

การวิเคราะห์การเพิ่มการพาความร้อนและการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง  
โดยใช้อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์

**Experimental Analysis of Convective Heat Transfer Enhancement and Energy  
Consumption in Drying Process Utilizing Electrohydrodynamics**

รัชพงศ์ กรวิชรินทร์, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์\*, สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-5643001-9 ต่อ 3144, โทรสาร: ต่อ 3049

E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th

**บทคัดย่อ**

วิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของวัสดุพอรุณที่อยู่ภายใต้กระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน บทความนี้ศึกษาผลของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของวัสดุพอรุณ อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้มีค่า  $60^{\circ}\text{C}$  และ  $0.35\text{ m/s}$  ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า  $0 - 30\text{ kV}$  จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสลมเกิดการหมุนวน ซึ่งส่งผลทำให้การไหลแบบแยกบริเวณผิวหน้าของวัสดุพอรุณถูกทำลายลง เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุพอรุณเพิ่มขึ้นอย่างมาก และขนาดความแรงของลมหมุนวนแปรผันกับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ  $1.5 - 2$  เท่าของการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป ( $DR \propto e^V$ ) จากการวิเคราะห์การใช้พลังงานพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าจะให้ความคุ้มค่าของการใช้พลังงานที่มากในช่วงที่ภายในวัสดุพอรุณมีความชื้นสูง โดยค่า SEC ของการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบใช้สนามไฟฟ้ารวมมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนทั่วไป 40 เปอร์เซ็นต์

**คำหลัก:** อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน ค่าการใช้พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยผลผลิต (SEC)

**Abstract**

Electrohydrodynamic technique is used for enhancing the convective heat transfer on surface of porous material in a drying process utilizing hot-air flow. This paper experimentally investigates the effects of electrical voltage on heat transfer and moisture removal of a porous material. Temperature and velocity of airflow are tested at  $60^{\circ}\text{C}$  and  $0.35\text{ m/s}$ , respectively. The electrical voltage is applied in range of  $0 - 30\text{ kV}$ . It is found that the influence of the electric field conduct airflow to circulate above the material surface. This causes the separation flow to be eliminated, resulting in high enhancement of heat transfer and moisture removal. In addition, strength of circulating flow is proportional to the increment of voltage.

With electric fields, the drying rate is approximately improved by  $1.5 - 2 (DR \propto e^V)$ . From analysis, worthy of energy usage is high when moisture content in the material is high. Moreover, the SEC of hot-air drying process utilizing electrohydrodynamics is lower than that of conventional hot-air drying by around 40 percent.

**Keywords:** Electrohydrodynamics, Drying process, Heat and mass transfer enhancement, Specific energy consumption.

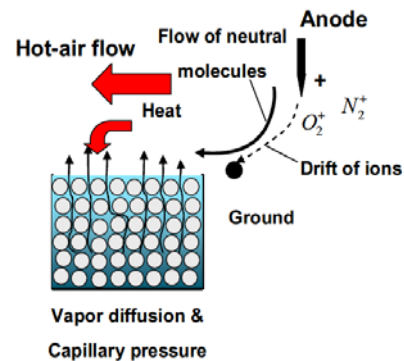
## 1. บทนำ

ด้วยวิฤตการณ์ด้านพลังงานและเศรษฐกิจทำให้ประเทศต่าง ๆ ให้ความสนใจด้านการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากที่สุด สำหรับประเทศอุตสาหกรรม การเกษตรวิธีการรักษาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นวัสดุพรุน (Porous material) เป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และวิธีที่นิยมใช้คือ กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot-air drying process) ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดการใช้พลังงานโดยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุพรุนในระหว่างการอบแห้งจึงอยู่ในความสนใจของวิจัยหลายกลุ่มเป็นอย่างมาก

Alemrajabi และคณะ [1] ทำการเพิ่มอัตราการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า วัสดุพรุนถูกแทนด้วยแพคเบด (Packed bed) ซึ่งบรรจุเม็ดแก้วน้ำและอากาศ สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างแท่งอิเล็กโตรดและแผ่นกราวด์ที่ทำจากทองแดง (การติดตั้งแบบ wire-to-plate) จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงบริเวณผิวของแพคเบด

Isobe และคณะ [2] ใช้วิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกสลับแห้งวัสดุที่อุณหภูมิบรรยากาศเมื่อไม่ใช้การเป่าลมร้อน ในการทดลองอิเล็กโตรดทองแดง 1 แท่งติดตั้งเหนือแผ่นกราวด์อลูมิเนียม ซึ่งเป็นการติดตั้งแบบ wire-to-plate จากการทดลองพบว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูงไม่เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยตรงแก่วัสดุแต่ช่วยเร่งให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นเป็น 3 เท่าของการอบแห้งแบบปกติ และอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ แต่แปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโตรดกับแผ่นกราวด์

Lai และ Sharma [3] วางแพคเบดที่บรรจุน้ำและลูกแก้วขนาดหนึ่งในสองมิลลิเมตรและติดตั้งอิเล็กโตรดกับกราวด์แบบ multi-wire-to-plate โดยใช้อิเล็กโตรดนิเกิล (Nickel) จำนวน 3 แท่งติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือแพคเบดซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง ในงานวิจัยพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าและขนาดความเร็วของลมที่ไหลในทิศขวางกับสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีการไหลของลมอัตราการอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 1 กลไกการเพิ่มการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า [4]

Chaktranond และ Rattanadecho [4] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าในแพคเบดที่มีความพรุนสองค่า (ชั้นของแพคเบดวางเม็ดแก้วขนาดต่างกัน) และอิเล็กโตรดถูกติดตั้งแบบ multi-wire-to-wire โดยอิเล็กโตรดทองแดง 4 แท่งติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและเส้นลวดกราวด์ทองแดงติดตั้งอยู่เหนือแพคเบดดังรูปที่ 1 ภาพถ่ายจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะเกิดลมหมุนบริเวณรอบ ๆ ลวดกราวด์และอิทธิพลของลมหมุนวนทำให้การถ่ายเทความร้อน

และความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงความพรุนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (Capillary pressure) ในแต่ละชั้นแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้อัตราการระเหยออกจากแพคเบตมีค่าแตกต่างกัน

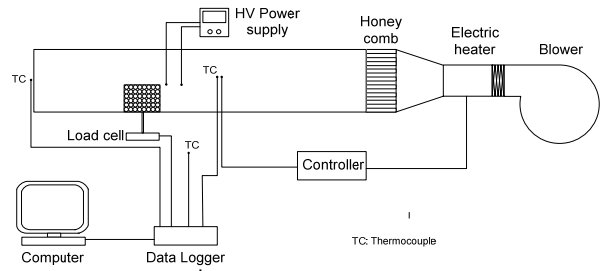
จากงานวิจัยที่กล่าวมานำเสนอการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง แต่การใช้พลังงานยังถูกนำไปพิจารณาน้อยมาก ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่ค่าต่างๆ โดยการติดตั้งอิเล็กโทรดเป็นแบบ multi-wire-to-wire

## 2. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

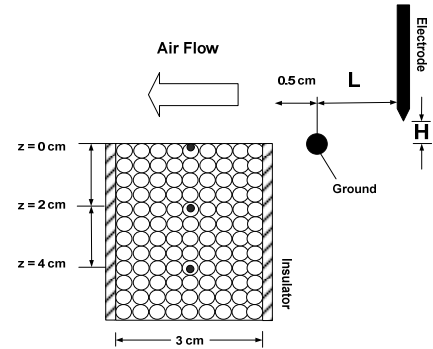
จากรูปที่ 2 ลมร้อนอุณหภูมิ 60 °C ไหลผ่านหน้าตัดทดสอบขนาด 15 cm X 15 cm แพคเบตที่ใช้มีขนาด 3 cm (กว้าง) X 12 cm (ยาว) X 6 cm (สูง) ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ผิวภายนอกหุ้มฉนวนกันความร้อน ส่วนภายในบรรจุน้ำและเม็ดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm (ค่าความพรุน,  $\phi \sim 0.385$ ) ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (Initial saturation) ของแพคเบตมีค่า  $S = 0.5$  และอุณหภูมิภายในแพคเบตถูกวัดค่าด้วยสายไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to  $\pm 0.5$  °C) และวัดอุณหภูมิ ณ ทุกระดับความลึก  $z = 0, 2$  และ 4 cm (วัดจากผิวด้านบนลงไปในแพคเบต) น้ำหนักของแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกวัดค่าโดยโหลดเซลล์ (Load cell)

สนามไฟฟ้าถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Glassman, model MJ30N400) อิเล็กโทรด 4 เส้นถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและลวดกราวด์ 1 เส้นถูกติดตั้งในแนวขวางกับการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3

แรงดันไฟฟ้าและระยะห่างที่ใช้ในการทดลองได้ถูกทดสอบแล้วว่าไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) และรายละเอียดของสภาวะทดสอบแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งอิเล็กโทรดและแพคเบต

ตารางที่ 1 สภาวะทดสอบ

Condition	Symbol	Value
Glass bead	$d$	0.125 mm
Saturation	$S$	0.5
Drying temperature	$T$	60 °C
Ambient temperature	$T_a$	25 °C
Mean air velocity	$u_b$	0.35 m/s
Applied voltage	$V$	0 – 30 kV
Drying time	$t$	24 hr

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

### 3.1 ลักษณะและอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้เกิดแรงเนื่องจากประจุไฟฟ้า (Coulomb force) สามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (1)$$

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

$$q = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (2)$$

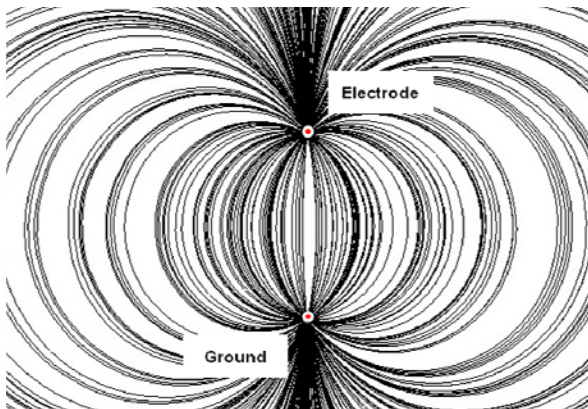
$$\vec{E} = -\nabla \cdot \vec{V} \quad (3)$$

ซึ่ง  $\varepsilon$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของของไหล และ  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้า

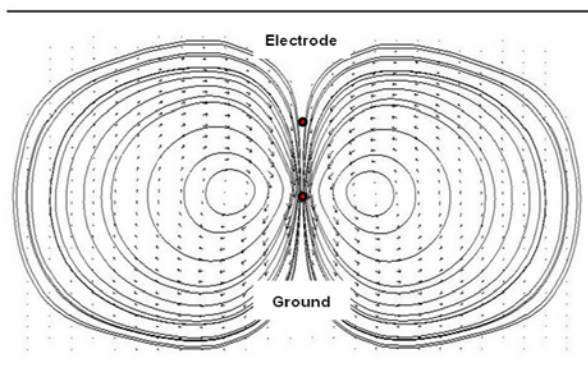
เพื่อแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าแรงดันสูง สมมติให้อากาศเป็นอนุภาคกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมครอนและเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง และแรงต้านการเคลื่อนที่พิจารณาจากแรงต้าน (Drag force) ดังนั้น

$$\bar{u}_p = \frac{\bar{F}_E}{3\pi\mu_f d_p} \quad (4)$$

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางจากปลายขั้วอิเล็กโทรดไปสู่กราวด์ แต่จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง พบว่าลักษณะการหมุนวนของอากาศมีลักษณะแตกต่างจากรูปแบบของเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าอย่างสิ้นเชิง ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิ-



รูปที่ 4 เส้นแรงสนามไฟฟ้า

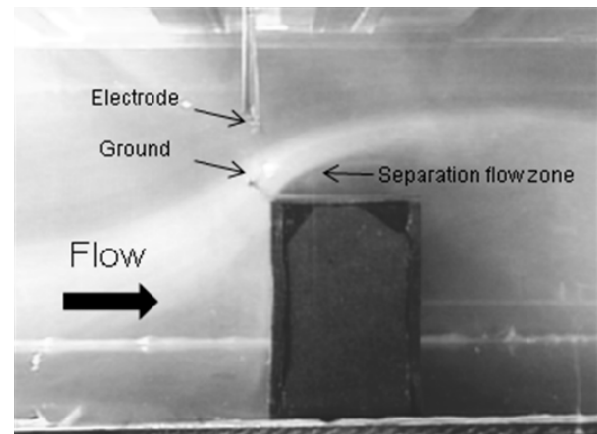


รูปที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศเนื่องจากสนามไฟฟ้า

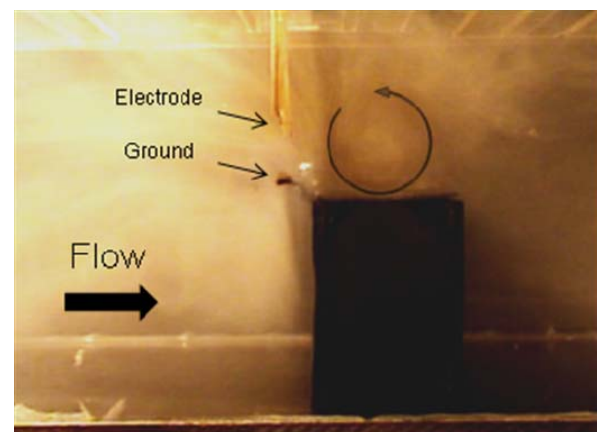
พลของการไหลแบบเฉือน (Shear flow) โดยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าหรือแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) จะผลักอากาศส่วนที่ถูกชาร์ตให้เคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรดสู่กราวด์ และในขณะที่เดียวกันอากาศรอบๆ ที่ไม่ถูกชาร์ตจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เป็นลักษณะหมุนวน (Swirling flow)

### 3.2 ภาพถ่ายการไหลของกระแสอากาศ

เพื่ออธิบายลักษณะลมหมุนวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้ควันทูบแสดงเส้นทางการไหลของกระแสอากาศและใช้หลอดไฟส่องสว่างขนาด 500 W จำนวน 2 ดวง ส่องทำ 45 องศากับอิมโวกซ์ลุมภาพการไหลของลมถูกบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอลวีดีโอ (Sony DCR-PC 108/PC 109E)



รูปที่ 6 ภาพการไหลเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 7 ภาพการไหลเมื่อใช้สนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการไหลเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า จะเห็นว่าบริเวณขอบด้านบนของแพคเบตจะเกิดการไหลแบบแยก (Flow separation) ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังผิวแพคเบตไม่ดี

รูปที่ 7 แสดงผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อการไหลของลมร้อน เมื่อ  $V = 15$  kV และ  $H = 2$  cm ลักษณะของกระแสอากาศเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบหมุนวนอยู่เหนือแพคเบต ซึ่งทำให้การไหลแยกถูกทำลายลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งลมร้อนสามารถสัมผัสกับผิวของแพคเบตมากขึ้น โดยความรุนแรงของลมหมุนวนนั้นแปรผันตรงตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ( $\bar{u}_{EHD} \propto \bar{V}$ )

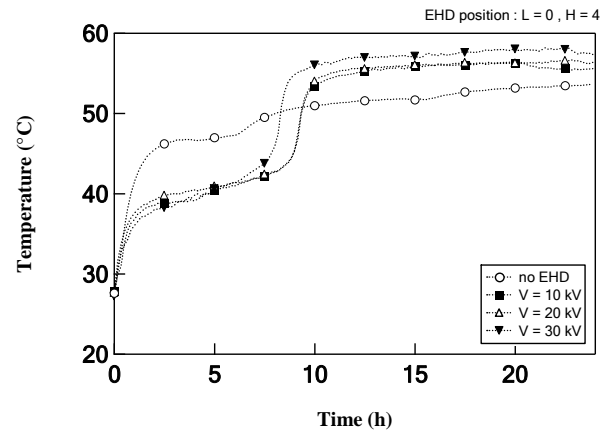
### 3.3 อิทธิพลของขนาดของสนามไฟฟ้า

เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการระเหยมวลน้ำออกจากแพคเบต ติดตั้งอิเล็กโตรดถูกติดตั้งที่  $L = 0$  cm และ  $H = 4$  cm ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า  $V = 0, 10, 20$  และ  $30$  kV

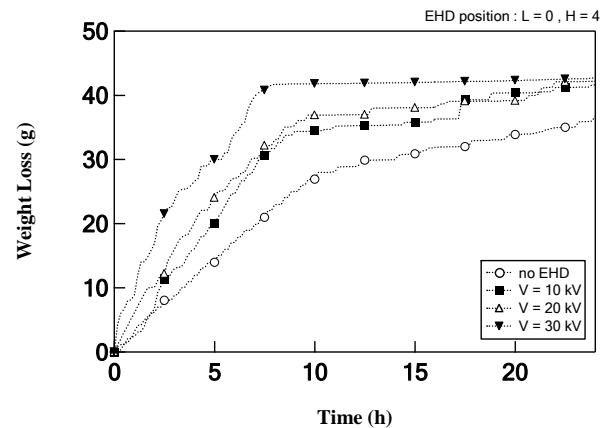
รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิบริเวณผิวหน้าของแพคเบตสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างช้าในช่วงอุ่นเริ่มแรก (Warm-up period) และช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate of drying) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของลมหมุนวนจะขับให้มวลน้ำนั้นเคลื่อนที่ไปที่ผิวของแพคเบตได้เร็วขึ้นและความร้อนที่รับจากลมร้อนถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบต ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 9 ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งแบบใช้สนามไฟฟ้าอัตราของน้ำที่หายไปจากแพคเบตมีค่าสูงกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้ามาก

หากเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งในแต่ละช่วงดังรูปที่ 10 พบว่า การเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นสูงมากยิ่งขึ้น และเป็นผลทำให้เวลาในการอบแห้งน้อยลง (ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่อัตราความชื้นระเหยออกจากแพคเบตตกลง) โดยการใช้สนามไฟฟ้าขนาด  $V = 10, 20$  และ  $30$  kV ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 1.4, 1.8 และ 2.2

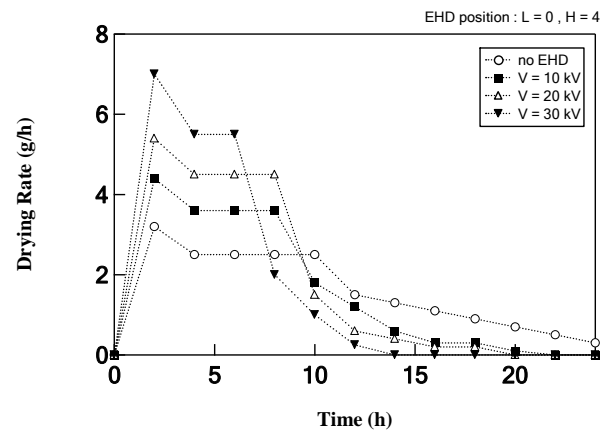
เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้าตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าอัตราการอบแห้งแปรผันกับเอ็กโปเนนเชียลยกกำลังแรงดันไฟฟ้า ( $DR \propto e^V$ )



รูปที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวแพคเบตภายใต้สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเบตที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ

### 3.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

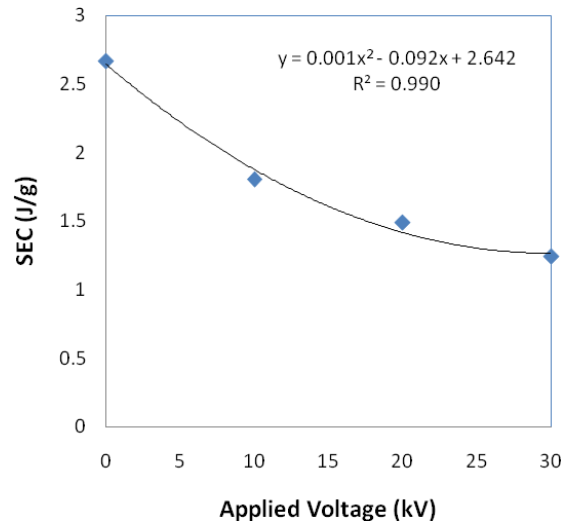
การวิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดไฟฟ้า (ขนาด 2 kW) และจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ( $I = 0.4$  mA) โดยคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ( $t_{DR}$ ) จากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) เป็นหลัก และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 ที่ซึ่ง DRR (Drying rate ratio) คืออัตราส่วนของอัตราการอบแห้งภายใต้สนามไฟฟ้าต่ออัตราการอบแห้งแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้า (หรือใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว) และ SEC (Specific energy consumption) คือค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยผลผลิต)

เมื่อวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยผลผลิตพบว่าค่า SEC จะลดลงตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 แต่หากสังเกตที่การใช้แรงดันไฟฟ้า 20 kV เป็นต้นไป ค่าความชันของเส้นกราฟมีแนวโน้มที่จะลดลงแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าของการใช้พลังงานอาจไม่เพิ่มสูงมากหากใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินความจำเป็น

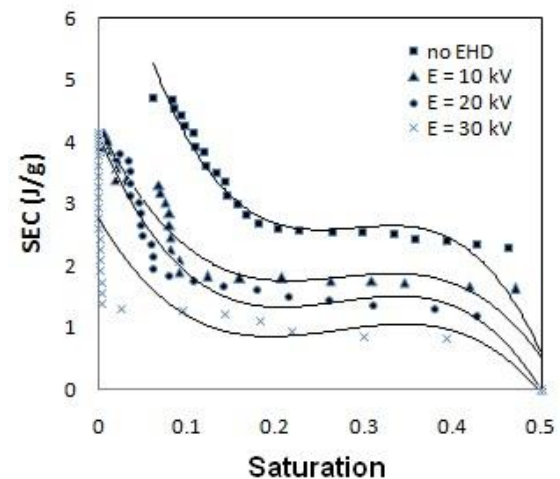
รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่า SEC กับค่าความอิ่มตัว พบว่าช่วงที่แพคเบตมีความชื้นหรือมีค่าความอิ่มตัวสูงการใช้สนามไฟฟ้าจะให้ความคุ้มค่าของการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งที่มาก แต่เมื่อแพคเบตมีค่าความอิ่มตัวต่ำ ( $\sim 0.1$ ) ค่า SEC ของกรณีไม่ใช้และใช้สนามไฟฟ้ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามการใช้สนามไฟฟ้ายังสามารถช่วยขยับความชื้นออกจากแพคเบตได้มากกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่งความชื้นเหลืออยู่ในแพคเบตน้อยมาก ๆ

ตารางที่ 2 รายละเอียดผลการทดลองแต่ละกรณี

V (kV)	Energy (kWh)	DRR	SEC (J/g)
0	20.000	1	2.667
10	16.032	1.4	1.804
20	14.056	1.8	1.488
30	12.072	2.2	1.242



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยผลผลิตกับแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยผลผลิตกับค่าความอิ่มตัว

## 4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีต่อกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนและวิเคราะห์ถึงค่าการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จากภาพถ่ายการไหลของลมแสดงให้เห็นว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ลมเกิดการหมุนวนและลดอิทธิพลของการไหลแบบแยก (Separation flow) ซึ่งทำให้ลมร้อนสามารถสัมผัสกับผิวของแพคเบตได้ดีขึ้น

- อัตราความชื้นระเหยจากผิวหน้าแพคเบตได้เร็วขึ้นและความร้อนถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพคเบตได้มากขึ้น เป็นผลจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 10, 20 และ 30 kV มีอัตราการอบแห้งดีขึ้น 1.4, 1.8 และ 2.2 เท่าตามลำดับ และอัตราการอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับแรงดันไฟฟ้า
- การอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้าร่วมให้การใช้พลังงานในช่วงที่แพคเบตมีความชื้นสูงมีความคุ้มค่ามากกว่าช่วงที่แพคเบตมีความชื้นต่ำ และการอบแห้งแบบใช้สนามไฟฟ้าร่วมยังทำให้ความชื้นคงเหลือในแพคเบตน้อยกว่าการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนปกติทั่วไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนา

มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alemrajabi, A. and Lai, F.C. (2005). EHD-enhanced drying of partially wetted glass beads, *Drying Technology*, vol. 233, pp. 597-609.
- [2] Isobe, S., Barthakur, N., Yoshino, T., Okushima, L. and Sase, S. (1999). Electrohydrodynamic drying characteristics of agar gel. *Food Sci. Technol. Res.*, vol. 5(2), pp. 132-136.
- [3] Lai, F.C. and Sharma, R.K. (2005). EHD-enhanced drying with multiple needle electrode, *J. Electrostatics*, vol. 63, pp. 223-237.
- [4] 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(8), pp.1049-1056.