

ผลของตำแหน่งอิเล็กโตรดที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลเพื่อเพิ่มอัตราการ อบแห้งแบบลมร้อนด้วยแรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิค Effect of Electrode Placement on Flow pattern Enhancing Hot-Air Drying Rate with Electrohydrodynamic Force

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{*}, ทศพร กลิ่นมาลี, พัชรพล สังข์สุขศิริกุล, วีรวัฒน์ นุ่นสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120 Chainarong Chaktranond^{*}, Tossaphorn Klinmalee, Patcharapol Sungsuksirigul, Weerawat Nunsuwan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Phathum Thani 12120

Received 19 May 2023; Received in revised 19 December 2023; Accepted 25 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะวิเคราะห์ผลของตำแหน่งวางลวดอิเล็กโตรดทั้งทิศตามแนวการไหล (E) และทิศตั้งฉาก กับการไหล (E) ที่ส่งผลต่อการไหลภายใต้แรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิค (electrohydrodynamic force, EHD) เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อน และใช้การจำลองทางตัวเลขในสองมิติเพื่ออธิบายผลของรูปแบบการไหลของ กระแสลมที่ถูกขับเคลื่อนโดยสนามไฟฟ้าต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (DR) ในชุดการทดสอบลวดอิเล็กโตรด 4 เส้นถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหล และลวดกราวด์ 2 เส้นซึ่งมีความยาวเท่ากับแพคเบดถูกวางในแนวขนานกับ การไหลเหนือผิวหน้าของแพคเบด ความเร็วลม และอุณหภูมิของลมที่ทางเข้าหน้าตัดทดสอบมีค่าเฉลี่ยที่ 0.33 m/s และ 60°C ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 20 kV แพคเบดมีค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นที่ *S*_{int} = 0.5 เวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ช่วยเพิ่มการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบดแม้ใช้ลมเพียง อย่างเดียว เมื่อใช้ลมร้อนร่วมกับแรง EHD ทำให้ DR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.4 – 2.2 เท่าของการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ค่า DR จะสูงเมื่อ E_s อยู่ค่อนไปทางปลายด้านหน้าของแพคเบด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ E_s อยู่ค่อนไปทางปลายด้าน หลังมากยิ่งขึ้น ผลจากการจำลองการไหลพบว่าผลของแรง EHD ทำให้เกิดลมหมุนวนที่ด้านหน้าของอิเล็กโตรด และ ทำให้กระแสลมที่ด้านหลังของลมหมุนวนมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น แต่ด้วยการเกิดลมหมุนวนทำให้กระแสลมด้านหน้า ลมหมุนวนมีความเร็วต่ำ ดังนั้นเมื่อ E_s อยู่ค่อนไปทางปลายด้านหลังมากขึ้นตำแหน่งของลมหมุนวน และกระแสลม ที่มีความเร็วสูงจะเกิดค่อนไปทางด้านหลังมากขึ้น เนื่องจากแรง EHD จะน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และกราวด์มากขึ้น ดังนั้นที่ E_y > 4 cm ค่า DR มีแนวโน้มที่จะลดลง แต่เมื่อ E_y = 2 cm แรง EHD จะเหนี่ยวนำเฉพาะ ชั้นกระแสลมที่มีอุณหภูมิต่ำ และใกล้ผิวให้เคลื่อนที่ไปยังผิวแพดเบดทำให้อุณหภูมิแพคเบดไม่เพิ่มสูงขึ้นมากนัก

คำสำคัญ: แรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิค; วัสดุพรุน; การอบแห้งแบบลมร้อน

Abstract

This research aims to elucidate the effect of electrode placement both in the flow direction (E_x) and normal to the flow direction (E_y) on airflow subjected to electrodynamic force (EHD) enhancing hot-air drying rate. Additionally, numerical simulations of two-dimensional fluid flow with EHD force are conducted to explore the effect of electrically-driven flow patterns on enhancing the drying rate (DR). In the experimental setup, four electrode wires are suspended perpendicularly from the upper wall of the wind tunnel, while two ground wires, having the same length as the packed bed, are positioned above the packed bed surface and aligned parallel to the flow. At the inlet of the test section, the average velocity and temperature of inlet air are controlled at 0.33 m/s and 60°C, respectively. In addition, a high electrical voltage of 20 kV is applied. The initial saturation (S_{int}) of the packed bed is 0.5, and the drying period lasts for 12 hours.

The experimental results indicate that, even in the absence of applied heat, the EHD force can enhance the evaporation of moisture from the packed bed. Moreover, the DR of the hot-air flow with EHD is approximately 1.4 - 2.2 times higher than that without EHD. Higher DRs are observed when E_x is positioned near the front end of packed bed surface, but tend to decrease when E_x is located further downstream. Simulation results illustrate that the effect of EHD force induces vortices in front of the electrodes and also increases the air velocity behind these vortices. However, the occurrence of vortices results in low airflow velocities in their front regions. Consequently, when E_x is increased, vortices and high air velocity manifest further downstream. Moreover, the EHD force weakens as the gap between electrode and ground increases. Therefore, when $E_y > 4$ cm, the DR tends to decrease. However, when $E_y = 2$ cm, the EHD force only influences the low-temperature layer of airstream near the surface, compelling it towards the packed bed surface. As a result, surface temperature is not significantly increased.

Keywords: Electrohydrodynamic force; Porous material; Hot-air drying

1. บทนำ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการนำความขึ้น ออกจากผลิตภัณฑ์ทางเกษตร และอาหารที่นิยมใช้อย่าง แพร่หลายในประเทศไทย แม้ว่าเป็นวิธีที่ง่าย และค่า ก่อสร้างอุปกรณ์ไม่สูง รวมถึงสามารถควบคุมอุณหภูมิ ของผลิตภัณฑ์ขณะทำการอบแห้งได้ง่าย แต่จำเป็นต้อง ใช้เวลานาน ทำให้ต้องใช้พลังงานรวมปริมาณมากเพื่อ การอบแห้ง ด้วยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงหรือแรงอิเล็ก โตรไฮโดรไดนามิค (electrohydrodynamic force, EHD) ร่วมสามารถลดผลของขั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เป็นผล ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณผิวสูงขึ้น และอัตราการอบแห้งสูงขึ้นอย่างมาก [1] ด้วยเหตุนี้ระยะ เวลาการอบแห้ง และพลังงานรวมที่ใช้จึงลดลงอย่างมาก อีกทั้งยังลดผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อน

หลักการการใช้แรง EHD ควบคุมการไหลของ อากาศแสดงดัง Figure 1 เมื่อประจุไฟฟ้าที่สร้างจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยออกจากปลาย ขั้วอิเล็กโตรด อากาศที่อยู่บริเวณปลายขั้วถูกชาร์จ (charged air) ให้มีความเร็วสูงขึ้น และเคลื่อนที่ไปยัง กราวด์ ขณะเคลื่อนที่จะเกิดการชนกับอนุภาคอากาศที่ อยู่รอบ ๆ ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่าง อากาศ นอกจากนี้อากาศรอบ ๆ ที่ไม่ถูกชาร์จ (uncharged air) จะถูกเหนี่ยวนำจากอากาศที่มีความเร็ว สูงด้วยผลการไหลแบบเฉือน (shear flow) ทำให้เกิด กระแสลมหมุนวน การใช้แรง EHD เพื่อปรับรูปแบบการไหลเป็น หลักการที่น่าสนใจเนื่องจากไม่มีขึ้นส่วนทางกลที่เคลื่อนที่ ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อน และง่ายต่อการควบคุม อุณหภูมิ ทศวรรษที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายศึกษา การนำหลักการ EHD ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ของระบบ เช่น การอบแห้งวัสดุ [1-3] การพ่นสีหรือ สเปรย์ (electrospray) [4] อุปกรณ์ทำความเย็น [5] การ ดักจับฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็ก [6] อุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อน [7]

Lai และ Lai [1] ติดตั้งลวดอิเล็กโตรดเหนือ แพคเบด (packed bed) ซึ่งใช้แทนวัสดุพรุน และติดตั้ง แผ่นกราวด์ที่ด้านล่างของแพคเบด จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า และ ความเร็วของลมที่ใช้ การเพิ่มความเร็วของการไหลมาก ขึ้นจะลดอิทธิพลของแรง EHD กล่าวคือเมื่อความเร็วของ การไหลมากขึ้นแรง EHD จะต้องเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้ สามารถควบคุมการไหลได้

Chaktranond และ Rattanadecho [2] ทำ การทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วย ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูง โดยติดตั้งลวด อิเล็กโตรดตั้งฉากกับการไหล และลวดกราวด์ติดตั้งขวาง กับการไหล นอกจากนี้ยังศึกษาผลของแพคเบดที่มีชั้น ความพรุนสองชั้น (double layer porous packed bed) จากภาพถ่ายด้วยเทคนิคควันธูป (incense smoke technique) พบว่าเมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยสู่ อากาศจะทำให้เกิดลมหมุนวนในทิศตรงข้ามกับการไหล



Figure 1 Movement of charged and uncharged air

และพบว่าเมื่อขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะช่วยทำให้อัตรา การอบแห้งเพิ่มมากยิ่งขึ้น ด้วยผลของแรงดันแคปิลารี่ (capillary pressure) ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นของ ความพรุน ทำให้การจัดวางชั้นความพรุนมากเหนือชั้น ความพรุนน้อยมีอัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นมาก

Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [3] ใช้ วิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบสองมิติศึกษาการไหลภายใน ท่อ ในการคำนวณสมมติให้เส้นลวดอิเล็กโตรด และกราว ด์เป็นจุด จากการคำนวณพบว่าความรุนแรงของลมหมุน วนจะมากขึ้นเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ความเร็วของ อากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแปรผันกับแรงดันไฟฟ้ากำลัง สอง และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และ กราวด์กำลังสอง ขนาดของลมหมุนจะกว้างขึ้นเมื่อระยะ ห่างนี้กว้างขึ้น ตำแหน่งของอิเล็กโตรดมีผลต่อรูปแบบ ลมหมุนวนที่เกิดขึ้น เมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งที่ด้านหลัง ของกราวด์จะเกิดลมหมุนวนขนาดใหญ่ ส่วนการติดตั้ง อิเล็กโตรดที่ด้านหน้าในระดับเดียวกับกราวด์ไม่ช่วยทำให้ เกิดการหมุนวน แต่ช่วยจะเพิ่มความเร็วของกระแสลม ตามทิศทางของแรง EHD ที่กระทำในทิศทางเดียวกับ กระแสลม

จากวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นลวดกราวด์ถูกติดตั้งใน แนวขวางกับการไหล ทำให้อิทธิพลแรงเนื่องจากสนาม ไฟฟ้าลดลงเมื่อกระทำให้ทิศทางตรงข้ามกับทิศของการ ไหลของลม รวมถึงไม่ได้ศึกษารายละเอียดผลของ ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโตรดทั้งในแนวตั้งฉาก และแนว ตามการไหลร่วมกันที่ส่งผลต่อการลักษณะการเกิดลม หมุนวนบนผิวหน้าของวัสดุ รวมถึงตำแหน่งความสัมพันธ์ ของลวดอิเล็กโตรด ลวดกราวด์ และตำแหน่งของที่วาง วัสดุพรุน ดังนั้นเพื่อทำให้แรง EHD สามารถปรับปรุงการ ไหลให้เกิดขึ้นบริเวณทั่วผิวหน้าของวัสดุพรุนในงานวิจัย นี้ทำการติดตั้งลวดอิเล็กโตรด และลวดกราวด์ใกล้กับ บริเวณบนผิวหน้าของวัสดุพรุน และเพื่อไม่ทำให้เกิด breakdown voltage [2] โดยลวดอิเล็กโตรดจำนวน 4 แท่ง ถูกติดตั้งตั้งฉากกับการไหล ส่วนลวดกราวด์ถูก ติดตั้งเหนือวัสดุพรุนใกล้กับขอบทั้งสองด้านของวัสดุพรุน โดยวางตามแนวยาวขนานกับทิศทางการไหลของกระแส ลม และทำการทดลองศึกษาผลของตำแหน่งติดตั้งลวด อิเล็กโตรดที่มีต่ออัตราการอบแห้งโดยเปลี่ยนตำแหน่ง ทั้งทิศตามแนวการไหล และทิศตั้งฉากกับการไหล นอกจากนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำลองรูปแบบของ กระแสลมที่เปลี่ยนแปลงตามแรง EHD อธิบายการเพิ่ม อัตราการอบแห้ง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ชุดทดสอบ

Figure 2 อุโมงค์ลมทำจากแผ่นอะคริลิค (acrylic plate) และมีขนาดหน้าตัด 0.3 m × 0.3 m ยาว 1 m ลมถูกทำให้ร้อนโดยขดลวดไฟฟ้า (electric heater) ขนาด 2 kW จำนวน 2 ชุดซึ่งทำงานร่วมกับตัว ตรวจวัดอุณหภูมิ (TS) และชุดควบคุม (controller) ก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบค่าเฉลี่ยของความเร็ว และ อุณหภูมิถูกควบคุมที่ ~0.33 m/s และ 60℃ ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศภายในชุดทดสอบตรวจวัดโดยเทอร์ โมคัปเปิ้ล (TC) แบบ K และอุณหภูมิของห้องที่ติดตั้ง ชุดทดสอบมีค่าประมาณ 25°C แพคเบด (packed bed) ซึ่งมีขนาด 0.75 m (W) × 0.15 m (L) × 0.4 m (H) ถูกใช้แทนวัสดุพรุนซึ่งภายในประกอบด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm น้ำ และอากาศ โดยผิวภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวนยางกัน ้ความร้อนทุกด้าน ยกเว้นผิวด้านที่เปิดออกสู่ลมร้อน ค่าความพรุนของแพคเบดมีค่า ϕ ~ 0.385 [2] กำหนด ้ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) ทุกกรณีมีค่า S_{int} = 0.5 ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) [2] และระยะเวลา ในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 20 kV ซึ่ง m คือมวล ตัวห้อย w คือน้ำ ตัวห้อย bead คือเม็ด แก้ว ค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้ว และน้ำมีค่า 2,500 และ 1,000 kg/m³ ตามลำดับ

$$S = \frac{m_w}{m_{bead}} \frac{\rho_{bead} \left(1 - \phi\right)}{\rho_w \phi} \tag{1}$$



Figure 2 Experimental setup diagram

Figure 3 ลวดอิเล็กโตรดจำนวน 4 เส้นซึ่งมีระยะ ห่างระหว่างเส้นเท่ากัน (S_r = 1.9 cm) ถูกแขวนจากผนัง ด้านบนของอุโมงค์ลมโดยปลายขั้วไม่หุ้มฉนวนไฟฟ้า ้ส่วนเส้นลวดกราวด์ไม่หุ้มฉนวน และมีความยาว 15 cm จำนวน 2 เส้นติดห่างจากผนังแต่ละด้านของอุโมงค์ลม 10.25 cm และถูกวางตามความยาวของอุโมงค์ลม (G = 30 cm, G = 1 cm) ลวดอิเล็กโตรด และลวดกราวด์ ทำจากเส้นลวดทองแดงขนาดหน้าตัด 0.25 mm² แพคเบดถูกวางที่ผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม น้ำหนักของ แพคเบดถูกวัดค่าจากโหลดเซลล์ (load cell, accuracy ±0.1) และถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ทุก ๆ 1 วินาที ส่วนอุณหภูมิที่กึ่งกลางผิวหน้า ของแพคเบดถูกวัดค่าโดยสายไฟเบอร์ออปติค (Rugged fiber optic temperature monitoring, model L201, Quebec, Canada, accuracy ±0.1°C) ทุก ๆ 1 วินาที สนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดัน สูง (high voltage power supply) (Glassman, model FJ30R4, New Jersey, USA) ขนาดพิกัด 120 W

2.2 การจำลองทางตัวเลขของการไหล

เพื่ออธิบายลักษณะการเกิดลมหมุนวนที่เกิดจาก สนามไฟฟ้าแรงดันสูง และส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ให้แก่วัสดุที่อบแห้ง รวมถึงข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ วัดภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูง งานวิจัยนี้จำลองการไหล ของอากาศภายใต้แรง EHD ในสองมิติ โดยคำนวณผ่าน สมการของความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโต๊กส์ (continuity, Navier-Stokes equations) และสมการ พลังงาน [3] ดังสมการที่ (2) ถึง (4)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{2}$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{u} \right] = -\nabla \vec{P} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_{EHD}$$
(3)

$$\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\vec{u} \cdot \nabla \right) T \right] = k \nabla^2 T \tag{4}$$

ซึ่ง \vec{u} คือความเร็วของกระแสลม t คือเวลา ρ คือความ หนาแน่นของอากาศ μ คือค่าความหนึดของอากาศ Tคืออุณหภูมิ c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ k คือค่า การนำความร้อน และ \vec{f}_{EHD} คือแรง EHD ซึ่งพิจารณา เฉพาะแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ตาม Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [3]



Figure 3 Electrode and ground positions

$$\vec{f}_{EHD} = q\vec{E} \tag{5}$$

ซึ่ง q คือความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า และ Eี คือค่า ความเข้มของสนามไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการของ แมกส์เวลล์ (Maxwell's equations)

$$q = \nabla \cdot \varepsilon \vec{E} \tag{6}$$

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{7}$$

ซึ่ง ɛ คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ (permittivity) ของอากาศ และ V คือขนาดของแรงดันไฟฟ้า

โดเมนของการคำนวณแสดงดัง Figure 4 กำหนดให้ค่าความเร็วของอากาศที่ทางเข้า *u*_i เป็นแบบ สม่ำเสมอ (uniform flow) ที่ความเร็ว 0.33 m/s ส่วน ที่ทางออกกำหนดให้ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความเร็วของอากาศที่ผนังทุกด้านมีค่าเป็นศูนย์

ด้วยผลของแรงลอยตัว (buoyancy force) ทำให้อุณหภูมิของอากาศในแนวตั้งฉากกับการไหลก่อน ถึงแพคเบดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ทำการวัดอุณหภูมิของลมร้อนตามแนวตั้งฉากกับการไหล ในกรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้าบริเวณก่อนถึงแพคเบด และหา สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อน แสดงดัง สมการที่ (8) และกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่ ผนังทุกด้าน

$$T(y) = -0.0249y^2 + 1.9763y + 25.649$$
(8)

เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศภายใต้แรง EHD และอธิบายอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่นำความร้อน สู่วัสดุ รวมถึงเพื่อตัดผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้น ภายในวัสดุตามระยะเวลาการอบแห้ง การจำลองสมมติ ให้แพคเบดเป็นวัสดุไม่มีความพรุน และใช้สมการ [4] คำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุซึ่งมีค่า ความหนาแน่นเท่ากับ 2500 kg/m³ และค่าการนำความ ร้อนเท่ากับ 0.295 W/m.K ส่วนในการคำนวณทางไฟฟ้า กำหนดให้ขั้วอิเล็กโตรดให้เป็นจุด และลวดกราวด์เป็น เส้นโดยไม่คำนึงถึงขนาด แรงดันไฟฟ้า V = V₀ = 20 kV ที่ปลายขั้วอิเล็กโตรด และ V = 0 kV ที่เส้นลวดกราวด์ ไม่มีสนามไฟฟ้าออกนอกโดเมน การคำนวณใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.4 เมื่อเปรียบเทียบการ คำนวณ 245,969 และ 351,497 อิลิเมนต์พบว่าค่าความ แตกต่างของสนามความเร็วเพียง 10⁻⁴ และ 10⁻³%



Figure 4 Computational domain (left) and grid generation (right)

ตามลำดับ และรูปแบบการไหลของลมร้อนไม่แตกต่าง กัน ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้ 165,897 อิลิเมนต์ซึ่ง เพียงพอต่อการสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศ และ การถ่ายเทความร้อน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการ ไหลในรูปแบบเดียวกับ Saneewong Na Ayuttaya [3] และพบว่าได้ผลการคำนวณที่ให้รูปแบบการไหลเดียวกัน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย 3.1 ผลของการใช้ EHD

ผลการทดลองแสดงดังรูป Figure 5 และ 6 โดย Figure 6 เปรียบเทียบน้ำหนักแพคเบดที่หายไป (weight loss) เนื่องจากการระเหยของความชื้น และ อุณหภูมิที่ผิวของจากแพคเบดกรณีใช้ และไม่ใช้แรง EHD ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของแรง EHD จะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง (DR) ให้สูงขึ้นได้แม้ไม่ใช้ ความร้อน นอกจากนี้ยังช่วยเหนี่ยวนำกระแสลมที่ห่าง จากผิวซึ่งมีอุณหภูมิสูงลงมาสู่ที่ผิวแพคเบดดังสังเกตได้ จากอุณหภูมิที่ผิวที่สูงขึ้นกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้ ร่วมกับแรง EHD ซึ่งเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ ผิวหน้าของแพคเบด

3.2 ผลของตำแหน่งอิเล็กโตรดในแนวการไหล (E)

Figure 6 พบว่าปริมาณความชื้นที่ระเหย และ อุณหภูมิที่ผิวจะมีค่าสูงเมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งบริเวณ ค่อนไปทางส่วนครึ่งหน้าของแพคเบด (E_x ≤ 37.5 cm) และทั้งสองค่ามีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อ E_x ถูกเลื่อนค่อน ไปทางด้านหลังมากขึ้น โดยเมื่อ E_x = 33.75 cm และ E_y = 4 cm จะให้ DR สูงสุด จาก Figure 6 (b) ยังสังเกตว่า ช่วงปลายเวลาของการอบแห้งเมื่อ E_x = 33.75 cm อุณหภูมิที่ผิวเริ่มสูงขึ้นทันทีซึ่งเกิดจากผิวของแพคเบด เริ่มแห้ง ความร้อนจากลมถูกใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับ



Figure 5 Comparison on drying rate and surface temperature with/without EHD force



Figure 6 Moisture removal (left) and surface temperature (right) of packed bed in various E_x : (a) $E_y = 2$ cm, (b) $E_y = 4$ cm and (c) $E_y = 6$ cm

เม็ดแก้วที่ผิวหน้าของแพคเบด ส่วนกรณีอื่นความร้อนยัง คงถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะของความชื้นที่ผิวให้กลาย เป็นไอที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ๆ

3.3 ผลของตำแหน่งอิเล็กโตรดในแนวตั้งฉาก (E_.)

จากการทดลองพบว่าตำแหน่งอิเล็กโตรดที่สู่งขึ้น ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่หายไปจากแพคเบด Figure 7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของอัตราการอบแห้ง (drying rate ratio, DRR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการอบแห้ง ต่ออัตราการอบแห้งกรณีใช้เฉพาะลมร้อน ค่า DRR สูง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อ E_y = 4 cm และลดลงเมื่อ E_yสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เพิ่มขึ้น 1.4 – 2.2 เท่าของกรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และ อัตราการอบแห้งสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ E_y = 30 cm และ E_y = 4 cm ดังนั้นเพื่อให้อัตราการอบแห้งสูงอิเล็กโตรดควร ถูกติดตั้งค่อนไปทางครึ่งหน้าของผิวแพคเบด และอยู่ที่ ความสูงที่เหมาะสม

3.4 การจำลองการไหลภายใต้อิทธิพลของ EHD

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขของกระแส ลมร้อนเพื่ออธิบายผลของลมหมุนวนที่ส่งผลต่ออัตราการ อบแห้ง และการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ Figure 8 และ 9 แสดงผลการคำนวณ และการเปรียบเทียบสนาม ความเร็ว และอุณหภูมิของลมร้อนภายใต้อิทธิพลของแรง EHD ที่ E และ E ต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง Figure 8 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งโดเมนเมื่อ E = 30 cm และ E = 2 cm ส่วน Figure 8 (b) – (f) ขยายรายละเอียดบริเวณใกล้กับแพคเบดของแต่ละกรณี เนื่องจากประจุถูกปล่อยออกจากขั้วอิเล็กโตรด ดังนั้นแรง EHD ทำให้อากาศใกล้ขั้วเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมสูงขึ้น และผลของความเร็วของอากาศที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิด ้ลมหมุนวนที่ด้านหน้าของขั้วอิเล็กโตรด ผลของลมหมุน ้วนนี้ทำให้เกิดการกั้นการไหลทำให้ความเร็วลมด้านหน้า ้ลมหมุนวนมีค่าต่ำ ส่วนความเร็วลมด้านหลังลมหมุนวน มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแรง EHD กระทำให้ทิศเดียวกับ การไหล



Figure 7 Drying rate ratio in various case

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 32 ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน 2567



95



Figure 8 Comparison on the velocity (left) and temperature (right) fields in various E_{y} when $E_{y} = 2$ cm



Figure 9 Comparison on velocity (left) and temperature (right) fields in various E_v when $E_v = 33.75$ cm

อิเล็กโตรดที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของกระแสลม และอัตราการอบแห้งของวัสดุพรุน โดยมีข้อสรุปดัง ต่อไปนี้

 แรง EHD ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งของวัสดุ พรุนได้ยิ่งขึ้นแม้ว่าจะไม่ใช้ความร้อน และยิ่งเพิ่มอัตรา การอบแห้งได้ดีขึ้นมากเมื่อใช้ทั้งลมร้อน และ EHD ผล จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ
 4 – 2.2 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่าง เดียว

 การติดตั้งลวดอิเล็กโตรดบริเวณค่อนไปทาง ปลายส่วนหน้าของแพคเบดจะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ได้มากกว่าการติดตั้งลวดอิเล็กโตรดค่อนไปทางปลาย ส่วนหลัง

3. จากการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าแรง EHD ทำให้เกิดลมหมุนวน และเพิ่มความเร็วของกระแส ลมเหนือผิวหน้าของแพคเบด เมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้ง ค่อนไปทางปลายส่วนหน้า อิทธิพลของแรง EHD จะ เหนี่ยวนำกระแสลมร้อนจากด้านบนให้เคลื่อนลงมาใกล้ ผิวของแพคเบดเป็นบริเวณกว้างมากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้ อัตราการอบแห้งดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อ E_yยิ่งสูงขึ้นขนาด ของลมหมุนวนจะกว้างขึ้นแต่ความเร็วของการหมุนวน ลม และความเร็วลมด้านหลังลมหมุนวนจะมีค่าน้อยลง เมื่อระยะ E_y = 4 cm ให้ผลอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อ E_y = 2 cm ยกเว้นเมื่อ E = 45 cm เนื่องจากที่ระยะ E_y = 4 cm สามารถเหนี้ยวนำกระแสลมร้อนในชั้นที่มี อุณหภูมิสูงกว่าให้ไหลลงสู่ผิวหน้าของวัสดุ รวมถึงทำให้ บริเวณผิวหน้าแพคเบดมีความเร็วลมที่สูงกว่า

จากข้อสรุปข้างต้นตำแหน่งของอิเล็กโตรดเทียบ กับตำแหน่งของกราวด์ และวัสดุที่อบแห้งส่งผลต่อ ตำแหน่งการเกิดลมหมุนวน และความเร็วบริเวณผิวหน้า ของวัสดุ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้ง ดังนั้นเพื่อให้ได้อัตราการอบแห้งสูงอิทธิพลของแรง EHD จะต้องปรับปรุงรูปแบบการไหลให้กระแสลมในชั้นด้าน บนที่มีอุณหภูมิสูงให้ไหลไปสู่ผิวแพคเบด และให้กระจาย ครอบคลุมทั่วผิวแพคเบดด้วยความเร็วสูง

เมื่อ E ถูกเลื่อนไปให้ใกล้กับปลายส่วนหลังของ แพคเบดมากขึ้น ตำแหน่งของทั้งลมหมุนวน และกระแส ลมความเร็วสูงอันเนื่องจากแรง EHD ก็ยิ่งเลื่อนไปเกิดขึ้น ที่ปลายด้านหลังมากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังสังเกต ได้ว่าด้วยอิทธิพลของแรง EHD ทำให้ลมในชั้นที่อยู่สูงขึ้น ไปเคลื่อนที่ลงสู่พื้นผิวของแพคเบด ส่งผลให้ทั้งความเร็ว และอุณหภูมิของลมที่ด้านหลังของลมหมุนวนมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ E ถูกติดตั้งใกล้ปลายส่วนหน้าของแพคเบด หรือ อาจจะกล่าวได้ว่าเพื่อให้ได้อัตราการอบแห้งที่สูงควรติด ตั้งอิเล็กโตรดในบริเวณปลายส่วนหน้าของแพคเบดเพื่อ เหนี่ยวนำให้อากาศในชั้นที่มีอุณหภูมิเคลื่อนลงสู่ด้านล่าง และทำให้กระแสลมทั่วผิวแพคเบดมีความเร็วสูงขึ้น

Figure 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออิเล็กโตรด_์ถูกติดตั้ง ในตำแหน่งที่สูงจากกราวด์มากขึ้น แรง EHD สามารถ เหนี่ยวนำกระแสลมชั้นด้านบนเคลื่อนลงสู่ผนังด้านล่าง ได้มากขึ้น แต่ความเร็วของกระแสลมจากแรง EHD จะ น้อยลง ($f_{ee} \propto r^{-2}$ [3]) และส่งผลทำให้แรงจากการไหล (fluid force) มีมากพอที่จะผลักอากาศอากาศที่ถูกชาร์ท ให้เคลื่อนที่ไปทิศปลายแพคเบดมากยิ่งขึ้นดังแสดง Figure 9 (c) ส่งผลทำให้ความเร็วลมเหนือแพคเบดมีค่า ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Figure 9 (a) และ (b) แต่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากแรง EHD เหนี่ยวนำลมที่มี อุณหภูมิสูงจากชั้นด้านบนลงสู่ผิวแพคเบดทำให้อัตราการ อบแห้งยังคงสูงอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนาม ไฟฟ้า

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการทดลองศึกษาการเพิ่มอัตราการ อบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้แรง EHD และศึกษาผลของ เปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโตรดทั้งในแนวขนาน กับการไหล (E) และตั้งฉาก (E) ส่วนลวดกราวด์ถูก วางขนานตามความยาวของแพคเบดโดยไม่มีการ เปลี่ยนแปลงตำแหน่ง และใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขจำลอง การไหลในสองมิติอธิบายผลของการเปลี่ยนตำแหน่ง งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุน และอุปกรณ์ วิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

6. References

- Lai, F.C., and Lai, K.W., 2007, EHD-Enhanced Drying with Wire Electrode, *Dry.Technol.*, 20(7): 1393-1405.
- [2] Chaktranond, C., and Rattanadecho, P.,
 2010, Analysis of Heat and Mass Transfer
 Enhancement in Porous Material
 Subjected to Electric Fields (Effects of
 Particle Sizes and Layered Arrangement),
 Exp. Therm. Fluid Sci., 34 (8): 1049-1056.
- [3] Saneewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond,
 C., and Rattanadecho, P., 2013, Numerical
 Analysis of Electric Force Influence on
 Heat Transfer in A Channel Flow (Theory
 Based on Saturated Porous Medium
 Approach), Int. J. Heat and Mass Transfer,
 64: 361-374.

- [4] Ganan-Calvo, A.M., Davila, J., and Barrero,
 A., 1997, Current and Droplet Size in the
 Electrospraying of Liquids. Scaling Laws,
 J. Aerosol Sci., 28 (2): 249-275.
- [5] Kim, B., Lee, S., Lee, Y.S., and Kang, K.H.,
 2012, Ion Wind Generation and the Application to Cooling, *J. Electrostat.*, 70 (5): 438-44.
- [6] Zouzou, N., and Moreau, E., 2011, Effect of a Filamentary Discharge on the Particle Trajectory in a Plane-to-Plane DBD Precipitator, J. Phys. D. Appl. Phys., 44: 285204.
- Smith, K., Byrne, G., Kempers, R., and Robinson, A.J., 2016, Electrohydrodynamic Augmentation of a Reflux Thermosyphon, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 79: 175-186.