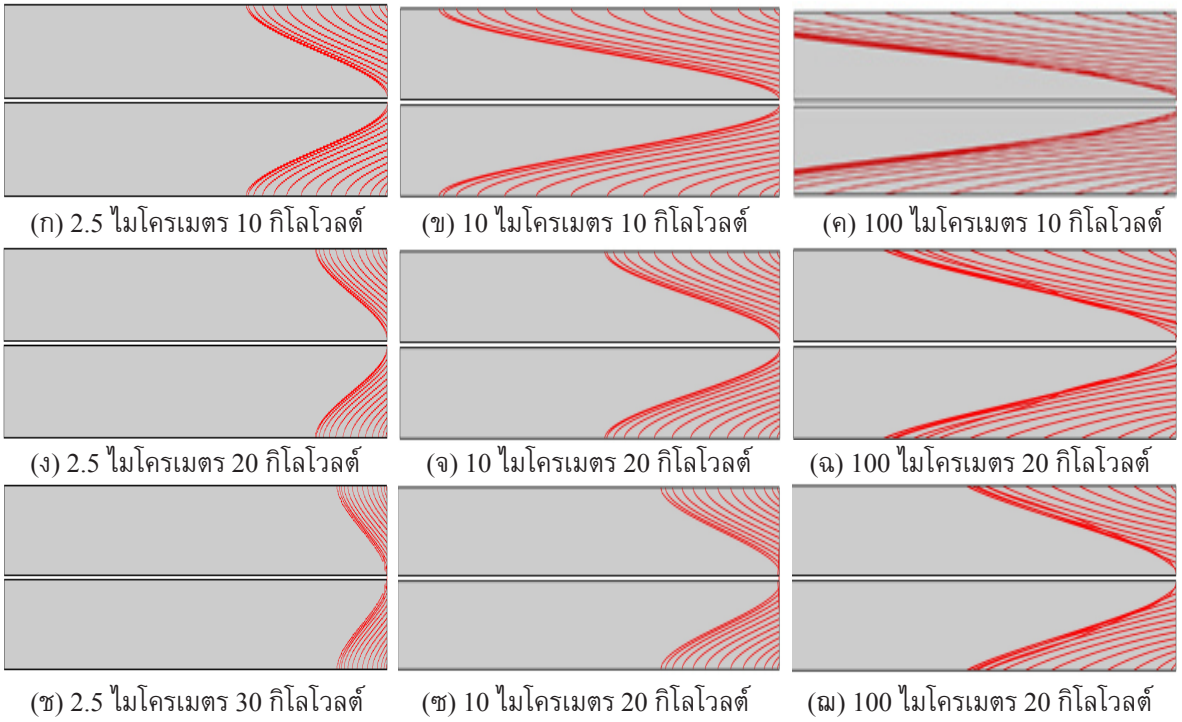
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการตกตะกอนของอนุภาคขนาด 100 ไมโครเมตร

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในชุดตกตะกอน

ชุดตกตะกอนมีหน้าที่ตกตะกอนอนุภาคควันกาแฟ โดยที่อนุภาคควันกาแฟจะได้รับประจุจากชุดประจุไฟฟ้ามาก่อนนี้ ซึ่งลักษณะการทำงานจะให้อนุภาคควันกาแฟเคลื่อนที่ขนานไปกับแนวแผ่นตกตะกอนด้วยแรงของการไหล จากนั้นอนุภาคควันกาแฟจะได้รับแรงของสนามไฟฟ้าแล้วตกตะกอนอยู่ภายในชุดตกตะกอน โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในชุดตกตะกอนนี้จะแสดงให้เห็นถึงระยะการตกตะกอนของอนุภาค อาจจะมีการตกช้าและตกเร็ว ซึ่งพฤติกรรมการเคลื่อนที่ดังกล่าวมีส่วนสำคัญในการปรับแรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการไหลของแก๊ส ตลอดจนการกำหนดขนาดอนุภาค ซึ่งส่งผลการตกตะกอน ดังนั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในชุดตกตะกอนในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในชุดตกตะกอนด้วยซอฟแวร์ COMSOL Multiphysics 3.5 จะใช้การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค แรงของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า (Khan and Richardson Force for Particle Tracing) ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยทดสอบกับอนุภาคขนาด 100 ไมโครเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ แสดงในรูปที่ 9 จากผลการจำลองการตกตะกอนของอนุภาคขนาด 100 ไมโครเมตรในชุดตกตะกอนใช้แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ และเปลี่ยนอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 65.2, 106 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในช่วง 65.2–150 องศาเซลเซียส มีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนเล็กน้อย ซึ่งจากสมการนาเวียร์สโตกส์ตัวแปรของอุณหภูมิจะแปรผันตรงกับจำนวนประจุที่อนุภาคได้รับ จากขั้นตอนการอัดประจุ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจำนวนประจุก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการจำลองในครั้งนี้อุณหภูมิในช่วง 65.2–150 องศาเซลเซียส มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ

การวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยทดสอบกับอนุภาคขนาด 2.5, 10 และ 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 10 จากผลการจำลองการตกตะกอนของอนุภาคขนาด 2.5, 10 และ 100 ไมโครเมตร ในชุดตกตะกอนโดยใช้อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 30 กิโลโวลต์ เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคขนาด 100 ไมโครเมตรสามารถตกตะกอนได้เร็วที่สุด เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อจำนวนประจุของอนุภาค โดยแรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับจำนวนประจุของอนุภาค คือเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง จำนวนประจุของอนุภาคก็สูงตามไปด้วย โดยจำนวนของประจุของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของไอออน ระยะเวลาในการอัดประจุ และนอกจากนี้ยังขึ้นกับสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้จากแรงดันไฟฟ้า

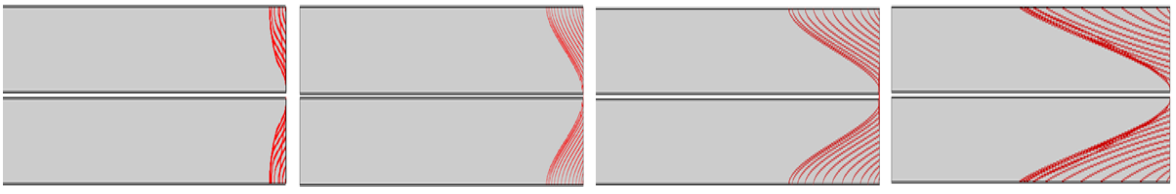


(ก) 2.5 ไมโครเมตร 10 กิโลโวลต์ (ข) 10 ไมโครเมตร 10 กิโลโวลต์ (ค) 100 ไมโครเมตร 10 กิโลโวลต์

(ง) 2.5 ไมโครเมตร 20 กิโลโวลต์ (จ) 10 ไมโครเมตร 20 กิโลโวลต์ (ฉ) 100 ไมโครเมตร 20 กิโลโวลต์

(ช) 2.5 ไมโครเมตร 30 กิโลโวลต์ (ซ) 10 ไมโครเมตร 20 กิโลโวลต์ (ฌ) 100 ไมโครเมตร 20 กิโลโวลต์

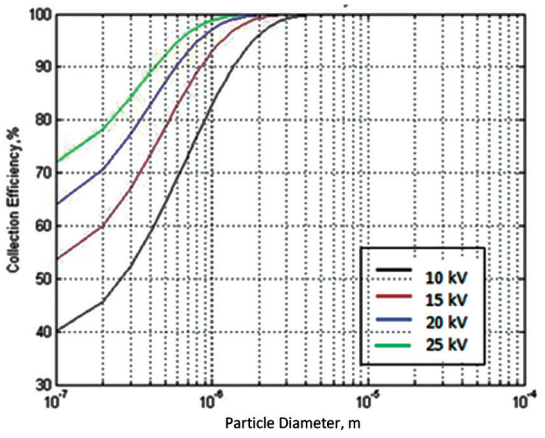
รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส



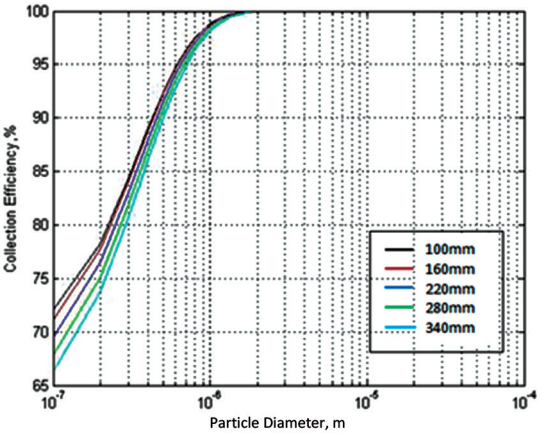
(ก) 1 ไมโครเมตร (ข) 2.5 ไมโครเมตร (ค) 10 ไมโครเมตร (ง) 100 ไมโครเมตร

รูปที่ 11 เปรียบเทียบการตกตะกอนของอนุภาคขนาด 1, 2.5, 10 และ 100 ไมโครเมตรที่แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 11 จากรูปแสดงผลการจำลองการตกตะกอนของอนุภาคในชุดตกตะกอนใช้แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนอนุภาค 4 ขนาด ได้แก่ 1, 2.5, 10 และ 100 ไมโครเมตร พบว่าการตกตะกอนของอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตรใช้เวลาในการตกตะกอนเร็วกว่าอนุภาคขนาด 2.5, 10 และ 100 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากผลการจำลองที่ได้พบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถตกตะกอนได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าและความเร็วไฟฟ้าสถิตปลายสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อพิจารณาสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า และขนาดของอนุภาค



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แรงดันไฟฟ้าขั้นตกตะกอนที่แตกต่างกัน

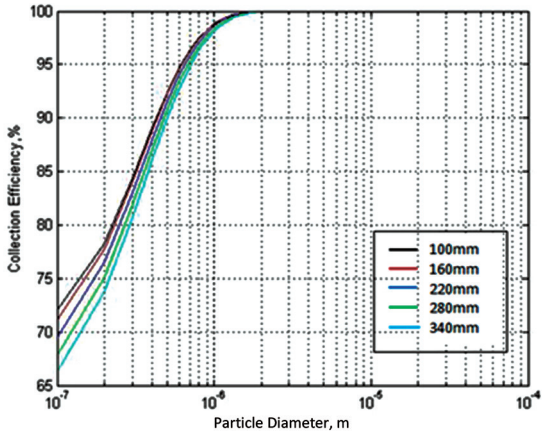


รูปที่ 13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จที่แตกต่างกัน

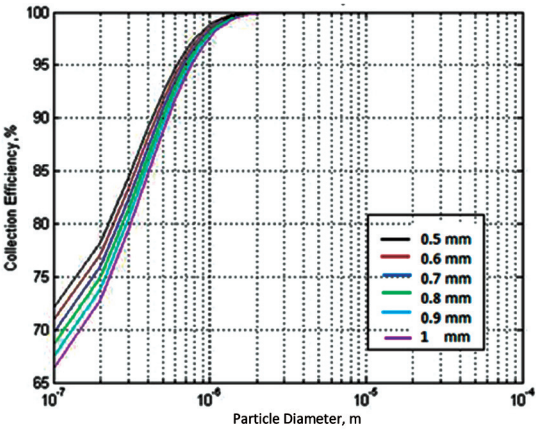
4.2 ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาค

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วดิสชาร์จขั้นตกตะกอน 10, 15, 20 และ 25 กิโลโวลต์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมสูงขึ้นตามเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าเข้มข้นของสนามไฟฟ้าภายในขั้นตกตะกอนและยังส่งผลต่อความเร็วเชิงไฟฟ้าสถิตของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนที่เป็นฟังก์ชันของประจุไฟฟ้าของอนุภาคและสนามไฟฟ้า จึงทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น โดยเหตุผลที่ไม่ใช้แรงดันไฟฟ้าขั้นตกตะกอนมากกว่า 25 กิโลโวลต์ เนื่องจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขั้นอัดประจุ เท่ากับ 30 กิโลโวลต์ ส่งผลให้เกิดจำนวนของประจุของอนุภาคมากที่สุดแล้ว และการใช้แรงดันไฟฟ้าขั้นตกตะกอน เท่ากับ 25 กิโลโวลต์นั้นถือว่าเหมาะสมกับพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการใช้แต่แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นระหว่างขั้วดิสชาร์จและขั้วตกตะกอน (แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศ) โดยอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตและอาจจะส่งผลอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และนอกจากนี้ยังพบว่าค่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากขึ้นเนื่องจากจำนวนประจุบนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น

รูปที่ 13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จที่แตกต่าง ($2c$) เท่ากับ 100, 160, 220, 280 และ 340 มิลลิเมตร พบว่าระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จดังกล่าว ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ ซึ่งเห็นได้ว่าในแต่ละระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกันมากเมื่ออนุภาคมากกว่า 0.2 ไมโคเมตร เนื่องจากระยะห่างระหว่างลวดที่ลดลงนั้นแสดงให้ทราบถึงจำนวนเส้นลวดที่เพิ่มขึ้น แต่ละแถวเสมือนกับว่าเป็นการเพิ่มกระแสโคโรนา แต่การเพิ่มกระแสโคโรนานั้น ยังจำกัด



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตกตะกอนที่แตกต่างกัน



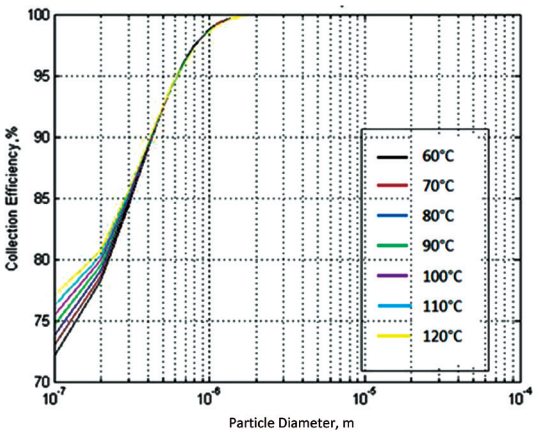
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จที่แตกต่างกัน

ด้วยพื้นที่การเกาะติดบนขั้วเก็บประจุด้วย ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่ใช้มีขีดจำกัดในการการคุมแต่หากระยะห่างระหว่างลวดมีขนาดกว้างมากๆ นั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อที่รักษาสนามไฟฟ้าโคโรนา โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มากขึ้นนั่นเอง และนอกจากนี้ยังพบว่าค่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากขึ้นเนื่องจากจำนวนประจุบนอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตกตะกอน ($2s$) เท่ากับ 100, 160, 220, 280 และ 340 มิลลิเมตร พบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นตกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ เนื่องจากระยะห่างระหว่างแผ่นขนานที่แคบลงนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ทำให้มีการอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคของควันกาแฟได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นขนานน้อยลง ซึ่งการทดลองนี้ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตกตะกอน 100 มิลลิเมตร ทำให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟสูงกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นตกตะกอนอื่นๆ

รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จที่แตกต่างกัน ($2r_0$) เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1 มิลลิเมตร พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จมีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วดิสชาร์จเล็กทำให้มีประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วดิสชาร์จที่ใหญ่ ซึ่งการวิเคราะห์นี้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จอื่นๆ

รูปที่ 16 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ อนุภาคที่อุณหภูมิขาเข้าที่แตกต่างกัน (T) เท่ากับ 60, 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในช่วง 60–120



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่อุณหภูมิทางด้านขาเข้าที่แตกต่างกัน

องศาเซลเซียส มีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนเล็กน้อย เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาด เล็กมากๆ และจากรูปจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิของก๊าซขาเข้าสูงจะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร สูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซขาเข้าต่ำ แต่เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นตั้งแต่ขนาด 1 ไมโครเมตรขึ้นไป ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการตะกอนเฉลี่ยสูง 99.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากสมการการอัดประจุแบบแพร่กระจายตัวแปรของอุณหภูมิ แปรผันตรงกับจำนวนประจุที่อนุภาคได้รับจากขั้นตอนการอัดประจุ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จำนวนประจุก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น แต่ในความเป็นจริงในการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่มีอุณหภูมิของควันสูงมากๆ จะทำให้เกิดผลเสียต่อโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนที่ทำจากโลหะ โดยอาจทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปได้ อีกทั้งยังไม่มีฉนวนไฟฟ้าที่จะสามารถทนความร้อนสูงมากๆ ได้ และยังส่งผลต่อความปลอดภัยในการทำงานอีกด้วย ดังนั้น อุณหภูมิค่อนข้างจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สำหรับกำจัดฝุ่นควันจากกระบวนการคั่วกาแฟ ที่อุณหภูมิของควันอยู่ในช่วง 60–120 องศาเซลเซียส

5. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่อนุภาคและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบ 2 ขั้น สำหรับการกำจัดอนุภาคจากกระบวนการคั่วกาแฟ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องตกตะกอนแบบ 2 มิติได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics™ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยสมการ Poisson's สมการ Navier-Stokes และสมการแรง Khan and Richardson และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นสำหรับทำนายประสิทธิภาพรวมการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ MATLAB 7.0 ในการคำนวณจะถูกประเมินสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จอยู่ในช่วง 10 ถึง 30 กิโลโวลต์ และอุณหภูมิขณะทำงานของไอเสียอยู่ในช่วง 60 ถึง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษาทางทฤษฎีของพฤติกรรมอนุภาคและประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า โดยสามารถสรุปแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบดังนี้

1. การกำหนดแรงดันไฟฟ้า แรงดันเพิ่มขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้นตาม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าหากมีการนำไปปรับใช้จริงต้องพิจารณาถึงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วย เนื่องจากการสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงนั้นทำได้ยากเพราะแหล่งจ่ายแรงดันชนิดนี้มีราคาค่อนข้างแพง แต่หากมีความต้องการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง ทางเลือกที่ดีควรมีการปรับขนาดของแผ่นตกตะกอนให้สั้นลง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสร้างเครื่องตกตะกอน เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงจะทำให้ระยะการตกตะกอนสั้น

2. การกำหนดอุณหภูมิ อุณหภูมิในช่วง 65.2–150

องศาเซลเซียส ค่อนข้างจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมของอนุภาค ดังนั้นการใช้งานจริง ควรปรับสภาวะให้อุณหภูมิของแก๊สไอเสียมีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว หากแก๊สไอเสียมีค่าอุณหภูมิมากกว่าช่วงที่กำหนดควรทำการลดอุณหภูมิก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องตกตะกอน เพราะในการทำงานจริงของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต อุณหภูมิของอนุภาคที่สูงมาก จะทำให้เกิดผลเสียต่อโครงสร้างของเครื่องตกตะกอน โดยอาจทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปได้ และไม่มีฉนวนไฟฟ้าที่จะสามารถทนความร้อนสูงมาก ๆ ได้เช่นกัน อีกทั้งยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการทำงานของผู้ปฏิบัติการอีกด้วย

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หากมีขนาดเล็กประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมจะสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าและความเร็วไฟฟ้าสถิตปลายสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการผลิตงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (รหัสโครงการ HRL-026) ขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าสถิตในงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Intra, *Electrostatic System for Clean Air*. Chiang Mai: NSTDA Northern Network, 2010 (in Thai).

[2] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 5, pp. 615–624, 2000.

[3] P. Haslerm and T. H. Nussbaumer, "Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification," *Biomass & Bioenergy*, vol. 16, pp. 385–395, 1999.

[4] P. Intra and N. Dussadee, "Characterisation of wire-cylinder electrostatic precipitator for exhaust gas particles removal of biomass furnace," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 14, no. 1, pp. 29–39, 2007 (in Thai).

[5] K. R. Parker, *Applied Electrostatic Precipitation*. New York: Blackie Academic & Professional, 1997.

[6] S. H. Kim and K. W. Lee, "Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models," *Journal of Electrostatics*, vol. 48, pp. 25, 1999.

[7] Y. Zhuang, Y. J. Kim, T.G. Lee, and P. Biswas, "Experimental and theoretical studies of ultra fine particle behavior in electrostatic precipitators," *Journal of Electrostatics*, vol. 49, pp. 245, 2000.

[8] J. D. Bapat, "Application of ESP for gas cleaning in cement industry with reference to india," *Journal of Hazardous Meterials*, B81, pp. 285, 2001.

[9] S. H. Kim, H. S. Park, and K. W. Lee, "Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles," *Journal of Electrostatics*, vol. 50, pp. 177, 2001.

[10] J. H. Park and C. H. Chun, "An Improved modeling for prediction of grade efficiency of electrostatic precipitator with negative corona," *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, pp. 673, 2002.

[11] B. S. Choi and C. A. J. Fletcher, "Computation of particle transport in an electrostatic precipitator,"

Journal of Electrostatics, vol. 40–41, pp. 413–418, 1997.

[12] P. Intra, *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*. Bangkok: Chula Press, 2015, in press. (in Thai)

[13] W. C. Hinds, *Aerosol Technology*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1999.

[14] J. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 1995.

[15] H. J. White, *Industrial Electrostatic Precipitation*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1963.

[16] P. Intra and N. Tippayawong, "Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement," *Korean Institute of Electrical Engineers International Transactions on Electrophysics and Applications*, vol. 5–C, no. 5, pp. 196–203, 2005.

[17] E. Cunningham, "On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium," in *Proceeding of the Royal Society*, A-83, pp. 357–365, 1910.