

ลมหมุนวนตั้งฉากโดยสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุนที่อยู่ภายใต้ การไหลของลมร้อน

Cross-Flow Vortex Induced by Electric Fields for Enhancement of Heat and Mass Transfer in a Porous Packed Bed Subjected to Hot-Air Flow

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{1*} และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบล คลองหนึ่ง อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: E-mail cchainar@engr.tu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-5643001 ต่อ 3144 เบอร์โทรสาร 02-5643023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุนที่ถูกอบแห้งแบบใช้ลมร้อนด้วยลมหมุนวนในแนวตั้งฉากกับการไหลที่สร้างจากสนามไฟฟ้าแรงดันสูง ในการทดลองความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนในอุโมงค์ลมก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่ 0.35 m/s และ 60°C ตามลำดับ ไฟฟ้าแรงดันสูงถูกทดสอบที่ 15 kV แท่งอิเล็กโทรดและแท่งกราวด์ถูกติดตั้งในทิศทางตั้งฉากและขนานกับทิศการไหลของลมตามลำดับ จำนวนแท่งอิเล็กโทรดที่ทดสอบ $n = 1 - 3$ แท่ง ตำแหน่งของแท่งอิเล็กโทรดถูกเปลี่ยนแปลงทั้งในแนวทิศทางการไหลและตั้งทิศตั้งฉากกับการไหล ส่วนแท่งกราวด์ถูกเปลี่ยนตำแหน่งเฉพาะในแนวตั้งฉากกับการไหล แพคเกจ (Packed bed) ที่ใช้แทนวัสดุพรุนประกอบด้วยน้ำ อากาศและลูกแก้ว จากผลการทดลองพบว่าตำแหน่งของอิเล็กโทรดและกราวด์และจำนวนแท่งอิเล็กโทรดมีผลมากต่อตำแหน่งและรูปแบบของลมหมุนวน เมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรดความรุนแรงของการหมุนวนมีค่ามากขึ้น การติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ใกล้กับผิววัสดุลมหมุนวนจะเกิดทั่วบริเวณผิวหน้าของแพคเกจ ด้วยผลนี้ส่งผลทำให้แพคเกจมีอุณหภูมิที่ผิวหน้าสูงเร็วยิ่งขึ้นและมีอัตราการระเหยของความชื้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก

คำหลัก: ลมหมุนวนในแนวตั้งฉากการไหล สนามไฟฟ้าแรงดันสูง วัสดุพรุน การถ่ายเทมวลและความร้อน

Abstract

This research proposes an efficient method to enhance heat and mass transfer in a porous material dried by hot airflow with the electrically-driven cross-flow vortex. In experiments, velocity and temperature of airflow are controlled at 0.35 m/s and 60°C, respectively; electrical voltage is tested at 15 kV. Electrode and ground wires are placed in the normal and parallel directions of airflow, respectively. Positions of electrodes are varied in both the parallel and normal directions, while positions of grounds are varied in the normal flow direction. The number of electrodes is tested $n = 1 - 3$. Packed bed representing porous material composes of water, air, and glass beads. Experimental results show that positions of electrode and ground, and the number of electrode highly affect the positions and patterns of vortices. When the number of electrode is increased, vortices are more violent. Moreover, the vortices spread over the material surface when electrodes and grounds are near the packed bed surface. With these effects on packed bed, the surface temperature increases rapidly and drying rate is enhanced considerably.

Keywords: 3 – 5 Cross-flow vortex, high electrical voltage, porous medium, heat and mass transfer.

1. บทนำ

ด้วยวิกฤตด้านพลังงานและผลกระทบของการใช้พลังงานต่อสิ่งแวดล้อมทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิตต่างๆ เป็นสิ่งที่ถูกให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก และในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา [1-9] การใช้หลักการอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) หรือการใช้สนามไฟฟ้าควบคุมลักษณะการไหลของของไหลเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกศึกษาเป็นอย่างมาก ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่มีชิ้นส่วนหรือกลไกที่เคลื่อนไหวเพื่อปรับรูปแบบการไหล อีกทั้งยังสามารถปรับรูปแบบการไหลเมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงได้

Kasayapanand และ Kiatsirirot [1] ศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้สนามไฟฟ้าควบคุมการไหลของของไหลในช่องการไหลแบบลูกคลื่น (Wavy channel flow) จากการคำนวณพบว่า เมื่อปล่อยสนามไฟฟ้าสู่การไหล รูปแบบการไหลของของไหลและชั้นเทอร์มอลบาวดารี (Thermal boundary layer) บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกรบกวน ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น Kasayapanand [2] ทำการคำนวณการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหล (Channel flow) โดยติดตั้งอิเล็กโตรดแบบกลุ่ม (Electrode bank) พบว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดมีผลมากต่อการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน

Lai และ Lai [3-4] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งในท่อการไหลด้วยสนามไฟฟ้าซึ่งจัดเรียงอิเล็กโตรดกับกราวด์ (Ground) แบบเส้นลวดกับแผ่น (Wire-to-plate arrangement) โดยแท่งอิเล็กโตรดและแผ่นทองแดงถูกวางไว้ที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเกจพูน (Porous packed bed) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าผลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นมาก และอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และผลของโคโรนาวินด์จะลดลงเมื่อความเร็วของลมที่เพิ่มขึ้น

Chaktranond และ Rattanadecho [5] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนที่อยู่ภายใต้ลมร้อนโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจัดเรียงอิเล็กโตรดกับกราวด์แบบเส้นลวดกับเส้นลวด (Wire-to-wire arrangement) จากการทดลองพบว่าลมหมุนวนที่เกิดขึ้น

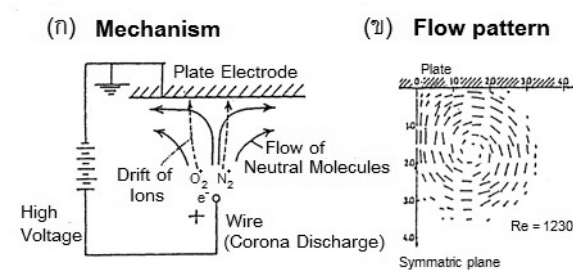
จากสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้ลวดอิเล็กโตรดและกราวด์ ธัชพงศ์ กริวัชรินทร์ และคณะ [6] พบว่าการเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโตรดและระยะห่างในแนวการไหลระหว่างอิเล็กโตรดกับกราวด์ที่แคบจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลของแพคเกจ ซัยณรงค์ จักรธรรานนท์ และคณะ [7] ยังพบว่า ลมหมุนวนที่เกิดขึ้นจะช่วยลดผลของการไหลแบบแยกที่ผิวของแพคเกจ ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเกจดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อทิศทางของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำในทิศเดียวกับทิศการไหลของลมร้อนจะทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนดีขึ้น Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [8] พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับกราวด์มีค่ามากขึ้นลมหมุนวนจะมีขนาดวงหมุนวนที่ใหญ่ขึ้น แต่ความแข็งแรงของการหมุนวน (Vortex strength) กลับมีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อระยะห่างมีค่าน้อยลงขนาดวงหมุนวนจะเล็กลงแต่ความแข็งแรงของการหมุนวนกลับมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การจัดเรียงอิเล็กโตรดและกราวด์แบบเส้นลวดกับเส้นลวดจะทำให้ลมเกิดการหมุนวนเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณแต่ค่าการหมุนวนแข็งแรงกว่าการจัดเรียงแบบอิเล็กโตรดกับแผ่นกราวด์

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นการปรับรูปแบบการไหลภายในท่อหรือช่องการไหลสามารถทำได้โดยใช้สนามไฟฟ้าสร้างลมหมุนวนให้เกิดขึ้นในทิศทางการไหลแต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของลมหมุนวนจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วที่ทางเข้าของของไหลมีค่ามากหรือเมื่อทิศทางของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับทิศของการไหล ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดที่จะสร้างลมหมุนวนให้เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศการไหล ซึ่งทิศของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำในทิศทางตั้งฉากกับการไหลส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเกจดีขึ้น

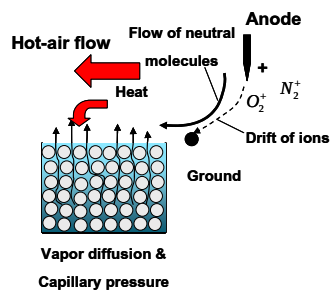
2. หลักการสร้างลมหมุนด้วยสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน

กลไกการสร้างลมหมุนด้วยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 เมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงปล่อยจากขั้วอิเล็กโตรด อากาศที่อยู่ใกล้ๆ นี้จะถูกไอออไนซ์ (Ionized) และถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์ ด้วยผลของการไหลแบบเฉือน (Shear flow) ขณะที่อากาศส่วนนี้เคลื่อนที่จะเหนี่ยวนำอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ให้เคลื่อนที่แบบหมุนวน

จากแนวคิดข้างต้นถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายมวลและความร้อนของวัสดุพูนดังรูปที่ 2 เมื่อลมร้อนบริเวณเหนือแพคเบตเกิดการหมุนวนจะทำให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และความชื้นที่อยู่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตจะระเหยสู่ลมร้อนเร็วด้วยอัตราที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดียิ่งขึ้น [5]



รูปที่ 1 กลไกการเกิดลมหมุนวน [10] (ก) การเคลื่อนที่ของอากาศที่ถูกชาร์จ (ข) กระแสหมุนวน



รูปที่ 2 กลไกการเกิดลมหมุนวนในทิศการไหลของลมเพื่อการถ่ายมวลและความร้อนในแพคเบตโดยใช้สนามไฟฟ้า [5]

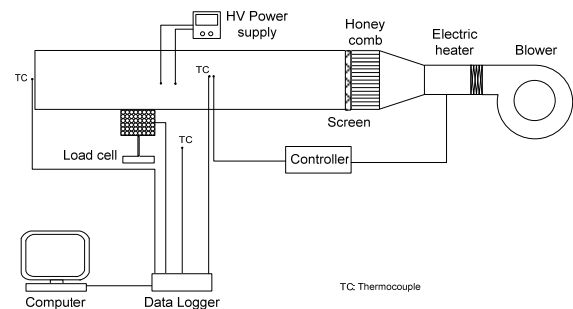
3. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 - 1 ลมร้อนไหลผ่านอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 15 cm X 15 cm และลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C และความเร็วลมเฉลี่ยที่ 0.35 m/s ส่วนอุณหภูมิภายนอกมีค่าประมาณ 25°C

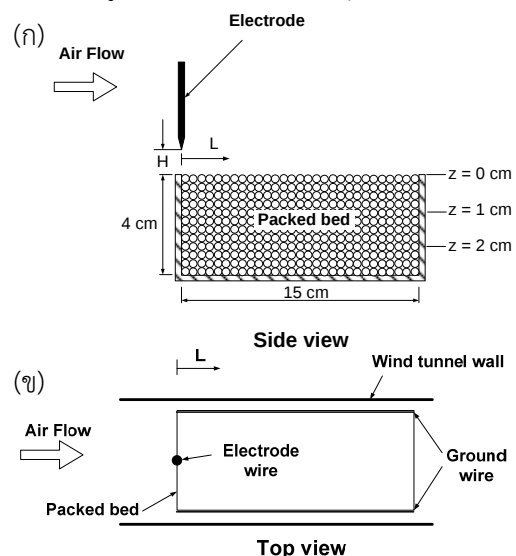
ดังแสดงในรูปที่ 3 - 2 (ก) กล่องแพคเบตซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านล่างของอุโมงค์ลมมีขนาด 14 cm (กว้าง) x 15 cm (ยาว) x 4 cm (สูง) และทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ผิวภายนอกทุกด้านถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ยกเว้นที่ผิวด้านบนเปิดรับลมร้อน ภายในกล่องแพคเบตบรรจุน้ำ อากาศและเม็ดแก้ว (Glass bead) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm และกำหนดให้ที่สภาวะเริ่มต้นค่าความอึดตัว (Initial

saturation) ของแพคเบตมีค่า $s = 0.5$ อุณหภูมิภายในแพคเบตถูกวัดค่าโดยใช้สายไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^\circ\text{C}$) จำนวน 3 เส้น ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ระดับความลึก $z = 0, 1$ และ 2 cm (วัดจากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเบต) น้ำหนักของแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกวัดค่าโดยโหลดเซลล์ (Load cell) สนามไฟฟ้าถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า 15 kV

ในการทดลองแท่งอิเล็กโทรดจะถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ลมและถูกติดตั้งด้วยระยะห่างที่เท่ากันในแนวตั้งฉากกับทิศการไหล ส่วนตำแหน่งของลวดกราวด์ (ยาว 15 cm) ถูกติดตั้งในแนวขนานกับทิศการไหลที่ระยะ 4 cm สูงจากผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม ($H = 0$ cm) โดยปลายด้านหนึ่งของลวดกราวด์ถูกติดตั้งในแนวเดียวกับตำแหน่งของแพคเบต ($L = 0$ cm) ดังแสดงในรูปที่ 3 - 2 (ข)



รูปที่ 3 - 1 ไดอะแกรมชุดทดสอบ



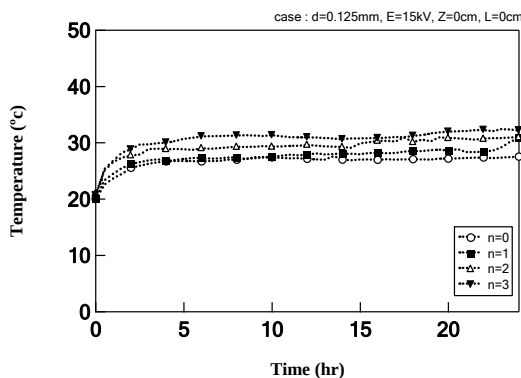
รูปที่ 3 - 2 ตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโทรด (ก) ภาพด้านข้าง (ข) ภาพด้านบน

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

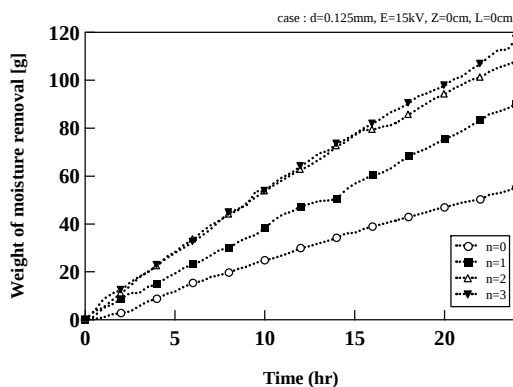
ผลการทดลองจะแสดงผลของตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดทั้งในทิศการไหลและทิศตั้งฉากกับการไหล ($L = -3.75, 0, 3.75$ และ 7.5 cm; $H = -3.75$ และ 0 cm) และจำนวนอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น ($n = 1 - 3$ แท่ง) ที่มีต่อรูปแบบการไหลของลมร้อนและการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลของแพคเบต

4.1 ผลของจำนวนแท่งอิเล็กโทรด

รูปที่ 4 - 1 และ 4 - 2 แสดงผลของจำนวนแท่งอิเล็กโทรดที่มีต่ออุณหภูมิผิวและน้ำหนักของแพคเบตที่เวลาต่างๆของการอบแห้ง โดยตำแหน่งของอิเล็กโทรดถูกติดตั้งที่ $L = 0$ cm และ $H = 0$ cm ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว การใช้สนามไฟฟ้าร่วมส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิผิวของแพคเบตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและค่าอัตราการระเหยของความชื้น (น้ำหนักของแพคเบตที่เปลี่ยนไปต่อเวลา) ออกจากแพคเบตมีค่าสูงเร็วขึ้นเช่นกัน และเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรดมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าสูงเพิ่มยิ่งขึ้น ประมาณ 1.63 - 2.12 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4 - 1 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของแพคเบตที่จำนวน n ค่าต่างๆ

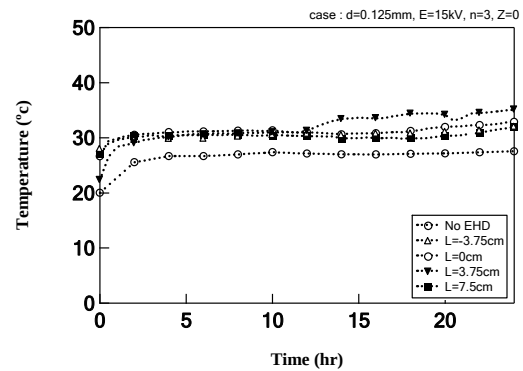


รูปที่ 4 - 2 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากแพคเบตที่จำนวน n ค่าต่างๆ

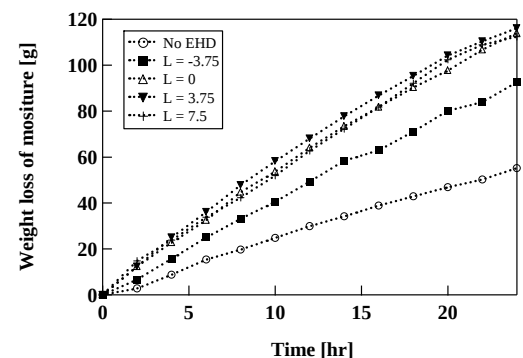
4.2 ผลของตำแหน่งติดตั้งแท่งอิเล็กโทรดในแนวทิศการไหล (L)

ผลการทดลองส่วนนี้ใช้จำนวนแท่งอิเล็กโทรด $n = 3$ แท่งและกำหนดให้ตำแหน่งอิเล็กโทรดถูกเปลี่ยนแปลงในแนวทิศการไหล ($L = -3.75, 0, 3.75$, และ 7.5 cm) ส่วนตำแหน่งความสูงของอิเล็กโทรดและกราวด์จะถูกกำหนดที่ $H = 0$ cm

จากรูปที่ 4 - 3 และ 4 - 4 เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์มีค่าน้อยลง ส่งผลทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะหมุนวนจะมีความแข็งแกร่งมากเมื่อตำแหน่งแท่งอิเล็กโทรดอยู่ใกล้กับกราวด์ [7, 8] อีกทั้งการติดตั้งอิเล็กโทรดที่ระยะ L มีค่าเป็นบวกจะทำให้ลมหมุนวนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบต



รูปที่ 4 - 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวของแพคเบตที่ระยะ L ค่าต่างๆ



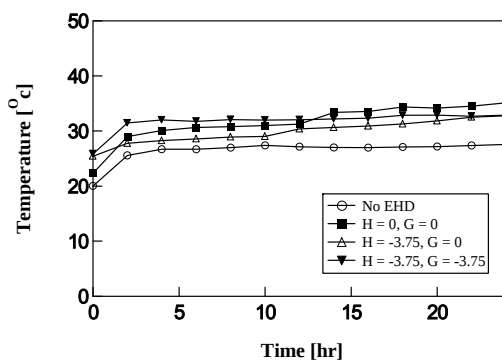
รูปที่ 4 - 4 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากแพคเบตที่ระยะ L ค่าต่างๆ

4.3 ผลของตำแหน่งติดตั้งแท่งอิเล็กโทรดในแนวทิศตั้งฉากกับการไหล (H)

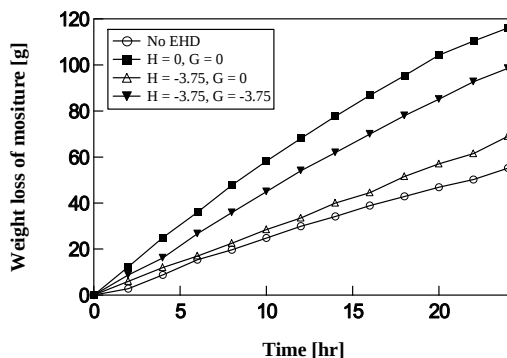
ผลการทดลองส่วนนี้ใช้จำนวนแท่งอิเล็กโทรด $n = 3$ แท่ง และกำหนดให้ตำแหน่งอิเล็กโทรดในทิศการไหลมีค่าระยะ $L = 3.75$ cm ส่วนตำแหน่งของอิเล็กโทรดใน

ทิศทางตั้งฉากกับการไหลถูกทดสอบที่ระยะ $H = -3.75$ และ 0 cm นอกจากนี้ตำแหน่งของกราวด์ (G) ยังถูกเลื่อนตำแหน่งในทิศตั้งฉากกับการไหลอีกด้วย

จากรูปที่ 4 - 5 และ 4 - 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออีเล็กโทรดและกราวด์อยู่ใกล้กันจะส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าสูงเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้เมื่อแท่งอีเล็กโทรดถูกติดตั้งที่ $H = 0$ cm และกราวด์ถูกติดตั้งอยู่ที่ระดับความสูงเดียวกับปลายแท่งอีเล็กโทรด ($G = 0$ cm) จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตสูงกว่าเมื่อติดตั้งอีเล็กโทรดและกราวด์ไว้ใกล้ผิวแพคเบต ($H = -3.75$ cm, $G = -3.75$ cm)



รูปที่ 4 - 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตเมื่อ H ค่าต่างๆ



รูปที่ 4 - 6 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากแพคเบตที่ H ค่าต่างๆ

4. 4 ลักษณะลมหมุนวนจากผลของสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 - 7 แสดงภาพการหมุนวนของอากาศในระนาบตั้งฉากกับการไหลอันเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า และจากรูป 4 - 7 (ก) เมื่อใช้แท่งอีเล็กโทรด 1 แท่ง เกิดการหมุนวน 4 ลูกที่ระนาบนี้ โดยลมหมุนวนสองลูกเกิดขึ้นเหนือปลายแท่งอีเล็กโทรด และอีกสองลูกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่ำกว่าปลายแท่งอีเล็กโทรด โดยลมหมุนวนที่อยู่ต่ำกว่าปลายแท่งอีเล็กโทรด (ใกล้กับผนังด้านล่างของ

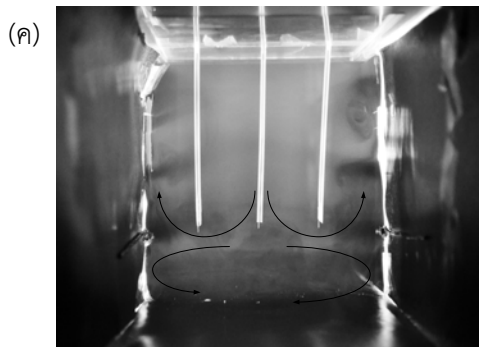
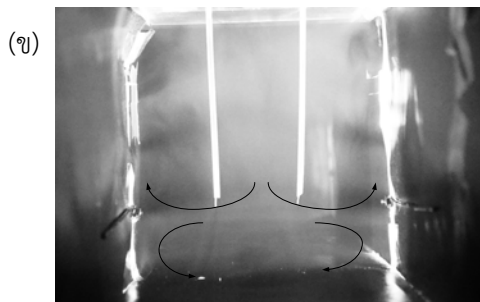
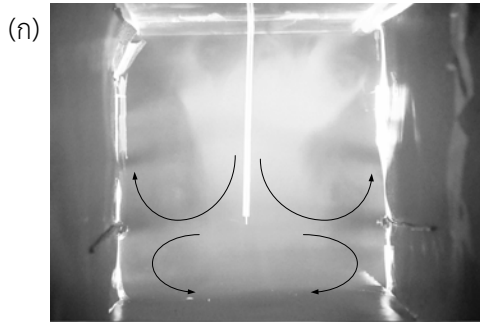
อุโมงค์ลม) มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่แพคเบตเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะลมหมุนวนดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทไปสู่ผิวของแพคเบตได้ดีขึ้น อีกทั้งอิทธิพลของลมหมุนวนยังเป็นตัวถ่ายเทโมเมนต์ให้กับความชื้นที่อยู่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตทำให้ความชื้นระเหยสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตมีค่ามากขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอีเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4 - 7 (ข) และ (ค) รูปแบบการหมุนวนมีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพราะเหตุผล 2 ประการคือ 1) ระยะห่างระหว่างอีเล็กโทรดและกราวด์มีค่าน้อยส่งผลทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่ามากยิ่งขึ้น โดยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างยกกำลังสอง [7] ดังนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอีเล็กโทรดส่งผลทำให้ระยะห่างระหว่างอีเล็กโทรดและกราวด์มีค่าลดลง และ 2) การเพิ่มจำนวนแท่งอีเล็กโทรดทำให้เส้นแรงสนามไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น [8, 9]

รูปที่ 4 - 8 แสดงภาพที่ได้จากการคำนวณของสนามความเร็วในระนาบตั้งฉากกับการไหลเมื่อใช้สนามไฟฟ้า ซึ่งคำนวณจากโปรแกรม COMSOL โดยรายละเอียดวิธีการคำนวณใช้วิธีที่นำเสนอโดย Saneewong Na Ayuttaya และคณะ [8, 9] จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอีเล็กโทรดมากขึ้นรูปแบบและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการหมุนวนเปลี่ยนไป และความเร็วของการหมุนก็ยิ่งมีการกระจายตัวมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้กับผนังด้านล่างของอุโมงค์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนที่ผิวหน้าของแพคเบตดียิ่งขึ้น ดังผลที่ได้รายงานมาแล้วก่อนหน้านี้

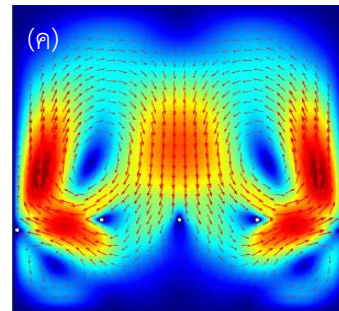
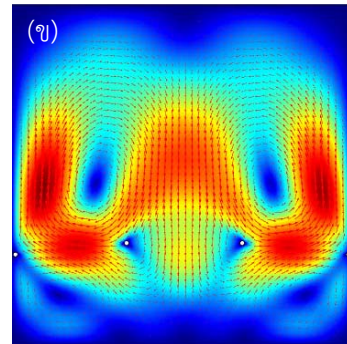
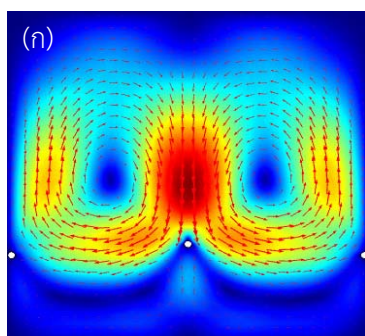
จากรูปที่ 4 - 9 ซึ่งแสดงผลของการติดตั้งตำแหน่งแท่งอีเล็กโทรดให้อยู่ใกล้ผิวของแพคเบต (ใกล้ผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม) มากยิ่งขึ้นพบว่าลมหมุนวนมีการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยลมหมุนวนบริเวณที่ตำแหน่งปลายแท่งอีเล็กโทรดมีบริเวณที่แคบลง (พื้นที่การหมุนวนน้อยลง) และมีความปั่นป่วนน้อยลง ทั้งนี้เพราะระยะห่างระหว่างอีเล็กโทรดและกราวด์มีค่ามากขึ้น ทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4 - 6

ส่วนรูปที่ 4 - 10 ตำแหน่งของแท่งอีเล็กโทรดและกราวด์ถูกติดตั้งใกล้ผิวผนังด้านล่างของอุโมงค์ (หรือใกล้ผิวแพคเบตมากขึ้น) และพบว่าลักษณะของลมหมุน

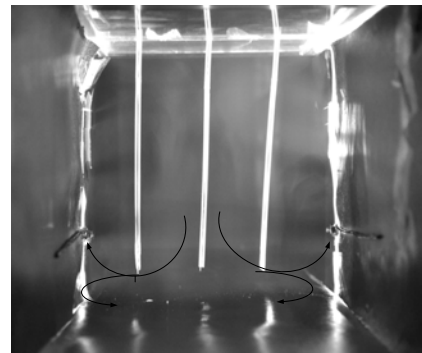
วนมีความปั่นป่วนที่มากกว่ารูปที่ 4 - 9 ทั้งนี้เพราะเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยลง แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นส่งผลทำให้ลมนวนปั่นป่วนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากลมนวนบริเวณส่วนที่ต่ำกว่าปลายแท่งอิเล็กโทรดมีลมนวนที่แคบกว่ารูปที่ 4 - 7 (ค) ทำให้อัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเกจมีค่าต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 4 - 6



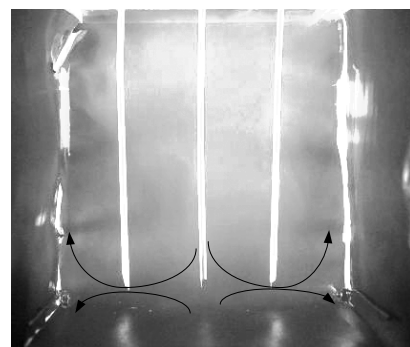
รูปที่ 4 - 7 ภาพลมนวนในระนาบหน้าตัดต่อทดสอบที่จำนวนแท่งอิเล็กโทรดค่า n ต่างๆ (ก) 1 แท่ง (ข) 2 แท่ง และ (ค) 3 แท่ง



รูปที่ 4 - 8 สนามความเร็วในระนาบหน้าตัดต่อทดสอบที่จำนวนแท่งอิเล็กโทรดค่า n ต่างๆ (ก) 1 แท่ง (ข) 2 แท่ง และ (ค) 3 แท่ง



รูปที่ 4 - 9 ภาพลมนวนในระนาบหน้าตัดต่อทดสอบเมื่อ $H = -3.75$ cm, $G = 0$ cm



รูปที่ 4 - 10 ภาพลมนวนในระนาบหน้าตัดต่อทดสอบเมื่อ $H = -3.75$ cm, $G = -3.75$ cm

5. สรุป

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนที่อยู่ภายใต้ลมร้อนโดยใช้ในสนามไฟฟ้าแรงดันสูงสร้างลมหมุนวนในแนวตั้งฉากกับการไหล จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรดมีผลทำให้รูปแบบการไหลในแนวตั้งฉากกับการไหลมีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะบริเวณเหนือผิวหน้าของแพคเกจ ส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นเพิ่มขึ้นประมาณ 1.63 - 2.12 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า
2. ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดในแนวทิศทางการไหลมีผลต่อตำแหน่งของการเกิดลมหมุนวนที่มีความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าของแพคเกจ ซึ่งถ้าอิเล็กโทรดเข้าใกล้กราวด์มากขึ้น ยิ่งให้อัตราการระเหยของความชื้นมีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น
3. การเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ในแนวตั้งฉากกับการไหลมีผลทำให้รูปแบบการหมุนวนของอากาศใกล้กับผิวแพคเกจ โดยเมื่ออิเล็กโทรดหรือกราวด์เข้าใกล้ผิวแพคเกจมากยิ่งขึ้น วงของการหมุนวนจะมีลักษณะที่ยิ่งแคบลง ซึ่งมีผลให้อัตราการระเหยของความชื้นเปลี่ยนแปลงไป โดยตำแหน่งที่อิเล็กโทรดและกราวด์ควรถูกติดตั้งให้ใกล้กันและให้ห่างจากผิวของแพคเกจที่ระยะหนึ่งๆ เพื่อให้อิทธิพลของลมหมุนวนสามารถนำความชื้นออกจากผิวหน้าของแพคเกจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kasayapanand, N., and Kiatsiriroat, T. (2005). EHD enhanced heat transfer in wavy channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, pp. 809 – 821.
- [2] Kasayapanand, N. (2006). Numerical study of electrode bank enhanced heat transfer, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 1471–1480.
- [3] Lai, F.C., and Lai, K.W. (2002). Enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1393-1405.

[4] Lai, F.C., and Sharma, R.K. (2005). EHD enhanced drying with multiple needle electrodes, *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 223-237.

[5] 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), *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 1049-1056.

[6] อึ้งพงศ์ กรวัชรินทร์, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2011). ผลของการเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า, *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol.1 No1., pp 57 – 62.

[7] ไชยณรงค์ จักรธรานนท์, อึ้งพงศ์ กรวัชรินทร์, สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2555) ผลของการจัดวางอิเล็กโทรดที่มีต่อการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนที่อบแห้งด้วยเทคนิคการอบแห้งอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 เมษายน - มิถุนายน 2555 หน้า 149 – 158.

[8] Sanewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C., Kreewatcharin, T., and Rattanadecho, P. (2011). Comparison on Effect of Electrode Arrangements between Wire-to-Wire and Wire-to-plate Types on Swirling Flow under Electric Fields in a Channel Flow, paper presented in *The 2nd TSME-ICoME International Conference on Mechanical Engineering*, Krabi, Thailand TSF011.

[9] Saneewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C., Rattanadecho, P., and Kreewatcharin, T. Comparison on effect of ground arrangements between wire-to-wire and wire-to-plate types on swirling Flow in a rectangular duct subjected to electrohydro-dynamic effects, *ASME Journal*. (In press)

[10] Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K. (1996). Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields, *Annual Reviews of Heat Transfer*, vol.7, pp. 193-244.