

ผลของอุณหภูมิแก๊ส และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อประสิทธิภาพ
การตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต
แบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

**Effects of Gas Temperature and Materials Dielectric Constant on
Collection Efficiency of the Tubular - Type Electrostatic Precipitator**

วิสูตร อาสนวิจิตร* และ พานิช อินตะ

Visut Asanavijit* and Panich Intra

บทคัดย่อ

อุณหภูมิแก๊สและค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เนื่องจากมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการอัดประจุของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอน ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ และอุณหภูมิ ต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม (ESP) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้า ค่าเฉลี่ยจำนวนอัดประจุของอนุภาค และประสิทธิภาพการตกตะกอน โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 46.9 อุณหภูมิในการทำงานระหว่าง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร แรงดันโคโรนา 20 กิโลโวลต์ ความเร็วของแก๊ส 3.4 เมตรต่อวินาที และความชื้นในการทดสอบ 10 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคโดยรวม 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการลดอนุภาคภายในแก๊สจากระบบการเผาไหม้ชีวมวลขนาดเล็กต่อไปได้

คำสำคัญ: อนุภาคฝุ่น, ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก, สนามไฟฟ้า, การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, เตาเผา

ABSTRACT

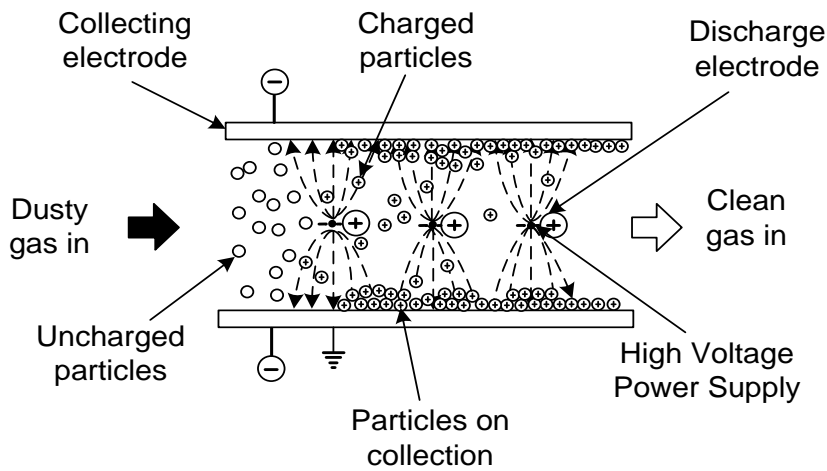
Gas temperature and dielectric constant of materials are the important parameters for collection efficiency of an electrostatic precipitator (ESP) due to its influences on particle charging efficiency inside the ESP. In this paper, effects of temperature and materials dielectric constant on the charging and collection efficiency of the tubular-type electrostatic precipitator (ESP) were analytically investigated. The current to voltage characteristic, mean charge per particle and collection efficiency were analyzed by mathematic model for the materials dielectric constant of 2.5 - 46.9, the operating temperature between 250 and 750 °C, the particle size range of 10 nm - 10 um, the applied corona voltage of 20 kV, the flow velocity of 3.4 m/s, and the humidity of 10%. It was found that higher dielectric constant of particle results in higher collection efficiency of the ESP. Also, an increase in the operating temperature results in increasing the ESP collection efficiency. It was shown that about 95% of overall collection efficiency can be achieved with a relative simple multiple tubular electrostatic precipitator design. The device appeared to be a promising tool for reducing particulate matter in flue gas from a small biomass combustion system.

Key words: particulate matter, dielectric constant, electric field, electrostatic precipitation, furnace

บทนำ

รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2559 พบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นของประเทศไทย 27.06 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นอัตราการเกิดขยะมูลฝอยที่ 1.14 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน และอัตราการเกิดขยะมูลฝอยชุมชนเฉลี่ยขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เทศบาลนคร เทศบาลเมือง เทศบาลตำบล และองค์การบริหารส่วนตำบล 1.89, 1.15, 1.02 และ 0.91 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน ตามลำดับ (ส่วนขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูล สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย, 2560) การกำจัดขยะ (Waste Management) เป็นปัญหาหนึ่งของหน่วยงานปกครองในชุมชน โดยชุมชนขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูงย่อมสามารถสร้างขยะได้อย่างมหาศาลในแต่ละวัน การเผาขยะด้วยเตาเผาเป็นวิธีการกำจัดขยะอีกวิธีหนึ่งซึ่งช่วยลดปริมาณขยะลงได้ ข้อดีของเตาเผาขยะคือ เหมาะกับสถานที่ที่มีพื้นที่จำกัด

เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักและปริมาตรของขยะมูลฝอยได้มาก แต่การเผาขยะในปัจจุบันทำให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก (Particulate Matter) ฝุ่นบรรยากาศ โดยฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่า PM 10 เนื่องจาก PM 10 สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานาน จึงทำให้มีผลกระทบต่อทัศนวิสัย อากาศตามฤดูกาลและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ (Hinds, 1999) จากรายงานทางการแพทย์พบว่า PM 10 มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ทำให้เกิดการทำลายเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรคหอบหืด (อุษณีย์ และคณะ, 2550) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการแพร่กระจายฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก PM 10 เหล่านี้เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรือ ESP เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นิยม



ภาพที่ 1 หลักการทำงานเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrical4u, 2018)

นำมาใช้สำหรับการกำจัดฝุ่นละอองลอยขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร ออกจากการไหลของแก๊สโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ (พานิช, 2558) ภาพที่ 1 ได้แสดงหลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ขั้วดิสชาร์จ (Discharge Electrode) และขั้วตกตะกอน (Collection Electrode) (Jaworek *et al.*, 2006) 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 โดยฝุ่นละอองลอยที่บนขั้วตกตะกอน

จะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอน โดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอนด้วยค้อนเพื่อให้หลุด (White, 1963)

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการพัฒนาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตหลากหลายเทคนิควิธี ดังนี้ พานิช และ ฉวีวุฒิ (2550ก) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกวางซ้อนกันสำหรับควบคุมอนุภาคแขวนลอยที่ปล่อยออกจากเตาเผาขนาดเล็กเพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มีการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงให้กับเส้นลวดดิสชาร์จในช่วง 1 ถึง 100 กิโลโวลต์ จากผลการศึกษาพบว่ามีประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมสูงถึง 99.34 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 1 ไมโครเมตร และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร เหลือ 47.08 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดัน 100 กิโลโวลต์ วัชร และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมฝุ่นแป้งของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบชนิดขั้วเดี่ยว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมควันและฝุ่นแป้ง โดยการทดลองแบ่งเป็น ส่วนที่ 1 การหาประสิทธิภาพของการเก็บรวบรวมควันและฝุ่นแป้งจะใช้กระดาษกรองอากาศก่อนผ่านและหลังผ่านเครื่องตกตะกอน พบว่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมควัน

และฝุ่นแป้งจะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงเวลาเริ่มแรก และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมลดลง เนื่องจากการเกาะของควันและฝุ่นแป้ง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคเฉลี่ย สำหรับฝุ่นแป้งมีค่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ และ 35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับควัน ส่วนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น และแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ พบว่าแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง Tekasakul *et al.* (2006) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดกับท่อทรงกระบอก (Wire-Cylinder Type) สำหรับควบคุมควันจากการเผาไหม้ชีวมวลสำหรับกระบวนการอบแห้งยางแผ่น ในการศึกษาได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมด้วยอนุภาคแบบ Polystyrene Latex ในห้องปฏิบัติการ 10 ชั่วโมง พบว่าเครื่องตกตะกอนที่ได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคสูงกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ชญาศักดิ์ และคณะ (2551) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดกับแผ่นราบสำหรับควบคุมควันจากการเผาไหม้ไม้พินที่มีขนาดมิติ $0.5 \times 1 \times 0.5$ เมตร³ จำนวนแผ่นราบ 10 แผ่น จำนวนเส้นลวด 12 เส้น ต่อ 1 แถว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 1 มิลลิเมตร จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 12 กิโลโวลต์ จากการทดสอบเก็บรวบรวมด้วยอนุภาคพบว่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมเฉลี่ยได้ 58.43 เปอร์เซ็นต์ อาทิตย์ และคณะ (2554) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับควบคุมอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นแบบเส้นลวดกับแผ่นราบซ้อนกันหลายชั้น (Multi-Wire-to-Plate) ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 20 กิโลโวลต์ มีกระแสไฟฟ้าขนาด 280 ไมโครแอมป์ จ่ายให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด ได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวมอนุภาค

และเวลาการทำงานในช่วง 0 ถึง 60 นาที พบว่าค่าประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมอนุภาคมีค่า 87.61, 80.42 และ 72.06 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวมอนุภาคเฉลี่ย 80.03 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการทำงานของเตาเผาขยะจะทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 200 ถึง 800 องศาเซลเซียส และจะมีลักษณะการเผาไหม้ของขยะหลากหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีค่าคงตัวของไดออกไซด์ทริกของวัสดุที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ใช้งานกับเตาเผาขยะได้ การปรับปรุงประสิทธิภาพการตกตะกอน (Collection Efficiency) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับเตาเผาขยะเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณา ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรด ความเร็วของแก๊ส จำนวนประจุบนฝุ่นละอองลอย อนุภูมิ และความดันบรรยากาศ (พานิช และ ณัฐวุฒิ, 2550ข) ได้รายงานผลการวิจัยของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วดิสชาร์จ ความเร็วของแก๊ส และอนุภูมิของแก๊สภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าความเข้มข้นสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วของแก๊สสูงขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง และผลของการเปลี่ยนแปลงอนุภูมิของแก๊สที่เพิ่มขึ้นในช่วง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลงเล็กน้อย แต่จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นมีอีกปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเช่นกัน และยังไม่ได้ทำการศึกษาอย่างเป็นกระบวนการ ในงานวิจัยที่ผ่านมา คือ กระบวนการอัดประจุ (Charging Process)

ให้กับฝุ่นละอองลอย ซึ่งโดยปกติแล้วการอัดประจุให้กับฝุ่นละอองจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion Number Concentration) เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ (Charging Time) และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ (Dielectric Constant of Materials) โดยค่าความเข้มข้นของไอออนและเวลาที่ใช้ในการอัดประจุจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรด และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุจะขึ้นอยู่กับความเร็วของแก๊ส ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้ว แต่ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุจะขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองลอย (มงคล และคณะ, 2553) ได้รายงานผลการวิจัยการวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตพบว่า ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของแต่ละวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีความแตกต่างเล็กน้อยมาก แต่ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งการทำงานจริงของเตาเผาจะมีพฤติกรรมอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนอนุภาคที่จะต้องทำการศึกษา

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอย โดยจะนำเสนอการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอยแต่ละชนิดในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจำนวน 7 ชนิด ด้วยสมการของ (White, 1963) และสมมติให้อนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิให้มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ค่ากระแส โคโรนาดีสชาร์จ และวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพในการตกตะกอนของ

อนุภาคแต่ละชนิด ซึ่งข้อมูลที่ได้อาจการวิเคราะห์นี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่ต้องการกำจัด จากกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดอนุภาคควันได้มากขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการดำเนินงานพื้นฐานของชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตคือ เป็นวิธีการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองออกจากการไหลของแก๊ส โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วชุดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดีสชาร์จและให้ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดีสชาร์จที่ไอออนและอิเล็กตรอนอิสระจะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาโดยจะมีสนามไฟฟ้าโคโรนาดีสชาร์จในก๊าซ กลไกการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค ซึ่งเป็นปัจจัยที่กำหนดสมรรถนะของตัวตกตะกอน และจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาคโดยตรง โดยจะได้กล่าวในหัวข้อดังต่อไปนี้

1. สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า (Electric Field) มีความสำคัญในกระบวนการตกตะกอนเพราะสนามไฟฟ้ามีผลต่อการอัดประจุให้กับอนุภาคและแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่ได้รับประจุ สนามไฟฟ้าในเครื่องตกตะกอนเกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วอิเล็กโทรด และจากผลของประจุค้าง (Space Charge Effect) ของไอออนและอนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในช่องระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ในกรณีที่ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและลักษณะของรูปทรง (Geometry) ของระบบเท่านั้น ในกรณีที่เป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันร่วม (Concentric Cylinder) เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสม่ำเสมอ (Uniform Field) กว่าแผ่นระนาบขนาน

และมีการสูญเสียของสนามไฟฟ้าที่ขอบมมมีค่าน้อยกว่าแบบแผ่นระนาบขนาน ดังนั้นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) $E(r)$ ที่ระยะรัศมีใดๆ สามารถคำนวณหาค่าได้โดยอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss's Law) คือ (Parker, 1997)

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

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

2. โครนาดิสชาร์จในก๊าซ

โครนาดิสชาร์จในก๊าซ เป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพราะเป็นกระบวนการที่สร้างไอออนที่ทำให้อนุภาคได้รับประจุ ปกติแล้วจะแสดงในรูปของคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (Voltage-Current Characteristics) เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด โครนา (Corona Onset Voltage) กระแส โครนา (Corona Current) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดจะสร้างประกายโครนา (Spark Over Corona) ดังนั้น เราจำเป็นต้องรู้สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องตักตะกอนให้มีความสามารถในการกำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด โครนา (Corona Onset Field Strength) E_0 นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการของ (Chang *et al.*, 1995)

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

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

เมื่อ E_s คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown Field) ในอากาศที่สภาวะปกติ (3.126×10^6 โวลต์ต่อเมตร

สำหรับความดันบรรยากาศ ที่ 20 องศาเซลเซียส) A คือค่าคงที่ ($0.0301 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโครนาขั้วลบ และ $0.0266 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโครนาขั้วบวก) δ คือความหนาแน่นของอากาศที่ความดันบรรยากาศ T_r คืออุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน T คืออุณหภูมิอากาศขณะทำงาน P_r คือความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน และ P คือความดันบรรยากาศขณะทำงาน ถ้าเครื่องตักตะกอนเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน และไม่คิดผลของประจุค้าง ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโครนา V_0 สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ $f(H)$ คือ ฟังก์ชันแก้สำหรับความชื้นอากาศ H คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นอากาศ ซึ่งฟังก์ชันแก้สำหรับความชื้นอากาศสามารถหาได้จากสมการ (Yawootti *et al.*, 2015) ดังนี้

$$f(H) = 1 + \left(5.76 - \frac{1.63}{0.69\sqrt{\delta r} + 0.21} \right) \cdot \frac{P_w}{P} \cdot H \quad (5)$$

เมื่อ P_w คือ ความดันบางส่วนของไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (Yawootti *et al.*, 2015) ดังนี้

$$P_w = 6.11 \times 10^{7.5T/(237.3+T)} \quad (6)$$

จากนั้นนำสมการที่ (5) รวมกับสมการที่ (4) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโครนาที่รวมผลความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (Yawootti *et al.*, 2015)

$$V_0 = m_v E_0 \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} r \ln \left(\frac{S}{r} \right) \left[1 + \left(5.76 - \frac{1.63}{0.69\sqrt{\delta r} + 0.21} \right) \cdot \frac{P_w}{P} \cdot \frac{H}{100} \right] \right) \quad (7)$$

และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Current Density) j (A/m^2) ที่พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ที่มีหน่วยเป็นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโครนาดิสชาร์จ คำนวณได้จาก (Parker, 1997)

$$j = \frac{4\varepsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^3 \ln(r_2 / r_1)} \quad (8)$$

เมื่อ Z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนของไอออน (Ion Electrical Mobility) สำหรับโคโรนาบวมมีค่าเท่ากับ 1.14×10^{-4} ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที และ ε_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-Space Permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (8) ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกได้จากสมการ (พานิช และ ณัฐวุฒิ, 2550ก)

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^2 \ln(r_2 / r_1)} \quad (9)$$

แรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนา (Corona Onset Voltage) ของโคโรนาขั้วลบที่อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) มากกว่า 5×10^{-2} เมตร จะมีค่าเท่ากับ 15d กิโลโวลต์ เมื่อ d มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และถ้าเป็นโคโรนาขั้วบวกจะประมาณครึ่งหนึ่งของโคโรนาลบ ปกติแล้วขั้วลบนิยมนำไปใช้งานมากเพราะว่าแรงดันการเกิดโคโรนาที่สูงกว่าจะให้ช่วงของแรงดันทำงานมากกว่า สำหรับการนำไปใช้งานภายในอาคารจะนิยมใช้โคโรนาขั้วบวกเพราะขั้วบวกจะสร้างโอโซนต่ำกว่าขั้วลบ

3. การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า (Field Charging) นอกจากกระบวนการใส่ประจุโดยการแพร่แล้วอนุภาคยังได้รับประจุโดยสนามไฟฟ้า อนุภาคที่รับประจุจะก่อให้เกิดการแปรโอมเฉพาะถิ่น (Local Deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาค ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นของสนามไฟฟ้าจะกระทบกับอนุภาค และถูกยึดจับโดยแรงของประจุจินตภาพ (Image Charge Force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับ

อนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จำนวนประจุบนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะที่เกิดจากประจุบนอนุภาคก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิมจนเส้นเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป เมื่อสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้น ไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีก และจะไม่เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุบนอนุภาคอีก วิธีการอัดประจุแบบนี้มีชื่อเรียกว่า การอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า ซึ่งการอัดประจุวิธีนี้จะมี ความสำคัญกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร สำหรับการอัดประจุโดยสนามไฟฟ้า ถ้าไม่สนใจผลของการอัดประจุแพร่กระจาย จำนวนประจุอนุภาค $q(t)_{field}$ ที่ได้รับในสนามไฟฟ้า E คำนวณได้จาก (Intra and Tippayawong, 2009)

$$q_{field} = n(t)_{field} \times e \quad (10)$$

$$n(t)_{field} = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_e e} \right) \left(\frac{\pi K_e e Z_i N_i t}{1 + \pi K_e e Z_i N_i t} \right) \quad (11)$$

เมื่อ ε คือค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} คูลอมป์ K_e คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ มีค่าเท่ากับ 9.0×10^9 นิวตันตารางเมตรต่อคูลอมป์ N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนอิสระ (ions/m³) และ t คือเวลาในการอัดประจุ ในการศึกษานี้เครื่องตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันรวม ดังนั้นผลคูณของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุจะสามารถหาได้จาก (Intra and Tippayawong, 2005)

$$N_i t(r) = \frac{I}{2\pi r e Z_i E v} \quad (12)$$

เมื่อ z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน และ v คือความเร็วของแก๊ส สามารถหาได้จากสมการดังนี้ (พานิช และ ณัฐวุฒิ, 2550ข)

$$v = \frac{Q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (13)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของแก๊ส

4. ประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค

สำหรับประสิทธิภาพในการตกตะกอนของอนุภาค ภายในตัวตกตะกอน η ที่ได้ทำการศึกษานี้สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Hinds, 1999)

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-2\pi r_2 LZ_p}{Q}\right) \quad (14)$$

เมื่อ z_p คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$Z_p = \frac{qC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (15)$$

เมื่อ C_c คือตัวชดเชยของคันทันนิ่งแฮม และ μ คือความหนืดของแก๊สภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตทดสอบ

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทความวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายผลของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อจำนวนประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองลอยสำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกัน โดยใช้สมการ (White, 1963) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

ได้กำหนดขนาดของโครงสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ดังแสดงในภาพที่ 2 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จ 2 มิลลิเมตร ระยะห่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน 23.4 มิลลิเมตร

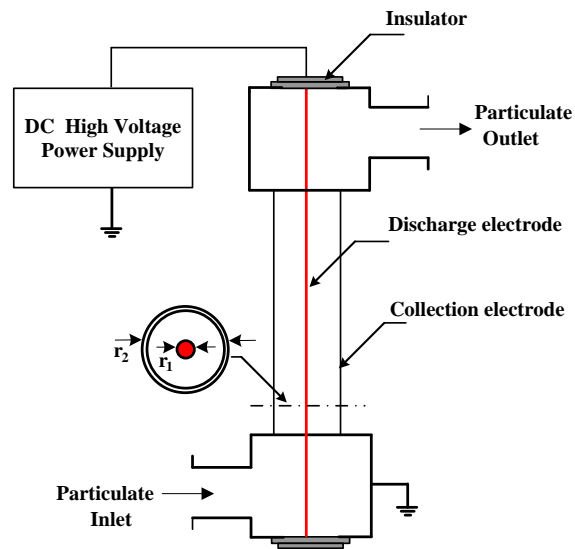
ความยาวของขั้วตกตะกอน 400 มิลลิเมตร มีลูกถ้วยไฟฟ้า (Insulator) ทำหน้าที่เป็นฉนวนในการแยกระหว่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอนทั้งด้านบนและล่างของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 20 กิโลโวลต์ ใช้ศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวก จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดทดสอบกับฝุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแก๊ส 250, 500 และ 750 องศาเซลเซียส มีความเร็วของแก๊ส 3.4 เมตรต่อวินาที ความดันภายในท่อ 1 บาร์ และความชื้นทดสอบ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1

2. การกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ

โดยสมมติและกำหนดชนิดของฝุ่นละอองลอย จะใช้ในการศึกษานี้จำนวน 7 ชนิด คือ Heavy Oils, Carbon Black, Sodium Chloride, Dimethyl Phthalate, Glass, Germanium และ Thallium Chloride ซึ่งมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 46.9 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และสมมติให้รูปร่างของความเร็วของของไหลสม่ำเสมอ (Uniform Velocity Profile) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุบวก ดังแสดงในตารางที่ 2

3. การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคำนวณ

ในการวิเคราะห์ผลนี้จะใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ ซึ่งไดอะแกรมลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3 โดยอันดับแรกจะต้องกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าของเครื่องตกตะกอนคือ ความเร็วในการไหลของแก๊ส ความดันและอุณหภูมิขณะทำงาน จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขภายในเครื่องตกตะกอนคือ ขนาดเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด



ภาพที่ 2 โครงสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

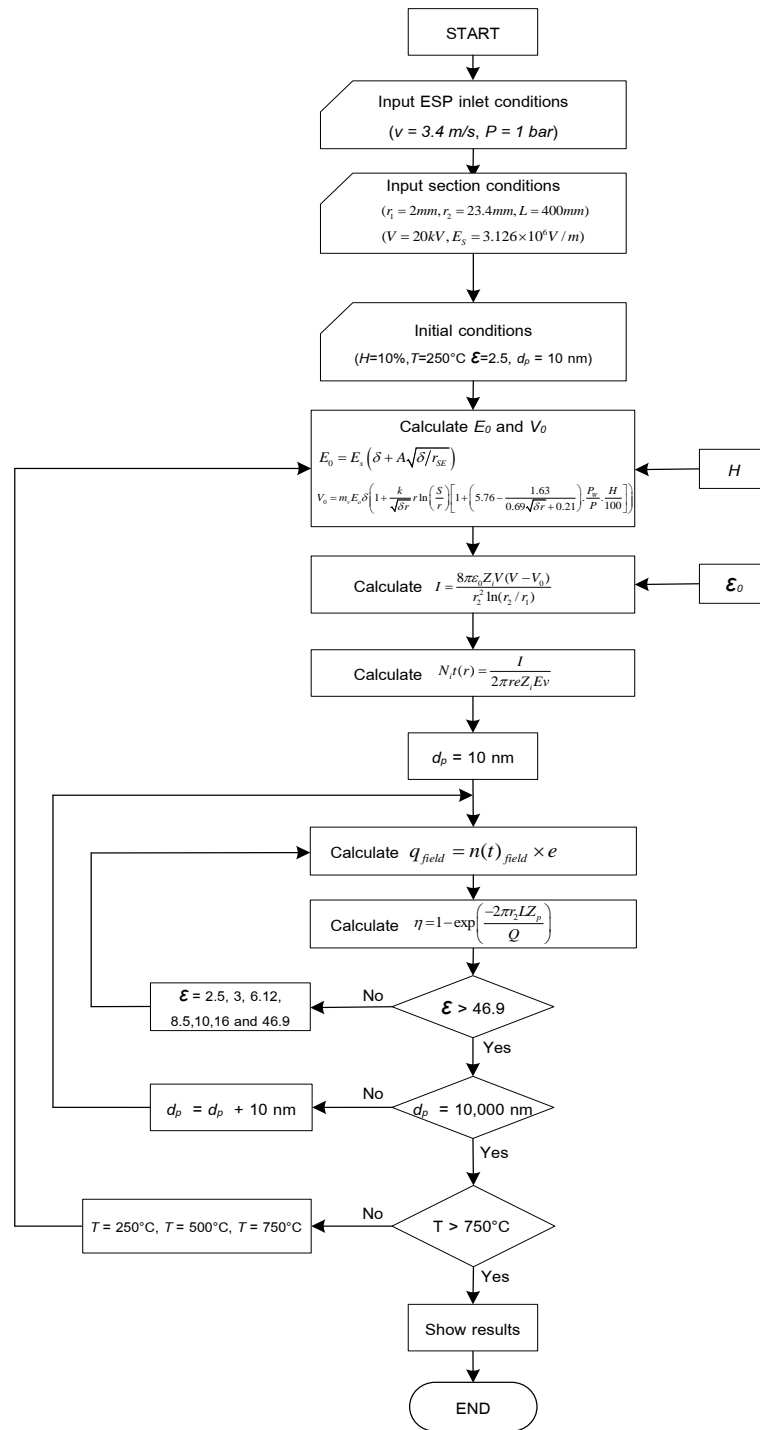
ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดิสชาร์จ	2 มิลลิเมตร
ระยะห่างขั้วดิสชาร์จกับขั้วตกตะกอน	23.4 มิลลิเมตร
ความยาวของขั้วตกตะกอน	400 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่น	10 nm ถึง 10 μ m
แรงดันไฟฟ้า	20 กิโลโวลต์
ศักย์ไฟฟ้า	บวก
อุณหภูมิแก๊ส	250, 500, 750 องศาเซลเซียส
ความดันภายในท่อ	1 บาร์
ความเร็วของแก๊ส	3.4 เมตรต่อวินาที
ความชื้นในการทดสอบ	10 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ (HyperPhysics, 2016; มงคล และคณะ, 2553)

ชนิดของวัสดุ	คงตัวของไดอิเล็กทริก
Heavy Oils	2.5
Carbon Black	3.0
Sodium Chloride	6.12
Dimethyl Phthalate	8.5
Glass	10
Germanium	16
Thallium Chloride	46.9

และสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาด้วยสมการที่ (2) ถึง (7) และทำการคำนวณค่ากระแสโคโรนาจากสมการที่ (9) พร้อมกับกำหนดค่าความชื้นในการทดสอบสำหรับกรณีวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสูญญากาศของอากาศภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร และผลคูณของเวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับความเข้มข้นจำนวนของไอออน ต่อจากนั้นกำหนดการเปลี่ยนค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ทั้ง 7 ชนิด โดยเริ่มจากไดอิเล็กทริกของวัสดุค่าน้อยไปหาค่าที่มากกว่าค่า 2.5 ถึง 46.9 และจากนั้นกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของอนุภาคเริ่มต้นที่ 10 นาโนเมตร และคำนวณหาค่าการอัดประจุของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ (10) ถึง (15) จากนั้นทำการคำนวณซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าคงตัวของการเป็นฉนวนของอนุภาคจนครบทุกค่า หลังจากนั้นจะเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10,000 นาโนเมตร หรือ 10 ไมโครเมตร และคำนวณซ้ำจนครบ โดยการทำงานของโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการตรวจเช็คเงื่อนไขค่าตัวแปรทั้ง 3 ค่าที่เป็นปัจจัยในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3 โค้ดโปรแกรมลำดับขั้นการวิเคราะห์ผล

คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุทั้ง 7 ค่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเปลี่ยนค่าจนครบ 10,000 นาโนเมตร และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้ง 3 ค่า ถูกต้องตามเงื่อนไข เมื่อทำงานจนครบแล้ว จะนำค่าที่

ได้ออกมาแสดงผลในการทำนายของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในรูปของค่าตัวเลขและกราฟ

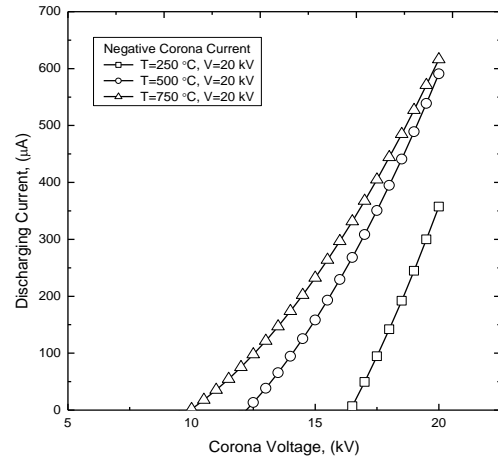
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้า

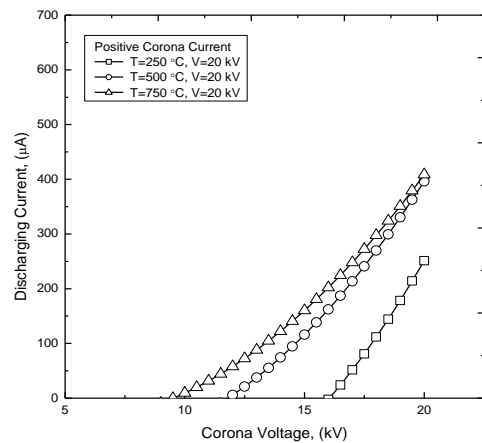
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 20 กิโลโวลต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเท่ากับ 250, 500 และ 750 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์แสดงไว้ดังภาพที่ 4 พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากระแสดิสชาร์จโคโรนาจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 38 ถึง 620 ไมโครแอมป์ และค่ากระแสดิสชาร์จโคโรนาบวกจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 24 ถึง 408 ไมโครแอมป์ โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาดิสชาร์จสำหรับโคโรนาลบตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ 250, 500 และ 750 องศาเซลเซียส จะเริ่มต้นที่ประมาณ 16.5, 12.5 และ 10 กิโลโวลต์ และแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาดิสชาร์จสำหรับโคโรนาบวก จะเริ่มต้นที่ประมาณ 16.5, 12.8 และ 10.2 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาดิสชาร์จได้เร็วขึ้นและให้ค่ากระแสดิสชาร์จโคโรนาสูงขึ้นตาม สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ (Fadhil, 2017) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่ากระแสดิสชาร์จโคโรนาลบและบวก จะพบว่าโคโรนาลบจะให้ค่าสูงกว่าถึง 212 ไมโครแอมป์ (620-408 ไมโครแอมป์)

2 จำนวนประจุรวมของอนุภาค

ผลการวิเคราะห์จำนวนประจุรวมของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุตามตารางที่ 1 และเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 5 พบว่าจำนวนประจุของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยค่าจำนวนประจุของอนุภาคจะมีค่าลดลงเมื่อ



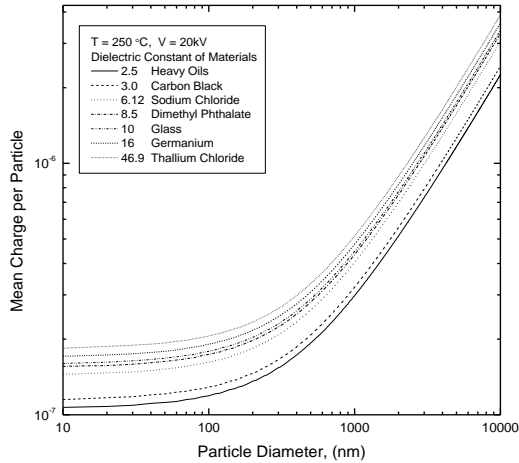
(ก) โคโรนาลบ



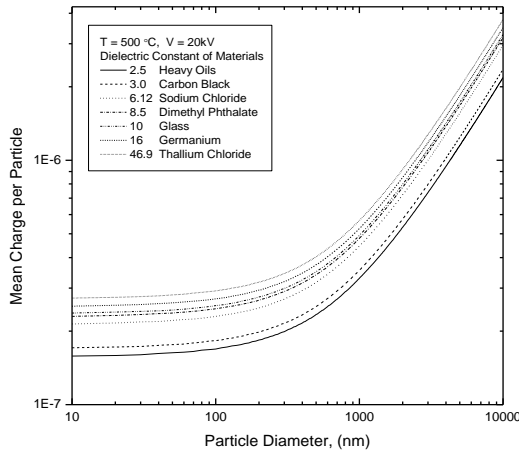
(ข) โคโรนาบวก

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

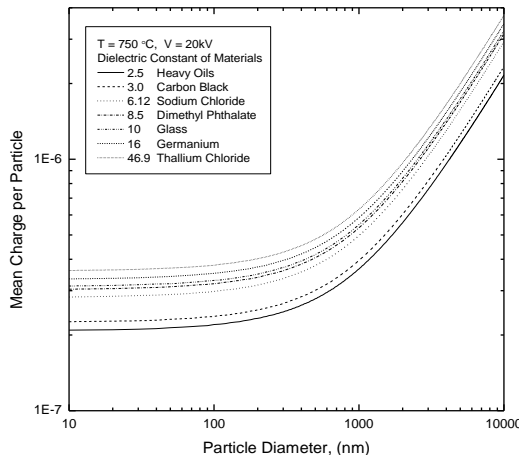
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุลดลง ซึ่งหมายความว่า ถ้าค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าน้อย จะมีผลต่อการอัดประจุไฟฟ้า จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ดังภาพที่ 5(ก) อุณหภูมิทดสอบ 250 องศาเซลเซียส พิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 1000 นาโนเมตร ของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่ำสุด Heavy Oils เท่ากับ 2.5 และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุสูงสุด Thallium Chloride เท่ากับ 46.9



(ก) อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

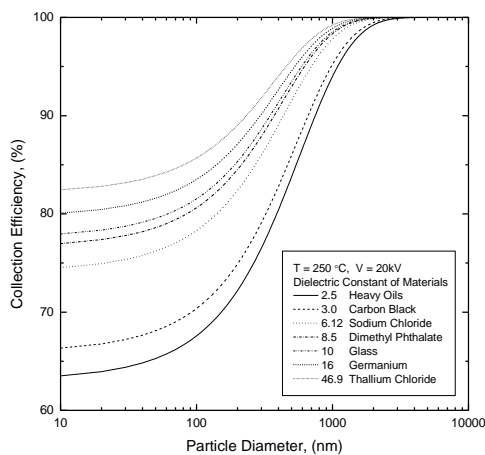
ภาพที่ 5 จำนวนประจุรวมของอนุภาคแต่ละชนิดที่

เปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิ จะมีจำนวนประจุของอนุภาคเท่ากับ 2.98×10^{-7} และ 5.14×10^{-7} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงนัยสำคัญว่า ถ้าค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าน้อยจะมีผลต่อจำนวนการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคน้อยตาม และจะทำการอัดประจุได้ดีเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้จำนวนประจุของอนุภาคมีค่าสูงขึ้นตาม สอดคล้องกับผลของค่ากระแสดิสชาร์จโคโรนาในภาพที่ 4 จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ดังภาพที่ 5 (ก) (ข) และ(ค) พิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 1000 นาโนเมตร ของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่ำสุด Heavy Oils เท่ากับ 2.5 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทดสอบ 250, 500 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่าจะมีจำนวนประจุของอนุภาคเท่ากับ 2.98×10^{-7} , 3.29×10^{-7} และ 3.66×10^{-7} ตามลำดับ และพิจารณา ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุสูงสุด Thallium Chloride เท่ากับ 46.9 จะมีจำนวนประจุของอนุภาคเท่ากับ 5.14×10^{-7} , 5.67×10^{-7} และ 6.33×10^{-7} ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์จำนวนประจุรวมของอนุภาคแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิ จะส่งผลกระทบต่อการอัดจำนวนประจุของอนุภาค โดยตรง มีความสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ (พานิช, 2558) และ (Fadhil, 2017)

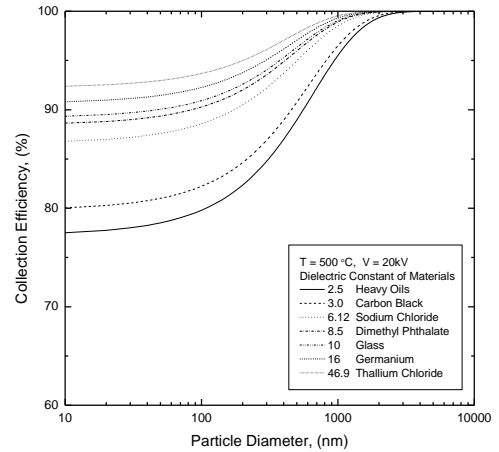
3 ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (d_p) กับประสิทธิภาพตกตะกอน (η) ของเครื่องตกตะกอน แสดงดังภาพที่ 6 มีการกำหนดเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของการอัดประจุแบบสนามไฟฟ้าขนาด 10 นาโนเมตร ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10,000 นาโนเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของ

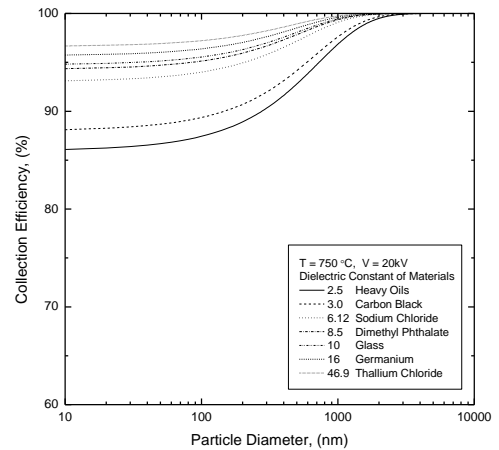
วัสดุ จำนวน 7 ชนิด ประกอบด้วย Heavy Oils, Carbon Black, Sodium Chloride, Dimethyl Phthalate, Glass, Germanium และ Thallium Chloride มีค่าเท่ากับ 2.5, 3, 6.12, 8.5, 10, 16 และ 46.9 ตามลำดับ โดยพิจารณาอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคแต่ละขนาดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุและอุณหภูมิ จากรูปจะพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 64 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัย (มงคลและคณะ, 2553) โดยค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเมื่อพิจารณาที่ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุชนิด Heavy Oils (ค่าเท่ากับ 2.5) ที่อุณหภูมิ 250, 500 และ 750 องศาเซลเซียส จะให้ค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเท่ากับ 64.0, 77.5 และ 86.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าลดลง เมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าถ้าค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าน้อยจะมีผลต่อจำนวนประจุไฟฟ้าของอนุภาคและมีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคได้น้อย สำหรับประสิทธิภาพ



(ก) อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (d_p) กับประสิทธิภาพการตกตะกอน (η) ของเครื่องตกตะกอน

การตกตะกอนอนุภาค η ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สามารถคำนวณหาค่าได้ตรงจากสมการที่ (14) ของ Deutsch (Hinds, 1999) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสดีสชาร์จ ค่าจำนวนประจุรวมของอนุภาคที่เกิดขึ้น

สรุป

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต พบว่าค่ากระแสดีสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากระแสดีสชาร์จโคโรนาลบจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 38 ถึง 620 ไมโครแอมป์ และค่ากระแสดีสชาร์จโคโรนาบวกจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 24 ถึง 408 ไมโครแอมป์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาดีสชาร์จได้เร็วขึ้นและให้ค่ากระแสดีสชาร์จโคโรนาสูงขึ้นตาม

ได้สมมติและกำหนดชนิดของฝุ่นละอองลอย จะใช้ในการศึกษานี้จำนวน 7 ชนิด คือ Heavy Oils, Carbon Black, Sodium Chloride, Dimethyl Phthalate, Glass, Germanium และ Thallium Chloride ซึ่งมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 46.9 จากการวิเคราะห์พบว่าจำนวนประจุของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยค่าจำนวนประจุของอนุภาคจะมีค่าลดลงเมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุลดลง และพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 64 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะเป็นประโยชน์กับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่เกิดจากการเผาไหม้ ตามความต้องการที่จะกำจัด

ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

ในการวิจัยต่อไปคณะผู้วิจัยจะออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการ

ตกตะกอนของอนุภาคในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 นาโนเมตร ไปจนถึงขนาด 10 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน USEPA เทียบกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่ ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม (RUEE : Research Unit of Applied Electric Field in Engineering) ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยและพัฒนาผลงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชญาศักดิ์ รัตนโชติ, พีระพงศ์ ทิมสกุล และ ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล. 2551. เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากการเผาไหม้ไม้ฟืน, น. 59-63. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- พานิช อินต๊ะ. 2558. เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, น. 139-148. ใน ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ นคร ทิพยาวงศ์, บรรณาธิการ. เทคโนโลยีการวัดและการควบคุมฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิต. เจริญ ก๊อปปี้ เซ็นเตอร์, เชียงใหม่.
- พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2550ก. ศักยภาพการดักจับอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, น. 52-58. ใน รายงานการประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล

- ในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ คุณฎี. 2550ข. การทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล, น. 152-158. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. โรงเรียนนายเรืออากาศ, ชลบุรี.
- มงคล ไชยวงศ์, วิสูตร อาสนวิจิตร, อาทิตย์ ยาวุฑฒิ และ พานิช อินต๊ะ. 2553. การวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, น. 1-6. ใน รายงานการประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.
- วชร กาลาสี, นฤบดี ศรีสังข์, ภัทธร สุพัตถกุล และ พีระพงศ์ ทิมสกุล. 2549. ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 1: อนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง, น. 75-79. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- ส่วนขยายผลฝอยและสิ่งปฏิกูล สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย. 2560. รายงานสถานการณ์ ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี 2559. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- อุษณีย์ วินิจเขตคำนวน, ชีระ ชีโวรินทร์ และ ณรงค์พันธ์ ภูรัมย์. 2550. รายงานการวิจัยการทำลายดีไอเอของเซลล์ถุงลมปอดจากการออกซิไดส์ด้วยสารสกัดจากฝุ่นขนาดเล็ก PM 2.5 และ PM 10 ในอากาศเชียงใหม่และลำพูน. ณะแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- อาทิตย์ ยาวุฑฒิ, พานิช อินต๊ะ, วิสูตร อาสนวิจิตร, สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ และ นครทิพย์าวงศ์. 2554. การออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดฝุ่นควันจากเตาเผาขยะชุมชน, น. 627-632. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ภูเก็ต.
- Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M. 1995. **Handbook of Electrostatic Processes.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Electrical4u, 2018. **Principle of Electrostatic precipitator.** Popular Science. Available Source: <https://www.electrical4u.com/electrostatic-precipitator/>, November 9, 2018.
- Fadhil, K.F., 2017. Pressure and temperature effects on corona onset voltage in electrostatic precipitators. **International Journal of Physical Sciences** 12(5): 52-59.
- Hinds, W.C. 1999. **Aerosol technology.** John Wiley and Sons, New York.
- HyperPhysics. 2016. **Dielectric Constants at 20 °C.** Available Source: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/diel.html>, November 18, 2018.
- Intra, P. and Tippayawong, N., 2009. Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review. **Journal of Electrostatics** 67(4): 605-615.

- Intra, P. and Tippayawong, N., 2005. Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement. **KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications** 5-C(5): 196-203.
- Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T., 2006. Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning A brief review. **Journal of Electrostatics** 65: 133-155.
- Parker, K.R. 1997. **Applied Electrostatic Precipitation**. Blackie Academic and Professional, New York.
- Tekasakul, S., Tantichaowan, M., Otani, Y., Kuruhongsa, P. and Tekasakul, P. 2006. Removal of Soot Particles in Rubber Smoking Chamber by Electrostatic Precipitator to Improve Rubber Sheet Color. **Aerosol and Air Quality Research** 6(1): 1-14.
- White, H.J. 1963. **Industrial Electrostatic Precipitation**. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- Yawootti, A. Intra, P. Tippayawong, N. and Rattanadecho, P. 2015. An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger. **Journal of Electrostatics** 77: 116-122.