Engng.J.CMU.(2018) 25 (3), 178-189

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินขนาดเล็กด้วยการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า

EFFICIENCY INCREASE ON SMALL COAL DUST PARTICLES CAPTURE BY ELECTRICAL - CHARGED WATER SPRAY

อรรถกร อาสนคำ ชัญกฤช จันทพิมพะ และ พิเชษฐ์ ทานิล
Attakorn Asanakham, Chanyagrid Jantapimpa, and Piched Thanil
หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200
Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Road, Suthep, Muang District, Chiang Mai, 50200
E-mail: attakorn_asanakham@hotmail.com
Telephone Number: 0918580668, 0924590550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินขนาดเล็กด้วยสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้าเทียบกับการดักจับฝุ่นขนาดเล็กด้วยสเปรย์น้ำที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและสร้างเครื่องต้นแบบในการดักจับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กด้วยละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งอนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ แป้งฝุ่นเป็นตัวแทนฝุ่นถ่านหิน ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นโดยเปรียบเทียบจากน้ำหนักของแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ กรณีแรกจะทดสอบในห้องทดสอบขนาดสูง 3 เมตร กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร เพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค โดยฉีดสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าขนาด 5 kV ที่อัตราการไหล 3.22 มิลลิลิตรต่อวินาที กรณีที่สองจะทดสอบจะทดสอบในอุโมงค์ลมวางในแนวนอน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาคโดยทดสอบ 3 รูปแบบคือ ไม่มีการสเปรย์น้ำ สเปรย์น้ำ และสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุ

จากการคำนวณเพื่อป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าในอากาศจะติดตั้งลวดอิเล็กโทรดขนาดรัศมี 0.05 เซนติเมตร ทำเป็นแบบวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร โดยให้เส้นลวดวางห่างจากหัวฉีด 2.2 เซนติเมตร การทดลองในกรณีแรกพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการสเปรย์น้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคเพิ่มขึ้น กรณีที่สองพบว่าช่วงที่ความเร็วอากาศเป็น 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที เมื่อชาร์จประจุให้กับละอองน้ำประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคจะสูงขึ้นประมาณ 35% และช่วงที่ความเร็วอากาศเป็น 0.3-1 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของวิธีการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะเริ่มมีค่าลดลงเข้าใกล้กับวิธีที่สเปรย์น้ำที่ไม่มีประจุไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดักจับแบบที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าก็ยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 20%

คำสำคัญ: ละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้า, ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น, อุโมงค์ลม, ความเร็วอากาศ, อิเล็กโทรดแบบวงแหวนซ้อนแกนร่วม

Received 31 July 2017
Accepted 7 September 2017

ABSTRACT

The goal of this research was to increase performance of small coal dust particles captured by electrical charged water spray compared with that by water spray only. A testing model for particle capture was constructed by electrical charged water spray. Particles used in the test were talc powder that is represented coal powder. The capture efficiency could be evaluated form the weights of the air filter before and after the test. The first experimental case was performed in a test room with dimensions of 3 m height x 2 m width x 2 m length. The capture efficiency by electrical charged water spray was done with 5 kV high voltages and the water flow rate of 3.22 ml/s. The second experiment case was performed in a horizontal wind tunnel for studying influence of air velocity effect on particle capture. Three methods, no water spray, water spray, and electrical charged water spray, were carried out.

To protect electrical breakdown, the appropriate electrode ring diameter with a wire having a radius of 0.05 cm was 4 cm with a distance 2.2 cm from the nozzle. From the first experiment, it was found that, the capture efficiency increased with the increased time of water spraying. For the second experiment, while the range of air velocity was 0.1-0.3 m/s with electrical charging, the capture efficiency increased about 35%. In addition, while the range of air velocity was 0.3-1 m/s, the capture efficiency of electrical charged water spray was reduced and close to that with no electrical charged condition. However, the capture efficiency of the electrical charging condition was about 20% higher on average.

Keywords: Electrical charged water spray, Capture efficiency, Air velocity, Ring-axis electrode

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าถ่านหิน จะมีการลำเลียงถ่านหินจากลานกองถ่านหิน มาตามสายพานและเติมในอ่างเก็บถ่านหินเพื่อใช้สำรองถ่านหินที่จะใช้เผาไหม้ [1] ทั้งนี้ขนาดของถ่านหินจะถูกบดให้มีขนาดละเอียดราว 200 mesh เพื่อป้อนเข้าห้องเผาไหม้ [2] ดังนั้นจึงเกิดปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เกิดจากเชื้อเพลิงจำพวก ถ่านหิน ในระหว่างขนย้ายสำหรับเตรียมเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบทางลบต่อสภาพอากาศบริเวณโรงไฟฟ้าและผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงานหรืออาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง [3] โดยปกติแล้วทางโรงไฟฟ้าจะแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายด้วยการฉีดสเปรย์น้ำ [4] ส่งผลให้เชื้อเพลิงเกิดความชื้นขึ้นประสิทธิภาพในการเผาไหม้จึงลดลง [5] หรืออาจเสียเวลาในการลดความชื้นให้กับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

การใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงสร้างประจุไฟฟ้าให้กับสเปรย์น้ำเพื่อใช้ในการดักจับอนุภาคฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชาร์จประจุให้กับสเปรย์น้ำ ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า Cloud Chamber Scrubber (CCS) และเทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคถึง 93% โดยสามารถลดปริมาณอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนที่แขวนลอยในอากาศได้สูงสุดถึง 87% [6]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ในหอสครับเบอร์ได้ถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่สเปรย์น้ำแบบธรรมดา แต่หากความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดักจับจะมีค่าลดลง และอัตราการฉีดสเปรย์น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการชาร์จประจุไฟฟ้าเท่าเดิม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับลงลงเช่นกัน [7] ซึ่งยังไม่มีการศึกษาผลของความเร็วอากาศและการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเปิดในพื้นที่กว้าง

งานวิจัยนี้จึง มุ่งสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ อนุภาคฝุ่นถ่านหินที่เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ เช่น ปัญหาการขนส่งถ่านหินในเหมืองถ่านหิน และศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหิน ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับสเปรย์น้ำ

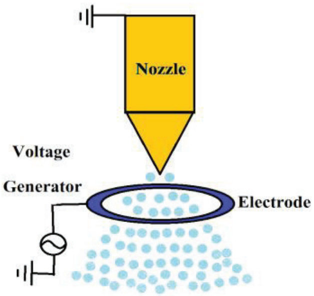
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยสเปรย์น้ำ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ

อนุภาคฝุ่นได้ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำก่อนดักจับ เพื่อเพิ่มกลไกการใช้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตในการควบคุมอนุภาคที่ฟุ้งกระจายในอากาศ

2.1 กลไกการชาร์จประจุไฟฟ้า

ละอองน้ำที่ถูกสเปรย์ผ่านลวดวงแหวนที่มีสนามไฟฟ้า ส่งผลให้ละอองน้ำมีประจุไฟฟ้าตามขั้วของแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ซึ่งลักษณะการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่า การชาร์จประจุแบบโคโรน่า (Corona Charging) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การชาร์จประจุแบบโคโรน่า

การชาร์จแบบโคโรน่าเป็นการชาร์จประจุหลังจากการพ่นเป็นละอองไปแล้ว และการชาร์จประจุแบบโคโรน่า นั้นจะให้ประจุไฟฟ้าที่ละอองของเหลวเป็นขั้วเดียวกับแหล่งจ่าย ในการคำนวณหาค่าการชาร์จประจุไฟฟ้าในละอองน้ำ (q_d) ที่เกิดจากการอัดประจุแบบแพร่กระจายในสนามไฟฟ้าโคโรนา สามารถคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าได้ดังสมการ [8]

$$q_d = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2}\right)\left(\frac{E_r d_d^2}{4K_c e}\right)\left(\frac{\pi K_c eZNt}{1 + \pi K_c eZNt}\right) \quad (1)$$

โดย Nt คือผลคูณของค่าความเข้มข้นไอออนกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ [8]

$$Nt = \frac{I\left(R^2 - R_1^2\right)}{2RZeE_r Q} \quad (2)$$

หลักการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำ แบบโคโรนานั้น มีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่ใช้กลไกในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่อนุภาคก่อนที่จะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำไปยังขั้วเก็บอนุภาคในที่สุด เช่นเดียวกับการชาร์จประจุให้กับละอองน้ำ และให้ละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้าดึงดูดฝุ่นละออง และตกลงสู่ขั้วเก็บในลักษณะคล้ายกัน

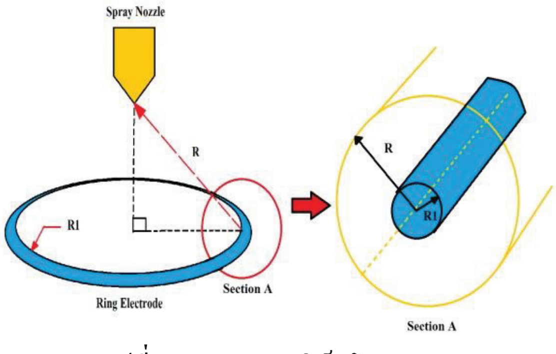
ค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนาสามารถคำนวณได้ดังนี้ [8]

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0 ZV(V - V_c)}{R^2 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right)} \quad (3)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาจะคำนวณได้จาก [9]

$$V_c = E_b \times R_1 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right) \quad (4)$$

การสร้างสนามไฟฟ้าจะต้องป้องกันการเกิด Electrical Breakdown ในการศึกษาครั้งนี้ลักษณะอิเล็กโทรดจะเป็นแบบวงแหวนซ้อนแกนร่วม ดังนั้นจึงต้องหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับหัวฉีดให้เหมาะสม เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นลวดวงแหวนกับระยะทางไปยังหัวฉีด จะเห็นได้ว่าต่างกันหลายเท่าทำให้สามารถมองเส้นลวดเป็นลักษณะของเส้นตรงดังรูปที่ 2 ที่เป็นอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมได้ โดยรัศมีของเส้นลวดคือ R_1 และระยะห่างจากเส้นลวดไปยังหัวฉีดเป็น R



รูปที่ 2 ลักษณะของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ระยะใดๆ จากตัวนำทรงกระบอกด้านใน สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$E_r = \frac{V_{rms}}{R_1 \ln \frac{R}{R_1}} \quad (5)$$

ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 30 kV_{peak}/cm และค่าสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนาของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$E_c = 31 \times \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{R_1}}\right) \quad (6)$$

2.2 การคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบ

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้านั้น สามารถเพิ่มโดยต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปที่บริเวณวงแหวนอิเล็กโทรดรอบ ๆ หัวฉีด เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าในการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำ จากนั้นสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้าที่ถูกฉีดออกมา จะไปจับกับอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่มีการการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำนั้น สามารถคำนวณได้ดังสมการ [8]

$$\eta \cong 1 - \exp\left(-\frac{4K_c C_c q_p q_d N_d}{3\mu_g d_p} t_p\right) \quad (7)$$

โดยค่า N_d ในสมการหาประสิทธิภาพการดักจับคือ ค่าความเข้มข้นของละอองน้ำ (drop/m^3) สามารถคำนวณได้จาก [8]

$$N_d = \frac{450Q \ln(t_d)/\pi d_d^{\,3}}{H_s \pi D_s^2 / 4} \quad (8)$$

ในส่วนของการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจากการทดสอบ จะนำค่าการวัดผลโดยการชั่งน้ำหนักของปริมาณอนุภาคที่เกาะบนแผ่นกรอง มาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงมวล โดยการคำนวณประสิทธิภาพเชิงมวลดังสมการ

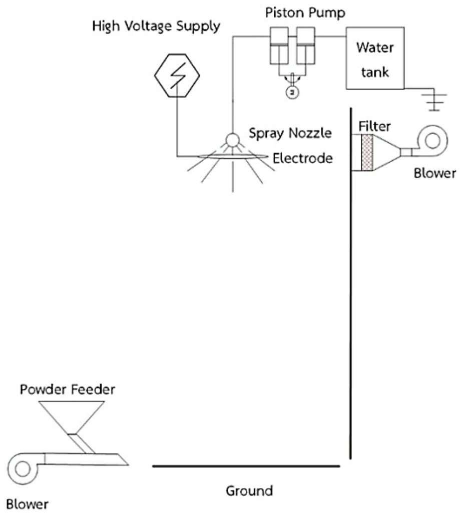
$$\eta_w = \frac{m_d - m_f}{m_d} \times 100\% \quad (9)$$

ค่า m_d และ m_f เป็นค่าที่ได้จากการวัดน้ำหนักรวมอนุภาคของฝุ่นละอองที่ถูกดักจับด้วยแผ่นกรองอากาศ ซึ่งจะต้องผ่านการอบไล่ความชื้นทุกครั้งก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

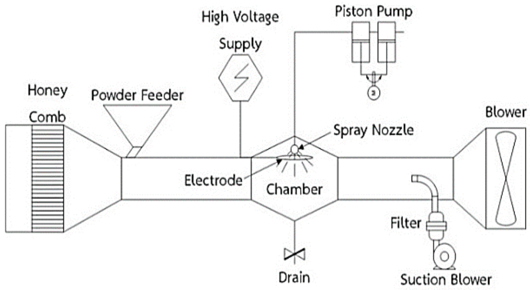
การทดสอบในห้องทดสอบ ขนาด 3 m x 2 m x 2 m เพื่อหาประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ภายในห้องทดสอบ โดยสนใจตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค คือ แรงดันฟ้าที่ชาร์จให้กับสเปรย์น้ำ และระยะเวลาในการฉีดสเปรย์น้ำ มีระบบการทดสอบดังรูปที่ 3

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากเตรียมอนุภาคแป้งฝุ่นและฝุ่นถ่านหิน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 0.5 - 60 μm และ 0.5 - 132 μm ตามลำดับ โดยอนุภาคฝุ่นทั้งคู่ใช้ปริมาณ 20 g และ 30 g เป่าอนุภาคให้ฟุ้งในห้องทดสอบ เป็นระยะเวลา 40 sec จากนั้นฉีดละอองน้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าขนาด 5 kV ที่อัตราการไหล 3.22 ml/sec เป็นระยะเวลา 150-600 sec ปล่อยให้ละอองน้ำตกพื้นเป็นระยะเวลา 30 sec แล้วดูดฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่เป็นระยะเวลา 30 sec นำแผ่นกรองมาชั่งน้ำหนักบันทึกผลและคำนวณหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 ระบบการทดสอบในห้องทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาค จะทดสอบในอุโมงค์ลมดังรูปที่ 4 ในกรณีนี้จะใช้แป้งฝุ่นเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้งและฝุ่นถ่านหินไม่แตกต่างกัน และมีความเสถียรของอนุภาคฝุ่น [10]โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือไม่ฉีดสเปรย์น้ำ, ฉีดสเปรย์น้ำที่ไม่มีสนามไฟฟ้า และฉีดสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้า



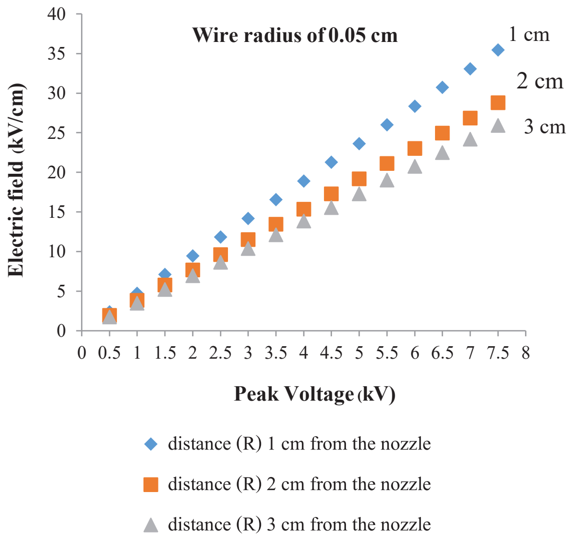
รูปที่ 4 ระบบการทดสอบในอุโมงค์ลม

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากเทแป้งฝุ่นลงบนตัวโปรยแป้ง 30 g และติดตั้งแผ่นกรอง เปิดสวิตซ์พัดลมอุโมงค์ลม แล้วเปิดสวิตซ์เครื่องเขย่าโปรยแป้งและสวิตซ์พัดลมดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง รอจนแป้งทั้งหมดโปรยลงสู่อุโมงค์ลม ปิดสวิตซ์พัดลมดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง และเครื่องเขย่า แล้วถอดเอาแผ่นกรองออกมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ โดยกรณีที่มีการฉีดละอองน้ำ ต้องมีการอบไล่ความชื้นในแผ่นกรองก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การเลือกระยะห่างอิเล็กโทรดของชุดหัวฉีดที่ออกแบบ

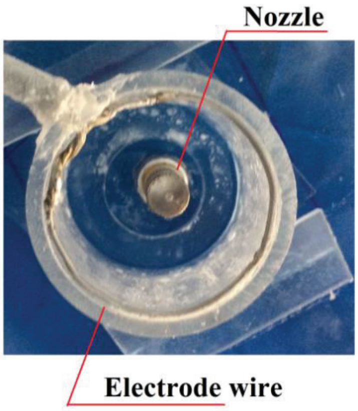
ชุดหัวฉีดได้ลักษณะและรูปแบบที่เหมาะสมของอิเล็กโทรดตามแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการชาร์จละอองน้ำให้มีประจุไฟฟ้า โดยลักษณะของเส้นลวดมีรัศมีขนาด 0.05 cm (R_1) เป็นแบบวงแหวน โดยใช้หลักการของอิเล็กโทรดแบบวงแหวนซ้อนแกนร่วมที่ระยะห่างจากหัวฉีดใดๆ และเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0.5-7.5 kV จะเกิดค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 5 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับวงแหวน

จากรูปที่ 5 พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 7.5 kV_{peak} เมื่อวางลวดวงแหวนห่างจากหัวฉีด 1 cm ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเป็น 35.4 kV/cm ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิด break down ดังนั้นในการทดสอบนี้เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่สูงสุดและไม่เสี่ยงต่อการเกิด break down จึงวางลวดวง

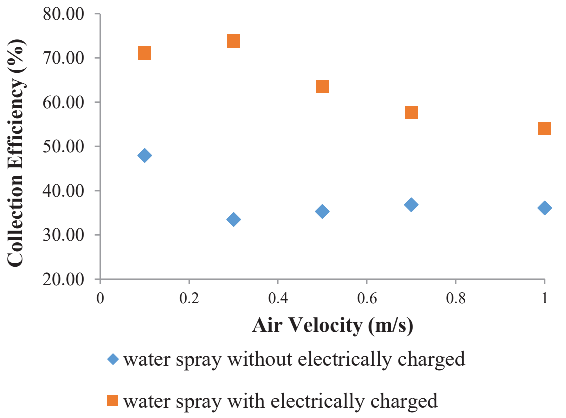
แหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 cm ห่างจากหัวฉีดเป็นระยะ 2.2 cm (*R*) ได้ลักษณะชุดหัวฉีดที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดหัวฉีดในการทดสอบ

4.2 ผลจากความเร็วของอากาศในอุโมงค์ลม

การทดสอบอิทธิพลของความความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาค ด้วยการสเปรย์น้ำและการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำ ในการทดสอบจะทำการสร้างข้อมูลเปรียบเทียบเบื้องต้น ซึ่งเกิดจากการเก็บข้อมูลผลต่างของน้ำหนักแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ โดยข้อมูลอ้างอิงนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลต่างของน้ำหนักแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ ในกรณีที่ทำการสเปรย์น้ำและกรณีที่ทำการสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 7.5 kV_{peak} จำนวนอนุภาคฝุ่นที่ใช้ในการโปรยลงสู่อุโมงค์ลมจำนวน 50 g โดยโปรยอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าในช่องโปรยแป้งในรูปที่ 4 ที่มีช่องกว้างเท่ากันตลอดความกว้างของอุโมงค์ลม โดยเขย่าในอัตราคงที่เป็นเวลา 3 นาที (อัตราการโปรยแป้ง 15 g/min) และความเร็วของอากาศที่ใช้ดูดตัวอย่างอนุภาคฝุ่นที่แขวนลอยในอากาศด้วยความเร็ว 8.5 m/s จากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคตามความเร็วของอากาศผสมอนุภาคฝุ่น ที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงไป

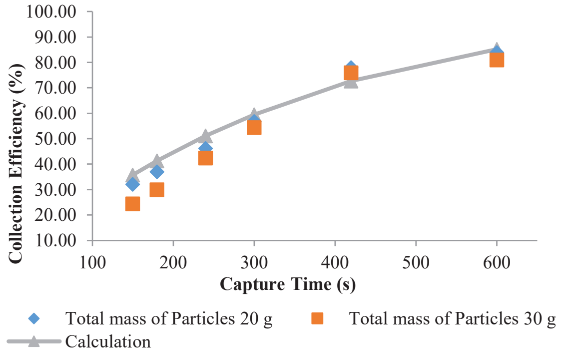
จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 0.1-0.3 m/s (3000 < Re <10,000) จะเป็นช่วงของการไหลแบบ Transitional ที่จะเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นช่วงที่ความการไหลต่ำ พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้งที่ใช้ทดสอบของวิธีการสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการสเปรย์น้ำธรรมดา โดยที่การวิธีการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 70 ส่วนการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาอยู่ที่ร้อยละ 35 ที่ความเร็ว 0.3 m/s ซึ่งที่ความเร็ว 0.1 m/s การสเปรย์ของน้ำแบบธรรมดาจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ความเร็ว 0.3 m/s เนื่องมาจากผลของการสเปรย์น้ำในอุโมงค์ลมจะเป็นตัวกั้นการไหลของอนุภาคฝุ่นไปตามการไหลของอากาศทำให้อนุภาคฝุ่นที่ไหลไปยังแผ่นกรองมีน้อยลงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่วนในการทดสอบที่ค่าความเร็วของอากาศเข้าสู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ที่ช่วงความเร็ว 0.3-1 m/s (Re >10,000) ประสิทธิภาพของการดักอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีการสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพลดลงเข้าหาประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคแบบสเปรย์น้ำธรรมดา แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

วิธีการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาโดยเฉลี่ย ประมาณร้อยละ 20

4.3 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการดักจับด้วยสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าในห้องทดสอบ

4.3.1 การทดสอบผลการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้งตามระยะเวลาในการสเปรย์น้ำ

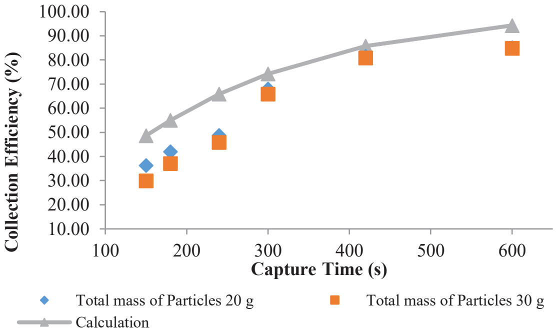
เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ 5 kV_{peak} ในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้ง ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 85.20% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 49.35% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแป้งในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV_{peak}

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 8 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 83.88% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 51.74% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 30 g ที่เวลา 600 s เป็น 81.03% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 56.59% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ 7.5 kV_{peak} ในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้ง ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 94.30% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 45.67% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 9

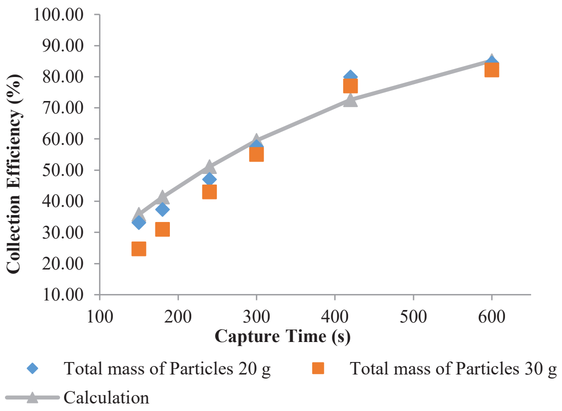


รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแป้งในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 7.5 kV_{peak}

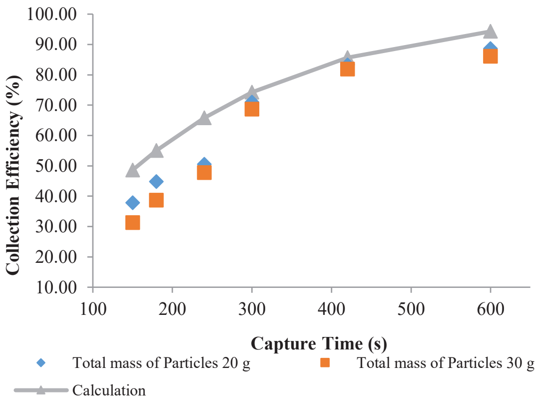
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 9 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 85.11% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 48.80% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 30 g ที่เวลา 600 s เป็น 84.80% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 54.94% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

4.3.2 การทดสอบผลการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินตามระยะเวลาในการสเปรย์น้ำ

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ 5 kV_{peak} ในการดักจับอนุภาคถ่านหิน ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 85.20% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 49.35% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นถ่านหินในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV_{peak}



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นถ่านหินในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 7.5 kV_{peak}

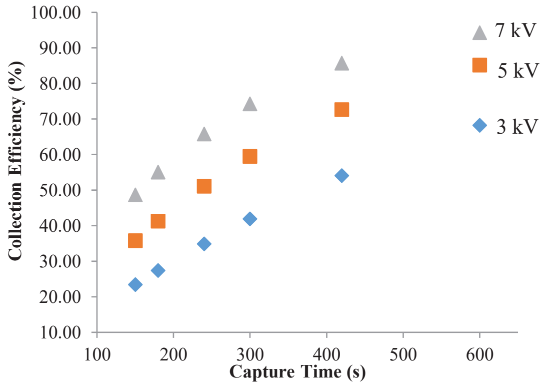
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 84.42% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 51.26% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 30 g ที่ระยะเวลา 600 s เป็น 82.10% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 57.43% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ 7.5 kV_{peak} ในการดักจับอนุภาคถ่านหิน ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 94.30% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 45.67% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 11

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 88.59% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 50.73% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 30 g ที่ระยะเวลา 600 s เป็น 86.10% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 54.79% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

จากผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพในการดักจับจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการดักจับจากการทดสอบจริง เมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะละอองน้ำที่มีสนามไฟฟ้าสามารถดักจับอนุภาคฝุ่นได้อย่างต่อเนื่องในระยะเวลาที่สูงขึ้น

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบจากการคำนวณที่ปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จที่ให้กับละอองน้ำ ณ ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจาก 150 s – 600 s ดังรูปที่ 12 เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำ



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพการดักจับในห้องทดสอบจากการคำนวณกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำ

จากรูปที่ 12 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำและระยะเวลาในการฉีดพ่นละอองน้ำที่เพิ่มขึ้น เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเกิน 600 s ค่าประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่

5. สรุปผลการวิจัย

- ชุดหัวฉีดมีเส้นลวดรัศมี 0.05 cm (R_1) ทำเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm อิเล็กโทรดแบบซ้อนแกนร่วมวางห่างจากหัวฉีด 2.2 cm (R) สามารถรับแรงดันสูงสุดที่ 7.5 kV_{peak} และไม่เสี่ยงต่อการเกิดการลัดวงจรในอากาศ
- การทดสอบในอุโมงค์ลมที่ความเร็วอากาศ 0.1-0.3 m/s ประสิทธิภาพในการดักจับของวิธีการฉีดสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงถึง 70% ส่วนการฉีดละอองน้ำแบบธรรมดาอยู่ที่ 35% และในการทดสอบที่ค่าความเร็วของอากาศเข้าสู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงความเร็ว 0.3-1 m/s ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีการฉีดสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า จะมีค่าค่อยๆลดลง แต่ประสิทธิภาพในการดักจับก็ยังสูงกว่าวิธีการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาเฉลี่ยประมาณ 20%
- การทดสอบในห้องทดสอบพบว่าปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับคือแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการฉีดสเปรย์น้ำ โดยที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 s เท่ากับ 84.42% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 57.43% จากที่ระยะเวลา 150 s และที่แรงดันไฟฟ้า 7.5 kV_{peak} ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 s เท่ากับ 88.59% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 50.73% จากที่ระยะเวลา 150 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ

6. ข้อเสนอแนะ

- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดักจับอนุภาคถ่านหินที่เกิดจากการฟุ้งกระจายที่จุดที่มีการขนย้ายถ่านหิน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย รวมไปถึงอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

8. รายการสัญลักษณ์

ε	คือ ค่าคงที่ของความเป็นฉนวนในอากาศ (มีค่า 1.00059)
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จประจุ (kV)
V_c	คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรน่า (kV)
E_r	คือ สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จประจุ (kV/m)
e	คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.61x10^{-19} C)
Z	คือ ความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออน (1.15x10^{-4} m^2/Vs)
I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด (A)
R	คือ ระยะสนามไฟฟ้ารอบๆ อิเล็กโทรด (m)
E_r	คือ ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)
E_c	คือ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรน่า (kV/m)
K_c	คือ ค่าคงที่จากสมการคูลอมบ์ (9x10^{-9} Nm^2/C^2)
C_c	คือ ตัวประกอบชดเชยของคันนิงแฮม
q_p	คือ ประจุไฟฟ้าของอนุภาค (C)
q_d	คือ ประจุไฟฟ้าของละอองน้ำ (C)
t_p	คือ เวลาในการดักจับอนุภาค (s)
μ_g	คือ ค่าความหนืดของอากาศ (68x10^{-9} kg/ms)
d_p	คือ ขนาดของละอองน้ำ (m)
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
t_d	คือ เวลาในการฉีดละอองน้ำ (s)

H_s คือ ความสูงของห้องทดสอบ (m)

D_s คือ ความกว้างของห้องทดสอบ (m)

η_w คือ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค

m_d คือ ปริมาณฝุ่นละอองที่แขวนลอยในระบบ (g)

m_f คือ ปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่บนแผ่นกรอง (g)

เอกสารอ้างอิง

[1] พิริยะ ทองเชี่ยว และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การประเมินปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการสันดาปภายในหม้อไอน้ำ เชื้อเพลิง ถ่านหินบดละเอียด. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2010; 17(1): 60-71.

[2] พิพัฒน์พงษ์ วงศ์ไพศาลฤทธิ์ ธรณิศวร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การกำหนดอากาศส่วนเกินเพื่อควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟที่ก่อให้เกิดการหลอมตัวของเถ้า ในหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าถ่านที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2016; 23(2): 81-91.

[3] กรมควบคุมมลพิษ. เกร็ดความรู้เรื่องฝุ่นละออง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, [Online] Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/air_dust.htm, 2559.

[4] ปราโมทย์ เชี่ยวชาญ. สุขศาสตร์อุตสาหกรรม: การควบคุม หน่วยที่ 5 อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาค. ตำราคณะวิทยาศาสตร์สุขภาพมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2554.

[5] Andrew B. C., Andrew D. O., Joseph S., Jay F. C., William R. F., Robert J. F., Jerry J., Randolph R., Patrick W. R., John R. R., and Mark J. S. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. Report of Investigation, 2012: 61-76.

[6] Tran, H., Fujita, H., Nishida, O. and Harano, W. Removal of Fine Particulate Matter (PM) from Boiler Exhaust Gas in Electrostatic Water Spraying Scrubber. *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 2010; 45: 968-973.

[7] รัชมลคง ศรีวิภาต อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของสครับเบอร์แบบสเปรย์น้ำ. การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15, 30-31 มีนาคม 2559, สุราษฎร์ธานี.

[8] Luca D. A. Wet electrostatic scrubbing for high efficiency submicron particle capture. Philosophy Doctor Dissertation, Department of Chemical Engineering, Universita' Federico II di Napoli, 2011.

[9] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ตำราภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[10] Asanakham A., Sriwiphat R., and Kiatsiriroat T. Increase of Fine Particle Precipitation by AC Electrical-Charged Mist. The International Conference on Advanced Manufacturing Technology and Applied Energy 2016 (AMTAE 2016), August 22-23, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบ

กรณีใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 5 kV$_{peak}$ ชาร์จให้กับสเปรย์น้ำที่ระยะเวลา 600 s

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ศึกษา

พารามิเตอร์ศึกษา	ปริมาณที่ศึกษา
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)	$5kV$
รัศมีเส้นลวดอิเล็กโทรด (R_1)	$0.05\ cm$
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับหัวฉีด (R)	$2\ cm$
ε_0	$8.854\times10^{-12}\ F/m$
Z	$0.000115\ m^2/Vs$
อัตราการไหลของอากาศ (Q)	$0.0005\ m^3/s$
e (electron)	$1.61\times10^{-19}\ C$
Dielectric Constant (3)	1
ขนาดหยดน้ำ (d_d)	$0.00035\ m$
Constant Proportionality (K_c)	$8.99\times10^9\ Nm^2/C^2$
Droplet Resident Times (t_d)	$600s$
Particle Resident Times (t_p)	$640s$
Room High (H_s)	$2m$
Room Wide (D_s)	$2m$
Particle Charging (q_d)	$4.1\times10^{-16}\ C$
Gas Viscosity (μ_g)	$0.0000186\ kg/ms$
Particle Diameters (d_p)	$0.00001\ m$
Mean free path of air (λ_a)	0.000000068

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ $V_{rms} = V/\sqrt{2} = 5/\sqrt{2} = 3.53kV_{rms}$

คำนวณค่าสนามไฟฟ้า $E_r = \dfrac{V_{rms}}{R_1 \ln(\frac{R}{R_1})} = \dfrac{3.53}{(0.05)\ln(\frac{2}{0.05})} = 19.14kV_{rms}/cm$

คำนวณสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรน่า $E_c = 31\times(1+\dfrac{0.308}{\sqrt{R_1}}) = 31\times(1+\dfrac{0.308}{\sqrt{0.05}}) = 73.70kV_{rms}/cm$

คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรน่า $V_c = E_c r_1 \ln(\dfrac{R}{R_1}) = (73.70)(0.05)\ln(\dfrac{2}{0.05}) = 13.6kV$

คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรน่า

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0 ZV(V-V_c)}{R^2 \ln(\frac{R}{R_1})} = \frac{(8)(3.14)(8.854\times10^{-12})(0.000115)(3.53)(3.53-13.6)}{(2^2)\ln(\frac{2}{0.05})} = -6.16\times10^{-14} A$$

คำนวณค่าผลคูณของค่าความเข้มข้นไอออนกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ

$$N_t = \frac{I(R^2 - R_1^2)}{2rZeE_rQ} = \frac{(-6.16\times10^{-14})(2^2 - 0.05^2)}{(2)(2)(0.000115)(1.61\times10^{-19})(19.14)(0.0005)} = -3.5\times10^{11} s/m^3$$

คำนวณค่าการอัดประจุ

$$q_p = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2}\right)\left(\frac{E_r d_d^2}{4K_c e}\right)\left(\frac{\pi K_c eZN_t}{1+\pi K_c eZN_t}\right)$$

$$= \left(\frac{(3)(1)}{1+2}\right)\left(\frac{(19.14)(0.00035^2)}{(4)(8.99\times10^9)(1.61\times10^{19})}\right)\left(\frac{(3.14)(8.99\times10^9)(1.61\times10^{19})(0.000115)(-3.5\times10^{11})}{1+(3.14)(8.99\times10^9)(1.61\times10^{19})(0.000115)(-3.5\times10^{11})}\right)$$

$$= 6.522\times10^{-17} C$$

คำนวณค่าตัวประกอบชดเชยของคันนิงแฮม

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_a}{d_p}\left(1.257 + 0.4\exp\left(-\frac{1.1d_p}{2\lambda_a}\right)\right)$$

$$= 1 + \frac{(2)(0.000000068)}{0.00001}\left(1.257 + (0.4)\exp\left(-\frac{(1.1)(0.00001)}{(2)(0.000000068)}\right)\right) = 1.0170952$$

คำนวณค่าความเข้มข้นของละอองน้ำ

$$N_d = \frac{450Q\ln(t_d)/\pi d_d^3}{H_s\pi D_s^2/4} = \frac{((450)(0.0005)\ln(600))/(3.14)(0.00035^3)}{((2)(3.14)(2^2))/4} = 1702396306 drop/m^3$$

คำนวณค่าประสิทธิภาพในการดักจับ

$$\eta \cong 1 - \exp\left(-\frac{4K_c C_c q_p q_d N}{3\mu_g d_p} t_p\right)$$

$$\cong 1 - \exp\left(-\frac{(4)(8.99\times10^9)(1.0170952)(6.522\times10^{-17})(4.1\times10^{-16})(1702396306)}{(3)(0.0000186)(0.00001)}(640)\right)$$

$$\cong 0.852 \cong 85.20\%$$