

# การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุนแบบไม่อิ่มตัวด้วยสนามไฟฟ้า

## ENHANCEMENT OF MASS AND HEAT TRANSFER IN THE UNSATURATED PACKED-BED WITH ELECTRIC FIELDS

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์\*

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาณุเกียรติ สมาริวัฒน์

ทิศกร ประทีปะเสน

ปฐวี อมรรวารีสมาน

ศูนย์วิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟใน  
งานวิศวกรรม (R.C.M.E)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต

ปทุมธานี 12121 ประเทศไทย โทร 02-

5643001-9 \*อีเมลล์ [cchainar@engr.tu.ac.th](mailto:cchainar@engr.tu.ac.th)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) เพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อน ในการทดลองอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความชื้นและต่ออุณหภูมิของชุดแพ็คเบดที่มีความพรุนค่าหนึ่งๆได้ถูกตรวจสอบ สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลมถูกใช้ในช่วง 0 – 15 กิโลโวลท์ ลูกแก้วที่บรรจุในแพ็คเบดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของโคโรนาวินด์ที่เกิดในกระแสลมร้อนเหนือแพ็คเบดทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแพ็คเบดมีค่าเร็วขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกรณีที่ใช้สนามไฟฟ้าและไม่ใช้สนามไฟฟ้า

คำสำคัญ: อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD), กระบวนการอบแห้ง, วัสดุพรุน

### Abstract

The enhancement of mass and heat transfer by electrohydrodynamics (EHD) has been experimentally evaluated in this study. Influences of electric fields, which are associated with and without hot gas, on the water moisture content and temperature in the unsaturated packed bed are examined. Electric fields are applied in the range of 0 – 15 kV. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed. The results show that with influence of corona wind on flow above the packed bed, the drying rate is enhanced considerably. In addition, increasing EHD dramatically reduces the moisture content in packed bed. Moreover, the temperature measured at different levels in the packed bed increases with higher applied voltage. Comparison on the energy consumption between utilizing hot air with and without EHD is reported.

**Keywords:** Electrohydrodynamics (EHD), Drying process, Porous media

### 1. คำนำ

การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีกระบวนการอบแห้ง (Drying process) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมเกษตร การอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อน (Hot air drying) หรือการแผ่ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (Thermal radiant heater) เป็นที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีนี้เราสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ต้องการให้แก่ผลิตภัณฑ์และยังสามารถควบคุมช่วงเวลาการใช้งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนต้องการเวลาสำหรับการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยหลายกลุ่ม [ เช่น 2, 3, 4, 5, 6] ได้ศึกษาวิธีการที่จะเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้ง Lai และ Lai [4] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เรียกว่าอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) และทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในแพ็คเบด (Packed bed) ในการทดลองลวดและแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพ็คเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเร็วของอากาศซึ่งไหลในทิศทางขวาง (Cross flow) กับทิศของสนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความต่าง

ศักย์ทางไฟฟ้าที่ใช้ นอกจากนี้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น

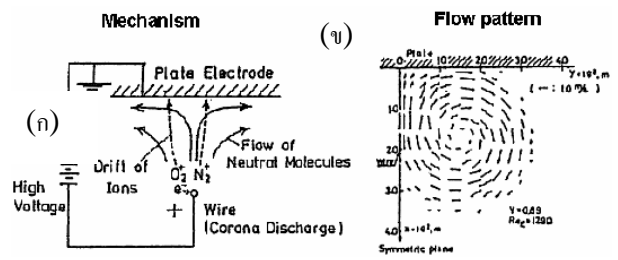
Alem-Rajabaic และ Lai [5] ทำการทดลองศึกษาอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า แพคเบตที่ใช้บรรจุลูก แก้วที่มีความเปียกบางส่วน (Partially wetted glass bead) ในการทดลองลวดอิเล็กโตรด และแผ่นทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเบตตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วย EHD มีประสิทธิภาพอย่างมากบริเวณผิวด้านบนของแพคเบต และอัตราการของการอบแห้งเพิ่มขึ้นในทิศของโคโรนาวินด์ที่เป็นบวกมากกว่าในทิศที่เป็นลบ

Ratanadecho และคณะ [6] ทำการศึกษาการอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยวิธีทดลองและโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วัสดุที่ทำการศึกษาคือวัสดุที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated material) และความพรุน (Porosity) ของวัสดุมีค่าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของความชื้น (Moisture content) ในวัสดุพรุนต่อกลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และอิทธิพลของการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพคเบตเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ Ratanadecho และคณะ [6] พบว่า แพคเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงคาปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นมี Ratanadecho และคณะ [6] เท่านั้นที่ได้ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบต แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมทำให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน กล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนเกิดขึ้นจากภายในแพคเบตและความร้อนจะไหลจากภายในแพคเบตออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพคเบต วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเบตโดยทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่งในแพคเบต และทำการตรวจสอบการสูญเสียความชื้นของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า

## 2. หลักการสร้างโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง แล้วไหลไปยังอิเล็กโตรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆกับผิวของอิเล็กโตรดนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionized) และผลทำให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโตรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศนี้เคลื่อนที่มันจะชนกับโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ดังรูปที่ 1 ก และทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum exchange) ผลของการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ของกระแสหมุนวนหรือที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (Corona wind) จากการศึกษาของ Yabe และคณะ [1] ในสภาวะที่ปราศจากการไหลทิศทางแนวขวาง (Cross flow) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Body force) เหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวน (Vortices) ที่สมมาตรกันสองลูกที่มีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกันระหว่างลวด และแผ่นอิเล็กโตรด (Wire and plate electrode) ดังแสดงในรูปที่ 1 ข



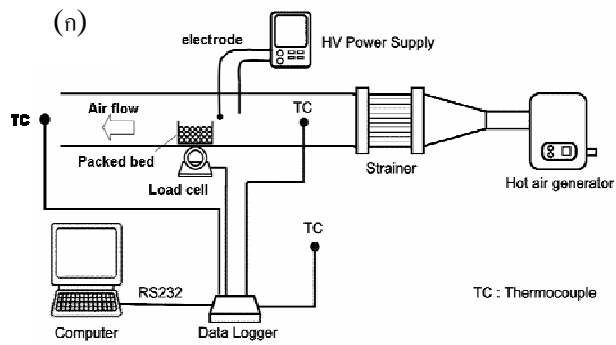
รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรนาวินด์ [1]

## 3. ชุดทดสอบและการทดลอง

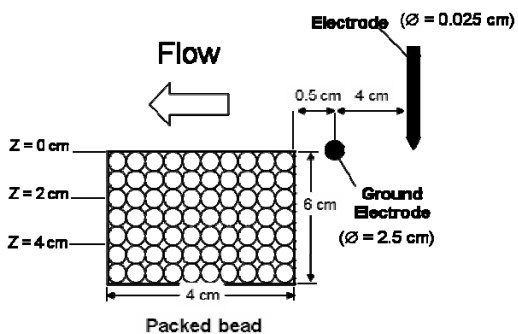
รูปที่ 2 แสดงชุดทดสอบของงานวิจัยนี้ กระแสลมจากพัดลมไหลผ่านอุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel) ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 15 × 15 ตร.ซม. แล้วถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเครื่องสร้างลมร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโตรดผ่านอากาศไปยังกราวด์อิเล็กโตรด ขั้วอิเล็กโตรดทำจากลวดทองแดง 4 เส้นที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม และลวดอิเล็กโตรดแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 มม. ส่วนกราวด์อิเล็กโตรดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้ๆกับแพคเบตและในทิศทางที่ขวางกับทิศการไหลของกระแสลมดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิของกระแสลมถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ประมาณ 60°C น้ำหนักของความชื้นภายในแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซล (Load cell)

กล่องแพคเบตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ความหนา 0.5 มม. ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเบต ซึ่งมีขนาด 4 ซม. กว้าง × 12 ซม. ยาว × 6 ซม. สูง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบต ลวดไฟเบอร์ออปติค (LUXTRON Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to ±0.5°C) จำนวน 3 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 2 และ 4 ซม. (วัดจากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเบต) ดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของกระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเบต และน้ำหนักของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Datataker DT505)

ในการทดลองความเร็วเฉลี่ยของกระแสลม ( $U_b$ ) มีค่า 0.35 เมตรต่อวินาที และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้มีค่า 15 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบ (ก) แผนภูมิรูปภาพชุดทดสอบ (ข) ภาพถ่ายชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ขนาดของแพคเบดและตำแหน่งของอิเล็กโทรด

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	$M_{in}$	22 %db
Drying temperature	T	50 – 60 °C
Ambient temperature	$T_M$	25 °C
Mean air velocity	$U_b$	0.35 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	~ 48 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

ตารางที่ 1. สภาวะทดสอบ

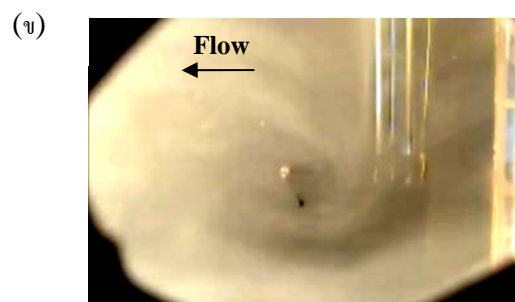
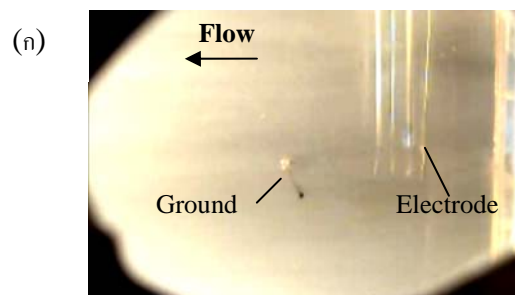
Diameter, d (mm)	Porosity, $\phi$	Permeability, K ( $m^2$ )
0.125	~ 0.385	~ $8.41 \times 10^{-12}$
0.38	~ 0.371	~ $3.52 \times 10^{-11}$

ตารางที่ 2. คุณลักษณะของความพรุน (Porosity) ในแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างๆ

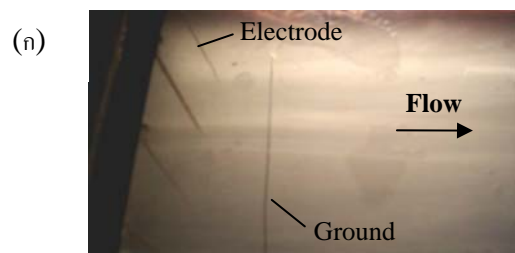
#### 4. ผลการทดลอง

#### 4.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการไหลเหนือแพคเบด

เพื่อแสดงลักษณะของโคโรนาวินด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า (EHD) ควันทรงถูกปล่อยจากกระแสต้นทาง (Upstream flow) ของชุดทดสอบ และแสงจากหลอดไฟ (Halogen lamp) ขนาด 500 วัตต์ถูกส่องจากที่ปลายทางออกของชุดทดสอบในทิศทางตรงข้ามกับทิศการไหลของกระแสลม รูปที่ 4 และ 5 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาที และค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่า (V) 10 กิโลโวลท์ จากรูปที่ 4 ข (แสดงภาพด้านข้าง) จะเห็นได้ว่าผลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสลมเกิดการผสมหมุนวน (Vortex) ระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ โดยศูนย์กลางของการหมุนวนเกิดใกล้กับกราวด์อิเล็กโทรด และจากรูปที่ 5 ข กระแสลมหลังลวดอิเล็กโทรดมีความปั่นป่วนมากด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากลวดอิเล็กโทรดแต่ละเส้นที่วางเรียงกันในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของกระแสลม



รูปที่ 4 ภาพถ่ายด้านข้างของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสควันทรงรูป (ก) V = 0 kV และ (ข) V = 10 kV



รูปที่ 5 ภาพถ่ายด้านบนของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสควีน  
รูป (ก)  $V = 0$  kV และ (ข)  $V = 10$  kV

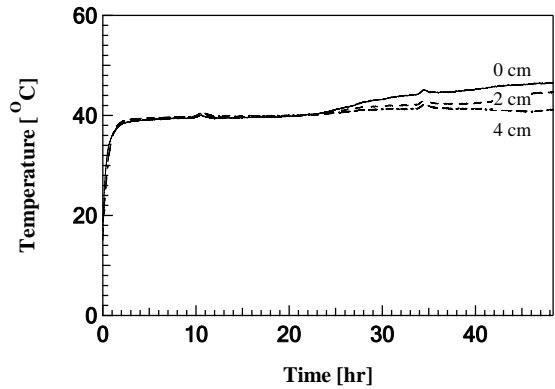
#### 4.2 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่ออุณหภูมิภายในแพคเบต

เพื่อสังเกตอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออุณหภูมิของกระแสลมและต่ออุณหภูมิภายในของแพคเบต งานวิจัยนี้ได้ทดสอบกรณีที่ไม่มีเปิดเครื่องสร้างลมร้อน แล้ววัดค่าอุณหภูมิของกระแสลมที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแพคเบต และพบว่าอุณหภูมิของกระแสลมก่อนและหลังแพคเบตมีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้อุณหภูมิที่ลวดอิเล็กโตรดยังถูกตรวจ สอบโดยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) และพบว่าอุณหภูมิที่ลวดอิเล็กโตรดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของกระแสลมมาก จากการทดสอบข้างต้นทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของความร้อนจากลวดอิเล็กโตรดมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบต

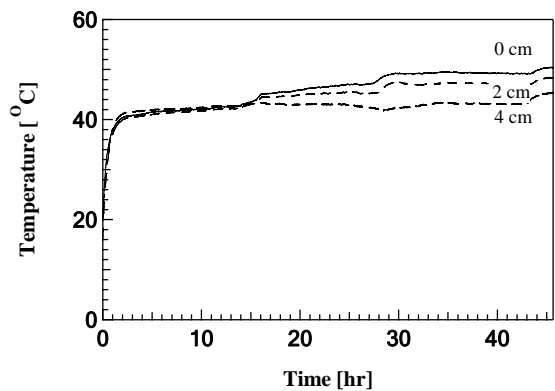
รูปที่ 6 แสดงผลการทดลองกรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวและกำหนดให้ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นของแพคเบต (Initial saturation,  $S_{int} = V_{water, int} / V_{glass}$ ) มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากกราฟในช่วง 3 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิภายในแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งที่ประมาณ  $40^{\circ}\text{C}$  หลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมงอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละชั้นเริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างช้าๆ และที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าประมาณ  $55^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่ระดับต่ำสุด (4 ซม. จากผิวแพคเบต) มีค่าประมาณ  $41^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการทดลองปริมาณความชื้นในแพคเบตยังมีค่ามาก เมื่อความร้อนจากลมร้อนไหลเข้าสู่แพคเบต น้ำภายในแพคเบตจะดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพคเบตทั้ง 3 ตำแหน่งมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่น้ำได้รับความร้อน น้ำก็มีการเคลื่อนที่จากภายในไปยังผิวของแพคเบตแล้วเกิดการระเหย (Evaporating) ไปสู่ลมร้อน ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการระเหยนี้เรียกว่า ช่วงของการทำให้แห้ง (Drying period) เมื่อน้ำส่วนใหญ่ระเหยออกจากแพคเบตจะทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทให้แก่ลูกแก้ว ดังนั้นอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละตำแหน่งเริ่มมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งและมีค่าแตกต่างกัน หรือกล่าวได้ว่าหลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมง กลไกการถ่ายเทความร้อนหลักเป็นแบบการนำความร้อน (Conduction heat transfer) นั้นเอง และเรียกช่วงของกระบวนการนี้ว่าช่วงของการตกลง (Falling period)

รูปที่ 7 และ 8 แสดงอุณหภูมิภายในแพคเบตเมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 และ 15 กิโลโวลต์ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มสนามไฟฟ้าทำให้ช่วงการระเหยของน้ำหรือช่วงของการทำให้แห้งมีค่าลดลง นั้นหมายถึงอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

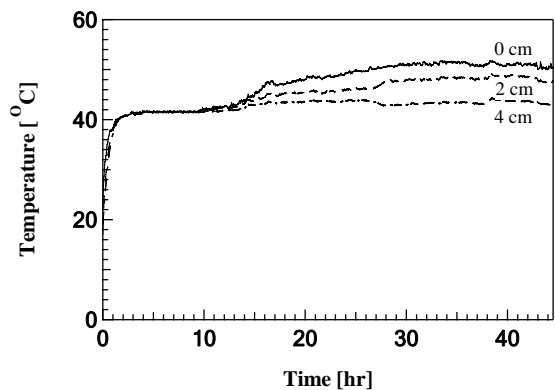
รูปที่ 9 และ 10 แสดงอิทธิพลของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีต่ออุณหภูมิที่ผิวและที่ความลึก 4 ซม. ของแพคเบตตามลำดับ จากรูปพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบต โดยเฉพาะที่ผิวของแพคเบตอุณหภูมิมีค่าแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 9



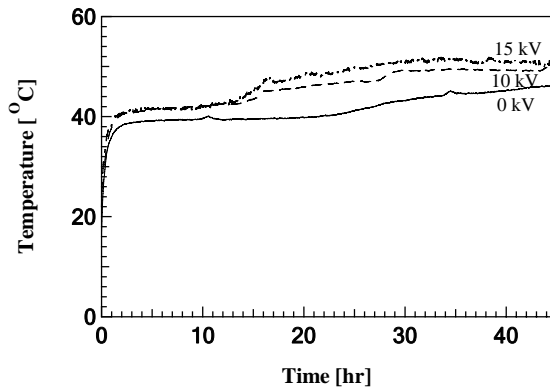
รูปที่ 6 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า  $V = 0$  kV



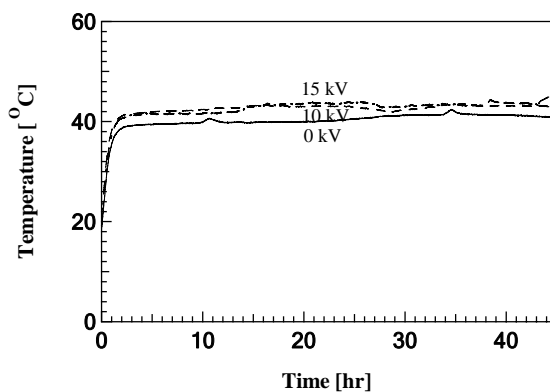
รูปที่ 7 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า  $V = 10$  kV



รูปที่ 8 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า  $V = 15$  kV



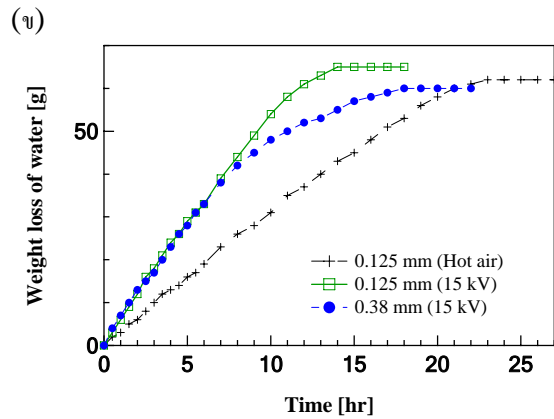
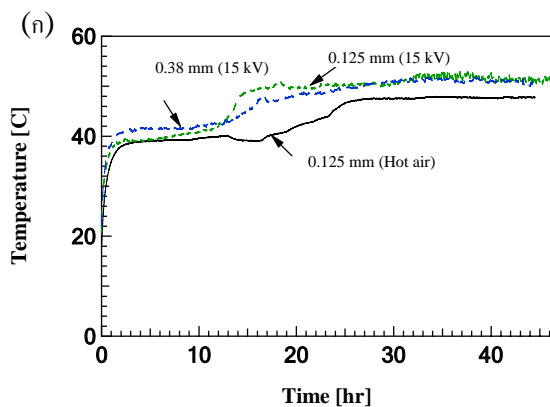
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับความลึก 4 ซม. ของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.

#### 4.3 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อความชื้นของแพคเบต

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วม ( $V = 15 \text{ kV}$ ) ที่  $s_{\text{int}} = 1$  จากรูปจะเห็นว่าผลของสนามไฟฟ้านอกจากจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าสูงเร็วขึ้นแล้วยังช่วยให้อัตราการระเหยความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งอัตราการระเหยมีค่าสูงขึ้นประมาณ 1.66 เท่า

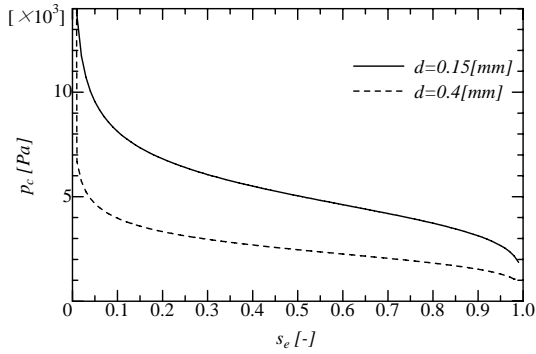


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วมที่เวลาต่างๆ (ก) อุณหภูมิที่ผิว (ข) ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากแพคเบต

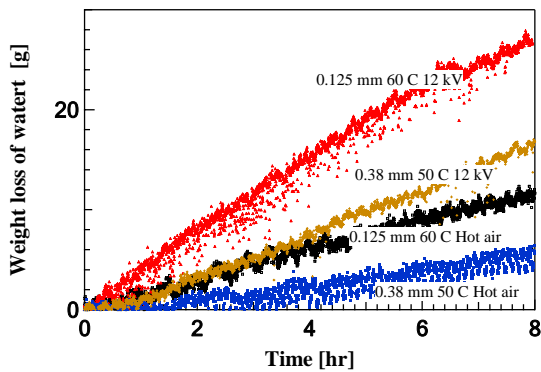
นอกจากนี้รูปที่ 11 ยังเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำในแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดหนึ่งๆ เมื่อการอบแห้งผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง แพคเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าหรือแพคเบตที่มีความพรุนมากกว่าจะมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำกว่าลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่น้ำระเหยตัวมากขึ้นความดันไอน้ำในวัสดุพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลของแรงดันแคปิลลารี (Capillary pressure,  $p_c = p_g - p_l$  [6]), มีผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำให้เคลื่อนที่ไปที่ผิวของวัสดุพรุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 12 [6] ดังนั้นถ้าหากวัสดุที่มีความพรุนมาก อัตราน้ำที่ระเหยหรืออัตราน้ำหนักน้ำที่สูญเสียจากแพคเบตจะมีค่ามากกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า และอิทธิพลของแรงดันแคปิลลารีจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความอึดตัวของวัสดุพรุนมีค่าน้อยลง

#### 4.4 การเปรียบเทียบด้านพลังงาน

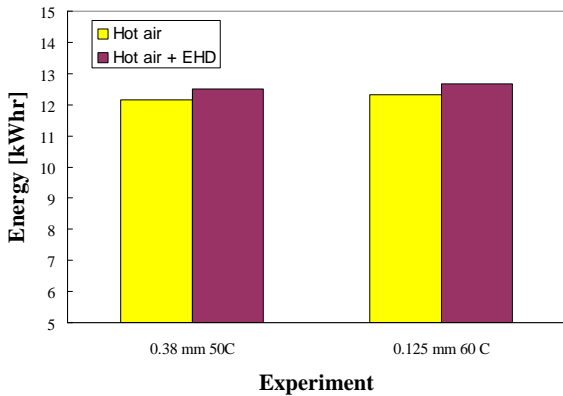
รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากแพคเบตที่ใส่ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. ที่  $s_{\text{int}} = 0.8$  ระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว (50 และ 60 °ซ) และโดยใช้สนามไฟฟ้าร่วม ( $V = 12 \text{ kV}$ ) จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่า สำหรับแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. การใช้สนามไฟฟ้าร่วมทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นประมาณ 2.3 และ 2.9 เท่า ตามลำดับ ในแง่ของพลังงานพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการระเหยของน้ำออกจากแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. มีค่า 0.024 และ 0.032 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัม ตามลำดับ หรือประมาณ 3% ของพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างลมร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 14) ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแคปิลลารี ( $p_c$ ) และความค่าอิมิตัวประสิทธิผลของน้ำ (Effective water saturation,  $s_e$ ) ในแพคเบต [6]



รูปที่ 13 เปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำในแพคเบตที่ระเหยไปในแต่ละเวลา ระหว่างใช้ไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 14 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากิทธิพลของลมร้อนทั้งแบบที่ร่วมและไม่ร่วมกับสนามไฟฟ้า รวมถึงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบตได้ถูกศึกษาโดยการทดลองผ่านการวัดอุณหภูมิที่ระดับต่างกัน 3 ตำแหน่งภายในแพคเบตและผ่าน

การวัดปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ลูกแก้วที่ใส่ในแพคเบตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม.

จากการทดลองพบว่าด้วยอิทธิพลของโคโรนาวินด์ซึ่งถูกสร้างผ่านจากเส้นลวดที่วางในตำแหน่งตั้งฉากและขวางกับทิศทางการไหลของลม สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแพคเบตมีค่าสูงขึ้นและอัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบตเร็วกว่าในกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้าประมาณ 1.66 เท่า จากการทดลองยังพบว่าความชื้นของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนภายในแพคเบตมีค่าสูงขึ้นด้วย

โดยการเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดของลูกแก้วที่บรรจุภายในแพคเบตพบว่า เนื่องด้วยแรงดันแคปิลลารีที่สูงกว่าของวัสดุที่มีความพรุนมากกว่าทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า

จากการทดลองที่ความอิมิตัวเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 การใช้พลังงานสำหรับสร้างโคโรนาวินด์เพิ่มขึ้นประมาณ 3% ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นประมาณ 2 – 3 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมสำหรับการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนจะช่วยประหยัดพลังงาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ กองทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ (ส.ก.ว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินลงทุนสำหรับการทำวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Chen, Y.H., and Barthakur, N.N., 1991, Potato slab dehydration by air ions from corona discharge. Int. J. Biometeorology, Vol 35, pp. 67-70.
- [3] Hashinaga, F., Bajgai, T.R., Isobe, S., and Barthakur, N.N., 1999, EHD drying of apple slices. Drying Technology, Vol. 17(3), pp. 479-495.
- [4] Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002, EHD-Enhanced drying with wire electrode. Drying Technology Vol 20(7), pp. 1393-1405.
- [5] Alem-Rajabi, A., and Lai, F.C., 1995, EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads. Drying Technology, Vol. 23, pp. 597-609.
- [6] Ratanadecho, P., Aoki, K, and Akahori, M., 2001, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material. Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 28(5), pp. 605-61