

ผลของตำแหน่งอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งแบบลมร้อนด้วยแรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิก

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

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*, ทศพร กลิ่นมาลี, พชรพล 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,

Phatum Thani 12120

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะวิเคราะห์ผลของตำแหน่งวางลวดอิเล็กโทรดทั้งทิศตามแนวการไหล (E_x) และทิศตั้งฉากกับการไหล (E_y) ที่ส่งผลต่อการไหลภายใต้แรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิก (electrohydrodynamic force, EHD) เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อน และใช้การจำลองทางตัวเลขในสองมิติเพื่ออธิบายผลของรูปแบบการไหลของกระแสลมที่ถูกขับเคลื่อนโดยสนามไฟฟ้าต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (DR) ในชุดการทดสอบลวดอิเล็กโทรด 4 เส้นถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหล และลวดกราวด์ 2 เส้นซึ่งมีความยาวเท่ากับแพคเกจลูกกวาดในแนวนานกับการไหลเหนือผิวหน้าของแพคเกจ ความเร็วลม และอุณหภูมิของลมที่ทางเข้าหน้าตัดทดสอบมีค่าเฉลี่ยที่ 0.33 m/s และ 60°C ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 20 kV แพคเกจมีความถี่เริ่มต้นที่ $S_{int} = 0.5$ เวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ช่วยเพิ่มการระเหยของความชื้นออกจากแพคเกจแม้ใช้ลมเพียงอย่างเดียว เมื่อใช้ลมร้อนร่วมกับแรง EHD ทำให้ DR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.4 – 2.2 เท่าของการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ค่า DR จะสูงเมื่อ E_x อยู่ก่อนไปทางปลายด้านหน้าของแพคเกจ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ E_x อยู่ก่อนไปทางปลายด้านหลังมากยิ่งขึ้น ผลจากการจำลองการไหลพบว่าผลของแรง EHD ทำให้เกิดลมหมุนวนที่ด้านหน้าของอิเล็กโทรด และทำให้กระแสลมที่ด้านหลังของลมหมุนวนมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น แต่ด้วยการเกิดลมหมุนวนทำให้กระแสลมด้านหน้าลมหมุนวนมีความเร็วต่ำ ดังนั้นเมื่อ E_x อยู่ก่อนไปทางปลายด้านหลังมากขึ้นตำแหน่งของลมหมุนวน และกระแสลมที่มีความเร็วสูงจะเกิดก่อนไปทางด้านหลังมากขึ้น เนื่องจากแรง EHD จะน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

และกรวดมากขึ้น ดังนั้นที่ $E_y > 4$ cm ค่า DR มีแนวโน้มที่จะลดลง แต่เมื่อ $E_y = 2$ cm แรง EHD จะเหนี่ยวนำเฉพาะชั้นกระแสลมที่มีอุณหภูมิต่ำ และใกล้ผิวให้เคลื่อนที่ไปยังผิวแพคเบตทำให้อุณหภูมิแพคเบตไม่เพิ่มสูงขึ้นมากนัก

คำสำคัญ: แรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิก; 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

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ทางเกษตร และอาหารที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย แม้ว่าเป็นวิธีที่ง่าย และค่าก่อสร้างอุปกรณ์ไม่สูง รวมถึงสามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ขณะทำการอบแห้งได้ง่าย แต่จำเป็นต้องใช้เวลานาน ทำให้ต้องใช้พลังงานรวมปริมาณมากเพื่อการอบแห้ง ด้วยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงหรือแรงอเล็กโตรไฮโดรไดนามิก (electrohydrodynamic force, EHD) ร่วมสามารถลดผลของชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณผิวสูงขึ้น และอัตราการอบแห้งสูงขึ้นอย่างมาก [1] ด้วยเหตุนี้ระยะเวลาการอบแห้ง และพลังงานรวมที่ใช้จึงลดลงอย่างมาก อีกทั้งยังลดผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อน

หลักการการใช้แรง EHD ควบคุมการไหลของอากาศแสดงดัง Figure 1 เมื่อประจุไฟฟ้าที่สร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยออกจากปลายหัวอิเล็กโตรด อากาศที่อยู่บริเวณปลายหัวถูกชาร์จ (charged air) ให้มีความเร็วสูงขึ้น และเคลื่อนที่ไปยังกราวด์ ขณะเคลื่อนที่ จะเกิดการชนกับอนุภาคอากาศที่อยู่รอบ ๆ ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอากาศ นอกจากนี้อากาศรอบ ๆ ที่ไม่ถูกชาร์จ (uncharged air) จะถูกเหวี่ยงมาจากอากาศที่มีความเร็วสูงด้วยผลการไหลแบบเฉือน (shear flow) ทำให้เกิดกระแสลมหมุนวน

การใช้แรง EHD เพื่อปรับรูปแบบการไหลเป็นหลักการที่น่าสนใจเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนทางกลที่เคลื่อนที่ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อน และง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิ ทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยมากมายศึกษาการนำหลักการ EHD ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เช่น การอบแห้งวัสดุ [1-3] การพ่นสีหรือสเปรย์ (electrospray) [4] อุปกรณ์ทำความเย็น [5] การดักจับฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็ก [6] อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [7]

Lai และ Lai [1] ติดตั้งลวดอิเล็กโตรดเหนือแพคเบด (packed bed) ซึ่งใช้แทนวัสดุพูน และติดตั้งแผ่นกราวด์ที่ด้านล่างของแพคเบด จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า และความเร็วของลมที่ใช้ การเพิ่มความเร็วของการไหลมากขึ้นจะลดอุณหภูมิของแรง EHD กล่าวคือเมื่อความเร็วของการไหลมากขึ้นแรง EHD จะต้องเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมการไหลได้

Chakranond และ Rattanadecho [2] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูง โดยติดตั้งลวดอิเล็กโตรดตั้งฉากกับการไหล และลวดกราวด์ติดตั้งขวางกับการไหล นอกจากนี้ยังศึกษาผลของแพคเบดที่มีชั้นความพูนสองชั้น (double layer porous packed bed) จากภาพถ่ายด้วยเทคนิคควันรูป (incense smoke technique) พบว่าเมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยสู่อากาศจะทำให้เกิดลมหมุนวนในทิศตรงข้ามกับการไหล

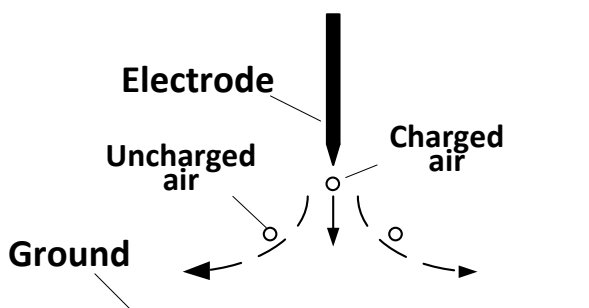


Figure 1 Movement of charged and uncharged air

และพบว่าเมื่อขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะช่วยทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มมากยิ่งขึ้น ด้วยผลของแรงดันแคปิลลารี (capillary pressure) ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นของความพรุน ทำให้การจัดวางชั้นความพรุนมากเหนือชั้นความพรุนน้อยมีอัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นมาก

Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [3] ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบสองมิติศึกษาการไหลภายในท่อ ในการคำนวณสมมติให้เส้นลวดอิเล็กโตรด และกราวด์เป็นจุด จากการคำนวณพบว่าความรุนแรงของลมหมุนวนจะมากขึ้นเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแปรผันกับแรงดันไฟฟ้ากำลังสอง และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และกราวด์กำลังสอง ขนาดของลมหมุนวนจะกว้างขึ้นเมื่อระยะห่างนี้กว้างขึ้น ตำแหน่งของอิเล็กโตรดมีผลต่อรูปแบบลมหมุนวนที่เกิดขึ้น เมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งที่ด้านหลังของกราวด์จะเกิดลมหมุนวนขนาดใหญ่ ส่วนการติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหน้าในระดับเดียวกับกราวด์ไม่ช่วยทำให้เกิดการหมุนวน แต่ช่วยจะเพิ่มความเร็วของกระแสลมตามทิศทางของแรง EHD ที่กระทำในทิศทางเดียวกับกระแสลม

จากวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นลวดกราวด์ถูกติดตั้งในแนวขวางกับการไหล ทำให้อิทธิพลแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าลดลงเมื่อกระทำทิศทางตรงข้ามกับทิศของการไหลของลม รวมถึงไม่ได้ศึกษารายละเอียดผลของตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโตรดทั้งในแนวตั้งฉาก และแนวตามการไหลร่วมกันที่ส่งผลต่อการลักษณะการเกิดลมหมุนวนบนผิวหน้าของวัสดุ รวมถึงตำแหน่งความสัมพันธ์ของลวดอิเล็กโตรด ลวดกราวด์ และตำแหน่งของที่วางวัสดุพูน ดังนั้นเพื่อให้แรง EHD สามารถปรับปรุงการไหลให้เกิดขึ้นบริเวณทั่วผิวหน้าของวัสดุพูนในงานวิจัยนี้ทำการติดตั้งลวดอิเล็กโตรด และลวดกราวด์ใกล้กับบริเวณบนผิวหน้าของวัสดุพูน และเพื่อไม่ทำให้เกิด breakdown voltage [2] โดยลวดอิเล็กโตรดจำนวน 4 แท่ง ถูกติดตั้งตั้งฉากกับการไหล ส่วนลวดกราวด์ถูกติดตั้งเหนือวัสดุพูนใกล้กับขอบทั้งสองด้านของวัสดุพูน

โดยวางตามแนวยาวขนานกับทิศทางการไหลของกระแสลม และทำการทดลองศึกษาผลของตำแหน่งติดตั้งลวดอิเล็กโตรดที่มีต่ออัตราการอบแห้งโดยเปลี่ยนตำแหน่งทั้งทิศตามแนวการไหล และทิศตั้งฉากกับการไหล นอกจากนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำลองรูปแบบของกระแสลมที่เปลี่ยนแปลงตามแรง EHD อธิบายการเพิ่มอัตราการอบแห้ง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ชุดทดสอบ

Figure 2 อุโมงค์ลมทำจากแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) และมีขนาดหน้าตัด 0.3 m × 0.3 m ยาว 1 m ลมถูกทำให้ร้อนโดยชุดลวดไฟฟ้า (electric heater) ขนาด 2 kW จำนวน 2 ชุดซึ่งทำงานร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (TS) และชุดควบคุม (controller) ก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบค่าเฉลี่ยของความเร็ว และอุณหภูมิถูกควบคุมที่ ~0.33 m/s และ 60°C ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศภายในชุดทดสอบตรวจวัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล (TC) แบบ K และอุณหภูมิของห้องที่ติดตั้งชุดทดสอบมีค่าประมาณ 25°C แพคเบด (packed bed) ซึ่งมีขนาด 0.75 m (W) × 0.15 m (L) × 0.4 m (H) ถูกใช้แทนวัสดุพูนซึ่งภายในประกอบด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm น้ำ และอากาศ โดยผิวภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวนยางกันความร้อนทุกด้าน ยกเว้นผิวด้านที่เปิดออกสู่ลมร้อน ค่าความพรุนของแพคเบดมีค่า $\phi \sim 0.385$ [2] กำหนดค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) ทุกกรณีมีค่า $S_{int} = 0.5$ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) [2] และระยะเวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 20 kV ซึ่ง m คือมวล w คือน้ำ $bead$ คือเม็ดแก้ว ค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้ว และน้ำมีค่า 2,500 และ 1,000 kg/m³ ตามลำดับ

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

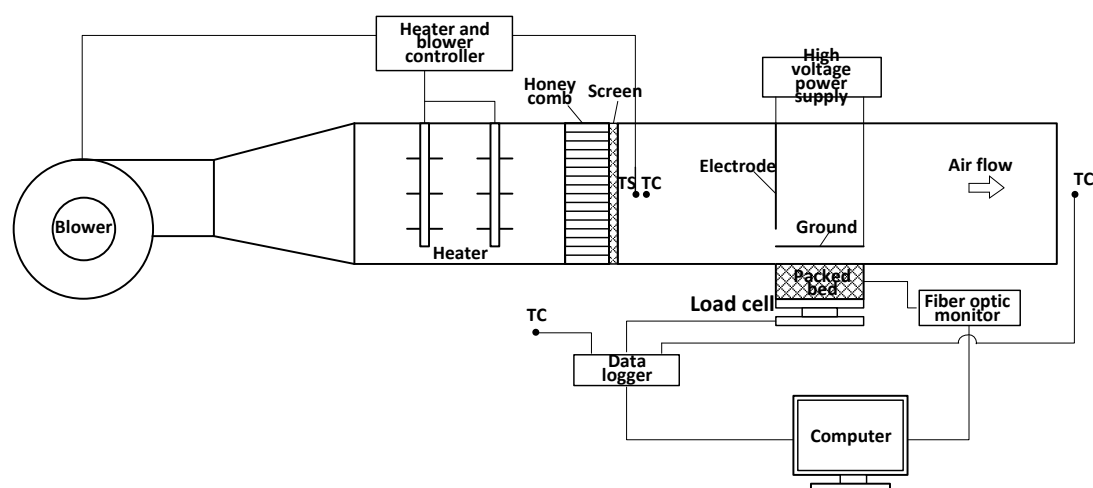


Figure 2 Experimental setup diagram

Figure 3 ลวดอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 4 เส้นซึ่งมีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากัน ($S_E = 1.9$ cm) ถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ลมโดยปลายขั้วไม่หุ้มฉนวนไฟฟ้า ส่วนเส้นลวดกราวด์ไม่หุ้มฉนวน และมีความยาว 15 cm จำนวน 2 เส้นติดห่างจากผนังแต่ละด้านของอุโมงค์ลม 10.25 cm และถูกวางตามความยาวของอุโมงค์ลม ($G_x = 30$ cm, $G_y = 1$ cm) ลวดอิเล็กทรอนิกส์ และลวดกราวด์ทำจากเส้นลวดทองแดงขนาดหน้าตัด 0.25 mm² แพคเกจถูกวางที่ผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม น้ำหนักของแพคเกจถูกวัดค่าจากโหลดเซลล์ (load cell, accuracy ± 0.1) และถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ทุก ๆ 1 วินาที ส่วนอุณหภูมิที่กึ่งกลางผิวหน้าของแพคเกจถูกวัดค่าโดยสายไฟเบอร์ออปติก (Rugged fiber optic temperature monitoring, model L201, Quebec, Canada, accuracy $\pm 0.1^\circ\text{C}$) ทุก ๆ 1 วินาที สนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage power supply) (Glassman, model FJ30R4, New Jersey, USA) ขนาดพิกัด 120 W

2.2 การจำลองทางตัวเลขของการไหล

เพื่ออธิบายลักษณะการเกิดลมหมุนวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้าแรงดันสูง และส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุที่อบแห้ง รวมถึงข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์วัดภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูง งานวิจัยนี้จำลองการไหลของอากาศภายใต้แรง EHD ในสองมิติ โดยคำนวณผ่านสมการของความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตกส์ (continuity, Navier-Stokes equations) และสมการพลังงาน [3] ดังสมการที่ (2) ถึง (4)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

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

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

ซึ่ง $\vec{u}$ คือความเร็วของกระแสลม t คือเวลา ρ คือความหนาแน่นของอากาศ μ คือค่าความหนืดของอากาศ T คืออุณหภูมิ c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ k คือค่าการนำความร้อน และ $\vec{f}_{EHD}$ คือแรง EHD ซึ่งพิจารณาเฉพาะแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ตาม Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [3]

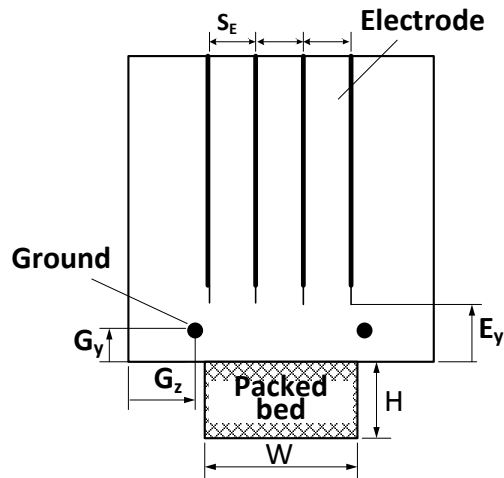


Figure 3 Electrode and ground positions

$$\vec{f}_{EHD} = q\vec{E} \quad (5)$$

ซึ่ง q คือความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า และ $\vec{E}$ คือค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

$$q = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (7)$$

ซึ่ง ϵ คือค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) ของอากาศ และ V คือขนาดของแรงดันไฟฟ้า

โดเมนของการคำนวณแสดงดัง Figure 4 กำหนดให้ค่าความเร็วของอากาศที่ทางเข้า u_i เป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) ที่ความเร็ว 0.33 m/s ส่วนที่ทางออกกำหนดให้ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความเร็วของอากาศที่ผนังทุกด้านมีค่าเป็นศูนย์

ด้วยผลของแรงลอยตัว (buoyancy force) ทำให้อุณหภูมิของอากาศในแนวตั้งฉากกับการไหลก่อนถึงแพคเกจมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการวัดอุณหภูมิของลมร้อนตามแนวตั้งฉากกับการไหลในกรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้าบริเวณก่อนถึงแพคเกจ และหา

สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อน แสดงดังสมการที่ (8) และกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผนังทุกด้าน

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

เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศภายใต้แรง EHD และอธิบายอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่นำความร้อนสู่วัสดุ รวมถึงเพื่อตัดผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุตามระยะเวลาการอบแห้ง การจำลองสมมติให้แพคเกจเป็นวัสดุไม่มีความพรุน และใช้สมการ [4] คำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2500 kg/m^3 และค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.295 W/m.K ส่วนในการคำนวณทางไฟฟ้า กำหนดให้ขั้วอิเล็กโทรดให้เป็นจุด และลวดกราวด์เป็นเส้นโดยไม่คำนึงถึงขนาด แรงดันไฟฟ้า $V = V_0 = 20 \text{ kV}$ ที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด และ $V = 0 \text{ kV}$ ที่เส้นลวดกราวด์ ไม่มีสนามไฟฟ้าออกนอกโดเมน การคำนวณใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.4 เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณ 245,969 และ 351,497 อิลิเมนต์พบว่าค่าความแตกต่างของสนามความเร็วเพียง 10^{-4} และ $10^{-3}\%$

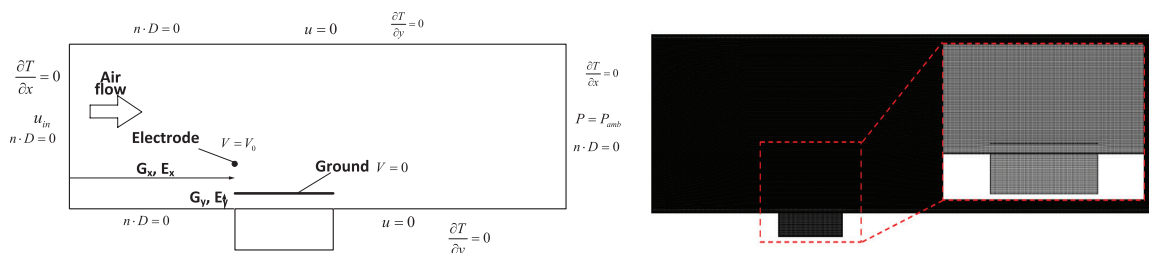


Figure 4 Computational domain (left) and grid generation (right)

ตามลำดับ และรูปแบบการไหลของลมร้อนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้ 165,897 อิเล็กเมนต์ซึ่งเพียงพอต่อการสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศ และการถ่ายเทความร้อน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลในรูปแบบเดียวกับ Saneewong Na Ayuttaya [3] และพบว่าได้ผลการคำนวณที่ให้รูปแบบการไหลเดียวกัน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลของการใช้ EHD

ผลการทดลองแสดงดังรูป Figure 5 และ 6 โดย Figure 6 เปรียบเทียบน้ำหนักแพคเบตที่หายไป (weight loss) เนื่องจากการระเหยของความชื้น และอุณหภูมิที่ผิวของจากแพคเบตกรณีใช้ และไม่ใช้แรง EHD ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของแรง EHD จะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง (DR) ให้สูงขึ้นได้แม้ไม่ใช่

ความร้อน นอกจากนี้ยังช่วยเหนี่ยวนำกระแสลมที่ห่างจากผิวซึ่งมีอุณหภูมิสูงลงมาสู่ที่ผิวแพคเบตดังสังเกตได้จากอุณหภูมิที่ผิวที่สูงขึ้นกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้ร่วมกับแรง EHD ซึ่งเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าของแพคเบต

3.2 ผลของตำแหน่งอิเล็กโตรดในแนวการไหล (E_x)

Figure 6 พบว่าปริมาณความชื้นที่ระเหย และอุณหภูมิที่ผิวจะมีค่าสูงเมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งบริเวณค่อนข้างไปทางส่วนครึ่งหน้าของแพคเบต ($E_x \leq 37.5$ cm) และทั้งสองค่ามีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อ E_x ถูกเลื่อนค่อนข้างไปทางด้านหลังมากขึ้น โดยเมื่อ $E_x = 33.75$ cm และ $E_y = 4$ cm จะให้ DR สูงสุด จาก Figure 6 (b) ยังสังเกตว่าช่วงปลายเวลาของการอบแห้งเมื่อ $E_x = 33.75$ cm อุณหภูมิที่ผิวเริ่มสูงขึ้นทันทีซึ่งเกิดจากผิวของแพคเบตเริ่มแห้ง ความร้อนจากลมถูกใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับ

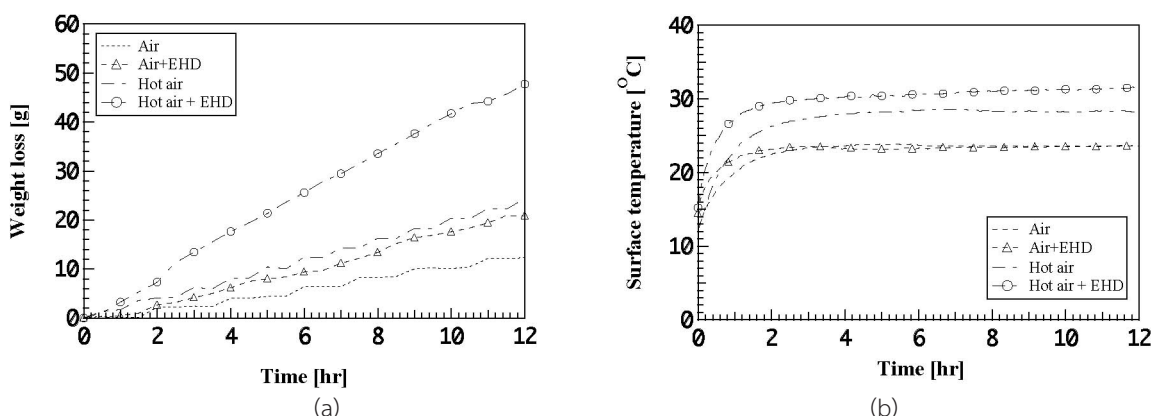


Figure 5 Comparison on drying rate and surface temperature with/without EHD force

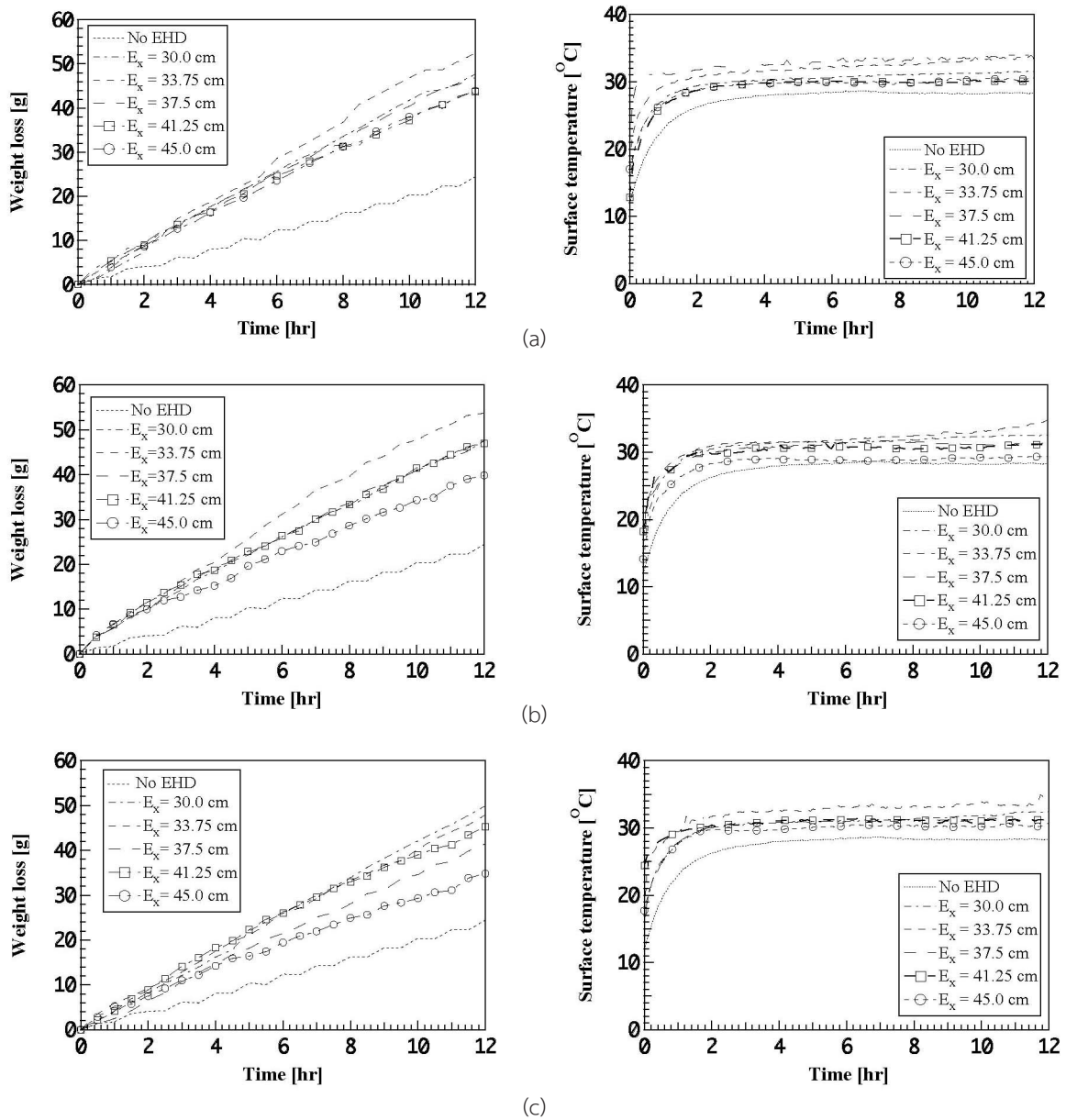


Figure 6 Moisture removal (left) and surface temperature (right) of packed bed in various E_x : (a) $E_y = 2$ cm, (b) $E_y = 4$ cm and (c) $E_y = 6$ cm

เม็ดแก้วที่ผิวหน้าของแพคเกจ ส่วนกรณีอื่นความร้อนยังคงถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะของความชื้นที่ผิวให้กลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ๆ

3.3 ผลของตำแหน่งอิเล็กโทรดในแนวตั้งฉาก (E_y)

จากการทดลองพบว่าตำแหน่งอิเล็กโทรดที่สูงขึ้นส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่หายไปจากแพคเกจ Figure 7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของอัตราการอบแห้ง (drying rate ratio, DRR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งกรณีใช้เฉพาะลมร้อน ค่า DRR สูงส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อ $E_y = 4$ cm และลดลงเมื่อ E_y สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เพิ่มขึ้น 1.4 – 2.2 เท่าของกรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และอัตราการอบแห้งสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ $E_x = 30$ cm และ $E_y = 4$ cm ดังนั้นเพื่อให้อัตราการอบแห้งสูงอิเล็กโทรดควรถูกติดตั้งค่อนไปทางครึ่งหน้าของผิวแพคเกจ และอยู่ที่ความสูงที่เหมาะสม

3.4 การจำลองการไหลภายใต้อิทธิพลของ EHD

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขของกระแสลมร้อนเพื่ออธิบายผลของลมหมุนวนที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง และการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ Figure 8 และ 9 แสดงผลการคำนวณ และการเปรียบเทียบสนามความเร็ว และอุณหภูมิของลมร้อนภายใต้อิทธิพลของแรง EHD ที่ E_x และ E_y ต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง Figure 8 (a) แสดงการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งโดเมนเมื่อ $E_x = 30$ cm และ $E_y = 2$ cm ส่วน Figure 8 (b) – (f) ขยายรายละเอียดบริเวณใกล้กับแพคเกจของแต่ละกรณี เนื่องจากประจุถูกปล่อยออกจากขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นแรง EHD ทำให้อากาศใกล้ขั้วเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมสูงขึ้น และผลของความเร็วของอากาศที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดลมหมุนวนที่ด้านหน้าของขั้วอิเล็กโทรด ผลของลมหมุนวนนี้ทำให้เกิดการกั้นการไหลทำให้ความเร็วลมด้านหน้าลมหมุนวนมีค่าต่ำ ส่วนความเร็วลมด้านหลังลมหมุนวนมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแรง EHD กระทำให้ทิศเดียวกับการไหล

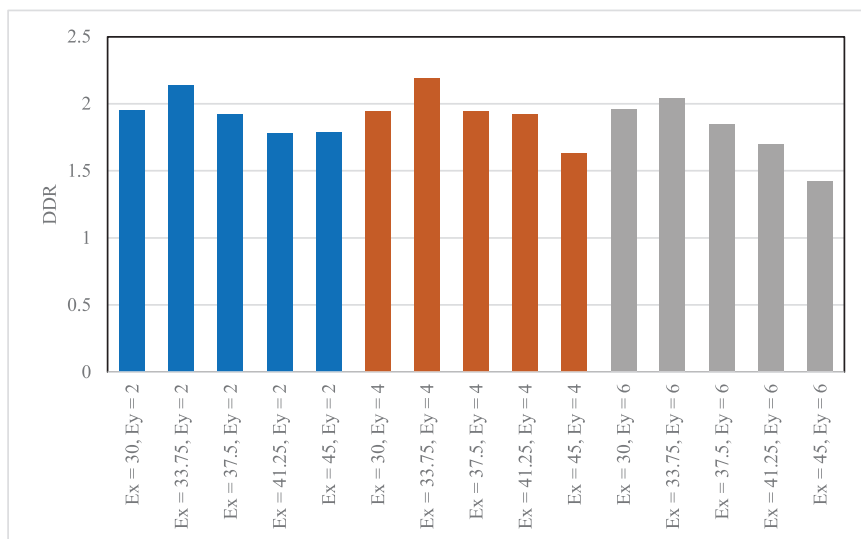
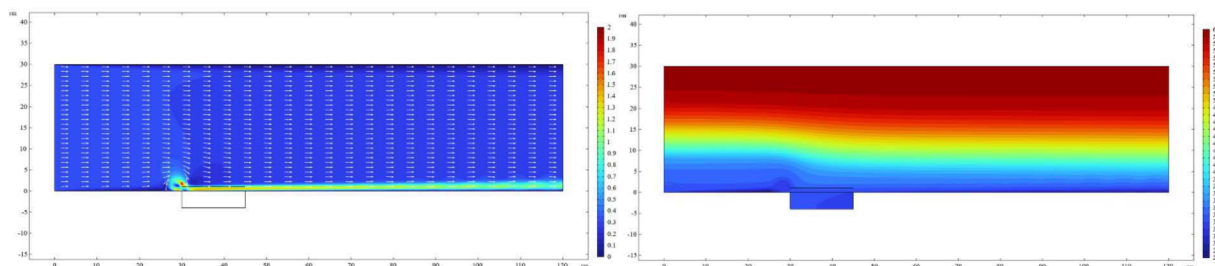
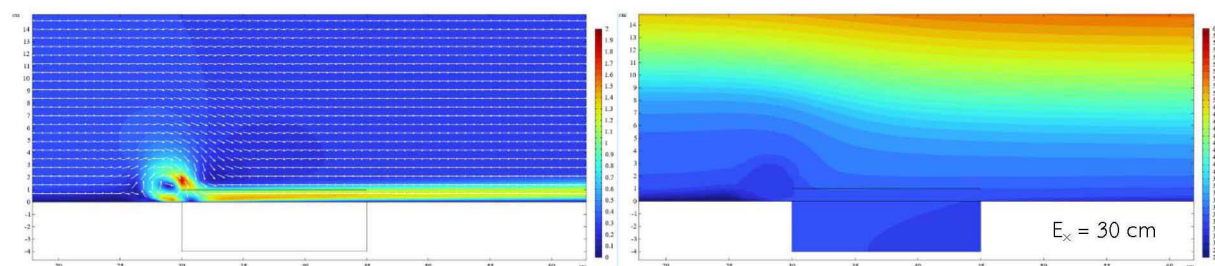


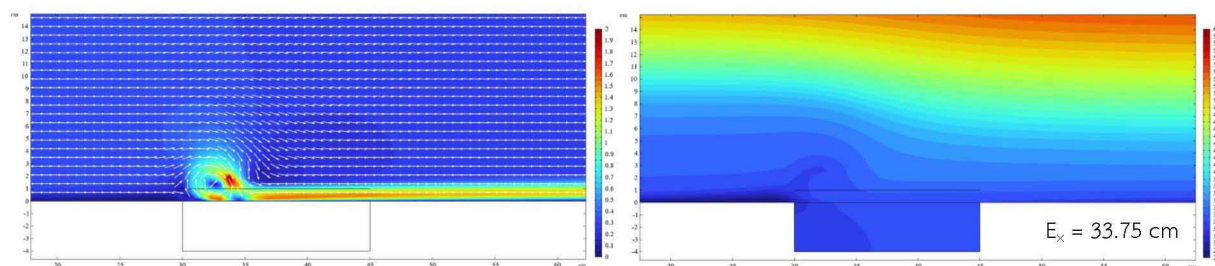
Figure 7 Drying rate ratio in various case



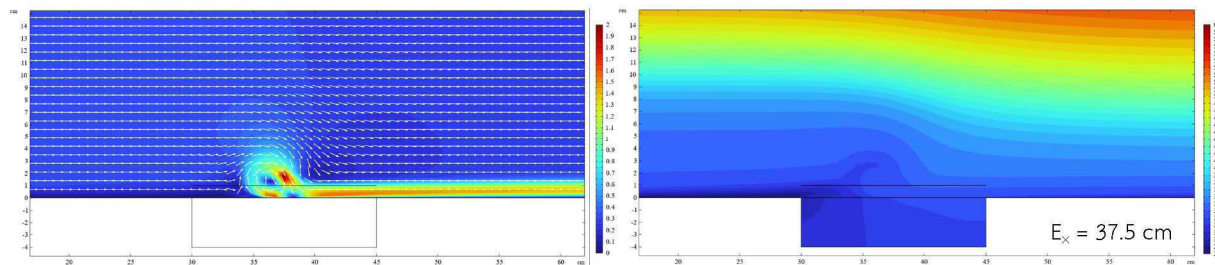
(a)



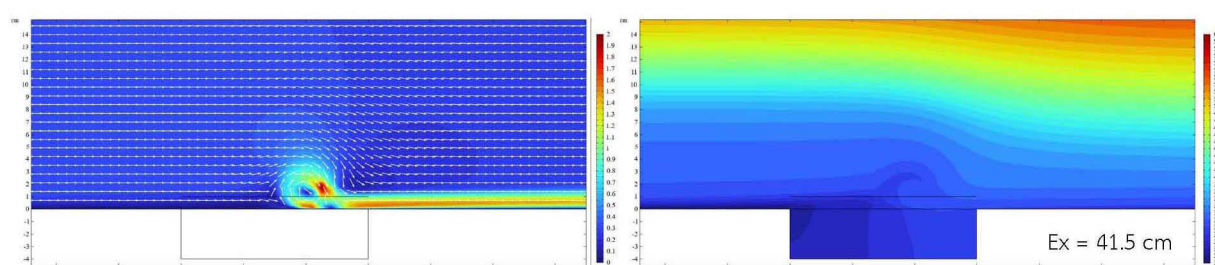
(b)



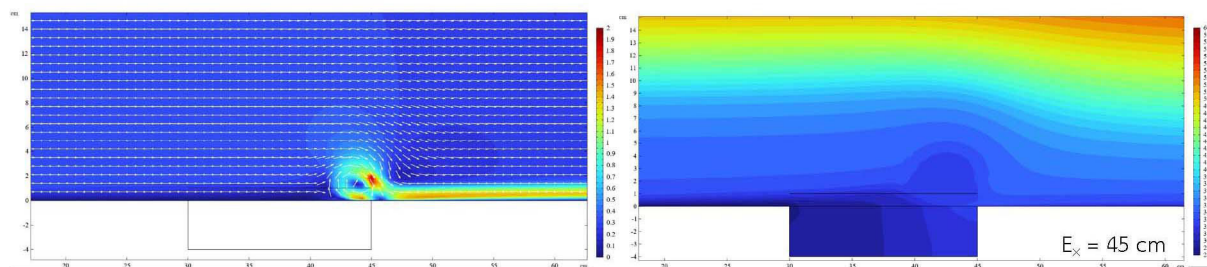
(c)



(d)

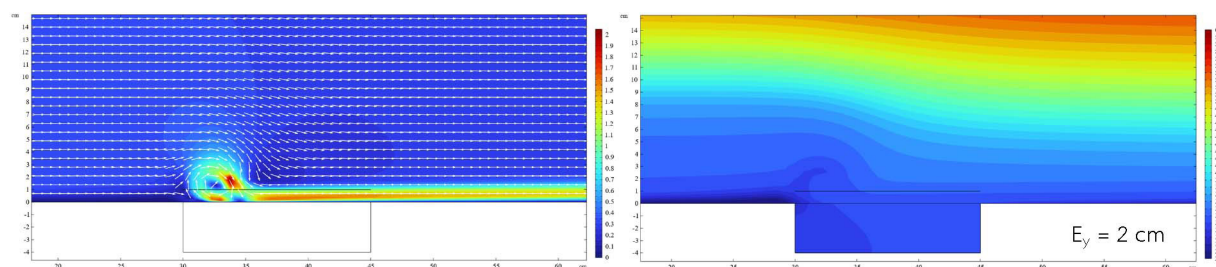


(e)

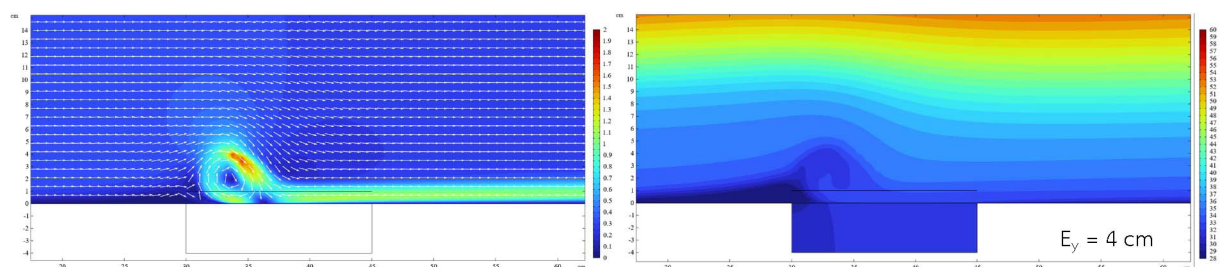


(f)

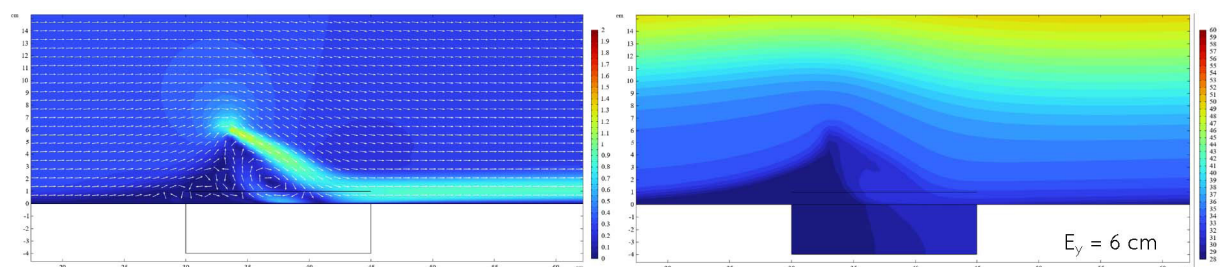
Figure 8 Comparison on the velocity (left) and temperature (right) fields in various E_x when $E_y = 2$ cm



(a)



(b)



(c)

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

เมื่อ E_x ถูกเลื่อนไปให้ใกล้กับปลายส่วนหลังของแพคเกจมากขึ้น ตำแหน่งของทั้งลมหมุนวน และกระแสลมความเร็วสูงอันเนื่องจากแรง EHD ก็ยิ่งเลื่อนไปเกิดขึ้นที่ปลายด้านหลังมากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าด้วยอิทธิพลของแรง EHD ทำให้ลมในชั้นที่อยู่สูงขึ้นไปเคลื่อนที่ลงสู่พื้นผิวของแพคเกจ ส่งผลให้ทั้งความเร็วและอุณหภูมิของลมที่ด้านหลังของลมหมุนวนมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ E_x ถูกติดตั้งใกล้ปลายส่วนหน้าของแพคเกจ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเพื่อให้ได้อัตราการอบแห้งที่สูงควรติดตั้งอิเล็กโทรดในบริเวณปลายส่วนหน้าของแพคเกจเพื่อเหนี่ยวนำให้อากาศในชั้นที่มีอุณหภูมิเคลื่อนลงสู่ด้านล่าง และทำให้กระแสลมทั่วผิวแพคเกจมีความเร็วสูงขึ้น

Figure 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่สูงจากราวด์มากขึ้น แรง EHD สามารถเหนี่ยวนำกระแสลมชั้นด้านบนเคลื่อนลงสู่ผนังด้านล่างได้มากขึ้น แต่ความเร็วของกระแสลมจากแรง EHD จะน้อยลง ($f_{EE} \propto r^{-2}$ [3]) และส่งผลทำให้แรงจากการไหล (fluid force) มีมากพอที่จะผลักอากาศอากาศที่ถูกซาร์ทให้เคลื่อนที่ไปทิศปลายแพคเกจมากยิ่งขึ้นดังแสดง Figure 9 (c) ส่งผลทำให้ความเร็วลมเหนือแพคเกจมีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Figure 9 (a) และ (b) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากแรง EHD เหนี่ยวนำลมที่มีอุณหภูมิสูงจากชั้นด้านบนลงสู่ผิวแพคเกจทำให้อัตราการอบแห้งยังคงสูงอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการทดลองศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้แรง EHD และศึกษาผลของเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดทั้งในแนวนอนกับการไหล (E_x) และตั้งฉาก (E_y) ส่วนลวดกราวด์ถูกวางขนานตามความยาวของแพคเกจโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง และใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขจำลองการไหลในสองมิติอธิบายผลของการเปลี่ยนตำแหน่ง

อิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของกระแสลมและอัตราการอบแห้งของวัสดุพูน โดยมีข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. แรง EHD ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งของวัสดุพูนได้ยิ่งขึ้นแม้ว่าจะไม่ใช้ความร้อน และยังเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ดีขึ้นมากเมื่อใช้ทั้งลมร้อน และ EHD ผลจากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.4 – 2.2 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

2. การติดตั้งลวดอิเล็กโทรดบริเวณค่อนไปทางปลายส่วนหน้าของแพคเกจจะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งได้มากกว่าการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดค่อนไปทางปลายส่วนหลัง

3. จากการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าแรง EHD ทำให้เกิดลมหมุนวน และเพิ่มความเร็วของกระแสลมเหนือผิวหน้าของแพคเกจ เมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้งค่อนไปทางปลายส่วนหน้า อิทธิพลของแรง EHD จะเหนี่ยวนำกระแสลมร้อนจากด้านบนให้เคลื่อนลงมาใกล้ผิวของแพคเกจเป็นบริเวณกว้างมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อ E_y ยิ่งสูงขึ้นขนาดของลมหมุนวนจะกว้างขึ้นแต่ความเร็วของการหมุนวนลม และความเร็วลมด้านหลังลมหมุนวนจะมีค่าน้อยลง เมื่อระยะ $E_y = 4$ cm ให้ผลอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อ $E_y = 2$ cm ยกเว้นเมื่อ $E_x = 45$ cm เนื่องจากที่ระยะ $E_y = 4$ cm สามารถเหนี่ยวนำกระแสลมร้อนในชั้นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าให้ไหลลงสู่ผิวหน้าของวัสดุ รวมถึงทำให้บริเวณผิวหน้าแพคเกจมีความเร็วลมที่สูงกว่า

จากข้อสรุปข้างต้นตำแหน่งของอิเล็กโทรดเทียบกับตำแหน่งของกราวด์ และวัสดุที่อบแห้งส่งผลต่อตำแหน่งการเกิดลมหมุนวน และความเร็วบริเวณผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้ง ดังนั้นเพื่อให้ได้อัตราการอบแห้งสูงอิทธิพลของแรง EHD จะต้องปรับปรุงรูปแบบการไหลให้กระแสลมในชั้นด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงให้ไหลไปสู่ผิวแพคเกจ และให้กระจายครอบคลุมทั่วผิวแพคเกจด้วยความเร็วสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุน และอุปกรณ์วิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

6. References

- [1] 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.
- [7] Smith, K., Byrne, G., Kempers, R., and Robinson, A.J., 2016, Electrohydrodynamic Augmentation of a Reflux Thermosyphon, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 79: 175-186.