



คุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบ ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสำหรับการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออก

จากเตาเผาชีวมวล

CHARACTERISATION OF WIRE-CYLINDER ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR EXHAUST GAS PARTICLES REMOVAL OF BIOMASS FURNACE

พานิช อินตะ และ ณัฐฤติ คุณฤ

ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

โทรศัพท์ 0-5387-5140 โทรสาร 0-5387-5140

E-mail: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้จะทำการศึกษาคคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสำหรับการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดอนุภาคจากกระแสการไหลของแก๊สที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01 – 1,000 ไมโครเมตร โดยอาศัยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งเครื่องตกตะกอนแบบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรดและขั้วตกตะกอน ดิสชาร์จอิเล็กโทรดจะถูกจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในขณะที่ขั้วตกตะกอนมีศักย์เป็นกราวด์ จะทำให้เกิดโคโรนาดิสชาร์จขึ้นบริเวณรอบๆ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด และเกิดการไหลของกระแสไอออนผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับขั้วตกตะกอน เมื่อแก๊สที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้อนุภาคได้รับประจุและถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอน โดยตัวแปรที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคคือ ลักษณะของกระแสและแรงดัน ความเข้มข้นจำนวนไอออน และระดับการอัดประจุของอนุภาค ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์หาลักษณะของกระแสและแรงดัน ระดับการอัดประจุ ระยะการเคลื่อนที่ และประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ยสูงถึงประมาณ 99.34 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพจะลดลงมาประมาณ 47.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเล็กลงมา 1 ไมโครเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล.

Abstract

This paper investigates the electrostatic properties of wire-cylinder electrostatic precipitator for exhaust gas particle removal from biomass furnace. Electrostatic precipitator is used to separate particles of 0.01 – 1,000 micron from gas flow stream based on electrical means. The precipitator is divided into two parts, discharge and collection electrodes. The discharge electrode is connected to the high voltage supply, while the collection electrode is grounded. The high voltage supply is used to produce corona discharge at the electrode. The corona discharge generates the ion current which moves rapidly toward the collection electrode. The exhaust gas flow containing particles is direct across the corona discharge field and is then charged. The charged particles are deflected outward radially and they are collected on the collection electrode. The most important parameters there determine collecting efficiency of particle of such devices are the current-voltage characteristics, the ion concentration, and the particle charging levels. In the present study, the current-voltage characteristics, the particle charging levels, the particle trajectory, and the collecting efficiency of sub-micron and super-micron particles in the size ranges between 10 nm to 100 μm are analytically investigated with mathematical model. It is shown the efficiency of particles collecting on the collection electrode wall is approximately 99.34% for the particle size larger than 1 μm and drops to 47.08% with the particle size smaller than 1 μm for 100 kV is used. Results from the mathematical model are found to be reliable in case of exhaust gas particle removal from biomass furnace.

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล(Biomass) ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น ลำไย พริก มะเขือเทศ ถั่วลิสง มะม่วง โดยการอบแห้งด้วยวิธีการนี้จะสามารถลดต้นทุนในด้านเชื้อเพลิงลงได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ [1] เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้มีราคาถูก และสามารถหาได้ง่ายในบริเวณพื้นที่การทำเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยระบบพลังงานชีวมวลยังมีความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายของอนุภาคแขวนลอย (Particulates) ที่ปนไปกับอากาศร้อน โดยอนุภาคแขวนลอยที่ปนมากับอากาศร้อนจะมีขนาดอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตร ไปจนถึง 100 ไมโครเมตร [2] ซึ่งอนุภาคแขวนลอยเหล่านี้จะทำให้เกิดการปนเปื้อนและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิตได้และนอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อทัศนวิสัย อากาศตามฤดูกาล และสุขภาพชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถลอยอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานาน สามารถที่จะผ่านเข้าไปยังระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ [3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการแพร่กระจายของอนุภาคเหล่านี้ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิต สิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์การควบคุม

ปริมาณการแพร่กระจายของอนุภาคแขวนลอยสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น เครื่องคัดแยกจากแรงเฉื่อย (Inertial separator) หรือ ไซโคลน (Cyclone) การตกตะกอนแบบเปียก (Wet collector) ผ้ากรอง (Fabric filter) และเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) [4 – 5] โดยทุกวิธีการได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับเตาเผาชีวมวลในปัจจุบันนิยมใช้ไซโคลนในการกำจัดเขม่าและขี้เถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ออกจากกระแสการไหลของอากาศร้อน แต่เนื่องจากข้อจำกัดของไซโคลนจึงทำให้ไม่สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตรได้ ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร สามารถผ่านออกไปได้ สำหรับการใช้ผ้ากรองจะให้ประสิทธิภาพการดักกรองที่สูง แต่การใช้ผ้ากรองจะมีปัญหาในเรื่องการบำรุงรักษาและการสูญเสียความดัน (Pressure drop) ของแก๊สร้อนโดยเฉพาะถ้าต้องการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ และเสี่ยงต่อการหลอมละลายหากใช้ที่อุณหภูมิสูงเกิน [3] ดังนั้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับกำจัดอนุภาคขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกำจัดอนุภาคด้วยวิธีการต่างๆ [5]

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การคัดแยกด้วยแรงเฉื่อย	- เป็นวิธีการที่สร้างง่าย - มีราคาถูกลง - การบำรุงรักษาค่า - ไม่มีขีดจำกัดของอุณหภูมิ - ใช้ได้ทั้งระบบแห้งและเปียก	- ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคถูกจำกัดด้วยช่วงขนาดอนุภาค - การสูญเสียของความดันสูง
การตกตะกอนแบบเปียก	- เป็นวิธีการที่สร้างง่าย - มีค่าใช้จ่ายในสร้างต่ำ - มีขนาดเล็ก - เหมาะสำหรับฝุ่นที่มีความเหนียวหนืด - ให้ประสิทธิภาพทั้งแก๊สและฝุ่นแบบเปียก	- การสูญเสียของความดันสูง - ต้องใช้น้ำปริมาณมาก - มีกลิ่นเหม็น
การกรองด้วยผ้ากรอง	- ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคสูงถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์	- การสูญเสียของความดันสูง - เสี่ยงต่อการหลอมละลายหรือไหม้ถ้าใช้กับอุณหภูมิสูง - ไม่เหมาะสำหรับฝุ่นที่มีความเหนียวหนืด
การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต	- ให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ - เหมาะสำหรับอนุภาคทุกช่วงขนาด - การสูญเสียความดันน้อย - การบำรุงรักษาค่า - อายุการใช้งานยาวนานถึง 20 ปี - สามารถกำจัดอนุภาคที่ทั้งแบบแห้งและแบบเปียก	- ค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง - ประสิทธิภาพไวต่อความต้านทานของฝุ่น - มีขนาดค่อนข้างใหญ่

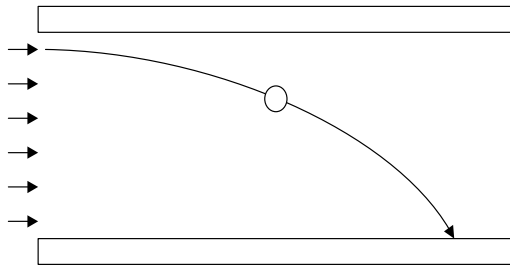
เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) จะกระทำต่อตัวอนุภาคเพียงอย่างเดียวจึงไม่มีผลกระทบต่อการไหลของแก๊ส [4 – 6] ดังนั้นข้อดีของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้มีผลให้ความดันสูญเสียของแก๊สมีค่าต่ำปกติแล้วจะน้อยกว่า 1000 Pa สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพการตกตะกอนสำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร สูงปกติจะมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และข้อดีที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้ก็คืออายุการใช้งานยาวนานและมีการบำรุงรักษาค่า [5]

จากข้อได้เปรียบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ในบทความวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาคูณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

สำหรับการกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล โดยจะทำการศึกษาวิเคราะห์ถึงผลของสนามไฟฟ้า (Electric field) ขนาดอนุภาค (Particle size) และอุณหภูมิอากาศร้อน (Hot gas temperature) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับเตาเผาชีวมวลต่อไป

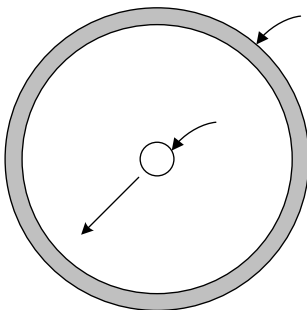
2. หลักการของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

กระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เป็นวิธีการกำจัดอนุภาคออกจากกระแสของแก๊สโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าดังรูปที่ 1 โดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ



รูปที่ 1 หลักการของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (Collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด (ประมาณ 20 ถึง 100 กิโลโวลต์) โดยที่แผ่นตกตะกอนเป็นกราวด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ อิเล็กโทรด ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอน (Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอน เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุ และอนุภาคที่มีประจุ (Charged particle) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังแผ่นตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนแผ่นตกตะกอน โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากแผ่นตกตะกอนโดยการเคาะแผ่นตกตะกอนด้วยก้อนเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงไป



รูปที่ 2 เครื่องตกตะกอนแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

3. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้ามีความสำคัญต่อกระบวนการตกตะกอน เพราะสนามไฟฟ้ามีผลต่อการอัดประจุให้กับอนุภาคและแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่ได้รับประจุ สนามไฟฟ้าในเครื่องตกตะกอนเกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วอิเล็กโทรด และจากผลของประจุค้าง (Space charge effect) ของไอออนและอนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในช่องระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในกรณีที่ไม่มีกรไลของกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและลักษณะของรูปทรง (Geometry) ของระบบเท่านั้น ในการศึกษาจะพิจารณาเครื่องตกตะกอนที่มีลักษณะทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Coaxial electrode) ดังรูปที่ 2 เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย ถ้าสมมติให้การสูญเสียของสนามไฟฟ้าต่อ collection electrode และขั้วตกตะกอนภายในท่อทรงกระบอกสม่ำเสมอ (Uniform electric field) ดังนั้นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) ที่ระยะรัศมีใดๆ $E(r)$ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss's law) คือ [7]

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

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้า r คือระยะรัศมี r_1 คือระยะรัศมีของดิสชาร์จอิเล็กโทรดและ r_2 คือระยะรัศมีของขั้วตกตะกอน

3.2 โคโรนาดิสชาร์จในแก๊ส

โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) เป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพราะเป็นกระบวนการสร้างไอออนที่ทำให้อนุภาคได้รับประจุ (Charged particle) โคโรนาดิสชาร์จจะสัมพันธ์กับกระแสและแรงดัน (Voltage-current characteristics) เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset voltage) กระแสโคโรนา (Corona current) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดจะสร้าง

ประกายโคโรนา (Sparkover corona) ดังนั้น เราจำเป็นต้องรู้สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเพื่อกำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset field strength) E_0 สามารถคำนวณได้จาก [5]

$$E_0 = E_s \left(\delta + A \sqrt{\delta/r_1} \right) \quad (2)$$

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

เมื่อ E_s คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown field) ในอากาศที่สภาวะปกติ (3.126×10^6 V/m สำหรับความดันบรรยากาศ ที่ 20°C) A คือค่าคงที่ ($0.0301 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วลบ และ $0.0266 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วบวก) δ คือความหนาแน่นของอากาศที่ความดันบรรยากาศ T_r คืออุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (293°K) T คืออุณหภูมิของอากาศขณะทำงาน P_r คือความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน (1 บาร์) และ P คือความดันบรรยากาศขณะทำงาน ถ้าเครื่องตกตะกอนเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมและไม่เกิดผลของประจุค้าง ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา V_0 สามารถคำนวณได้จาก

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

และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average current density) j (A/m^2) ที่พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโคโรนา ดิสชาร์จสามารถคำนวณได้จาก [5]

$$j = \frac{4\epsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^3 \ln(r_2/r_1)} \quad (5)$$

เมื่อ Z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (Ion electrical mobility) มีค่าเท่ากับ $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V.s}$ และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (5) ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ได้คือ

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

3.3 การอัดประจุอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนา ดิสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusion) ในการศึกษาจำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาคจะได้มาจากการอัดประจุแบบสนาม (Field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1 – 50 ไมโครเมตร อนุภาคที่รับประจุจะก่อให้เกิดการแปรโณเฉพาะถิ่น (Local deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เส้นสนามไฟฟ้าจะวิ่งตัดกับอนุภาค ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายไปตามเส้นของสนามไฟฟ้าจะกระทบกับอนุภาคและถูกยึดจับโดยแรงของประจุจินตภาพ (Image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จำนวนประจุบนอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเฉพาะถิ่นที่เกิดจากประจุบนอนุภาคก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิมจนเส้นเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป เมื่อสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้น ไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีกและจะไม่เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุบนอนุภาคอีก โดยการประมาณค่าการกระจายประจุของอนุภาคด้วยวิธีการนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) [8, 9, 10]

$$n_p = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (7)$$

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

รวม ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จาก [9]

$$N_i t(r) = \frac{(r_2^2 - r_1^2)I}{2rZ_i e E(r)Q} \quad (8)$$

เมื่อ Q คืออัตราการใช้ของแก๊ส

3.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการตกตะกอน

เมื่ออนุภาคที่มีประจุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม E อนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงกระทำทางไฟฟ้า F_e ที่กระทำต่ออนุภาคสามารถคำนวณได้จาก [3]

$$F_e = qE = n_p e E \quad (9)$$

เมื่อ q คือประจุไฟฟ้าของอนุภาค ส่วนแรงหนืด (Viscous force) ที่กระทำกับอนุภาคขณะเคลื่อนที่คือ [3]

$$F_s = \frac{3\pi\mu d_p \omega_e}{C_c} \quad (10)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left(2.514 + 0.8 \exp \left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda} \right) \right) \quad (11)$$

$$\lambda = 6.61 \times 10^{-8} \left(\frac{101.3}{P} \right) \left(\frac{T}{293.15} \right) \left(\frac{1 + 110/293.15}{1 + 110/T} \right) \quad (12)$$

เมื่อ μ คือความหนืดของของไหล ω_e คือความเร็วปั่นป่วน (Terminal electrostatic velocity) C_c คือตัวดัดเชยของคันทันนิงแฮม (Cunningham correction factor) [11] และ λ คือค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของแก๊ส จากกฎของนิวตัน (Newton's law) ของอนุภาคจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ [8]

$$m \frac{d\omega_e}{dt} = n_p e E - 3\pi\mu d_p \omega_e \quad (13)$$

เมื่อ m คือมวลของอนุภาคและ t คือเวลา โดยพิจารณาให้มวลของอนุภาคมีค่าน้อยมากๆ และเวลามีค่ามากกว่า 10^{-2} วินาที จะได้ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนคือ [8]

$$\omega_e = \frac{n_p e E C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (14)$$

การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนสามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{dr}{dt} = \frac{n_p e E(r)}{3\pi\mu d_p} \quad (15)$$

$$\frac{dz}{dt} = v(r) \quad (16)$$

เมื่อ r คือระยะในแนวรัศมี z คือระยะในแนวแกนและ $v(r)$ คือความเร็วของของไหล ทำการรวมสมการที่ (15) และสมการที่ (16) จะได้เส้นทางโคจรของอนุภาค (Particle trajectory) คือ

$$z = \frac{3\pi\mu d_p}{n_p e} \int_{r_0}^r \frac{v(r)}{E(r)} dr \quad (17)$$

3.5 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค

ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาค (Collection efficiency) η ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch คือ [4, 6]

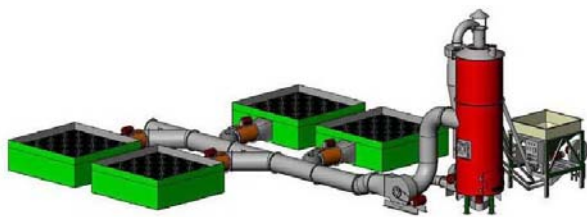
$$\eta = 1 - \exp \left(\frac{-2\pi r_2 L \omega_e}{Q} \right) \quad (18)$$

เมื่อ L คือความยาวของขั้วตกตะกอน

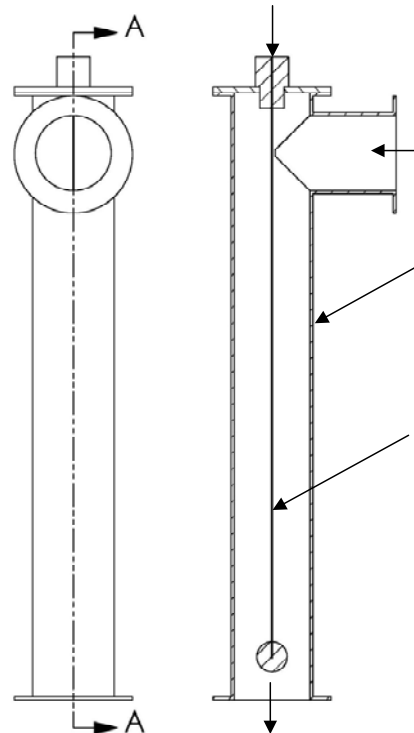
4. การวิเคราะห์สมรรถนะการตกตะกอน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายสมรรถนะการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยได้ทำการศึกษากับต้นแบบระบบการใช้พลังงานชีวมวลแบบรวมศูนย์ดังรูปที่ 3 [1] ซึ่งเป็นเตาเผาชีวมวลแบบรวมศูนย์ที่ใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนสำหรับเตาอบแห้งลำไย ที่มีอัตราส่วน H/D เท่ากับ 3.11 และมีปริมาตรห้องเผาไหม้ 1.248 ลูกบาศก์เมตร สามารถจ่ายค่าความร้อนได้สูงสุดถึง 152 กิโลวัตต์ โดยในการวิเคราะห์จะสมมุติให้ความดันภายในห้อง

อากาศร้อนมีค่าเท่ากับความดันของบรรยากาศ และให้อัตราการไหลของอากาศร้อนคงที่ที่ 1,728 ลูกบาศก์เมตรต่อ ชั่วโมง และสมมุติให้คุณสมบัติของแก๊สร้อนมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอากาศและให้อนุภาคมีประจุเป็นประจุบวก (Positive charge) เข้าไปในสนามไฟฟ้ามีลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นหัวอิเล็กโทรดซ้อนกันรวม รูปที่ 4 แสดงลักษณะโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จากรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตกตะกอนทรงกระบอกเท่ากับ 250 มิลลิเมตร และยาว 2000 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดดิสชาร์จเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคที่ทางเข้าอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร แรงดันไฟฟ้าในช่วง 1 – 100 กิโลโวลต์ และอุณหภูมิของแก๊สร้อนเปลี่ยนแปลงในช่วง 400 – 500 องศาเซลเซียส และเงื่อนไขในการวิเคราะห์แสดงไว้ดังตารางที่ 2 โดยการวิเคราะห์จะมีลำดับขั้นตอนดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยอันดับแรกจะต้องกำหนดเงื่อนไขด้านขาเข้าของเครื่องตกตะกอน คือ ช่วงขนาดของอนุภาค การไหลของแก๊ส ความดันและอุณหภูมิขณะทำงาน



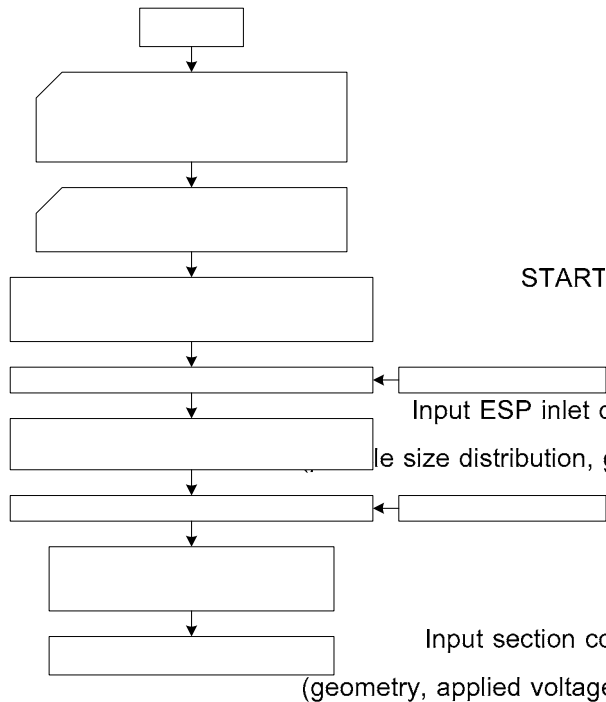
รูปที่ 3 ต้นแบบระบบการใช้พลังงานชีวมวลแบบรวมศูนย์ที่ใช้ในการศึกษา [1]



รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปร	ช่วงการคำนวณ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวดิสชาร์จ	3 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตกตะกอน	250 มิลลิเมตร
ความยาวของเครื่องตกตะกอน	2000 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	10 นาโนเมตร – 100 ไมโครเมตร
จำนวนหัวอิเล็กโทรด	1 หัว
ประจุอนุภาค	ประจุบวก
แรงดันไฟฟ้า	1 – 100 กิโลโวลต์
อุณหภูมิแก๊ส	400 – 500°C
ศักย์ไฟฟ้า	ขั้วบวก
ความดัน	1 บาร์
ลักษณะการไหลของแก๊ส	สม่ำเสมอตลอดทางเข้า
ความเร็วของแก๊ส	8.4 เมตร ต่อ วินาที



รูปที่ 5 แผนภูมิลำดับการคำนวณสมรรถนะการตกตะกอน

จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขในเครื่องตกตะกอน คือ ขนาดเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด และสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณ

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาด้วยสมการที่ 2 – 4 และทำการ

คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าของการอัดประจุจากสมการที่ 6

พร้อมกับกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของสูญญากาศของอากาศ

ภายในเครื่องตกตะกอน และเวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับ

ความเข้มข้นจำนวนของไอออนจะคำนวณหาการอัดประจุ

ต่อจากนั้นจะนำค่าความเข้มข้นจำนวนไอออนที่ได้ไป

คำนวณค่าการอัดประจุของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายใน

เครื่องตกตะกอนจากสมการที่ 7 เมื่อได้ค่าประจุของ

อนุภาคแล้ว ก็จะทำการคำนวณหาความสามารถในการ

เคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของอนุภาคและเส้นทางการเคลื่อนที่

ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนจนกระทั่งการเคลื่อน

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่อง

ตกตะกอน จะสมมุติให้โดยการรู้ตำแหน่งเริ่มต้นคือ

ตำแหน่งระยะแนวแกนของขั้วอิเล็กโทรดด้านในและ

ตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้าของอนุภาคและทำการ

คำนวณหาตำแหน่งระยะในแนวแกนและในแนวรัศมีของอนุภาคที่ตำแหน่งใหม่ และทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ ไปจนถึงตำแหน่งระยะรัศมีของขั้วตกตะกอน จะได้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากจุดทางเข้าไปจนถึงจุดที่อนุภาคตกที่ขั้วตกตะกอน ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนจากสมการที่ 18

5. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของความ

เข้มของสนามไฟฟ้าตามระยะรัศมีจากดิสชาร์จี้เล็กโทรด

เพื่อใช้ตรวจสอบการเกิดโคโรนาในเครื่องตกตะกอน ที่แรงดันโคโรนา

100 กิโลโวลต์ จากรูปจะเห็นว่าค่าความเข้มของ

สนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนมีความเข้มสูงสุด

บริเวณใกล้กับดิสชาร์จี้เล็กโทรดและมีค่าลดลงตาม

ระยะรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าที่บริเวณรอบๆ

ดิสชาร์จี้เล็กโทรดจะเกิดการโคโรนาดีชาร์จี้และเกิดการ

แตกตัวของไอออนขึ้นเนื่องจากมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

สูงที่สุด

Free-space permittivity constant

Particle dielectric constant

charging region

applied voltage 50 kV

average electric field

electric field strength (V/m)

radial distance from discharge electrode (m)

0.000 0.025 0.050 0.075 0.100 0.125

10⁵ 10⁶ 10⁷

Calculate electrical mobility of particles

Calculate trajectory of particles

Calculate collection efficiency of particles

Calculate particle charging

Calculate ion number concentration and charging time

Calculate electric field

Calculate corona onset field strength and voltage

Input section conditions

Input ESP inlet conditions

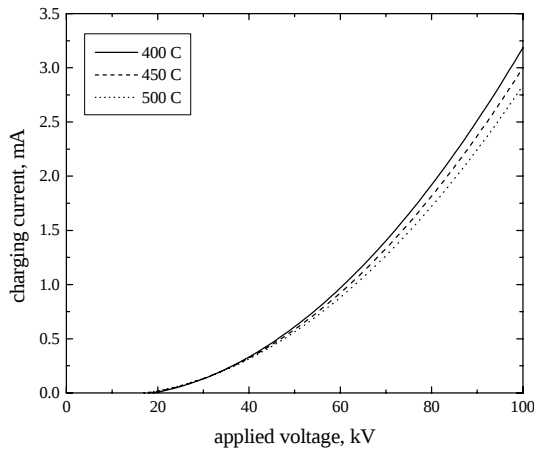
START

END

รูปที่ 6 แสดงการทำนายคุณสมบัติของกระแส

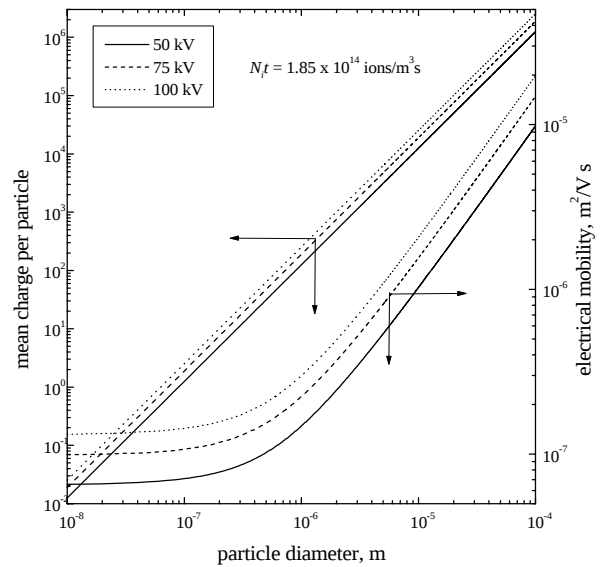
แรงดันของเครื่องตกตะกอนในช่วง 1 – 100 กิโลโวลต์และ

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วง 400 – 500 องศาเซลเซียส จากรูปแสดงให้เห็นว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะเริ่มต้นที่ประมาณ 20 กิโลโวลต์ และอุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแสดีสชาร์จมีค่าลดลงเนื่องจากกระแสดีสชาร์จเป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นของอากาศ



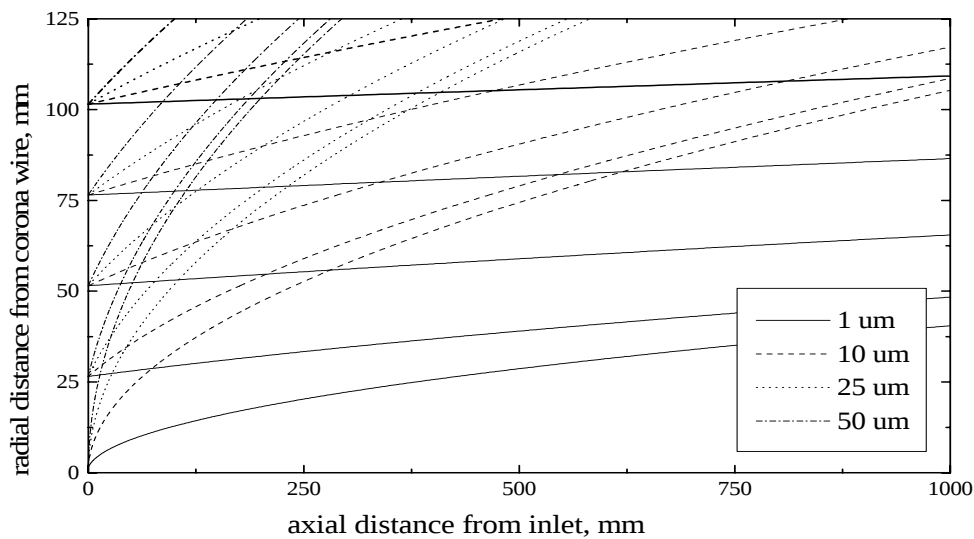
รูปที่ 7 คุณสมบัติของกระแส-แรงดันของเครื่องตกตะกอน

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าจำนวนประจุและความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง 50, 75 และ 100 กิโลโวลต์ จากรูปจะสังเกตได้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีจำนวนประจุและค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า และยังมีค่าแปรผันตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าถ้าหากแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้จำนวนประจุและค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนของอนุภาคสูงขึ้นตามไปด้วย



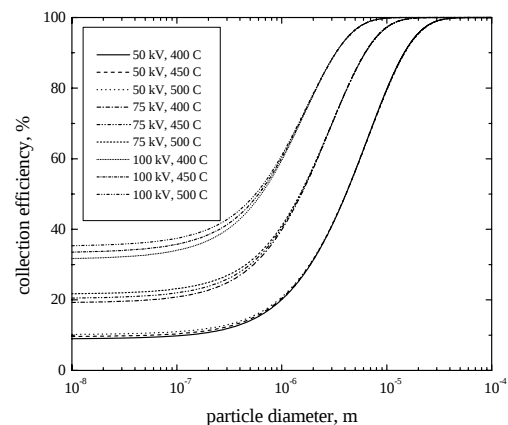
รูปที่ 8 จำนวนประจุเฉลี่ยและความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามขนาด

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ภายในเครื่องตกตะกอน ที่แรงดันไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ และอุณหภูมิของแก๊สร้อนเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส จากการเปรียบเทียบพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าอุณหภูมิและอัตราการไหลเดียวกัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีระยะเวลาเคลื่อนที่จากทางเข้าไปถึงหัวอิเล็กโทรดด้านนอกใกล้กว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออนสูงกว่าอนุภาคเล็กสำหรับการอัดประจุแบบสนาม [5, 8] และจากรูปที่ 9 ยังสังเกตได้ว่าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้าของอนุภาค พบว่าตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้าแปรผกผันกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นระยะเวลาเคลื่อนที่ของอนุภาคจะลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงขึ้นตาม ซึ่งถ้ารู้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ต้องการก็จะสามารถกำหนดความยาวของส่วนตกตะกอนจากระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้



รูปที่ 9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอนที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1 ไมโครเมตร ถึง 50 ไมโครเมตร

รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิของแก๊สร้อน จากรูปพบว่าอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ 99.34 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพจะลดลงมาประมาณ 47.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาดเล็กลงมา 1 ไมโครเมตร โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนและการอัดประจุของอนุภาค แต่แรงดันจะเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไปไม่ได้ดี เพราะจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอก ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ สำหรับอากาศที่ 20 องศาเซลเซียส และที่ความดันบรรยากาศ 1 บาร์ แรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown voltage) ประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อ เซนติเมตร [7] สำหรับในการศึกษานี้ช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 125 มิลลิเมตร แรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์จะประมาณ 375 กิโลโวลต์ สำหรับผลของอุณหภูมิมีผลทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดในช่วงที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการตกตะกอนเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค

6. บทสรุปและงานในอนาคต

ในบทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะทางไฟฟ้าสถิต ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน สำหรับการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล โดยจะทำการศึกษวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้า ขนาดอนุภาค และอุณหภูมิอากาศร้อนต่อประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค โดยทำการวิเคราะห์หาคูณลักษณะของกระแสและแรงดัน การอัดประจุและความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า ระยะการเคลื่อนที่

และประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคภายในเครื่องตกตะกอน ทั้งในระดับที่เล็กและใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตรที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ยสูงถึง 99.34 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ และประสิทธิภาพจะลดลงมาประมาณ 47.08 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ยที่ขนาดเล็กลงกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งจากผลการวิจัยพบเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีศักยภาพสูง เหมาะ

สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล

สำหรับการศึกษาต่อไป จะได้ทำการสร้างต้นแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับเตาเผาชีวมวล และจะทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเพิ่ม ศึกษาหาประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคทางการทดลอง โดยใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ช่วยในการออกแบบกระบวนการวัดทางของอิเล็กโตรดของเครื่องตกตะกอนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวุฒิ คุยฎี, พาวิน มะโนชัย, ญาณากร สุทัศนมาลี และ วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล, “ระบบการใช้พลังงานชีวมวลแบบรวมศูนย์สำหรับอบแห้งลำไยด้วยเครื่องกระบะ”, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยและพัฒนาภาครัฐร่วมเอกชนในเชิงพาณิชย์, สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (2549).
- [2] Haslerm P. and Nussbaumer, T.H., “Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification”, Biomass & Bioenergy, Vol. 16, 385 – 395 (1999).
- [3] Hinds, W.C., “Aerosol Technology”, John Wiley and Sons, New York, USA (1999).
- [4] พานิช อินดี๊ะ, “เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมมลภาวะทางอากาศจากอุตสาหกรรม”, วารสาร Technic Magazine, ปีที่ 22, ฉบับที่ 252, หน้า 109 – 122, สิงหาคม 2548.
- [5] Parker, K.R., “Applied Electrostatic Precipitation”, Blackie Academic & Professional, New York (1997).
- [6] Mizuno, A., “Electrostatic Precipitation”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.5, 615-624 (2000).
- [7] Chang, J., Kelly, A.J., and Crowley, J.M., “Handbook of Electrostatic Processes”, Marcel Dekker, Inc., New York, USA (1995).
- [8] White, H.J., “Industrial Electrostatic Precipitation”, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1963).
- [9] Burtscher, H, Reis, A, and Schmidt-Ott, A, “Particle Charge in Combustion Aerosols”, Journal of Aerosol Science, Vol. 17, 47-51 (1986).
- [10] Intra, P. and Tippayawong, N., “Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement”, KIEE International Transactions on Electrophysics and Applications, Vol. 5-C, No. 5, 196-203 (2005).
- [11] Cunningham, E., “On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium”, Proceeding of the Royal Society, A-83, 357 – 365 (1910).