

การปรับปรุงสมรรถนะและวิเคราะห์การใช้พลังงาน  
ของกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนด้วยลมไอออนิก  
Improvement and Energy Consumption Analysis of  
Hot-Air Drying Process with Ionic Wind

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์\* และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Chainarong Chaktranond\* and Phadungsak Rattanadecho

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

Klong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

## บทคัดย่อ

หลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) ถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างลมไอออนิกเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งวัสดุพูนในกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน บทความนี้ศึกษาผลของขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความเร็วของลมร้อนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลของวัสดุพูน รวมถึงเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ใช้สำหรับการเพิ่มอัตราการอบแห้งระหว่างการใช้น้ำไฟฟ้าและการเพิ่มความเร็วของลมร้อนในการทดลองลมร้อนถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C และที่ความเร็ว 0.35-1.4 m/s แรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ค่า 0-30 kV จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสลมเกิดการหมุนวน ซึ่งส่งผลทำให้การไหลแบบแยกบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนถูกทำลายลง เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยขนาดความเร็วของลมแปรผันกับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ด้วยการใช้สนามไฟฟ้าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.4-1.8 เท่า ของการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานพบว่าค่า SEC ของการใช้ EHD ร่วมกับลมร้อนที่ความเร็วต่ำมีค่าต่ำกว่าของการเพิ่มความเร็วลมร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณ 30-60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การใช้ EHD จะมีประสิทธิผลมากในช่วงที่วัสดุพูนมีความชื้นภายในสูง

คำสำคัญ: อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD), กระบวนการอบแห้ง, การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน, ค่าพลังงานจำเพาะ (SEC)

## Abstract

Electrohydrodynamics is used to create ionic wind to enhance the drying rate of a porous material during hot air drying. This study experimentally investigates the effects of electrical voltage and hot-air velocity on heat transfer and moisture removal of a porous material. In addition, the study compares the specific energy consumption (*SEC*) needed to enhance the drying rate when utilizing electric fields and when increasing the hot-air flow velocity. Air temperature is controlled at a temperature of 60 °C and a velocity in the range of 0.35-1.4 m/s. The electrical voltage is tested in the range of 0-30 kV. It is found that the electric fields induce airflow to circulate above the material surface, causing the flow separation to be eliminated and resulting in higher rates of heat transfer and moisture removal. The airflow velocity is noted to be proportional to the voltage employed. With electric fields, the drying rate is improved by approximately 1.4-1.8 times. By comparing the energy consumption, it is found that *SEC* of the EHD-assisted drying process is lower than when enhancing the drying rate by increasing the airflow velocity. In addition, *SEC* of EHD-enhanced process is noted to be lower than that of the process without EHD by 30-60 %. Utilizing EHD is highly effective when the moisture content in a porous material is high.

**Keywords:** electrohydrodynamics (EHD), drying process, heat and mass transfer enhancement, specific energy consumption (*SEC*)

## 1. บทนำ

ด้วยวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและปัญหาทางเศรษฐกิจทำให้อุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ให้ความสนใจในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด การอบแห้งด้วยลมร้อนถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น เซรามิก เฟอร์นิเจอร์ ไม้ ฯลฯ แต่เนื่องจากวิธีนี้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งก่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูง ด้วยเหตุนี้การอบแห้งวิธีนี้จึงถูกปรับปรุงโดยการนำไปใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ได้แก่ การใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) [1,2] การใช้คลื่นรังสีอินฟราเรด (infrared) [3,4] และการใช้สนามไฟฟ้าหรืออิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (electrohydrodynamics, EHD) [5-8] เป็นต้น การใช้สนามไฟฟ้าทำให้กระแส

ลมร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและส่งผลให้การพาความร้อนที่ผิวหน้าของวัสดุพูนเพิ่มขึ้น [8] โดยวิธีนี้มีข้อดีคือลงทุนน้อยและสามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่ให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ศึกษา รูปแบบการจัดวางอิเล็กโตรดและกรวดในลักษณะต่าง ๆ ความเร็วลม ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งทำให้กระแสลมเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและเป็นผลให้อัตราการอบแห้งของวัสดุพูนเพิ่มขึ้น Alemrajabi และคณะ [5] ศึกษาจัดวางอิเล็กโตรดแบบ wire-to-plate โดยแท่งอิเล็กโตรดถูกแขวนจากผนัง

ด้านบนอุโมงค์ลมและแผ่นกราวด์ทองแดงถูกวางไว้ได้แยกเบด และทำการปล่อยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปในกระแสลมแล้วทำให้อากาศเกิดการหมุนวนขึ้น และพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้า แต่จะลดลงเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น

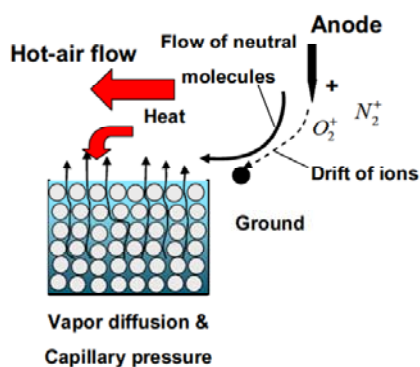
Isobe และคณะ [6] จัดวางอิเล็กโทรดแบบ wire-to-plate โดยติดตั้งอิเล็กโทรดทองแดง 1 แท่งเหนือแผ่นกราวด์ลุ่มนึ่ง และกล่าวว่าการร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Joule heating) ไม่ได้เป็นกลไกหลักของการอบแห้ง แต่สนามไฟฟ้าทำให้อากาศเกิดการหมุนวนซึ่งช่วยเร่งให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นเป็น 3 เท่า ของการอบแห้งแบบปกติ และอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ แต่แปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับแผ่นกราวด์

Lai และ Sharma [7] ศึกษาการจัดวางอิเล็กโทรดแบบ multi-wire-to-plate โดยอิเล็กโทรดนิเกิล (nickel) จำนวน 3 แท่ง ถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลของลมและวางเรียงในลักษณะรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือแพคเบด และแผ่นกราวด์ทองแดงถูกติดตั้งที่ฐานของแพคเบด ในงานวิจัยพบว่าอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้า แต่แปรผกผันกับขนาดความเร็วของลมที่ไหลในทิศทางกับสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีการไหลของลมอัตราการอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า

Chaktranond และ Rattanadecho [8] จัดวางอิเล็กโทรดแบบ multi-wire-to-wire โดยอิเล็กโทรดทองแดง 4 แท่ง ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลของลมร้อน ส่วนเส้นลวดกราวด์ทองแดงติดตั้งขวางกับทิศการไหลของลมร้อนและถูกวางอยู่เหนือแพคเบดดังรูปที่ 1 และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าในแพคเบดที่มี

ความพรุนสองค่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลมหมุนเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะเกิดบริเวณรอบ ๆ ลวดกราวด์และอิทธิพลของลมหมุนวนทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงความพรุนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (capillary pressure) ในแต่ละชั้นแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้อัตราการระเหยออกจากแพคเบดมีค่าแตกต่างกัน

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์การจัดวางแท่งอิเล็กโทรดและกราวด์แบบ multi-wire-to-wire ที่ถูกนำเสนอโดย Chaktranond และ Rattanadecho [8] และศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของวัสดุพรุนซึ่งแทนด้วยแพคเบดพรุน (porous packed bed) รวมถึงเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่ใช้เพิ่มอัตราการอบแห้งระหว่างวิธีการใช้ลมไอออนนิกและการเพิ่มความเร็วของกระแสลมร้อน



รูปที่ 1 กลไกการเพิ่มการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า [8]

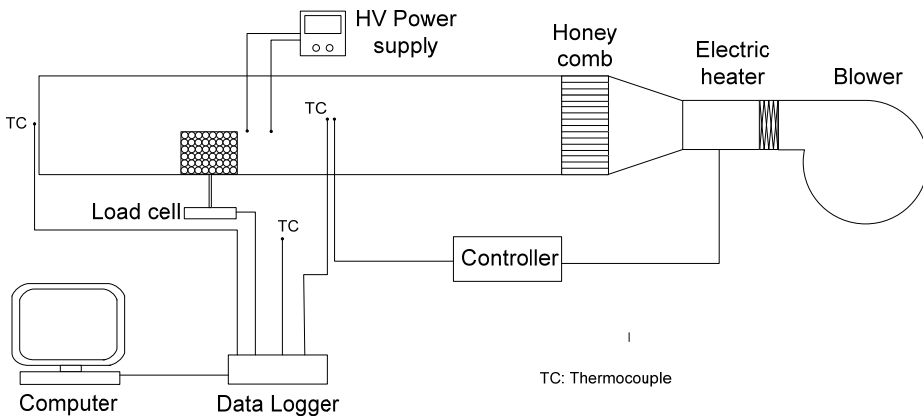
## 2. ขูดทดสอบและการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพขูดทดสอบ ลมร้อนอุณหภูมิ 60 °C ถูกสร้างจากขดลวดไฟฟ้าขนาด 2 kW ไหลผ่านหน้าตัดทดสอบขนาด 15 cm × 15 cm

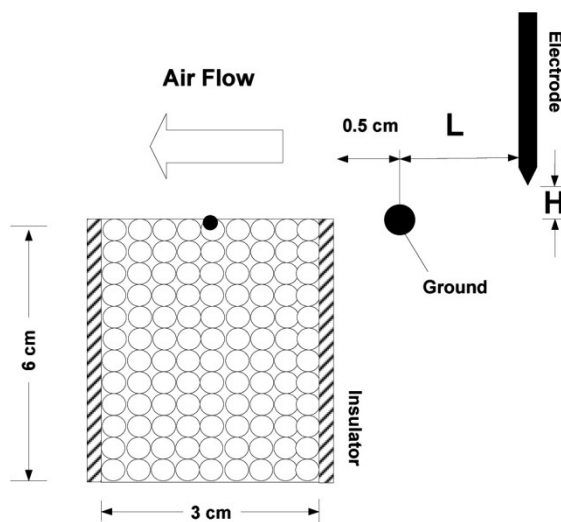
แพคเกจที่ใช้มีขนาด  $3 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$  (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง) ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) ผิวภายนอกทุกด้านถูกหุ้มฉนวนกันความร้อนยกเว้นผิวด้านบนซึ่งสัมผัสกับลมร้อน และภายในบรรจุน้ำและเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.125 \text{ mm}$  (ค่าความพรุน,  $\phi \sim 0.385$ ) กำหนดให้ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) ของแพคเกจมีค่า  $S_{int} = 0.5$  และอุณหภูมิที่ผิวของ แพคเกจถูกวัดด้วยสายไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790,

Santa Clara, CA, accuracy  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) น้ำหนักของแพคเกจที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกวัดค่าโดยโหลดเซลล์ (load cell)

สนามไฟฟ้าถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Glassman, model MJ30N400, New Jersey, USA) อิเล็กโทรด 4 เส้น ถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและลวดกราวด์ 1 เส้น ถูกติดตั้งในแนวขวางกับการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3 โดย  $L = 0 \text{ cm}$  และ  $H = 2 \text{ cm}$



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งอิเล็กโทรดและแพคเกจ

แรงดันไฟฟ้าถูกทดสอบในช่วง 0-30 kV และความเร็วลมเฉลี่ยก่อนทางเข้าของหน้าตัดทดสอบ (test section) ถูกทดสอบในช่วง 0.35-1.4 m/s

### 3. สมการ

การเคลื่อนที่ของอากาศภายในท่อ 2 มิติ คำนวณจากสมการของความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการนาเวียร์-โตกัส (Navier-Stoke equation) ดังสมการที่ (1) และ (2) โดยสมมติให้การไหลเป็นแบบนิวโตเนียนของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Newtonian flow of incompressible fluid)

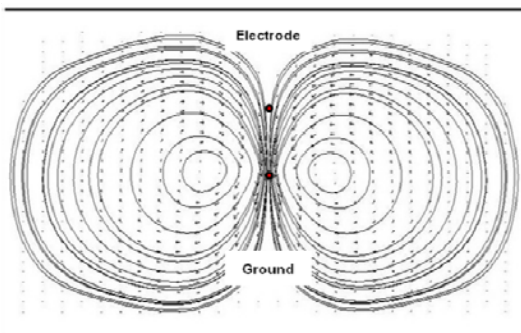
$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) = -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_E, \quad (2)$$

ที่ซึ่ง  $\mu$  คือ ค่าความหนืด ( $1.8656 \times 10^{-5}$  kg/m.s)  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $1.203$  kg/m<sup>3</sup>) และเทอมสุดท้ายในสมการที่ (2) เป็นแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออากาศซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{f}_E = q\vec{E}, \quad (3)$$

ที่ซึ่ง  $q$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า และ  $\vec{E}$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)



รูปที่ 4 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศเนื่องจากสนามไฟฟ้า

$$q = \nabla \cdot \varepsilon \vec{E}, \quad (4)$$

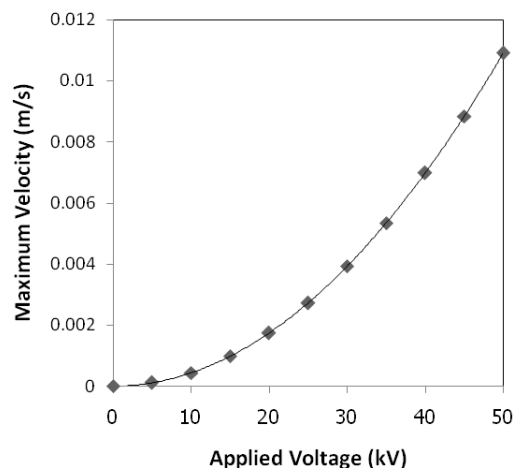
$$\vec{E} = -\nabla V, \quad (5)$$

ซึ่ง  $\varepsilon$  คือ ค่าไดอิเล็กตริกเปอร์มิตติวิตี (dielectric permittivity) ของอากาศ ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m) และ  $V$  คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า

### 4. ผลและการวิเคราะห์

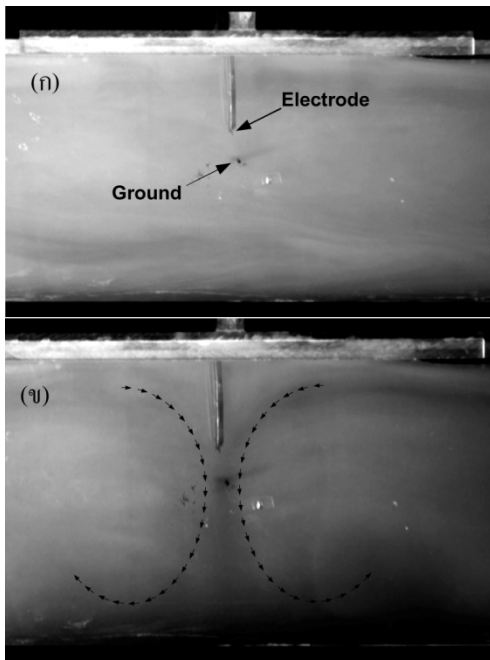
#### 4.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ

จากรูปที่ 4 ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) ถึง (5) แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง ด้วยผลของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า อากาศส่วนที่ถูกชาร์จ (charged air) ถูกทำให้เคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโตรดสู่กราวด์ และในขณะที่เดียวกันอากาศรอบๆที่ไม่ถูกชาร์จจะได้รับอิทธิพลของการไหลแบบเฉือน (shear flow) ทำให้อากาศส่วนนี้ถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เป็นลักษณะหมุนวน จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศที่ถูกชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ( $u_{air,EHD} \propto V^2$ )



รูปที่ 5 ความเร็วของอากาศที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ

ในการทดลองเพื่อสังเกตอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอากาศงานวิจัยนี้ใช้ควันรูปแสดงเส้นทางการไหลของกระแสอากาศและใช้หลอดไฟส่องสว่างขนาด 500 W จำนวน 2 ดวง ส่องทำมุม 45 องศา กับอูโมงค์ลม ภาพการไหลของลมถูกบันทึกโดยใช้กล้องดิจิทัลวิดีโอ (Sony DCR-PC 108/PC 109E) ในรูปที่ 6 กำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้าหน้าตัดทดสอบมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อใช้สนามไฟฟ้าอากาศเกิดการหมุนวนสองลูกบริเวณอิเล็กโทรดและกราวด์ในลักษณะเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการคำนวณ

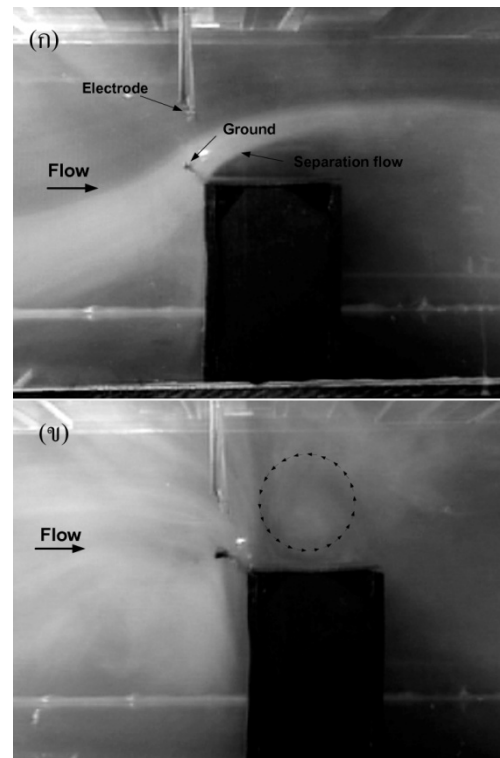


รูปที่ 6 การเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อ  $u_i = 0$  m/s (ก) กรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้า และ (ข) กรณีใช้สนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 7ก ซึ่งแสดงสภาวะการไหลกรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้า จะเห็นว่ากระแสอากาศที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตจะเกิดการไหลแบบแยก (flow separation) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อน

จากลมร้อนไปยังผิวแพคเบตไม่ดี และอัตราการระเหยของความชื้นจากผิวหน้าของแพคเบตมีค่าต่ำ

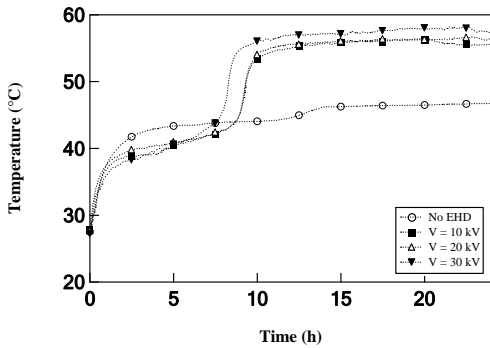
รูปที่ 7ข แสดงอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อกระแสอากาศเมื่อ  $V = 20$  kV,  $H = 2$  และ  $L = 0$  cm อากาศเกิดการหมุนวนอยู่เหนือแพคเบต ซึ่งทำให้การไหลแยกถูกทำลายลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งกระแสลมร้อนสามารถสัมผัสผิวหน้าของแพคเบตได้มากขึ้น



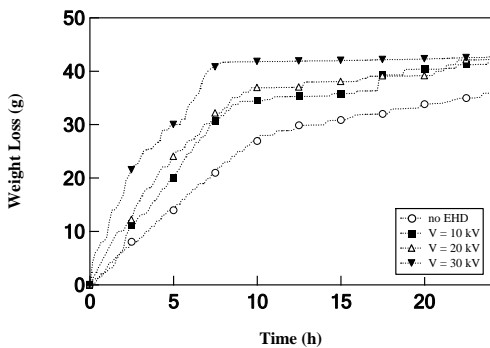
รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านแพคเบต เมื่อ  $u_i = 0.35$  m/s (ก) ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และ (ข) ใช้สนามไฟฟ้า

#### 4.2 ผลของของสนามไฟฟ้าต่อแพคเบต

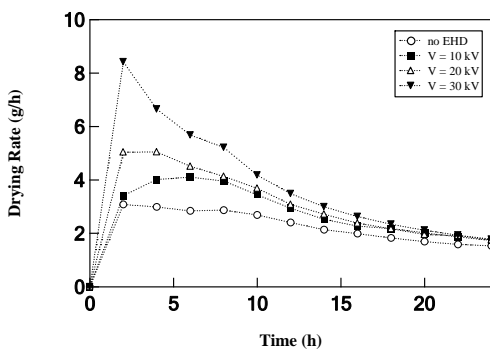
ผลจากการทดลองซึ่งแสดงผลของขนาดของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิและการระเหยของน้ำของแพคเบตแสดงดังรูปที่ 8 ถึง 10 โดยอิเล็กโทรดถูกติดตั้งที่  $L = 0$  cm และ  $H = 2$  cm



รูปที่ 8 ผลของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่ผิวของ แผลเบด



รูปที่ 9 ผลของแรงดันไฟฟ้าต่อปริมาณความชื้นที่ ระเหยออกจากแผลเบด



รูปที่ 10 ผลของแรงดันไฟฟ้าต่ออัตราการอบแห้ง

รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้า อุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผลเบดเพิ่มสูงขึ้นหลังจาก ผ่านช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate of drying period) ซึ่งอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผลเบดมีค่าที่ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนส่วนใหญ่จากลมร้อน ถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (การระเหย) บริเวณผิวหน้าของแผลเบด เมื่อผิวหน้าแผลเบดแห้ง มากขึ้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดย อิทธิพลของลมหมุนวนนอกจากทำให้น้ำบริเวณผิว หน้าของแผลเบดระเหยได้เร็วขึ้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ ความชื้นที่อยู่ภายในแผลเบดเคลื่อนที่ไปที่ผิวของ แผลเบดได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับในรูปที่ 9 ซึ่ง แสดงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแผลเบด ในช่วง เริ่มต้นของการอบแห้งการใช้สนามไฟฟ้าช่วยเพิ่ม อัตราของน้ำที่ระเหยออกจากแผลเบดมีค่าสูงกว่าการ ไม่ใช้สนามไฟฟ้ามาก

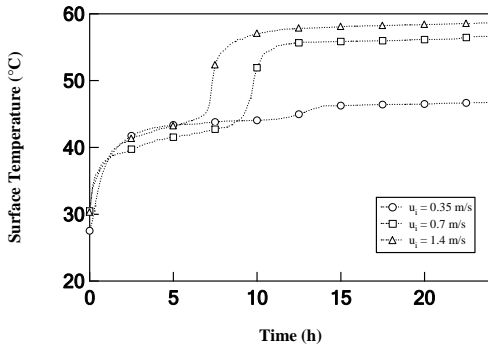
4.3 ผลของการเพิ่มความเร็วลมต่อการอบแห้ง

รูปที่ 11 ถึง 13 แสดงผลที่ได้จากทดลอง ของการเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ยที่ทางเข้าเพียงอย่างเดียว และอุณหภูมิที่ก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบมีค่า 60 °C

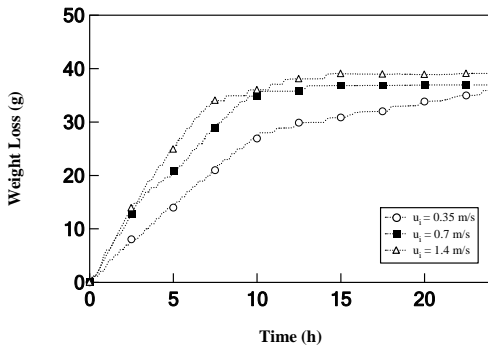
จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความ เร็วของกระแสลมทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทสู่ แผลเบดได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการพาความร้อน บริเวณผิวหน้าของแผลเบดดีขึ้น อีกทั้งทำให้อัตรา การระเหยของความชื้นออกจากแผลเบดดีขึ้น ดัง แสดงในรูปที่ 12 โดยการเพิ่มความเร็วลมเป็น  $u_i = 0.70$  และ  $1.40$  m/s ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น  $1.34$  และ  $1.48$  เท่าของการใช้ความเร็วลมปกติ ( $u_i = 0.35$  m/s) ดังแสดงในรูปที่ 13

4.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

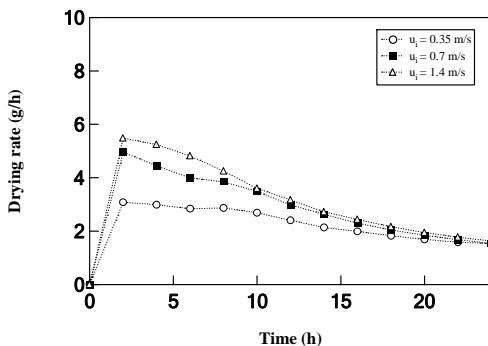
เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าด้านพลังงาน ระหว่างวิธีการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า และวิธี



รูปที่ 11 ผลของความเร็วยังที่ทางเข้าต่ออุณหภูมิที่ผิวแพคเกจเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 12 ผลของความเร็วยังที่ทางเข้าต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจ



รูปที่ 13 ผลของความเร็วยังที่ทางเข้าต่ออัตราการอบแห้ง

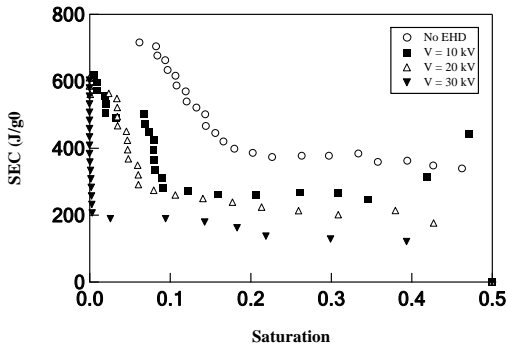
การเพิ่มความเร็วม ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งซึ่งพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ขดลวดไฟฟ้า (ขนาด 2 kW) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ( $I = 0.4 \text{ mA}$ ) และพัดลมขนาด 88 W โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ( $t_{DR}$ ) พิจารณาในช่วงเวลา 8 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง (เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งมีค่าคงที่ของทุกกรณี) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 ที่ซึ่งค่า  $DRR$  (drying rate ratio) คืออัตราส่วนของอัตราการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้าที่ความเร็วของลมร้อนมีค่า 0.35 m/s

ตารางที่ 2 อัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานจากแต่ละกรณี (เวลา 8 ชั่วโมง)

CASE	$V$ [kV]	$u_1$ [m/s]	Energy [kWh]	$DRR$	$SEC$ [J/g]
1	0	0.35	10.71	1.00	466.46
2	0	0.70	21.43	1.34	696.88
3	0	1.40	42.86	1.48	1,260.53
4	10	0.35	12.15	1.38	383.42
5	20	0.35	13.59	1.57	377.63
6	30	0.35	15.03	1.82	360.37

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าการเพิ่มความเร็วมของลมร้อนจะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าการใช้พลังงานในการอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยมวลน้ำที่ระเหยจากแพคเกจ (specific energy consumption,  $SEC$ ) โดยการใช้ลมไอออนนิกมีค่าน้อยกว่ามาก (~ 30-60 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นมีผลทำให้ค่า  $SEC$  ยิ่งต่ำลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าความคุ้มค่าของการใช้พลังงานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น





รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความอิ่มตัวในวัสดุ และการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้ง

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า *SEC* กับค่าความอิ่มตัว (saturation) ของความชื้นในวัสดุ จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ค่าความอิ่มตัวสูงจะมีค่า *SEC* ต่ำกว่าที่ค่าความอิ่มตัวต่ำ ซึ่งเป็นเพราะช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งปริมาณความชื้นในแพคเกจมีค่ามาก และทำให้เกิดลมหมุนวนบริเวณผิวหน้าของแพคเกจ โดยใช้สนามไฟฟ้าทำให้เพิ่มอัตราการระเหยความชื้นออกจากแพคเกจ แต่เมื่อความชื้นภายในแพคเกจเหลืออยู่น้อยมาก ๆ ค่า *SEC* จะมีค่าสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการที่ใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนจะมีประสิทธิภาพหรือความคุ้มค่าของการใช้พลังงานที่มากในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งหรือช่วงที่วัสดุมีความชื้นภายในสูงมากกว่าช่วงการอบแห้งช่วงอื่น ๆ

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูง ต่อกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนและวิเคราะห์ถึงค่าการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 การใช้สนามไฟฟ้าทำให้ลมเกิดการหมุนวนและช่วยลดอิทธิพลของการไหลแบบแยกซึ่งทำให้

กระแสลมร้อนสามารถสัมผัสกับผิวของแพคเกจได้ดีขึ้น เป็นผลทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทเข้าสู่แพคเกจดียิ่งขึ้น และยังส่งผลทำให้อัตราการระเหยของความชื้นหรืออัตราการอบแห้งแพคเกจดีขึ้น

4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไปการใช้ไฟฟ้าร่วมมีผลทำให้อัตราส่วนของการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.4-1.8 เท่า และอัตราการอบแห้งแปรผันกับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

4.3 ในแง่ของความคุ้มค่าด้านการใช้พลังงาน การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนทำให้พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าวิธีการเพิ่มความเร็วของกระแสลมร้อนประมาณ 30-60 เปอร์เซ็นต์

4.4 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนจะมีประสิทธิภาพหรือความคุ้มค่าของการใช้พลังงานที่มากในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งหรือช่วงที่วัสดุยังคงมีความชื้นสูง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ คุณรัชพงศ์ ศรีวัชรินทร์ ที่ช่วยรวบรวมข้อมูล

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gori, F., Gentili, G. and Matini, L., 1987, Microwave heating of porous media, ASME J. Heat Transfer 109: 522-525.

- [2] Rattanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2001, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 28: 605-616.
- [3] Sandua, C., 1986, Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis, *Biotechnol. Prog.* 2: 109-119.
- [4] Hanzawa, T., 2004, Application and advances in infrared heating in Japan, *Trends Food Sci. Technol.* 22: 809-820.
- [5] Alemrajabi, A. and Lai, F.C., 2005, EHD-enhanced drying of partially wetted glass beads, *Drying Technol.* 23: 597-609.
- [6] Isobe, S., Barthakur, N., Yoshino, T., Okushima, L. and Sase, S., 1999, Electrohydrodynamic drying characteristics of agar gel, *Food Sci. Technol. Res.* 5: 132-136.
- [7] Lai, F.C. and Sharma, R.K., 2005, EHD-enhanced drying with multiple needle electrode, *J. Electrostatics* 63: 223-237.
- [8] 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.