

การศึกษาการสร้างลมหมุนควงส่วนโดยใช้วิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน

Investigation of Spiral Flow Generation Using Electrohydrodynamics for Enhancement of Hot-Air Drying Efficiency

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*, ณัฐดนัย หนักแน่น และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Chainarong Chaktranond*, Natdanai Nuknan and Phadungsak Rattanadecho

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะลมหมุนวนแบบควงส่วนที่ถูกสร้างโดยผลของสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน ลวดกราวด์จำนวน 2 เส้น ถูกวางในแนวขนานกับทิศการไหลของลมร้อน ส่วนตำแหน่งของลวดอิเล็กโตรดถูกวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล โดยจำนวนลวดอิเล็กโตรดที่ใช้ทดสอบมีค่า $n = 1 - 8$ เส้น และตำแหน่งของปลายลวดอิเล็กโตรดซึ่งอ้างอิงกับตำแหน่งของผิวหน้าของวัสดุพรุณถูกทดสอบที่ระยะในทิศตั้งฉากการไหล $L_{y,E} = 1$ และ 3 cm และที่ระยะในแนวทิศการไหล $L_{x,E} = 0 - 7.5$ cm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า $V = 20$ kV อุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่ 60°C และ 0.35 m/s ตามลำดับ วัสดุพรุณถูกใช้แทนด้วยแพคเกจซึ่งประกอบด้วยน้ำ อากาศ และเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm แพคเกจมีความอิมพัลส์เริ่มต้น $S_i = 0.5$ ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อปล่อยสนามไฟฟ้าสู่ลมร้อนทำให้เกิดลมหมุนในระนาบตั้งฉากกับการไหลบริเวณเหนือผิวหน้าของแพคเกจ และด้วยอิทธิพลของลมหมุนวนทำให้แพคเกจมีอุณหภูมิและอัตราการระเหยของน้ำที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มจำนวนลวดอิเล็กโตรดทำให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ $1.2 - 1.7$ เท่า การติดตั้งลวดอิเล็กโตรดที่ตำแหน่งลมร้อนเริ่มสัมผัสกับแพคเกจให้อัตราการอบแห้งสูง จากภาพถ่ายการไหลแสดงให้เห็นว่ารูปร่างและตำแหน่งของลมหมุนวนเปลี่ยนตามตำแหน่งของอิเล็กโตรดและกราวด์ การติดตั้งอิเล็กโตรดที่สูงกว่าตำแหน่งของกราวด์ส่งผลทำให้ลมที่ถูกเหนี่ยวนำโดยผลของการไหลแบบเฉือนมีทิศพุ่งลงสู่ผิวหน้าของแพคเกจ ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความร้อนบริเวณผิวหน้าแพคเกจดีขึ้น

คำสำคัญ : ลมหมุนควงส่วาน; อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์; การอบแห้งด้วยลมร้อน; การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

Abstract

This research aims to study the patterns of electric-driven swirling flow for enhancing the efficiency of hot-air drying. Two ground wires are placed in the flow direction, while electrode wires are placed in the normal direction of flow. The number of electrode wires is tested at $n = 1 - 8$. In addition, electrode positions respected to the surface of porous material are varied both in the normal direction with $L_{y,E} = 1$ and 3 cm and in the flow direction with $L_{x,E} = 0 - 7.5$ cm. High electrical voltage is applied at $V = 20$ kV. The temperature and bulk mean velocity of hot air entering test section are controlled at 60°C and 0.35 m/s, respectively. In this study, a packed bed used as a porous material composes of water, air and 0.125 -mm-diameter glass beads. The initial saturation of packed bed is $S_i = 0.5$. It is found from experimental results when electric fields are exposed to hot-air flow, swirling flow is created in the plane normal to flow above the packed bed surface. With the influence of the swirling, surface temperature and the rate of moisture removal are rapidly increased. Increasing the number of electrodes enhanced the rate of moisture removal by 1.2 - 1.7 times. The maximum rate of moisture removal is obtained when the electrodes are placed in where hot-air flow initially attaches the surface of packed bed. It is shown from the flow visualization that pattern and location of the swirling depend on electrode and ground positions. When electrode position is higher than ground wires, air induced by shear flow effect impinges on packed bed surface, resulting enhancement of heat and mass transfer.

Keywords: spiral flow; electrohydrodynamics; hot-air drying; enhancement of heat and mass transfer

1. บทนำ

การอบแห้งด้วยลมร้อนถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อปรับปรุงและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยา และผลิตผลทางการเกษตร แต่เนื่องด้วยอิทธิพลของชั้นการไหลบาวดาร์เรเยอร์ (Boundary layer) หรือการไหลแบบแยก (flow separation) [1] ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าของวัสดุต่ำ ส่งผลทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานและสิ้นเปลืองพลังงานสูง

การอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าหรือที่เรียกการอบแห้งแบบอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งให้สูงขึ้นมาก [1-4] หลักการคือเมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยสู่อากาศ อากาศบริเวณหัวอิเล็กโตรดจะถูกชาร์จและถูกขับเคลื่อนให้เร็วขึ้นไปสู่กราวด์ ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมกันระหว่างอากาศ ในขณะที่ด้วยอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างอากาศที่มีความเร็วสูงกับ

อากาศที่มีความเร็วต่ำกว่าหรือที่เรียกว่าการไหลแบบเฉือน (shear flow) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศที่ไม่ถูกซาร์ทเกิดการหมุนวนหรือที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (corona wind) และผลของลมหมุนวนทำให้การถ่ายเทความร้อนและความร้อนบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนขึ้น

Chakranond และ Rattanedecho [1] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความร้อนของแพคเบด (packed bed) ซึ่งใช้แทนวัสดุพูน โดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า และศึกษาผลของความพูนของแพคเบดในการทดลองลดอุณหภูมิของ 4 เส้น ถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ลม ส่วนเส้นลดกรวดถูกติดตั้งขวางกับที่ทางการไหลของลมร้อนและอยู่เหนือแพคเบด จากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าลมจะเกิดการหมุนวนรอบ ๆ ลดกรวดและเป็นเหตุให้การพาความร้อนและการระเหยของความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงแพคเบดที่ให้แต่ละชั้นมีค่าความพูนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (capillary pressure) ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งต่างกัน

Lai และ Lai [2] ติดตั้งลดอุณหภูมิและแผ่นกรวดโลหะทองแดงที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเบด ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการการอบแห้งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และอิทธิพลของลมหมุนวนจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศซึ่งอยู่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น

Cao และคณะ [3] ใช้ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และติดตั้งลดอุณหภูมิจากทองแดงจำนวน 16 แท่ง อยู่เหนือแผ่นกรวดสแตนเลส ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าและแปรผกผันระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและกรวด

Lai และ Wang [4] ติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนเสริมใต้แพคเบดที่มีความอึดตัวแบบไม่สมบูรณ์ (unsaturated packed bed) ลดอุณหภูมิของลดอุณหภูมิที่ด้านบนและแผ่นกรวดทองแดงถูกติดตั้งที่ด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์จะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงที่แพคเบดมีความชื้นสูงหรือช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทิศทางการเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับทิศของการไหลของลมซึ่งทำให้ผลของโคโรนาวินด์จะลดลงถ้าหากกระแสลมที่เข้าหน้าตัดทดสอบมีค่าสูงขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนของวัสดุพูนที่มีความอึดตัวแบบไม่สมบูรณ์โดยใช้ลมหมุนวนควงสวนที่สร้างขึ้นจากแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าจะกระทำให้เกิดทิศทางตั้งฉากกับการไหลของลมและศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งอันเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งลดอุณหภูมิและกรวด

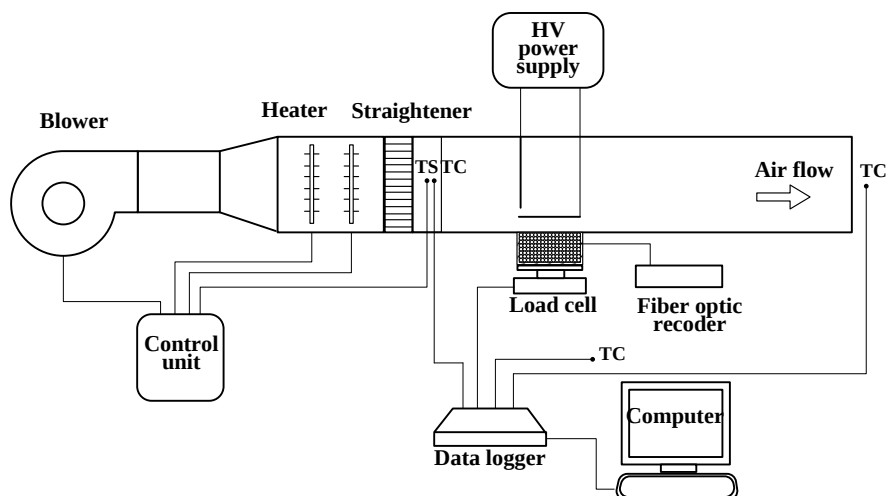
2. ขุดทดสอบและการทดลอง

แผนภาพขุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 ในการทดลองวัสดุพูนถูกใช้แทนด้วยแพคเบดซึ่งติดตั้งอยู่ในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 30 x 30 cm สภาวะของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่อุณหภูมิ 60 °C (โดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ TS) และที่ความเร็วเฉลี่ย 0.35 m/s อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล (TC) ชนิด K กล่องแพคเบด ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) มีขนาด 7.5 x 15 x 4 cm (กว้าง x ยาว x สูง) และที่ผิวกล่องแพคเบดถูกหุ้มด้วยฉนวนยางกันความร้อน ยกเว้นที่ผิวหน้าเปิดสู่ลมร้อน และภายในกล่องประกอบด้วยน้ำ อากาศ และเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm (ค่าความพูน, ϕ

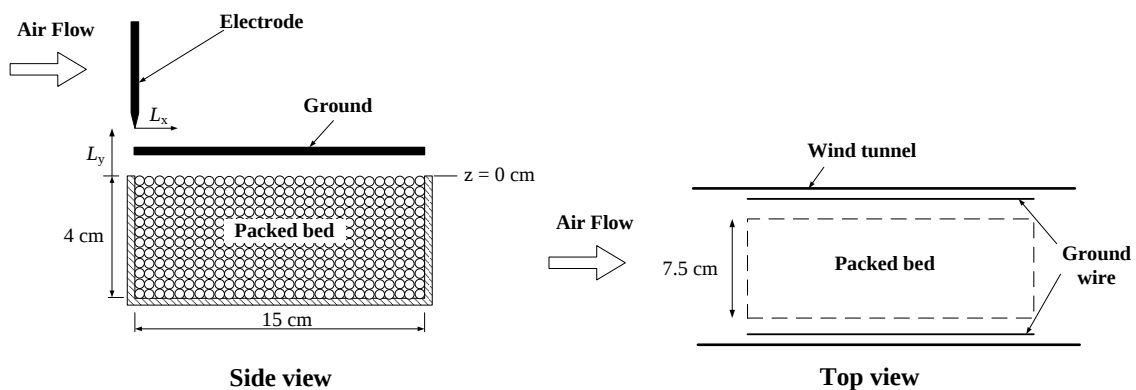
~ 0.385) และค่าความอึดตัวเริ่มต้นของแพคเบตมีค่า $S_i = 0.5$

ดังแสดงในรูปที่ 2 อูณหภูมิภายในแพคเบตถูกวัดด้วยลวดไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermo-meter, Model 790, Santa Clara, Canada, accuracy $\pm 0.5^\circ\text{C}$) จำนวน 3 เส้น ซึ่งติดตั้งที่ระยะ (z) เท่ากับ 0, 1, และ 2 cm (วัดจากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเบต) น้ำหนักของแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาถูกวัดโดยโหลดเซลล์ (Load cell, accuracy $\pm 0.1\text{ g}$) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แรงดันสูง (Glassman, Model FJ30R4, New Jersey, USA) ถูกใช้สร้างสนามไฟฟ้าที่แรงดันสูงที่ 20 kV และกำหนดให้ขอบของแพคเบตด้านต้นกระแสลมเป็นตำแหน่งอ้างอิง ($L_x = L_y = 0\text{ cm}$) ในการทดลองลวดอิเล็กทรอนิกส์ถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์และถูกปรับตำแหน่งทั้งระยะในแนวการไหล (L_x) และระยะในแนวตั้งฉากกับการไหล (L_y) ส่วนเส้นลวดกราวด์จำนวน 2 เส้น ถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างของอุโมงค์ลมในแนวขนานกับทิศการไหลของลม



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดสอบ

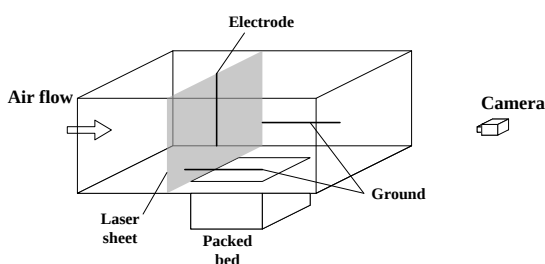


รูปที่ 2 ตำแหน่งอิเล็กโทรดและแพคเบต

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 ภาพถ่ายการไหลภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

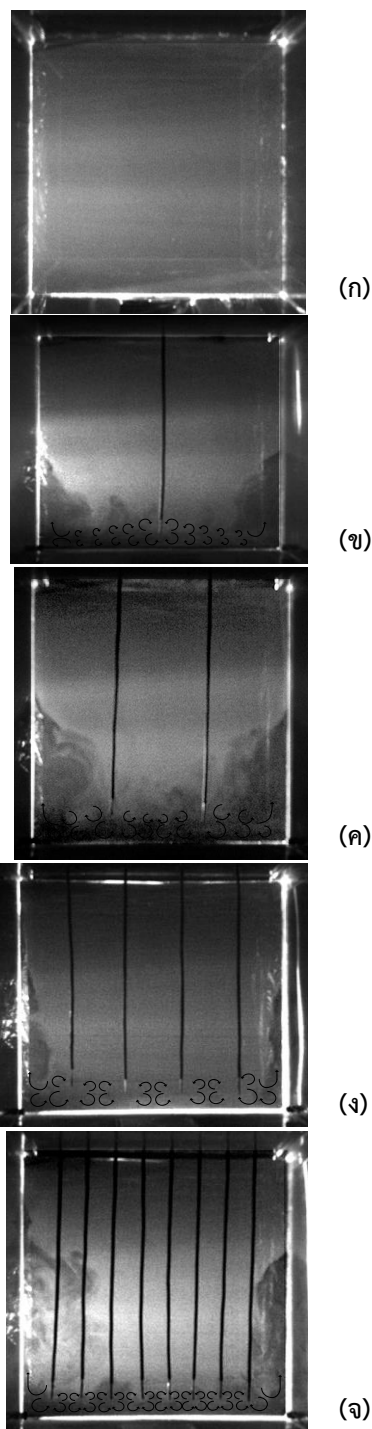
เพื่อสังเกตการเกิดลมหมุนในระนาบตั้งฉากกับการไหลของลมโดยผลของสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้ควินรูปแสดงเส้นทางการไหลของลม และใช้แสงเลเซอร์สร้างฉากรับภาพที่ระนาบ $L_x = 0$ cm และตั้งกล้อง (Basler model Aca1300-30gm, Germany) ที่ปลายทางออกของอุโมงค์ลม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการถ่ายภาพการไหล

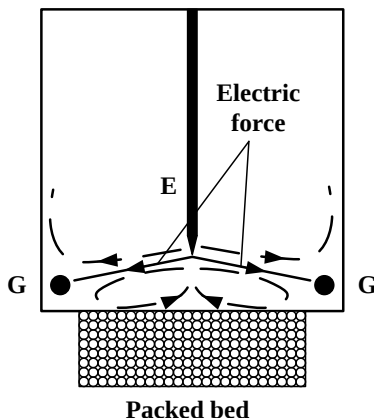
รูปที่ 4 แสดงภาพการไหลของอากาศในระนาบ $L_x = 0$ cm โดยใช้อิเล็กโตรดและกราวด์ติดตั้งที่ $L_{y,E} = 3$ cm และ $L_{y,G} = 0$ cm ตามลำดับ จากรูปที่ 4ก แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าการไหลของลมที่ระนาบหน้าตัดมีลักษณะราบเรียบ แต่เมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะเห็นสังเกตลมหมุนและความปั่นป่วนบริเวณผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม การเพิ่มจำนวนเส้นอิเล็กโตรดมีผลทำให้ลมหมุนเกิดความปั่นป่วนและความแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณที่มีความปั่นป่วนแผ่กระจายไปสู่ผนังด้านบนของอุโมงค์ลมได้มากขึ้น ผลของการหมุนวนนี้ช่วยทำให้เพิ่มการคลุกเคล้าระหว่างอากาศบริเวณผิวหน้าของแพคเกจมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 5 ซึ่งแสดงภาพวาดการเคลื่อนที่ของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าจะเห็นเมื่ออากาศส่วนที่ถูกขั้วโดยสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปสู่เส้นลวดกราวด์ทั้ง



รูปที่ 4 ลักษณะลมหมุนวนในระนาบหน้าตัดการไหลเมื่อใช้อิเล็กโตรดจำนวนลวดต่างกัน (ก) No EHD (ข) 1 เส้น (ค) 2 เส้น (ง) 4 เส้น และ (จ) 8 เส้น

สองข้างอากาศรอบ ๆ จะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหมุนวน โดยเฉพาะลมหมุนวนที่ใกล้กับผิวของแพคเบตจะช่วยนำพาความชื้นให้ระเหยออกจากผิวของแพคเบตได้ดีขึ้นซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 5 ภาพวาดแสดงการไหลของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า

4.2 ผลของการอบแห้งเมื่อใช้สนามไฟฟ้าร่วม

4.2.1 ผลของตำแหน่งอิเล็กโทรดและกราวด์ในระนาบตั้งฉากกับการไหล ($L_{y,E}$ และ $L_{y,G}$)

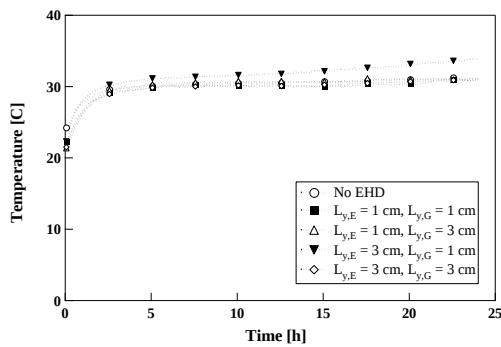
จากรูปที่ 6 ทั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ถูกเปลี่ยนตำแหน่งในระนาบตั้งฉากกับการไหลและใช้อิเล็กโทรดจำนวน 8 เส้น และพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าของแพคเบตสูงเร็วยิ่งขึ้น และอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า (ประมาณ 1.2-1.7 เท่า) เมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้งที่ $L_{y,E} = 3$ cm และ ลวดกราวด์ที่ $L_{y,G} = 1$ cm จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตเพิ่มสูงเร็วที่สุด และนอกจากนี้ความชื้นระเหยออกจากแพคเบตได้สูงสุดดังแสดงในรูปที่ 6 ข ทั้งนี้เพราะลมหมุนวนที่ใกล้กับผนังด้านล่างของอุโมงค์ลมมีทิศพุ่งลงสู่ผิวหน้าของแพคเบต นอกจากนี้ที่ระยะ

ติดตั้งดังกล่าวลมหมุนวนมีความปั่นป่วนสูง ซึ่งช่วยให้ความร้อนจากลมร้อนสามารถถ่ายเทไปสู่ผิวแพคเบตได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้หลังจากการอบแห้งผ่านไป 12 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตเพิ่มสูงเร็วขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ในกรณีนี้เมื่อบริเวณผิวหน้าของแพคเบตมีความแห้ง ความร้อนจากลมร้อนที่ถ่ายเทที่ผิวของแพคเบตจึงถูกใช้ไปในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ผิวหน้าแพคเบตมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนกรณีอื่น ๆ เนื่องจากผิวหน้าของแพคเบตยังคงมีความเปียกอยู่ ดังนั้นความร้อนจากลมจึงถูกใช้ไปในรูปความร้อนแฝง (latent heat) สำหรับการระเหยที่ผิวของแพคเบต

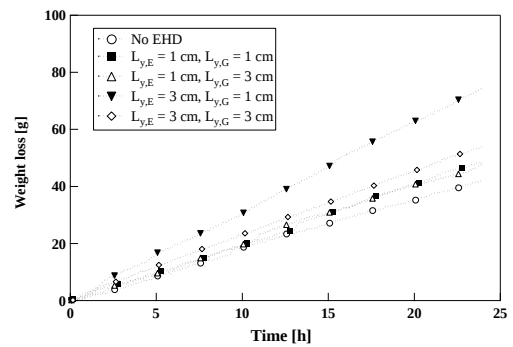
เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4 มาคำนวณค่าอัตราการระเหยเฉลี่ย (average drying rate, DR) พบว่ากรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่า $DR = 1.75$ g/h ส่วนกรณีที่ใช้สนามไฟฟ้าและ $L_{y,E} = 3$ cm และ $L_{y,G} = 1$ cm มีค่า $DR = 3.1$ g/h หรือประมาณ 1.77 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า

4.2.2 ผลของจำนวนอิเล็กโทรด (n)

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนเส้นลวดอิเล็กโทรดมากขึ้นส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตและการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตสูงเร็วขึ้น ทั้งนี้เพราะความแข็งแรงของลมหมุนวนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างปลายลวดอิเล็กโทรดและกราวด์มากขึ้น [5] ส่งผลให้ความปั่นป่วนบริเวณหน้าแพคเบตขยายเป็นวงกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 4 ข การใช้จำนวนเส้นอิเล็กโทรด (n) น้อยแม้ว่าลมหมุนวนจะมีลักษณะเป็นวงกว้าง (ดังแสดงในรูปที่ 4 ข) แต่ความแข็งแรงของการหมุนวนจะน้อยเพราะแรงของสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลงแปรผกผันระยะห่างกำลังสอง [6] โดยอัตราการอบแห้ง $DR = 2.11, 2.33, 2.58, 3.1$ เมื่อ $n = 1, 2, 4$, และ 8 เส้น ตามลำดับ

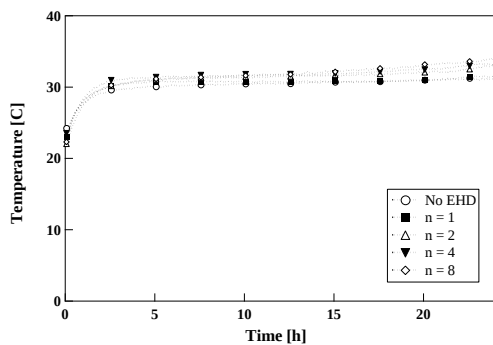


(ก)

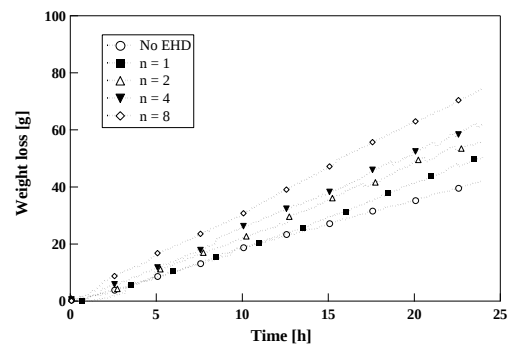


(ข)

รูปที่ 6 ผลของตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ในระนาบการไหล (ก) อุณหภูมิที่ผิวแพคเกจ และ (ข) น้ำหนักของมวลชิ้นที่ระเหยออกจากแพคเกจ

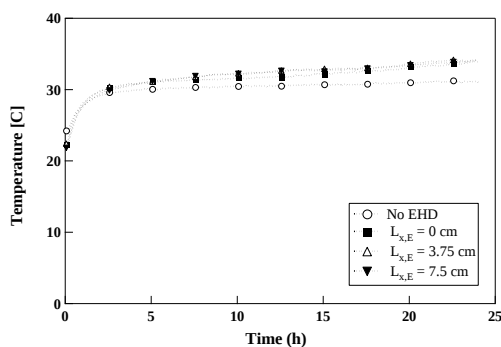


(ก)

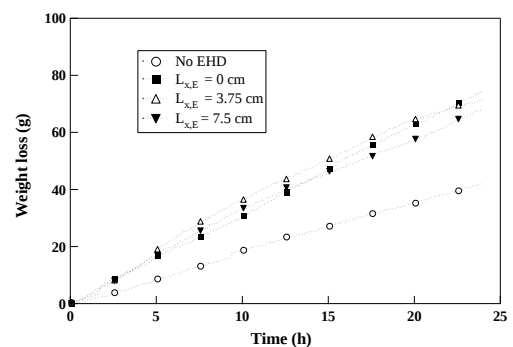


(ข)

รูปที่ 7 ผลของจำนวนเส้นลวดอิเล็กโทรด (ก) ที่มีต่อการอบแห้ง (ก) อุณหภูมิที่ผิวแพคเกจ และ (ข) น้ำหนักของมวลชิ้นที่ระเหย



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ผลของการติดตั้งอิเล็กโทรดที่ระยะ $L_{x,E}$ ต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิที่ผิวแพคเกจ และ (ข) น้ำหนักของมวลชิ้นที่ระเหยออกจากแพคเกจ

4.2.3 ผลของตำแหน่งอิเล็กโทรดในแนวการไหล ($L_{x,E}$)

จากรูปที่ 8 ซึ่งใช้อิเล็กโทรดจำนวน 8 เส้น และตำแหน่งติดตั้งลวดอิเล็กโทรดและกราวด์ที่ $L_{y,E} = 3$ cm และ $L_{y,G} = 1$ cm ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดในแนวการไหลมีผลการอบแห้ง เมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้ง $L_{x,E} = 0$ และ 3.75 cm จะให้ทำอุณหภูมิที่ผิวและการระเหยของความชื้นออกจากแพคเกจมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะหมนวนเกิดขึ้นที่ขอบของแพคเกจด้านที่เริ่มปะทะลมร้อน ส่งผลทำให้อิทธิพลของลมหมนวนเกิดขึ้นทั่ว ๆ ทั่วหน้าของแพคเกจ และเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่ $L_{x,E} = 7.5$ หมนวนจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของแพคเกจทำให้ผิวแพคเกจบางส่วนที่ได้รับอิทธิพลของลมหมนวน

4.3 การวิเคราะห์ค่าพลังงานจำเพาะ

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้ง ซึ่งพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ขดลวดไฟฟ้า (1.65 kW) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ($I = 0.1$ mA, 20 kV) และพัดลม (18.7 W) ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ของการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนซึ่งนิยามโดยพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณความชื้นที่ระเหย (weight loss) ใน 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงาน

No.	Case	DR_{EHD}/DR_{free}	SEC [J/g]
1	No EHD	1.00	953.54
2	$L_{x,E} = 0$ cm	1.77	538.94
3	$L_{x,E} = 3.75$ cm	1.70	562.37
4	$L_{x,E} = 7.5$ cm	1.62	587.93

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าลมหมนวนที่เกิด

จากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสามารถทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่าของการอบแห้งที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งให้น้อยลงและเป็นการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC จะเห็นได้ว่าการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนที่ใช้สนามไฟฟ้ารวมจะให้ค่า SEC ที่ต่ำกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวมาก กล่าวคือ มีความคุ้มค่าของการใช้พลังงานมากเมื่ออยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ (constant rate of drying)

5. สรุป

การสร้างลมหมนวนเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับการไหลของลมร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจให้สูงขึ้นและเพิ่มอัตราการระเหยของความชื้นออกจากวัสดุพูนได้ดียิ่งขึ้น โดยจากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

5.1 การจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดและกราวด์มีผลต่อลักษณะการเกิดลมหมนวน เมื่อ $L_{y,E} = 3$ cm และ $L_{y,G} = 1$ cm ทำให้เกิดหมนวนที่มีความแรงและมีทิศพุ่งสู่ผิวของแพคเกจ ส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและการระเหยของความชื้นมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ

5.2 จำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เพราะระยะห่างระหว่างปลายขั้วอิเล็กโทรดและกราวด์น้อยลง และสนามไฟฟ้าถูกปล่อยออกจากแต่ละปลายขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลทำให้อากาศบริเวณนี้เกิดความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น

5.3 ตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดในแนวการไหลของลมมีผลมากต่ออัตราการอบแห้ง เมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งที่ลมร้อนเริ่มสัมผัสกับผิวหน้าของแพคเกจลมหมนวนจะแผ่กระจายเป็นวงกว้างที่ผิวหน้า

ของแพคเกจทำให้ได้อัตราการอบแห้งสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

5.4 อิทธิพลของลมหมุนแบบควงส่วช่วยทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2-1.7 เท่า ของการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนปกติ และพบว่าเมื่อการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ การใช้ลมหมุนวนแบบควงส่วร่วมกับการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนจะให้ความคุ้มค่าของการใช้พลังงานมาก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และกองทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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: 1049-1056.
- [2] Lai, F.C. and Lai, K.W., 2002, EHD-enhanced drying with wire electrode, *Drying Technol.* 20: 1393-1405.
- [3] Cao, W., Nishiyama, Y. and Koide, S., 2004, Electro-hydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field, *J. Food Eng.* 62: 209-213.
- [4] Lai, F.C. and Wang, C.C., 2009, EHD-enhanced water evaporation from partially wetted glass beads with auxiliary heating from below, *Drying Technol.* 27: 1199-1204.
- [5] Sanewong 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.
- [7] Sanewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C. and Rattanadecho, P., 2013, Numerical analysis of influence of electrode position on fluid flow in a 2-D rectangular duct flow, *J. Mech. Sci. Technol.* 27: 1957-1962.