

การวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคใน เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

Analytical Investigation of the Effect of Dielectric Constant of Materials on Particle Charging in an Electrostatic Precipitator

มงคล ไชยวงศ์ วิสูตร อาสนวิจิตร อาทิตย์ ยาอุทมิ พานิช อินตะ*
กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีการวัดและควบคุมอนุภาคแขวนลอย วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
จังหวัดเชียงใหม่ 50300 โทร 089-755-1985 E-mail: panich.intra@yahoo.com

Mongkol Chaiwong Visut Asanavijit Artit Yawootti Panich Intra*

Research Group of Aerosol Measurement and Control Technology, College of Integrated Science and Technology,
Rajamankala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300 Tel. 089-755-1985 E-mail: panich.intra@yahoo.com

บทคัดย่อ

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่กระจายของอนุภาคที่ใช้แรงทางไฟฟ้าสถิตเพื่อเคลื่อนย้ายอนุภาคออกจากกระแสการไหลของแก๊สไปยังขั้วตกตะกอน อนุภาคจะถูกอัดประจุไฟฟ้าโดยผ่านเข้าไปยังสนามโคโรนาดีสชาร์จซึ่งอยู่ภายในเครื่องตกตะกอน ซึ่งสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแรงที่ผลักให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ออกจากขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงไปยังขั้วตกตะกอน โดยค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการใส่ประจุไฟฟ้าของอนุภาค ซึ่งจะสอดคล้องกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ดังนั้นในการศึกษานี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต จะสมมุติให้อนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร (nm) ถึง 10 ไมโครเมตร (μm) จากผลการทำนายจำนวนประจุเฉลี่ยจากสมการของ White (1963) พบว่าผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของแต่ละวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีความแตกต่างเล็กน้อยมาก

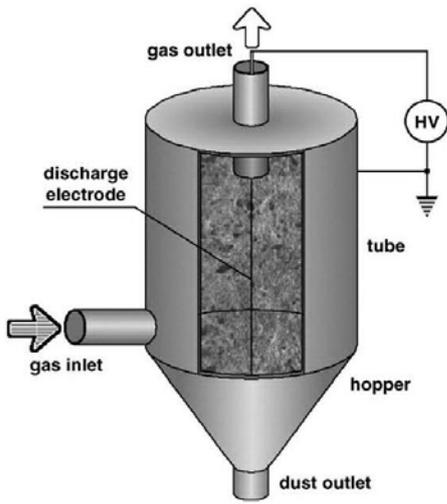
Abstract

An electrostatic precipitator (ESP) is a particle control device that uses electrostatic forces to move the particles out of the flowing gas stream and onto collector electrodes. The particles are given an electrical charge by forcing them to pass through a corona discharge field, a region in which gaseous ions flow. The electrical field that forces the charged particles to the walls comes from electrodes maintained at high voltage in the center of

the flow lane. Dielectric constant of materials on particle charging is important factors influencing collection efficiency of the ESP. In this study, we analytically investigated the dependence of unipolar charging of particles on the dielectric constant of the particle material. The examined particles (10 nm – 10 μm) cover a wide range of dielectric constant but have almost the spherical morphology. Prediction of mean charge per particle show very small differences among different materials. The level of the small difference is consistent with the estimation by White' equation (1963).

1. บทนำ

การกำจัดขยะ (waste management) เป็นปัญหาหนึ่งของหน่วยงานปกครองในชุมชน ชุมชนขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูงย่อมสามารถสร้างขยะได้อย่างมหาศาลในแต่ละวัน การเผาขยะด้วยเตาเผาเป็นวิธีการกำจัดขยะอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณขยะลงได้ ข้อดีของเตาเผาขยะคือ เหมาะกับสถานที่ที่มีพื้นที่จำกัด เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักและปริมาตรของขยะมูลฝอยได้มาก แต่การเผาขยะในปัจจุบันทำให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (particulate matter) สู่บรรยากาศ โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่า PM 10 เนื่องจาก PM 10 สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานาน จึงทำให้มีผลกระทบต่อทัศนวิสัย อากาศตามฤดูกาลและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ [1] จากรายงานทางการแพทย์พบว่า PM 10 มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ทำให้เกิดการทำให้เยื่อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรคหอบหืด [2]



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [4]

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการแพร่กระจาย PM 10 เหล่านี้ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) หรือ ESP เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้สำหรับการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร ออกจากการไหลของแก๊สโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า เพราะให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ [3] รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (collection electrode) [4] เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดิสชาร์จ โดยที่ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดิสชาร์จ ไอออน (ions) และอิเล็กตรอน (electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นละอองลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้ จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน โดยไอออนเกาะติดกับฝุ่นละอองลอยเหล่านั้นเป็นผลทำให้ฝุ่นละอองลอยได้รับประจุ และฝุ่นละอองลอยที่มีประจุ (charged particulate) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต หรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอน โดยฝุ่นละอองลอยที่ตกตะกอนบนขั้วตกตะกอนจะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอนด้วยค้อน เพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงไป [5]

การปรับปรุงประสิทธิภาพการตกตะกอน (collection efficiency) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรด ความเร็วของแก๊ส จำนวนประจุบนฝุ่นละอองลอย อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ พาณิช อินตะ และ ฌัววุฒิ ดุษฎี [6 - 8] ได้รายงานผลการวิจัยของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จ ความเร็วของแก๊ส และอุณหภูมิของแก๊สภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วของแก๊สสูงขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง

และผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแก๊สที่เพิ่มขึ้นในช่วง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลงเล็กน้อย แต่จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นมีอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเช่นกัน และยังไม่ได้ทำการศึกษาอย่างจริงจังในงานวิจัยที่ผ่านมา คือกระบวนการอัดประจุ (charging process) ให้กับฝุ่นละอองลอย ซึ่งโดยปกติแล้วการอัดประจุให้กับฝุ่นละอองจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (ion number concentration) เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ (charging time) และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ (dielectric constant of materials) โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนและเวลาที่ใช้ในการอัดประจุจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรด และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุจะขึ้นอยู่กับความเร็วของแก๊ส ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นอยู่แล้ว แต่ส่วนค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุจะขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองลอย

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอย โดยจะนำเสนอการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอยแต่ละชนิดในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยสมการของ White [5] จะสมมุติให้อนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า (electric field) มีความสำคัญในกระบวนการตกตะกอนเพราะสนามไฟฟ้ามีผลต่อการอัดประจุให้กับอนุภาคและแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่ได้รับประจุ สนามไฟฟ้าในเครื่องตกตะกอนเกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วอิเล็กโทรด และจากผลของประจุค้าง (space charge effect) ของไอออนและอนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในช่องระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในกรณีที่ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและลักษณะของรูปทรง (geometry) ของระบบเท่านั้น ในกรณีที่เป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันร่วม (concentric cylinder) เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสม่ำเสมอ (uniform field) กว่าแผ่นระนาบขนาน และมีการสูญเสียของสนามไฟฟ้าที่ขอบมุมมีค่าน้อยกว่าแบบแผ่นระนาบขนาน ดังนั้นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field strength) $E(r)$ ที่ระยะรัศมีใดๆ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss's law) คือ [9]

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_1/r_2)} \quad (1)$$

เมื่อ $E(r)$ คือความเข้มสนามไฟฟ้า r คือระยะรัศมี r_2 คือรัศมีของขั้วดิสชาร์จ r_1 คือระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน และ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จ

2.2 โคโรนาดีสชาร์จในแก๊ส

โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) เป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพราะเป็นกระบวนการที่

สร้างไอออนที่ทำให้อนุภาคได้รับประจุ ปกติแล้วจะแสดงในรูปของ คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (voltage-current characteristics) เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage) กระแสโคโรนา (corona current) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ เพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดจะสร้างประกายโคโรนา (sparkover corona) ดังนั้นเราจำเป็นต้องรู้สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเพื่อกำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset field strength) E_0 สามารถคำนวณได้จาก [10]

$$E_0 = E_s (\delta + A\sqrt{\delta/r_{SE}}) \quad (2)$$

$$\delta = \frac{T_r}{T} \frac{P}{P_r} \quad (3)$$

เมื่อ E_s คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (breakdown field) ในอากาศที่ สภาวะปกติ (3.126×10^6 โวลต์ต่อเมตร สำหรับความดันบรรยากาศ ที่ 20 องศาเซลเซียส) A คือค่าคงที่ ($0.0301 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วลบ และ $0.0266 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วบวก) δ คือความหนาแน่นของ อากาศที่ความดันบรรยากาศ T_r คืออุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะ มาตรฐาน T คืออุณหภูมิอากาศขณะทำงาน P_r คือความดัน บรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน และ P คือความดันบรรยากาศขณะ ทำงาน ถ้าเครื่องตกตะกอนเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแล้ว และไม่ คัดผลของประจุค้าง ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา V_0 สามารถ คำนวณได้จาก

$$V_0 = E_0 r_1 \ln(r_2/r_1) \quad (4)$$

และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (average current density) j (A/m^2) ที่พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ที่มีหน่วยเป็น กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโคโร นาติสซาร์จ สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$j = \frac{4\epsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^2 \ln(r_2/r_1)} \quad (5)$$

เมื่อ Z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน (ion electrical mobility) สำหรับโคโรนาขั้วลบมีค่าเท่ากับ 1.14×10^{-4} ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิททิวิตีของสุญญากาศ หรือที่ว่าง (free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัด ต่อเมตร โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในสมการที่ 5 ยังสามารถ เขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด ด้านนอก ได้คือ

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^2 \ln(r_2/r_1)} \quad (6)$$

แรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนา (corona onset voltage) ของโคโรนาขั้วลบที่ อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) มากกว่า 5×10^{-2} เมตร จะ

มีค่าเท่ากับ 15d กิโลโวลต์ เมื่อ d มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และถ้าเป็น โคโรนาขั้วบวกจะประมาณครึ่งหนึ่งของโคโรนาขั้วลบ ปกติแล้วขั้วลบนิยม นำไปใช้งานมากเพราะว่าแรงดันการเกิดโคโรนาที่สูงกว่าจะให้ช่วงของ แรงดันทำงานมากกว่า สำหรับการนำไปใช้งานภายในอาคารแล้ว จะ นิยมใช้โคโรนาขั้วบวกเพราะขั้วบวกจะสร้างไอออนต่ำกว่าขั้วลบ

2.3 กลไกการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

2.3.1 การอัดประจุโดยการแพร่

การอัดประจุโดยการแพร่ (diffusion charging) เป็นวิธีการอัด ประจุที่อนุภาคได้รับประจุจากการสัมผัสและเกาะติดของไอออนซึ่งเกิด จากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนที่ไม่มีกฎเกณฑ์ (Brownian random motion) เป็นวิธีการอัดประจุที่สำคัญกว่าวิธีการอื่นๆ ในกรณีของ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร การอัดประจุ โดยการแพร่จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าด้วย เพราะการ เคลื่อนไหวของไอออนย่อมขึ้นอยู่กับทั้งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตและแรงของ การแพร่กระจาย ดังนั้น จำนวนของประจุ $q(t)_{diff}$ ที่ได้รับจากการอัด ประจุแพร่กระจายในคาบเวลา t โดยอนุภาคของขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง d_p สามารถหาได้จากสมการของไวท์สแตงด์ได้โดย [11]

$$q_{diff} = n(t)_{diff} \times e \quad (7)$$

$$n(t)_{diff} = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right) \quad (8)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ของโบลท์ซมานน์ (Boltzmann's constant) มีค่า เท่ากับ 1.3806×10^{-23} จูลต่อเคลวิน e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่า เท่ากับ 1.61×10^{-19} คูโลมปี \bar{c}_i คือค่าความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากผลของ อุณหภูมิของไอออน (mean thermal speed of ion) มีค่าเท่ากับ 240 เมตรต่อวินาที K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูโลมปี มีค่าเท่ากับ 9.0×10^9 นิวตันตารางเมตรต่อคูโลมปี N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวน ของไอออนอิสระ (ions/ m^3) และ t คือเวลาในการอัดประจุ ใน การศึกษาเครื่องตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกัน รวม ดังนั้นผลคูณของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาที่ใช้ในการ อัดประจุจะสามารถหาได้จาก [12]

$$N_i t(r) = \frac{I}{2\pi r e Z_i E v} \quad (9)$$

เมื่อ Z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน และ v คือความเร็วของแก๊ส สามารถหาได้จาก

$$v = \frac{Q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (10)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของแก๊ส

2.3.2 การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า

การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า (field charging) นอกจาก กระบวนการใส่ประจุโดยการแพร่แล้ว อนุภาคยังได้รับประจุโดย

สนามไฟฟ้า อนุภาคที่รับประจุจะก่อให้เกิดการแปรโณมเฉพาะถิ่น (local deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาค ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นของสนามไฟฟ้าจะกระทบกับอนุภาค และถูกยึดจับโดยแรงของประจุจินตภาพ (image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จำนวนประจุบนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะถิ่นที่เกิดจากประจุบนอนุภาคก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิมจนเส้นเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป เมื่อสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้น ไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีก และจะไม่เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุบนอนุภาคอีก วิธีการอัดประจุแบบนี้มีชื่อเรียกว่า การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า (field charging) ซึ่งการอัดประจุวิธีนี้จะมีความสำคัญกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 ไมโครเมตร สำหรับการอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า ถ้าไม่สนใจผลของการอัดประจุแพร่กระจาย จำนวนประจุอนุภาค $q(t)_{field}$ ที่ได้รับในสนามไฟฟ้า E สามารถคำนวณได้จาก [11]

$$q_{field} = n(t)_{field} \times e \quad (11)$$

$$n(t)_{field} = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_e e} \right) \left(\frac{\pi K_e e Z_i N_i t}{1 + \pi K_e e Z_i N_i t} \right) \quad (12)$$

เมื่อ ϵ คือค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของอนุภาค

3. ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ผล

ในบทความวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายผลของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อจำนวนประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอยสำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน โดยใช้สมการของ White [5] โดยสมมติและกำหนดชนิดของฝุ่นละอองลอยจะใช้ในการศึกษานี้จำนวน 5 ชนิด คือ Thallium Chloride, Dimethyl Phthalate, Sodium Chloride, Carbon Black, และ Heavy Oils ซึ่งมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุอยู่ในช่วง 46.9 ถึง 2.5 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ในการวิเคราะห์นี้จะสมมติให้คุณสมบัติของแก๊สร้อนมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอากาศคือความหนาแน่น (density) เท่ากับ 1.1614 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืดเท่ากับ 1.846×10^{-5} ตารางเมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และสมมติให้รูปร่างของความเร็วของของไหลสม่ำเสมอ (uniform velocity profile) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุลบ ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์ผลนี้จะใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณซึ่งไดอะแกรมลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยอันดับแรกจะต้องกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าของเครื่องตกตะกอนคือ ความเร็วในการไหลของแก๊ส ความดันและอุณหภูมิขณะทำงาน จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขภายในเครื่องตกตะกอนคือ ขนาดเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดและสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาด้วยสมการที่ 2 ถึง 4 และทำการคำนวณค่ากระแสโคโรนาจากสมการที่ 6 พร้อมกับกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีดีของสูญญากาศของอากาศภายในเครื่องตกตะกอนและผลคูณของเวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับความเข้มข้น

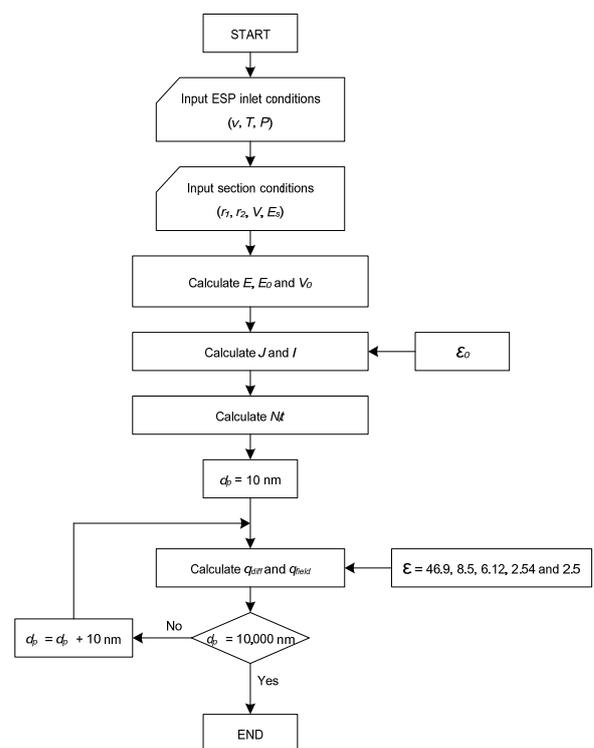
จำนวนของไอออนต่อจากนั้นกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเริ่มต้นที่ 10 นาโนเมตร และคำนวณหาการอัดประจุของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ 7 ถึง 10 จากนั้นก็ทำการคำนวณซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าคงตัวของอนุภาคเป็นอนุภาคชนิดอื่นค่า หลังจากนั้นก็เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร ไปจนถึงขนาด 10,000 นาโนเมตร หรือ 10 ไมโครเมตร และคำนวณซ้ำจนครบ

ตารางที่ 1 ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

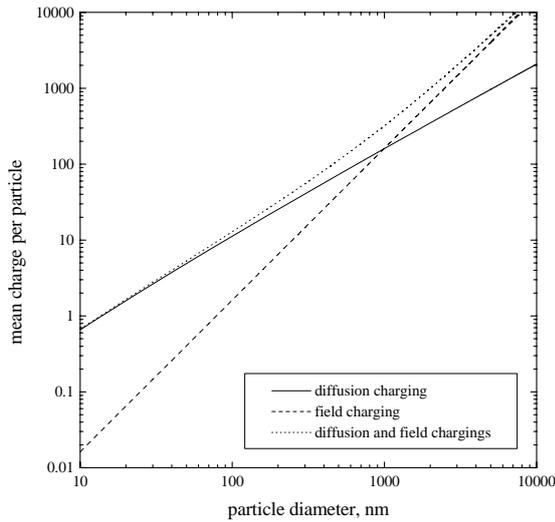
ชนิดของวัสดุ	ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก
Thallium Chloride	46.9
Dimethyl Phthalate	8.5
Sodium Chloride	6.12
Carbon Black	3
Heavy Oils	2.5

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

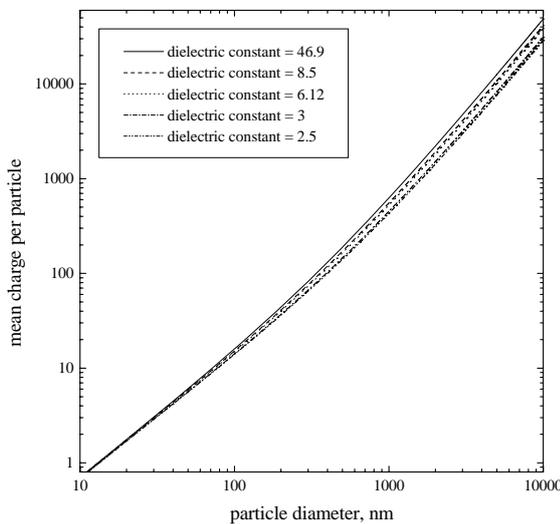
ตัวแปร	ช่วงในการวิเคราะห์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วดิสชาร์จ	2 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน	23.4 มิลลิเมตร
ความยาวของขั้วตกตะกอน	400 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นละอองลอย	10 nm ถึง 10 μ m
แรงดันไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ศักย์ไฟฟ้า	บวก
อุณหภูมิแก๊ส	400 องศาเซลเซียส
ความดัน	1 บาร์
ความเร็วของแก๊ส	3.4 เมตรต่อวินาที



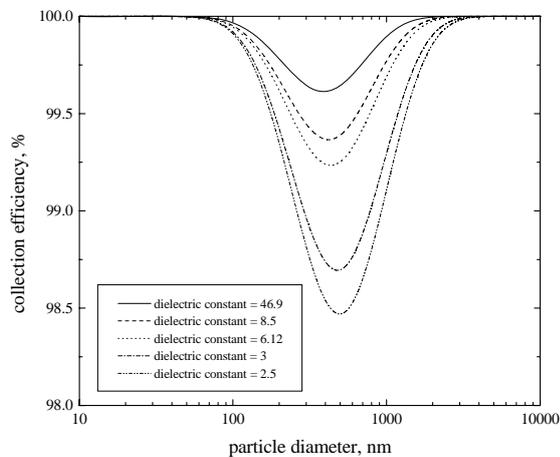
รูปที่ 2 ไดอะแกรมลำดับขั้นการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3 จำนวนประจุเฉลี่ยของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค



รูปที่ 4 จำนวนประจุรวมของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

4. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประจุของอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของการอัดประจุแบบแพร่กระจายสนาม และผลสม ที่ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1 โดยพิจารณาอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร จากรูปแสดงให้เห็นว่าจำนวนประจุของการให้ประจุแบบแพร่กระจายและสนามเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยค่าจำนวนประจุที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10,000 ประจุ โดยประจุที่ได้รับจะเป็นสัดส่วนกับฟังก์ชันแบบเส้นตรง สำหรับการให้ประจุแบบแพร่กระจาย และฟังก์ชันกำลังสอง สำหรับการให้ประจุแบบสนาม โดยจำนวนประจุของอนุภาคทั้งการแพร่กระจายและสนามจะมีค่าเท่ากันที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตร จากสมการการอัดประจุแบบแพร่กระจาย (สมการที่ 8) จะเห็นว่าค่าจำนวนประจุแบบแพร่กระจายจะเป็นอิสระโดยไม่มีขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ ดังนั้นค่าจำนวนประจุทั้งการแพร่กระจายและสนามจะต้องนำมาบวกรวมกัน

ผลการวิเคราะห์จำนวนประจุรวมของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุตามตารางที่ 1 แสดงไว้รูปที่ 4 จากรูปจะพบว่าจำนวนประจุของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยค่าจำนวนประจุของอนุภาคจะมีค่าลดลงเมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าน้อยจะมีผลต่อจำนวนประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร

สำหรับประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาค η ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch คือ [1]

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi r_2 L Z_p}{Q}\right) \quad (13)$$

เมื่อ Z_p คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$Z_p = \frac{qC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (14)$$

เมื่อ C_c คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม และ μ คือความหนืดของแก๊สรูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกจากรูปจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 98 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าลดลง เมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประจุไฟฟ้าของอนุภาคในรูปที่ 4 และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอน ๆ สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 90 นาโนเมตร ถึง 4 ไมโครเมตร ซึ่งหมายความว่าค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอน ๆ ลดลงในช่วงขนาดดังกล่าว

5. สรุป

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายผลโดยใช้สมการของ White [5] ได้สมมุติและกำหนดชนิดของฝุ่นละอองลอยจะใช้ในการศึกษานี้จำนวน 5 ชนิด คือ Thallium Chloride, Dimethyl Phthalate, Sodium Chloride, Carbon Black, และ Heavy Oils ซึ่งมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุอยู่ในช่วง 46.9 ถึง 2.5 จากการวิเคราะห์พบว่าจำนวนประจุของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยค่าจำนวนประจุของอนุภาคจะมีค่าลดลงเมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุลดลง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะเป็นประโยชน์กับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่ต้องการกำจัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาท้องถิ่น ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ (รหัสโครงการ MT-RD-2553-02)

เอกสารอ้างอิง

1. Hinds, W.C., 1999, "Aerosol technology" John Wiley and Sons, New York, USA.
2. อุษณีย์ วิณิชเขตคานวณ ธีระ ชีโวรินทร์ และณรงค์พันธ์ จุฑารัตน์, 2550, "การทำลายดีเอ็นเอของเซลล์ถูกปล่อยจากการออกซิไดส์ด้วยสารสกัดจากฝุ่นขนาดเล็ก PM 2.5 และ PM 10 ในอากาศเชียงใหม่และลำพูน", รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
3. พานิช อินต๊ะ ประวิทย์ ลีเหมือดภัย และ นคร ทิพย์วงศ์, "ทฤษฎีและการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล", การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, พิษณุโลก, 29 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2552.

4. Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T., "Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning A brief review", Journal of Electrostatics, Vol. 65, pp.133-155, 2006.
5. White, H.J., 1963, "Industrial electrostatic precipitation", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
6. พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, "คุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวมวลสำหรับการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล", วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 29 - 39, 2550.
7. พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, "ศักยภาพการดักจับอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต", การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 6, เชียงใหม่, 15-16 มีนาคม 2550.
8. พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, "การทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, ชลบุรี, 17 - 19 ตุลาคม 2550.
9. Parker, K.R., 1997, "Applied electrostatic precipitation" Blackie Academic and Professional, New York, USA.
10. Chang, J., Kelly, A.J., and Crowley, J.M., 1995, "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
11. Intra, P. and Tippayawong, N., "Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review", Journal of Electrostatics, Vol. 67, No.4, pp. 605 - 615, 2009.
12. Intra, P. and Tippayawong, N., "Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement", KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications, Vol. 5-C, No. 5, pp. 196 - 203, 2005.