

# การวิเคราะห์การใช้การไหลแบบควงสว่านที่ขับเคลื่อนโดยสนามไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน

## Analysis of Utilizing the Electrically-Driven Spiral Flow for Enhancement of Hot-Air Drying Efficiency

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์\*, ทศพร กลิ่นมาลี และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Chainarong Chaktranond\*, Tossaphorn Klinmalee, and Phadungsak Rattanadecho

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

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

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์อิทธิพลของลมหมุนวนแบบควงสว่านที่ถูกขับเคลื่อนโดยสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน ลวดกราวด์ 2 เส้น ถูกวางในแนวนานกับทิศการไหลของลมร้อน ส่วนตำแหน่งของลวดอิเล็กโทรดถูกวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ตำแหน่งของปลายลวดอิเล็กโทรดซึ่งอ้างอิงกับตำแหน่งของผิวหน้าของวัสดุพูนถูกทดสอบที่ระยะในทิศตั้งฉากการไหล  $L_y = 2$  และ  $4$  cm และที่ระยะในแนวทิศการไหล  $L_x = 30$  และ  $33.75$  cm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า  $V = 5, 10,$  และ  $20$  kV อุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่  $60^\circ\text{C}$  และ  $0.33$  m/s ตามลำดับ วัสดุพูนถูกใช้แทนด้วยแพคเกจซึ่งประกอบด้วย น้ำ อากาศ และเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.125$  mm แพคเกจมีค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น  $S_i = 0.5$  ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อปล่อยสนามไฟฟ้าสู่ลมร้อนทำให้เกิดลมหมุนในระนาบตั้งฉากกับการไหลบริเวณเหนือผิวหน้าของแพคเกจ การใช้สนามไฟฟ้าที่แรงดัน  $V = 20$  kV ทำให้อุณหภูมิและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากวัสดุเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งซึ่งภายในวัสดุมีความชื้นอยู่มาก และการติดตั้งอิเล็กโทรดที่ใกล้กึ่งกลางของผิวหน้าแพคเกจ ( $L_x = 33.75$  cm) ได้ประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีขึ้น จากภาพถ่ายการไหลแสดงให้เห็นว่ารูปร่างและตำแหน่งของลมหมุนวนเปลี่ยนตามตำแหน่งของอิเล็กโทรด การติดตั้งอิเล็กโทรดที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ขนาดของการหมุนกว้างขึ้น ด้วยผลของลมหมุนวนแบบควงสว่านที่สร้างจากสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 1.7-2.2 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2-2.8 เท่า

**คำสำคัญ :** ลมหมุนควงสว่าน; อิเล็กโทรดไฮโดรไดนามิกส์; การอบแห้งด้วยลมร้อน; การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

## Abstract

This research aims to analyze the influences of electric-driven swirling flow on the enhancement of the hot-air drying efficiencies. Two ground wires are placed in the flow direction, while electrode wires are placed in the normal direction of flow. In addition, electrode positions respected to the surface of porous material are varied both in the normal direction with  $L_y = 2$  and 4 cm and in the flow direction with  $L_x = 30$  and 33.75 cm. High electrical voltage is tested at  $V = 5, 10, \text{ and } 20$  kV. The temperature and bulk mean velocity of hot air entering test section are controlled at  $60^\circ\text{C}$  and  $0.33$  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. When the electrical voltage is applied at  $V = 20$  kV, surface temperature and the rate of moisture removal are rapidly increased, especially in the beginning period of drying. This is due to high moisture content in material. Higher drying efficiency is obtained when the electrodes are placed near the center of packed-bed surface ( $L_x = 33.75$  cm). It is found from the flow visualization that pattern and location of the swirling depend on electrode positions. With the electrically-driven swirling flow, the drying rate is enhanced approximately 1.7 - 2 times, and the convective heat transfer coefficient is increased around 2 - 2.8 times.

**Keywords:** spiral flow; electric field; hot-air drying; enhancement of heat and mass transfer

## 1. บทนำ

การอบแห้งเป็นวิธีการที่สำคัญในการรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ยา เซรามิก ฯลฯ และการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแต่เนื่องด้วยผลของชั้นขอบเขตการไหล (boundary layer) หรือการไหลแบบแยก (flow separation) [1-3] ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าของวัสดุต่ำ ส่งผลทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานและสิ้นเปลืองพลังงานสูง

การใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อควบคุมกระแสลมร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งให้สูงขึ้นมาก เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ อีกทั้งใช้พลังงานต่ำ [1,4] และยังสามารถควบคุมอุณหภูมิของการอบแห้งที่ให้แก่

ผลิตภัณฑ์ได้ง่าย [1] หลักการ คือ เมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยสู่อากาศจะทำให้เกิดอากาศ 2 บริเวณ คือ บริเวณที่ถูกชาร์ต (ionization region) และบริเวณอากาศเกิดการล่องลอย (drift region) โดยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อากาศที่ถูกชาร์ตเคลื่อนที่เร็วขึ้นในทิศทางจากขั้วอิเล็กโทรด (electrode) ไปยังกราวด์ (ground) และทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (momentum) กันระหว่างอากาศ ในขณะเดียวกันด้วยอิทธิพลของความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศที่ถูกชาร์ตและไม่ถูกชาร์ต หรืออิทธิพลของการเกิดการไหลแบบเฉือน (shear flow) ทำให้อากาศส่วนที่ไม่ถูกชาร์ตเกิดการหมุนวน

[5] และลมหมุนวนนี้ทำให้การถ่ายเทความร้อนและความร้อนบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนดีขึ้น [1,6]

Chaktranond และ Rattanedecho [1] ทดลองใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความร้อนของแพคเบด (packed bed) ซึ่งใช้แทนวัสดุพูนและติดตั้งภายในอุโมงค์ลม และศึกษาผลของการจัดวางชั้นค่าความพูนของแพคเบดที่แตกต่างกันสองค่า ในงานวิจัยนี้ลวดฮีเลียม 4 เส้น ถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ลม ส่วนเส้นลวดกราวด์ถูกติดตั้งเหนือแพคเบดในทิศขวางกับการไหลของลมร้อน จากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าลมจะเกิดการหมุนวนรอบ ๆ ลวดกราวด์ และเป็นเหตุให้การพาความร้อนและการระเหยของความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงชั้นค่าความพูนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (capillary pressure) ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งต่างกันอย่างมาก

Lai และ Lai [6] ใช้ลวดฮีเลียม 4 เส้นและติดตั้งแผ่นกราวด์ทองแดงที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการการอบแห้งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และอิทธิพลของลมหมุนวนจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศซึ่งอยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น Lai และ Wang [7] ติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนเสริมใต้แพคเบดที่มีความอิ่มตัวแบบไม่สมบูรณ์ (unsaturated packed bed) ลวดฮีเลียม 4 เส้นถูกติดตั้งที่ด้านบนและแผ่นกราวด์ทองแดงถูกติดตั้งที่ด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (corona wind) จะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงที่แพคเบดมีความชื้นสูงหรือช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง

Ahmedou และ Havet [8] จำลองไหลในช่องการไหลแบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า โดยโคโรนาวินด์ถูกสร้างจาก

ฮีเลียม 4 เส้นเดี่ยวและหลายเส้น (สมมติให้เป็นจุด) ฮีเลียม 4 เส้นถูกติดตั้งที่กลางท่อและกราวด์ติดตั้งตามแนวยาวของผนังด้านล่างของช่องการไหล นอกจากนี้ที่ผนังด้านล่างมีการใส่ฟลักซ์ความร้อน (heat flux) ผลการคำนวณพบว่าหากตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) ของอากาศเย็นที่เข้าสู่ท่อก่อนมีค่าน้อยแล้ว ผลของโคโรนาวินด์สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นได้ 3 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า Saenewong Na Ayuttaya และคณะ [9] ซึ่งจำลองการไหลของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงในท่อแบบสองมิติ โดยสมมติให้ลวดฮีเลียม 4 เส้นติดตั้งฉากกับการไหลและลวดกราวด์ติดตั้งวางขวางกับทิศทางการไหลของกระแสลม ผลจากการคำนวณพบว่าความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างฮีเลียม 4 เส้นและกราวด์ยกกำลังสอง

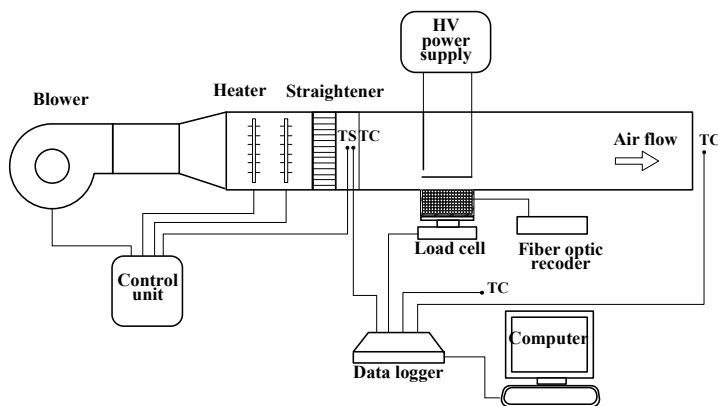
จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของลม ซึ่งทำให้ผลของโคโรนาวินด์ลดลงเมื่อความเร็วของกระแสลมที่ทางเข้ามีค่าสูงขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างลมหมุนควงสวนซึ่งเกิดจากผลของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าให้ทิศทางตั้งฉากกับการไหลของลม และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนอันเนื่องจากการผลของการเปลี่ยนตำแหน่งลวดฮีเลียม 4 เส้น

## 2. ขุดทดสอบและการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพขุดทดสอบซึ่งอุโมงค์ลมที่ใช้มีขนาดหน้าตัดทดสอบ 30×30 cm สภาพของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่อุณหภูมิ 60 °C (โดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ TS และกำหนดตำแหน่ง TS เป็นพิกัดอ้างอิง  $L_x = 0$ ) และที่ความเร็วเฉลี่ย 0.33 m/s อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิล (TC) ชนิด K ในการทดลอง

วัสดุพูนถูกใช้แทนด้วยกล่องแพคเกจซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) มีขนาด 7.5 (กว้าง)×15 (ยาว)×4 (สูง) cm (ซึ่งติดตั้งห่างจากเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบประมาณ  $L_x = 30$  cm) และที่ผิวกล่องแพคเกจถูกหุ้มด้วยฉนวนยางกันความร้อน ยกเว้นที่ผิวหน้าเปิดสู่ลมร้อน และภายในกล่องประกอบด้วยน้ำ อากาศและเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125

mm (ค่าความพูน,  $\phi \sim 0.385$ ) และค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นของแพคเกจมีค่า  $S_i = 0.5$  น้ำหนักของแพคเกจที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของการอบแห้งถูกวัดโดยโหลดเซลล์ (load cell, accuracy  $\pm 0.1$  g) และสนามไฟฟ้าถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูง (Glassman, Model FJ30R4, New Jersey, USA)



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิภายในแพคเกจที่วัดด้วยลวดไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accuracy  $\pm 0.5$  °C) จำนวน 2 เส้น ซึ่งติดตั้งที่ระยะ (z) เท่ากับ 0 และ 2 cm (วัดจากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเกจ) ในการทดลองลวดอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 8 เส้นที่จัดวางระยะห่างเท่า ๆ กันถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ เฉพาะปลายซ้ายยาว 1 cm สัมผัสกับอากาศ (ส่วนที่เหลือถูกหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้า) และถูกปรับตำแหน่งทั้งระยะในแนวการไหล ( $L_x$ ) และระยะในแนวตั้งฉากกับการไหล ( $L_y$ ) ส่วนเส้นลวดกราวด์ซึ่งไม่มีฉนวนหุ้มจำนวน 2 เส้น ถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างของอุโมงค์กลมในแนวขนานกับทิศการไหลของลม โดยแต่ละเส้นติดตั้งห่างจากผนังประมาณ 1.5 cm โดยเส้น

ลวดอิเล็กทรอนิกส์และกราวด์ทำจากทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด 2.5 mm<sup>2</sup>

### 3. ทฤษฎี

#### 3.1 ค่าความอิ่มตัว

ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) หรือค่าความชื้นเริ่มต้นภายในแพคเกจจะถูกเตรียมโดยการคำนวณหาสัดส่วนปริมาณน้ำและปริมาณลูกแก้วที่ต้องใส่ในแพคเกจ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นบรรจุในแพคเกจ (percentage of moisture content) ซึ่งใช้ค่าความแห้งเป็นฐาน (dry based) คำนวณจาก

$$x_{db} = \frac{\rho_{water} S \phi}{\rho_{bead} (1 - \phi)} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่  $\rho_{water}$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ (1000

$\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_{\text{bead}}$  คือ ค่าความหนาแน่นของลูกแก้ว ( $2500 \text{ kg/m}^3$ ),  $S$  คือ ค่าความอิมิตัวของแพคเบต และ  $\phi$  คือ ค่าความพรุนของแพคเบต (0.385) ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ต้องเติมในแพคเบตคำนวณได้จาก

$$m_{\text{water}} = m_{\text{bead}} \left( \frac{x_{\text{db}}}{100} \right) \quad (3.2)$$

โดยที่  $m_{\text{bead}}$  คือ น้ำหนักของลูกแก้วที่ใส่ในแพคเบต การคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแพคเบตคำนวณได้จากการสมดุลความร้อนที่ผิวของแพคเบตระหว่างการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่ผิวแพคเบตซึ่งเป็นการพาความร้อนและความร้อนแฝงของการระเหยของความชื้นที่ผิวกับการนำความร้อนจากผิวสู่ภายในแพคเบต ดังสมการที่ (3.3) [1]

$$h_c (T_{\text{air}} - T_{\text{sur}}) = \dot{m}_{\text{water}} h_v - \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.3)$$

โดยที่  $h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแพคเบต,  $T_{\text{air}}$  คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน,  $T_{\text{sur}}$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบต,  $\dot{m}_{\text{water}}$  คือ อัตราการระเหยของความชื้น,  $h_v$  คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ,  $\lambda_{\text{eff}}$  คือ ค่าการนำความร้อนภายในแพคเบต ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองของ Aoki และ คณะ [10]

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{0.8}{1 + 3.7e^{-5.95S}} \quad (3.4)$$

### 3.2 การจำลองการไหล

การจำลองการไหลของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกคำนวณในแบบ 3 มิติ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.4 และกำหนดให้การไหลที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) ความดันที่ทางออกเท่ากับความดันบรรยากาศ ส่วนความเร็วที่ผนังทุกด้านมีค่าเป็นศูนย์ ในการคำนวณทางไฟฟ้าใช้อัลกอริทึมการคำนวณให้เป็นจุดและลวดกราวด์สมมติให้เป็นเส้นตรง แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่ใช้อัลกอ-

ริทึมตามค่าที่ทดสอบส่วนที่ลวดกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ และสนามไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านทะลุผนังของอุโมงค์ลมได้ รายละเอียดของเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ (boundary condition) สามารถดูได้จากงานวิจัยของ Saenewong Na Ayuttaya และ คณะ [9] ในการคำนวณสมมติให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้แบบคงตัว (Steady incompressible flow) และไม่คำนึงถึงผลของความร้อนที่เกิดจากเส้นลวด (joule heating) เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบความร้อนจากลมร้อน [1] การคำนวณถูกทำโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element method) เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องคำนวณและระยะเวลาในการคำนวณจำนวนอีลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณประมาณ 200,000 อีลิเมนต์ ซึ่งสามารถยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบการใช้จำนวนอีลิเมนต์ที่มากขึ้น (~500,000 อีลิเมนต์) และให้ผลคำนวณที่สอดคล้องกับรูปถ่ายที่ได้จากการทดลอง

การเคลื่อนที่ของอากาศคำนวณจากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_{EE} \quad (3.6)$$

โดยที่  $\vec{u}$  คือ ความเร็วของของไหล,  $t$  คือ เวลา,  $\bar{P}$  คือ ความดัน,  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ,  $\mu$  คือ ความหนืดของอากาศ และ  $\vec{f}_{EE}$  คือ แรงกระทำเนื่องจากสนามไฟฟ้า (electric force) ซึ่งทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนอนุภาคอากาศและคำนวณได้จากแรงคูลอมบ์ (Coulomb force)

$$\vec{f}_{EE} = q\vec{E} \quad (3.7)$$

โดยที่  $q$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า และ  $\vec{E}$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

ของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

$$q = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (3.8)$$

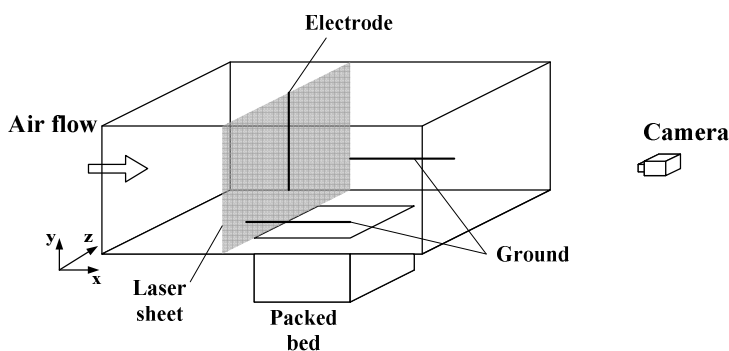
$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.9)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของของไหล และ  $V$  คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์

##### 4.1 ภาพถ่ายการไหลภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

งานวิจัยนี้ เส้นทางการเคลื่อนที่ของลมหมุน



รูปที่ 3 ตำแหน่งการถ่ายภาพการไหล

รูปที่ 4 แสดงภาพผลการคำนวณการกระจายตัวของเส้นแรงสนามไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าในระนาบตั้งฉากกับการไหลเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 2$  cm จากรูปแสดงให้เห็นว่าทิศทางการไหลของสนามไฟฟ้าจะมีทิศจากขั้วอิเล็กโทรดไปยังแท่งกราวด์ เมื่อเพิ่มจำนวนแท่งอิเล็กโทรดหรือเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นแล้วเส้นแรงของสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้อากาศเคลื่อนที่เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงภาพการไหลของอากาศในระนาบหน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลเมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้งที่  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 2$  cm จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าการไหลของลมใน

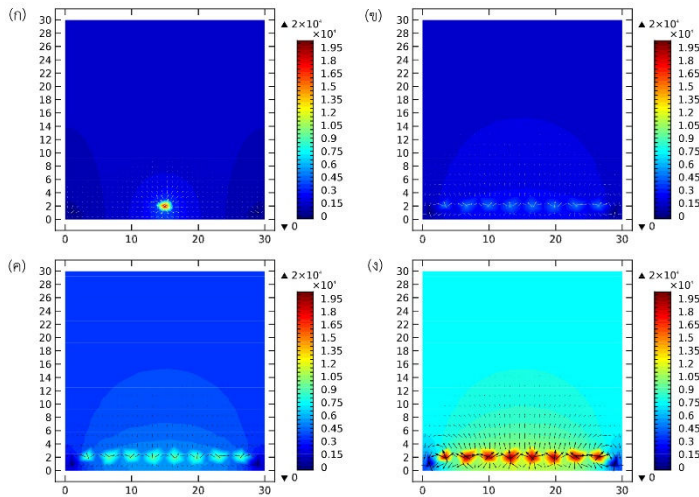
วนที่เกิดจากอิทธิพลของแรงไฟฟ้าถูกสังเกตโดยใช้ควันรูป ซึ่งควันถูกปล่อยเข้าที่ท่อทางดูดของเครื่องเป่าลม (blower) และแสงเลเซอร์ (laser sheet) ถูกใช้สำหรับสร้างฉากรับภาพเพื่อดูการเคลื่อนที่ของของไหลที่ตำแหน่งหน้าตัดต่าง ๆ (ที่ติดตั้งอิเล็กโทรด) โดยกล้องถ่ายภาพ (Basler model Aca1300-30gm, Germany) ถูกติดตั้งที่ปลายทางออกของอุโมงค์ลม ( $L_x \sim 2$  m) ดังแสดงในรูปที่ 3 และถูกติดตั้งห่างจากผนังด้านข้างของอุโมงค์ลมประมาณ 1 m เพื่อป้องกันผลของสนามไฟฟ้าทำให้กล้องเสียหาย

ระนาบหน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลมีลักษณะราบเรียบ แต่เมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะเห็นสังเกตลมหมุนปั่นป่วนเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม การเพิ่มจำนวนเส้นลวดอิเล็กโทรดมีผลทำให้ลมหมุนเกิดความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ด้วยผลของลมหมุนวนนี้จะทำให้อากาศบริเวณผิวหน้าของแพคเกจเกิดการคลุกเคล้ากันมากยิ่งขึ้น

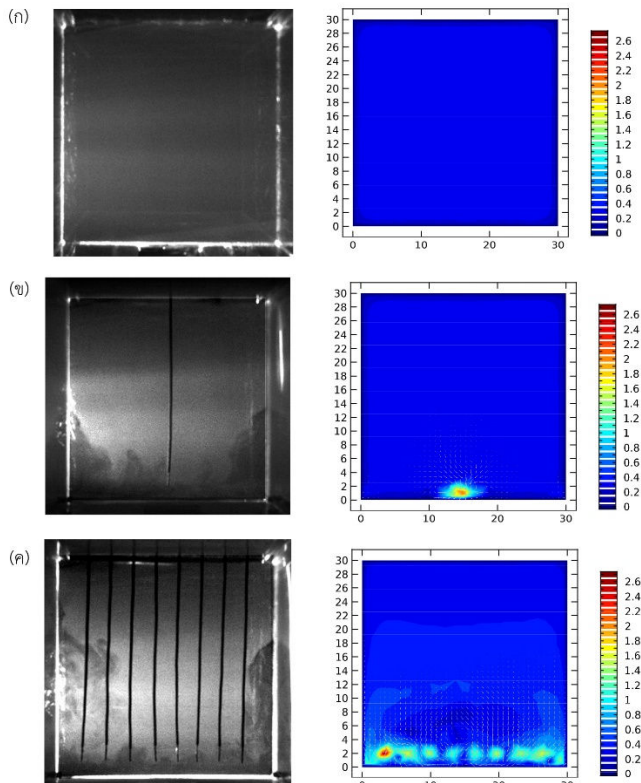
รูปที่ 6 และ 7 แสดงภาพการไหลของกระแสลมในระนาบ x-y ที่แนวกึ่งกลางของแพคเกจโดยใช้อิเล็กโทรดจำนวน 8 เส้นที่ติดตั้งที่ความสูง  $L_y = 2$  cm และใช้แรงดันไฟฟ้า  $V = 20$  kV จากรูปพบว่าตำแหน่งของลมปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งก่อน

ถึงตำแหน่งของแพคเกจและครอบคลุมบริเวณบางส่วน  
ของผิวหน้าของแพคเกจ และเมื่อเลื่อนตำแหน่งแท่ง  
อิเล็กโตรดให้ค่อนไปทางผิวหน้าของแพคเกจมากขึ้น  
(ที่  $L_x = 33.75$  cm) พบว่าตำแหน่งของลมปั่นป่วนที่  
รุนแรงเกิดขึ้นค่อนไปทางผิวหน้าของแพคเกจมาก

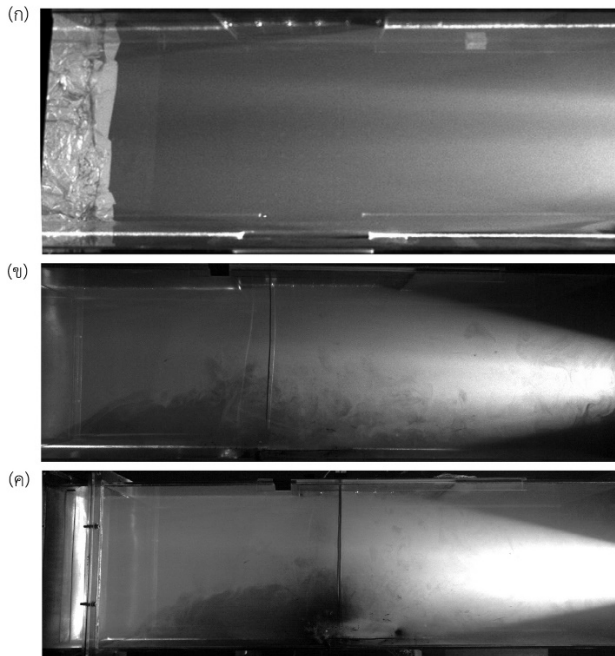
ยิ่งขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าใน  
แต่ละตำแหน่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของอิเล็กโตรดและ  
กราวด์ เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดลดลง แรง  
เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นและส่งผลทำให้ลม  
ปั่นป่วนมากขึ้น



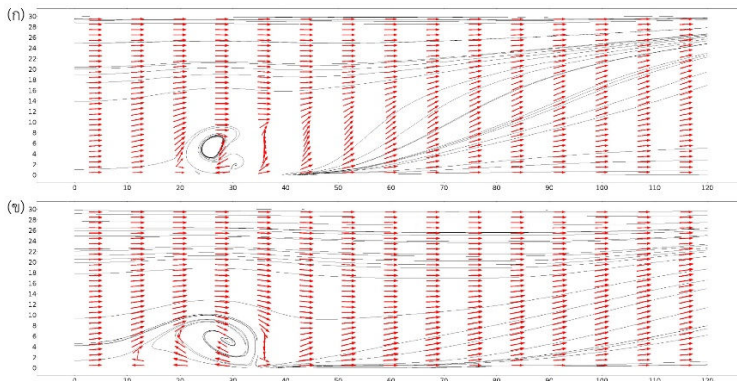
รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตัว  
ของสนามไฟฟ้าที่ค่าแรงดัน  
ไฟฟ้าและจำนวนแท่งอิเล็ก-  
โตรดต่าง ๆ : (ก) V = 20 kV  
จำนวน 1 เส้น, (ข) V = 5 kV  
จำนวน 8 เส้น, (ค) V = 10 kV  
จำนวน 8 เส้น และ (ง) V = 20  
kV จำนวน 8 เส้น



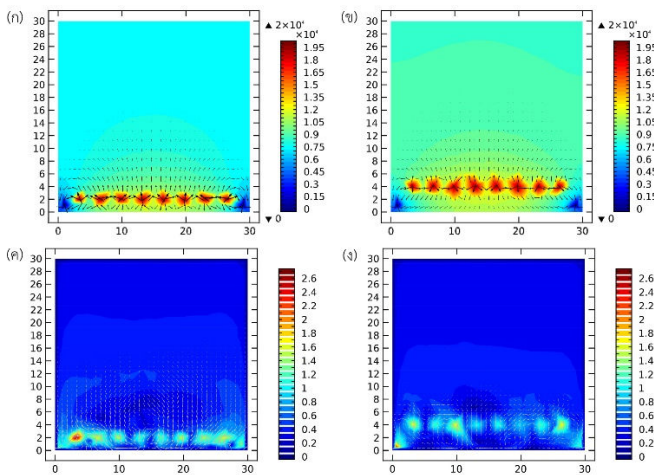
รูปที่ 5 ลักษณะลมหมุนวนในระนาบหน้า  
ตัดตั้งฉากกับการไหลโดยรูปซ้าย  
เป็นภาพถ่ายการไหลและรูปขวา  
ภาพการไหลจากการคำนวณ :  
(ก) No EE, (ข) อิเล็กโตรด 1 เส้น  
และ (ค) อิเล็กโตรด 8 เส้น



รูปที่ 6 ภาพถ่ายการไหลด้านข้างเปรียบเทียบตำแหน่งของลมหมุนปั่นป่วนที่ตำแหน่งอิเล็กโตรดต่าง ๆ : (ก) กรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้า, (ข)  $L_x = 30$  cm และ (ค)  $L_x = 33.75$  cm



รูปที่ 7 ภาพการไหลด้านข้างจากการคำนวณเปรียบเทียบตำแหน่งของลมหมุนปั่นป่วนที่ตำแหน่งอิเล็กโตรดต่าง ๆ : (ก)  $L_x = 30$  cm และ (ข)  $L_x = 33.75$  cm



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการกระจายตัวของเส้นสนามไฟฟ้าและความเร็วในระนาบตั้งฉากกับการไหล : (ก) และ (ข) สนามไฟฟ้าเมื่อ  $L_y = 2$  cm และ 4 cm, (ค) และ (ง) ความเร็วลมเมื่อ  $L_y = 2$  cm และ 4 cm

รูปที่ 8 ซึ่งอีเล็กโตรดจำนวน 8 เส้น ถูกติดตั้งที่  $L_x = 30$  cm และ  $V = 20$  kV แสดงให้เห็นว่าเมื่อลวดอีเล็กโตรดถูกติดตั้งห่างจากลวดกราวด์มากขึ้นที่  $L_y = 4$  cm ค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งจะมีขนาดน้อยกว่าที่  $L_y = 2$  cm ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของอากาศบริเวณผนังด้านล่างของอุโมงค์ลมมีค่าต่ำกว่า แต่ความปั่นป่วนของลมมีลักษณะแผ่ขยายกว้างมากขึ้น

#### 4.2 ผลของการอบแห้งเมื่อใช้สนามไฟฟ้าร่วม

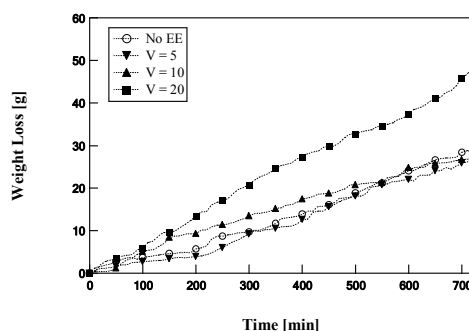
การทดลองอุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่  $60^\circ\text{C}$  และ  $0.33$  m/s ตามลำดับ ค่าความอิมพัลส์เริ่มต้นของแพคเกจ  $S_i = 0.5$  (ความพรุน  $\phi = 0.385$ ) งานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดของแรงดันไฟฟ้าและตำแหน่งอีเล็กโตรดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุพรุนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า  $V = 0, 5, 10$  และ  $20$  kV และลวดอีเล็กโตรดจำนวน 8 เส้นซึ่งถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ในแนวตั้งฉากกับการไหลของอากาศถูกเปลี่ยนตำแหน่งทั้งในแนวแกน  $x$  ( $L_x = 30$  และ  $33.75$  cm) และแกน  $y$  ( $L_y = 2$  และ  $4$  cm) ส่วนลวดกราวด์จำนวน 2 ซึ่งถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างทั้งสองด้านของอุโมงค์และถูกติดตั้งที่ระดับความสูง  $L_y = 2$  cm จากผนังด้านล่างของอุโมงค์ในทิศการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

##### 4.2.1 ผลของตำแหน่งอีเล็กโตรดในแนวตั้งฉากกับการไหล ( $L_y$ )

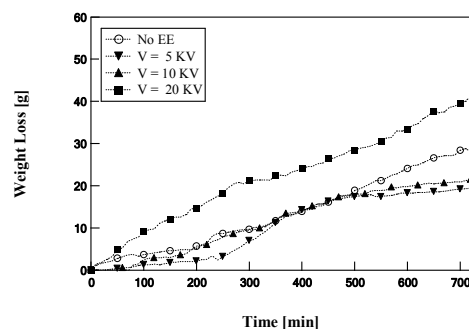
รูปที่ 9 และ 10 ซึ่งอีเล็กโตรดถูกติดตั้งที่  $L_x = 30$  cm พบว่าเมื่อแพคเกจได้รับความร้อนจากลมร้อนอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (warm up period) และจะเกือบคงที่ที่ค่าหนึ่ง ในช่วงนี้ความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ และช่วงนี้อัตราการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant rate

of drying period)

เมื่อแรงดันของสนามไฟฟ้า  $V = 5$  และ  $10$  kV ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจไม่แตกต่างจากการไม่ใช้สนามไฟฟ้ามากนัก และบางกรณีเช่นที่  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 4$  cm ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากที่  $V = 5$  และ  $10$  kV แรงเฉื่อย (inertia force) ของกระแสลมร้อนทำให้ไม่สามารถเหนี่ยวนำกระแสการไหลหลัก (main stream flow) มาที่ผิวหน้าของแพคเกจได้ดีเท่าที่ควร อีกทั้งลม

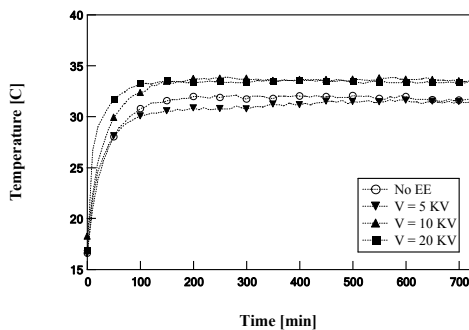


รูปที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 2$  cm

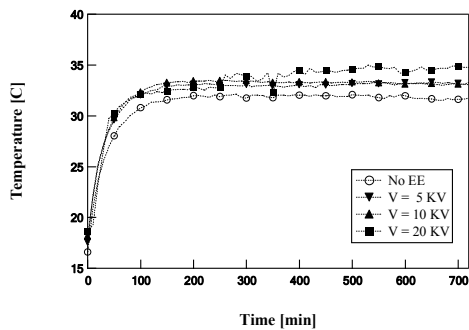


รูปที่ 10 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 4$  cm

หมุนวนที่เกิดขึ้นยังกั้นการไหลทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นผิวหน้าของแพคเกจไม่ดี



รูปที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 2$  cm

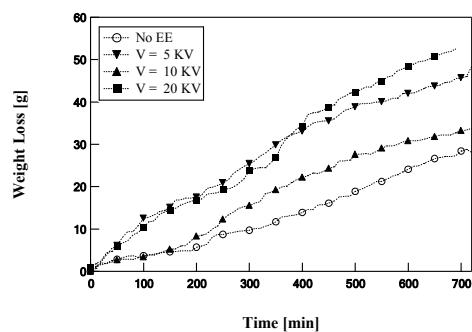


รูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 30$  cm และ  $L_y = 4$  cm

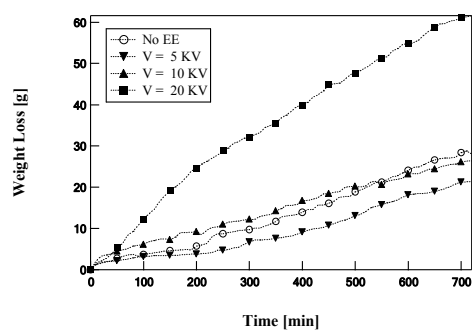
จากรูปที่ 11 และ 12 ซึ่งลวดฮีตเตอร์ถูกติดตั้งที่  $L_x = 30$  cm พบว่าเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้า  $V = 20$  KV ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนธรรมดา นอกจากนั้นที่  $L_y = 2$  cm จะทำให้ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจมีค่าสูงกว่าที่  $L_y = 4$  cm (ประมาณ 14.5 %) โดยอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้

เนื่องจากเมื่อ  $L_y = 2$  cm ลมหมุนวนจะมีวงของการหมุนเล็กกว่าเมื่อ  $L_y = 4$  cm แต่ความรุนแรงของการปั่นป่วนมากกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 8) ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (momentum) ระหว่างกระแสลมและความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเกจเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การระเหยของน้ำบริเวณผิวหน้าของแพคเกจเพิ่มมากขึ้น

#### 4.2.4 ผลของตำแหน่งฮีตเตอร์ในแนวการไหล ( $L_x$ )



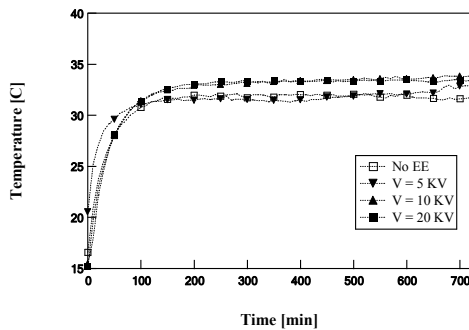
รูปที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 33.75$  cm และ  $L_y = 2$  cm



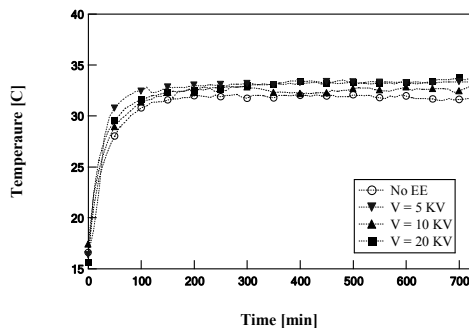
รูปที่ 14 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 33.75$  cm และ  $L_y = 4$  cm

รูปที่ 13 และ 14 พบว่าเมื่อมีการเลื่อน

ตำแหน่งอิเล็กโตรดให้เข้าใกล้ผิวหน้าของแพคเกจมากขึ้น ( $L_x = 33.75$  cm) ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 ตำแหน่งของลมหมุนปั่น่วนจะขึ้นกับตำแหน่งของอิเล็กโตรดและกราวด์ หากเลื่อนอิเล็กโตรดเข้าใกล้ผิวหน้าแพคเกจมากขึ้น ตำแหน่งของลมที่ปั่น่วนก็เลื่อนเข้าใกล้ผิวหน้าแพคเกจมากขึ้นตาม นอกจากนี้ยัง



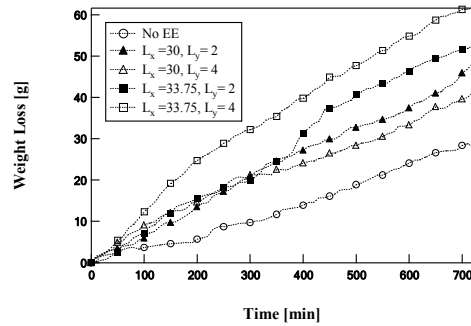
รูปที่ 15 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 33.75$  cm และ  $L_y = 2$  cm



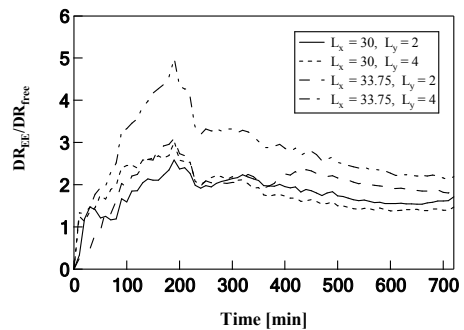
รูปที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เมื่อ  $L_x = 33.75$  cm และ  $L_y = 4$  cm

พบว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโตรดที่  $L_y = 4$  cm ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจกลับมีปริมาณมากกว่าการติดตั้งอิเล็กโตรดที่  $L_y = 2$  cm งานวิจัยนี้พบว่า

ติดตั้งอิเล็กโตรดและกราวด์สัมพันธ์กับตำแหน่งของแพคเกจ กล่าวคือ เพื่อให้ปริมาณความชื้นระเหยออกจากแพคเกจได้ดีขึ้นควรทำให้เกิดลมปั่น่วนครอบคลุมบริเวณทั่วผิวหน้าของแพคเกจ



รูปที่ 17 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแพคเกจที่ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโตรดต่าง ๆ

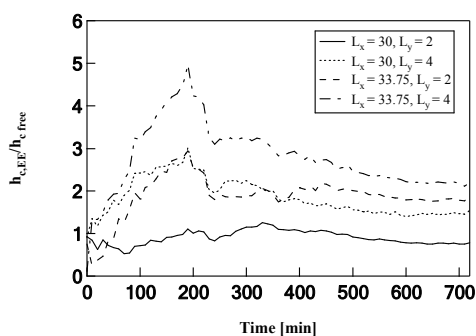


รูปที่ 18 อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโตรดต่าง ๆ

#### 4.3 ประสิทธิภาพการอบแห้ง

รูปที่ 17 ถึง 19 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของลมหมุนวนที่ถูกสร้างโดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้อัตราการความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจหรืออัตราการอบแห้ง (drying rate, DR) สูงขึ้นประมาณ 1.7-2.2 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient,  $h_c$ ) บริเวณผิวหน้าของแพคเกจมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2-2.8 เท่า ดังแสดงในรูปที่

18 และ 19 อัตราการอบแห้ง (DR) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง (0 ถึง 190 นาที) ทั้งนี้เนื่องจากภายในแพคเกจยังคงมีความชื้นสะสมอยู่มากหลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลง แต่ยังให้อัตราการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการใช้ลมหมุนวนแบบควงส่วนที่ถูกสร้างโดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงจะให้ผลดีอย่างมากในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งหรือสภาวะที่วัสดุพรมมีความชื้นสูง และการติดตั้งอิเล็กโทรดในบริเวณผิวหน้าของแพคเกจและความสูงห่างจากผิวหน้าของแพคเกจในระยะที่เหมาะสมทำให้ลมหมุนวนปั่นป่วนเกิดครอบคลุมบริเวณผิวหน้าของแพคเกจ ซึ่งส่งผลให้การระเหยของความชื้นและการถ่ายเทความร้อนที่สูงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดต่างๆ

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์การใช้ลมหมุนวนแบบควงส่วนที่ถูกสร้างโดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน โดยความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ลมมีค่า 0.33 m/s และ 60 °C ตามลำดับ จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

5.1 เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ต่ำเกินไป (5 และ 10 kV) จะไม่ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง และอัตราการอบแห้งสูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 20 kV

5.2 ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ส่งผลต่อ ตำแหน่ง รูปร่างและขนาดของลมหมุนวนที่สร้างขึ้น เมื่ออิเล็กโทรดติดตั้งที่ด้านต้นกระแสลมหมุนวนที่ปั่นป่วนรุนแรงจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนด้านหน้าของแพคเกจ และเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดบริเวณเหนือผิวหน้าของแพคเกจจะทำให้เกิดลมหมุนวนที่รุนแรงครอบคลุมผิวหน้าของแพคเกจมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออิเล็กโทรดถูกติดตั้งความสูงห่างจากผิวหน้าของแพคเกจมากขึ้นจะทำให้บริเวณที่ลมปั่นป่วนกว้างมากขึ้น

5.3 การใช้ลมหมุนวนแบบควงส่วนที่สร้างโดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงสามารถประสิทธิภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงที่ความชื้นในแพคเกจสูง และจากงานวิจัยนี้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 1.7-2.2 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ 2.0-2.8 เท่า

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนวิจัยของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประเภททุนวิจัยทั่วไป และกองทุนวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

## 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] Wang, W., Yang, L., Wu, K., Lin, C., Huo, P., Liu, S., Huang, D. and Lin, M., 2017, Regulation-controlling of boundary layer by multi-wire-to-cylinder negative corona discharge, Appl. Therm. Eng. 119: 438-448.
- [3] Lai, F.C., and Zhang, J., 2011, Effect of emitting electrode number on the performance of EHD gas pump in a rectangular channel, J. Elect. 69: 486-493.
- [4] Lee, J.R. and Lau, E.V., 2017, Effects of relative humidity in the convective heat transfer over flat surface using ionic wind, Appl. Therm. Eng. 114: 554-560.
- [5] Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K., 1978, EHD study of the corona wind between wire and plates electrodes, AIAA J. 16: 340-345.
- [6] Lai, F.C. and Lai, K.W., 2002, EHD-enhanced drying with wire electrode, Drying Technol. 20: 1393-1405.
- [7] 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.
- [8] Ahmedou, A.O., Rouaud, O. and Havet, M., 2009, Assessment of the electrohydrodynamic drying process, Food Bioproc. Technol. 2: 240-247.
- [9] Saenewong 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 Mass Trans. 64: 361-374.
- [10] Aoki, K., Hattori, M., Kitamura, M. and Shiraishi, N., 1991, Characteristics of heat transport in porous media with water infiltration, ASME/JSME Therm. Eng. Proc. 4: 303-308.