

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต :
ส่วนที่ 2 ผลกระทบของความต่างศักย์

The Soot Particles Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator

Part II: The Effect of Voltage

นฤปดี ศรีสังข์¹ จรัสชัย เย็นพยับ² พีระพงศ์ ทีฆสกุล³ และ วชร กาลาสี⁴

^{1,4}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, ²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (วิทยาเขตชุมพร) อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160 โทรศัพท์ 0-7750-6434 โทรสาร 0-7750-6434 Email: kkwachar@kmitl.ac.th⁴

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
โทรศัพท์ 0-7428-7035 โทรสาร 0-7421-2893 Email: perapong.t@psu.ac.th³

N. Srisang¹, C. Yenphayab², P. Tekasakul³ and W. Kalasee⁴

^{1,4}Department of Mechanical Engineering, ²Department of Agricultural Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, Pathiu, Chumphon 86160 Tel: 0-7750-6434 Fax: 0-7750-6434
Email: kkwachar@kmitl.ac.th⁴

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkla 90112
Tel: 0-7428-7035 Fax: 0-7421-2893 Email: perapong.t@psu.ac.th³

บทคัดย่อ :

บทความนี้ได้นำเสนอผลกระทบของความต่างศักย์ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีท่อสแตนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคและมีลวดทองแดงที่อยู่กลางท่อทำหน้าที่เป็นขั้วโคโรนาถ่ายประจุให้กับอนุภาค ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ออกแบบไว้จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้ทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, อนุภาคเขม่าควัน, ความต่างศักย์

Abstract:

This paper presents the effect of an Electrostatic Precipitator (ESP) voltage on soot particles collection efficiency. The single state wire-cylinder ESP with used stainless steel for a collection electrode and used wire copper for a discharge electrode. It was found,

the efficiency of the ESP design for collection the soot particle was high when the ESP voltage was increased.

Keyword: Electrostatic precipitator, soot particle, voltage

1. บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้กำจัดอนุภาคอย่างแพร่หลาย ทั้งจากฝุ่นละอองที่ผสมมากับควันไฟ, เขม่าควันจากการเผาไหม้ไม้ฟืน [1] เขม่าควันของบุหรี [2] เขม่าควันจากท่อแก๊สไอเสียจากเครื่องยนต์ [3] เขม่าควันจากหม้อไอน้ำ (Boiler) และอนุภาคจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ฝุ่นและฝุ่นแป้ง เป็นต้น

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสามารถแบ่งตามวิธีการใส่ประจุได้เป็นสองแบบใหญ่ คือแบบชั้นเดียว (one-stage type) และแบบสองชั้น (two-stage type) โดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบชั้นเดียวนี้ การใส่ประจุให้อนุภาคฝุ่นและการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุจะกระทำในสนามไฟฟ้าชั้นเดียวกัน เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบนี้มีใช้กันอย่าง

กว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ และชีวโคโรนา (ชีวเส้นลวด) มักจะเป็นขั้วลบเนื่องจากการใส่ประจุให้กับอนุภาคในภาคปฏิบัติจะได้ผลดีกว่ากรณีที่ชีวโคโรนาเป็นขั้วบวก ส่วนเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสองชั้น การใส่ประจุให้อนุภาคฝุ่นและการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุจะกระทำในสนามไฟฟ้าที่แยกต่างหากกัน โดยทั่วไปเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบนี้จะใช้เป็นเครื่องทำความสะอาดอากาศ (air cleaner) เพื่อทำความสะอาดอากาศที่มีอนุภาคละเอียดผสมอยู่ในความเข้มข้นต่ำ และมักใช้ขั้วบวกเป็นชีวโคโรนาเพื่อป้องกันการเกิดแก๊สอันตราย เช่น โอโซน เป็นต้น

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสามารถแบ่งตามกระบวนการใส่ประจุได้เป็น 2 ชนิด คือเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่มีชีวโคโรนาเป็นขั้วบวก (Positive corona) และชนิดชีวโคโรนาเป็นขั้วลบ (Negative corona)

ความต่างศักย์จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควัน, การใช้พลังงานไฟฟ้า และระยะเวลาการใช้งานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นั้น จะทำให้สามารถแบ่งชนิดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีชีวโคโรนาเป็นขั้วลบ (Type of negative corona) ได้เพิ่มขึ้นอีก 3 ชนิด คือ Trichel pulse corona, Pulseless corona และ Spark [4]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีท่อสแตนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคและมีลวดทองแดงที่อยู่กลางท่อทำหน้าที่เป็นชีวโคโรนาถ่ายประจุให้กับอนุภาค

2. ทฤษฎี

2.1 สนามไฟฟ้า (Electric field) มีบทบาทสำคัญในกระบวนการตกตะกอนเพราะสนามไฟฟ้ามีผลทั้งต่อการใส่ประจุให้กับอนุภาคและต่อแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่ได้รับประจุแล้ว ซึ่งผลคูณระหว่างความแรงของสนามไฟฟ้าในย่านที่เกิดการใส่ประจุกับความแรงของสนามไฟฟ้าใกล้ขั้วเก็บจะเป็นตัวที่กำหนดประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาค ในกรณีของระบบขั้วแบบเส้นลวดและแผ่นทรงกระบอกที่มีแนวกลางร่วมกัน ความแรงของสนามไฟฟ้าที่ระยะรัศมีใด ๆ $E(r)$ สามารถคำนวณได้จาก [5]

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (1)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของเส้นลวดโคโรนา (m)

b คือ ระยะห่างระหว่างชีวโคโรนาและขั้วเก็บ (m)

r คือ ระยะรัศมี (m)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใส่ (V)

$E(r)$ คือ ความแรงของสนามไฟฟ้า (V/m)

2.2 การใส่ประจุให้อนุภาค เป็นเงื่อนไขพื้นฐานข้อหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยปกติถือว่าการใส่ประจุเกิดขึ้นในย่านระหว่างขอบนอกของแสงเรืองโคโรนากับขั้วเก็บ ซึ่งภายในย่านนี้อนุภาคจะถูกชนโดยไอออนจำนวนมากมหาศาลที่เกิดจากปรากฏการณ์โคโรนา [5,6] ซึ่งการใส่ประจุให้กับอนุภาคเกิดขึ้น 3 วิธีคือ

1. การใส่ประจุโดยสนามไฟฟ้า (Field charging) เกิดจากอนุภาคที่รับประจุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 0.5 ไมโครเมตร ทำให้เกิดการแปรโณมเฉพาะถิ่น (local deformation) ของสนามไฟฟ้าในลักษณะที่สนามไฟฟ้าวิ่งตัดกับอนุภาค เนื่องจากไอออนซึ่งเคลื่อนที่ตามเส้นสนามไฟฟ้าจะกระทบกับอนุภาคและถูกจับยึดด้วยแรงของประจุจินตภาพ (image charge force) เมื่อจำนวนไอออนที่กระทบกับอนุภาคได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นสนามไฟฟ้าเดิม ทำให้เส้นสนามไฟฟ้าเหล่านี้ไม่วิ่งตัดกับอนุภาคอีกต่อไป สภาวะนี้เกิดขึ้นนี้ทำให้ไอออนจะไม่กระทบกับอนุภาคอีกและจะไม่เกิดการเพิ่มของประจุบนอนุภาคอีก ซึ่งวิธีการใส่ประจุแบบนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การใส่ประจุที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า (field dependent charging)

2. การใส่ประจุโดยการแพร่ (Diffusion charging) เป็นกลไกที่ใส่ประจุให้อนุภาคโดยการสัมผัสและการเกาะติดของไอออน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่อย่างไม่มีกฎเกณฑ์เชิงความร้อน (thermal random motion) โดยมักเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร ซึ่งการใส่ประจุโดยการแพร่นี้จะขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าด้วย เพราะการเคลื่อนไหวของไอออนย่อมขึ้นกับทั้งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตและแรงของการแพร่

3. การใส่ประจุโดยทั้งสนามไฟฟ้าและการแพร่ มักเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.2 ไมโครเมตร ถึง 0.5 ไมโครเมตร

3. การทดสอบ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าโคโรนากับค่าความต่างศักย์ทุติยภูมิในรูปที่ 1 ทำให้ทราบค่าความต่างศักย์ Onset และความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในการศึกษาผลกระทบของความต่างศักย์ที่มีต่อ

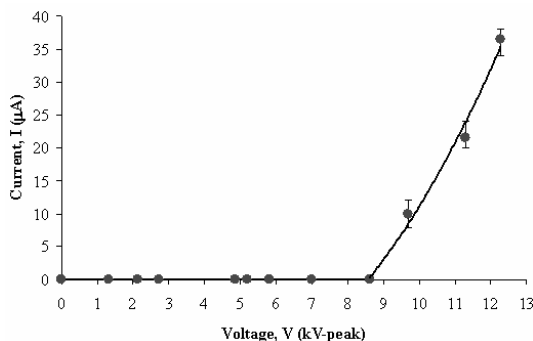
ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่ออกแบบไว้ได้ทำการศึกษาที่ค่าความต่างศักย์ทุติยภูมิ 2.1 kV, 4.9 kV และ 5.8 kV ในกรณี Trichel pulse corona และที่ 8.6 kV (จุด Onset), 9.7 kV และ 12.3 kV ในกรณี Pulseless corona ซึ่งสามารถทำได้โดย

1. ทำการติดตั้งเครื่องมือและเครื่องมือตั้งรูปที่ 2
2. ตรวจสอบการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ หลังจากนั้นทำการเปิดปั๊มสุญญากาศ โดยตั้งอัตราการไหลที่ 20 ลิตรต่อนาที
3. เดินเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ข้างต้น
4. เมื่อครบ 30 นาที ทำการปิดปั๊มสุญญากาศและนำกระดาษกรองออกจาก Filter holder และเก็บกระดาษกรองในกล่องปิดสนิทที่มีวัสดุดูดความชื้น (silica gel) เพื่อดูดความชื้นออกจากกระดาษกรองทั้ง 2 ชุด ซึ่งชุดแรก คือชุดสำหรับหาปริมาณของอนุภาคเขม่าควันทั้งหมด ส่วนชุดหลัง คือชุดสำหรับหาปริมาณของอนุภาคเขม่าควันหลังจากถูกดักจับด้วยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต
5. ทำการทดลองต่อไปจนครบ 10 ชั่วโมง
4. นำผลที่ได้มาหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจากสมการ

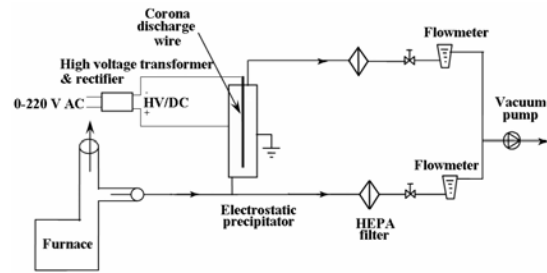
$$Efficiency = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \quad (2)$$

เมื่อ m_1 คือ น้ำหนักของอนุภาคเขม่าควันจากกระดาษกรองชุดที่ไม่ผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

m_2 คือ น้ำหนักของอนุภาคเขม่าควันจากกระดาษกรองชุดที่ผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าโคโรนา กับค่าความต่างศักย์ทุติยภูมิ



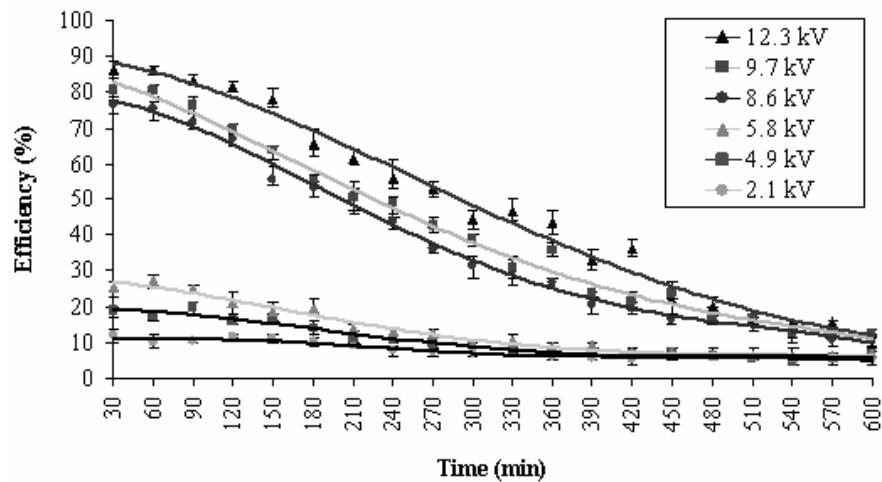
รูปที่ 2 ชุดการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

4. ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผล

เนื่องจากความแตกต่างของค่าของความต่างศักย์ในการใช้งานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควัน ซึ่งจากการศึกษาข้างต้นพบว่าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวที่มีขั้วโคโรนาเป็นขั้วลบ (Type of negative corona) สามารถแบ่งชนิดได้เป็น Trichel pulse corona, Pulseless corona และ Spark แต่ในช่วง Spark การทดสอบค่อนข้างยุ่งยากและอาจเป็นอันตรายได้ประกอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ไม่สามารถแปลงความต่างศักย์ให้สูงถึงช่วง Spark ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจทดสอบผลกระทบของความต่างศักย์ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชั้นเดียวในช่วงของ Trichel pulse corona และ Pulseless corona เท่านั้น

4.1 Trichel pulse corona

Trichel pulse corona เป็นช่วงของการดักจับอนุภาค (Aerosol) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่เริ่มต้นเมื่อเกิดค่าสนามไฟฟ้าสถิต (เกิดความต่างศักย์) รอบ ๆ ตัวของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งถึงค่าความต่างศักย์สูงเริ่มต้นการใช้งาน (High voltage onset) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ด้วย โดยที่ค่าความต่างศักย์สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคมากกว่าที่ค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าดังรูปที่ 3 โดยประสิทธิภาพเริ่มต้นของการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในช่วง 30 นาทีแรก มีค่าประมาณ 25%, ประมาณ 20% และประมาณ 10% ที่ค่าความต่างศักย์ 5.8 kV, 4.9 kV และ 2.1 kV ตามลำดับ จากนั้นเมื่อระยะเวลาการใช้งานของ



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการ ดักจับอนุภาคจะลดลง เนื่องจากพื้นผิวของขั้วเก็บอนุภาคถูกอนุภาคเขม่าควันเกาะติดอยู่ ทำให้พื้นผิวของขั้วเก็บอนุภาคไม่สะอาดเช่นเดิม โดยในกรณีที่ความต่างศักย์ 5.8 kV นั้นจะมีการลดลงของประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันมากกว่ากรณีที่ความต่างศักย์ 4.9 kV และ 2.1 kV ตามลำดับ เนื่องจากประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในช่วงแรกมีค่าสูงมากกว่า จึงเป็นสาเหตุให้มีอนุภาคเขม่าควันเกาะติดอยู่บนผิวขั้วบวกได้มากกว่าทำให้ค่าของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย จนในที่สุดก็จะไม่เกิดการดักจับอนุภาคโดยใช้สนามไฟฟ้า แต่จะเป็นการดักจับแบบการชน (Impaction) แทน โดยสังเกตได้จากประสิทธิภาพการดักจับสุดท้าย (10 ชั่วโมง) จะมีค่าใกล้เคียงกันของความต่างศักย์ทั้ง 3 ค่า คือประมาณ 5%

4.2 Pulseless corona

Pulseless corona เป็นช่วงของการดักจับอนุภาค (Aerosol) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่เริ่มต้นจากค่าความต่างศักย์สูงเริ่มต้นการใช้งาน (High voltage onset) จนกระทั่งถึงจุดที่เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเกิดการ Spark จากการศึกษพบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ โดยที่ค่าความต่างศักย์สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคมากกว่าที่ค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าและมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในกรณี Trichel pulse corona ดังรูปที่ 3 โดยประสิทธิภาพเริ่มต้นของการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในช่วง 30 นาทีแรก มีค่าประมาณ 90%, ประมาณ 80% และประมาณ

75% ที่ค่าความต่างศักย์ 12.3 kV, 9.7 kV และ 8.6 kV ตามลำดับ โดยค่าความต่างศักย์ทั้งหมดในช่วงนี้จะทำให้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากเหตุผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะเพิ่มขึ้นสูงมาก เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้งานผ่านค่า Onset ดังนั้นจึงอาจจะสามารถประมาณการได้ว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ผ่านจุดสูงสุดในช่วง Pulseless corona เข้าสู่ช่วง Spark แล้ว ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตน่าจะมีค่าลดลง

5. บทสรุป

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดชนิดขึ้นเดียวที่ออกแบบไว้ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้งานอยู่ในช่วง Trichel pulse corona และ Pulseless corona โดยที่ค่าความต่างศักย์สูงสุดในช่วงของ Pulseless corona นั้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีค่ามากที่สุด ก่อนที่ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีค่าลดลงไปเมื่อความต่างศักย์เข้าสู่ช่วง Spark

6. เอกสารอ้างอิง

1. Kalasee, W; Tekasakul, S; Otani, Y; and Tekasakul, P. 2003. "Characteristics of Soot Particles Produced from Rubberwood Combustion", The 2nd Asian Particle Technology Symposium (APT 2003), Volume II, December 17-19, 2003., Penang, Malaysia.

2. Otani, Y.; Namiki, N.; Yen, C.-M. and Emi, H. 1993. "Simultaneous removal of particulate and gaseous cigarette smoke components by corona discharge" Japan: Journal of aerosol research.
3. Kubo, T; Kawada, Y; Takahashi, T; Ehara, Y; Ito, T; Zukeran, A. and Takamatsu, T. 2000. "The relation between shape of particles and collection efficiency by electrostatic precipitators", Journal of aerosol science, Volume 31, Supplement 1, pp. 452-453
4. Chang, Jen-Shih; Lawless, Phil A. and Yamamoto, T. 1991. "Corona discharge processes", IEEE Transactions on plasma science, Volume 19, Issue 6, pp. 1152-1166.
5. Hinds, W.C. 1999. "Aerosol technology", New York: John Wiley & Sons, 2nd ed.
6. ชีคาโอะ คานาโอกะ และ วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. 2528. "มลภาวะทางอากาศ", กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
7. วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และ ชีระ เกรอด. 2529. "มลภาวะทางอากาศ", กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.