

## ผลของการเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า Effects of Electrode Arrangement on the combined Hot-Air Flow and Electric Field Drying

รัชพงศ์ กรวัชรินทร์ , ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ 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

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งในวัสดุพูน โดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ จำนวนขั้วอิเล็กโทรด ( $n = 1, 3,$  และ  $4$  ขั้ว) และระยะระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ ( $L = 2 - 8$  cm) แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพื่อทำให้เกิดโคโรนาวินด์ (Corona wind) ถูกใช้ที่  $15$  kV อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนถูกควบคุมที่  $60^{\circ}\text{C}$  และ  $0.35$  m/s ตามลำดับ วัสดุพูนที่ใช้ประกอบด้วย น้ำ อากาศ และลูกแก้วซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.125$  mm ผลจากการทดลองพบว่า การเพิ่มจำนวนขั้ว  $n$  มีผลต่อลักษณะของการหมุนวนกระแสร้อนอย่างมาก และยังส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงมากขึ้น เมื่อระยะ  $L$  มีค่าน้อยลงลมพูนวนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงแต่มีความแรงของการหมุนที่มากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนมีค่าสูงขึ้นมาก

**คำหลัก:** อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง วัสดุพูน การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

### Abstract

This research experimentally investigates the effects of electrode arrangement on the efficiency of a drying process utilizing hot-air flow and electric fields. Parameters are the number of electrodes ( $n = 1, 3,$  and  $4$  poles), and the distance between electrode and ground wires ( $L = 2 - 8$  cm). High electrical voltage used for generating Corona wind is employed at  $15$  kV. Temperature and bulk mean velocity of hot-air flow are controlled at  $60^{\circ}\text{C}$  and  $0.35$  m/s, respectively. A porous medium composes of water, air and glass beads of  $0.125$  mm in diameter. The results show that increasing the number of electrodes much affects the characteristics of circulating hot-air streams. Moreover, it leads the drying rate to be increased substantially. When distance  $L$  becomes smaller, size of Corona wind is smaller but circulating flow is stronger. Consequently, the rates of heat and mass transfer in the porous medium are considerably enhanced.

**Keywords:** Electrohydrodynamics, Drying process, Porous medium, Heat and mass transfer enhancement.

## 1. บทนำ

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อประเทศอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ประเทศไทย วิธีการอบแห้งที่นิยมทำกันมากที่สุด คือ การใช้ลมร้อน แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปมีประสิทธิภาพยังไม่ดีพอ ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) ได้ถูกนำมาศึกษา วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยนักวิจัยหลายกลุ่ม อาทิ Lai และ Lai [1-2] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า โดยจำลองกระบวนการอบแห้ง และใช้แพคเบด (Packed Bed) ซึ่งเป็นภาชนะบรรจุเม็ดทรายแก้ว แทนวัสดุที่ต้องการอบแห้ง การสร้างสนามไฟฟ้าทำได้โดยนำลวดและแผ่นทองแดงวางไว้ที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ แล้วจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ลวดทองแดง จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ก็ต่อเมื่อสนามไฟฟ้า เกิดขึ้นในแนวขวางกับทิศทางการไหลของอากาศ (Cross - flow direction) ซึ่งความสามารถของการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้งนั้นแปรผันกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งการเกิดกระแสลมหมุนวนหรือโคโรनावินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Chaktranond และคณะ [4-7] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยใช้แท่งอิเล็กโทรด 4 เส้นติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและลวดกราวด์ 1 แท่งติดตั้งในแนวขวางกับอุโมงค์ลม ผลการทดลองพบว่า ลมหมุนวนของโคโรनावินด์ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างแพคเบดดีขึ้น และขนาดของสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากลมที่หมุนวนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพา

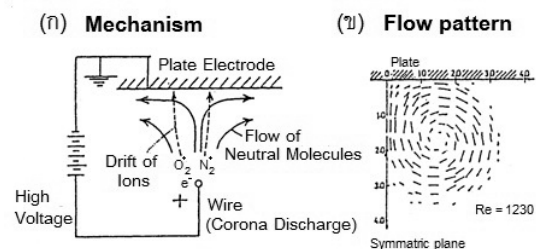
ความร้อน (Convective heat transfer coefficient) ระหว่างลมร้อนและผิวหน้าของแพคเบด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษา อิทธิพลของระยะห่างระหว่างลวดอิเล็กโทรดและกราวด์ และจำนวนอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบด

## 2. หลักการเพิ่มการถ่ายเทมวลด้วยโคโรनावินด์

กลไกการเกิดโคโรनावินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงปล่อยจากอิเล็กโทรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆ จะถูกไอออไนซ์ (Ionized) และถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศส่วนนี้เคลื่อนที่ จะเหนี่ยวนำอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ให้เคลื่อนที่ไปด้วย ดังรูปที่ 1 ผลของการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ของกระแสลมหมุนวนหรือที่เรียกว่าโคโรनावินด์ (Corona wind)

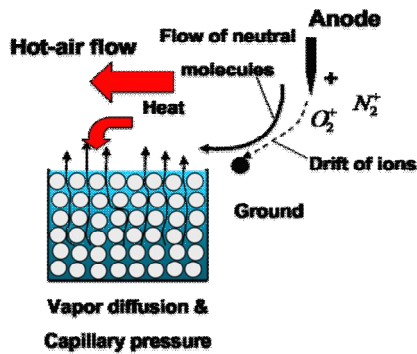
แนวคิดของการปรากฏการณ์โคโรनावินด์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพอรุน แสดงในรูปที่ 2 โดยลมร้อนจะไหลผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้กระแสอากาศหมุนวน ซึ่งเพิ่มพาความร้อนระหว่างลมร้อนและผิวหน้าของแพคเบดมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดียิ่งขึ้น [7]



รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรनावินด์ [3]

(ก) การเคลื่อนที่ของอากาศที่ถูกชาร์จ

(ข) กระแสลมหมุนวน



รูปที่ 2 กลไกการถ่ายมวลและความร้อนในการอบแห้งโดยใช้โคโรนาวินด์ [7]

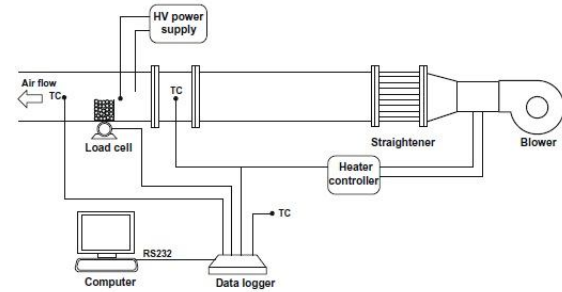
### 3. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

จากรูปที่ 3 ลมร้อนไหลผ่านอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 15 cm X 15 cm และถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C ก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบ

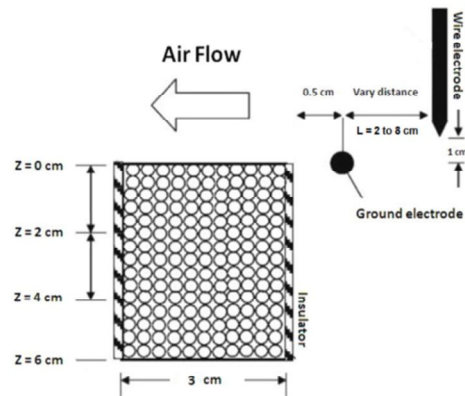
กล่องแพคเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 3 cm (กว้าง) X 12 cm (ยาว) X 6 cm (สูง) ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) โดยบรรจุน้ำและเม็ดทรายแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (Initial saturation) ของแพคเกจมีค่า  $s = 0.5$  และอุณหภูมิภายในแพคเกจถูกวัดค่าด้วยสายไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to  $\pm 0.5$  °C) จำนวน 4 เส้น ซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ระดับความลึก  $z = 0, 2, 4$  และ 6 cm (วัดจากผิวด้านบนลงไปแพคเกจ) ดังแสดงในรูปที่ 4 หน้าหลักของแพคเกจที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกวัดค่าโดยโหลดเซลล์ (Load cell)

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองได้ถูกทดสอบว่าไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1

พารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดสอบ [7]



รูปที่ 4 ขนาดของแพคเกจและตำแหน่งของอิเล็กโทรด

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	$E$	0, 15 kV
Drying time	$t$	24 hr

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์

พารามิเตอร์	Symbol (unit)
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	$d$ (mm)
ขนาดของสนามไฟฟ้า	$E$ (kV)
จำนวนหัวอิเล็กโทรด	$n$ (หัว)
ระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรดกับกราวด์	$L$ (cm)
ความลึกวัดจากผิวของแพคเกจ	$z$ (cm)

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองทุกกรณี กำหนดให้ค่าความอึดตัวเริ่มต้นของวัสดุพรมมีค่า  $s_{int} = 0.5$  เวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง แรงดันสนามไฟฟ้า ( $E$ ) และความเร็วลม ( $U_p$ ) มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

##### 4.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอีเล็กโตรดกับกราวด์

ระยะห่างระหว่างขั้วอีเล็กโตรดกับกราวด์ถูกทดลองที่  $L = 2, 4, 6$  และ  $8$  cm และกำหนดให้จำนวนขั้วอีเล็กโตรด  $n = 4$  รูปที่ 6 และ 7 เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอีเล็กโตรดและกราวด์ยิ่งน้อยลงแล้ว อุณหภูมิภายในแพคเกจมีค่าสูงยิ่งขึ้นโดยเฉพาะบริเวณผิวของแพคเกจของกรณี  $L = 2$  cm จะมีค่ามากกว่ากรณีอื่นๆ ดังนั้นกรณีนี้ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ระยะห่างระหว่างขั้วอีเล็กโตรดกับกราวด์ที่ลดลง มีผลต่ออัตราการระเหยของความชื้นจากแพคเกจ สามารถสังเกตได้จากอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ดังแสดงในตารางที่ 3

โดยการเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งของแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้าร่วม พบว่า ในกรณี  $L = 2$  และ  $4$  cm อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 2 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่กรณี  $L = 6$  และ  $8$  cm มีอัตราการอบแห้งดีขึ้นพอๆกัน ประมาณ 1.5 เท่า

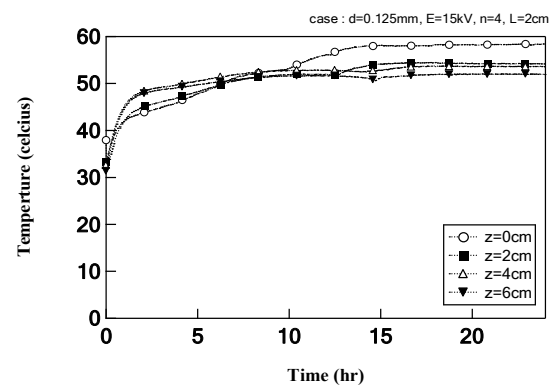
##### 4.2 อิทธิพลของจำนวนขั้วอีเล็กโตรด

ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนขั้วอีเล็กโตรดที่มีผลต่อการระเหยของมวลน้ำออกจากแพคเกจ โดย  $L = 2$  cm และ  $n = 1, 3$  และ  $4$

เมื่อสังเกตกราฟอุณหภูมิที่ผิว ( $z = 0$  cm) ของแพคเกจ ดังรูปที่ 9 และ 10 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ในกรณี  $n = 4$  นั้นมีอุณหภูมิที่สูงแตกต่างจากกรณีอื่นๆ กล่าวได้ว่า ในการใช้ขั้วอีเล็กโตรดยิ่งมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวหน้าของแพคเกจ

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าในการอบแห้งแบบใช้สนามไฟฟ้าร่วม หากจำนวนอีเล็กโตรดยิ่งมากยิ่งขึ้นสามารถระเหยมวลน้ำออกจากแพคเกจได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากผลอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4

การใช้อีเล็กโตรด 4 ขั้ว ( $n = 4$ ) ทำให้อัตราการอบแห้งสูงมากกว่าเดิมถึง 2 เท่าจากการอบแห้งปกติ (ไม่ใช้สนามไฟฟ้า) แต่เมื่อลดจำนวนอีเล็กโตรดลงเหลือ  $n = 3$  และ 1 ขั้วแล้ว อัตราการอบแห้งดีขึ้นเพียง 1.3 เท่า และ 1.2 เท่า ตามลำดับ เท่านั้น



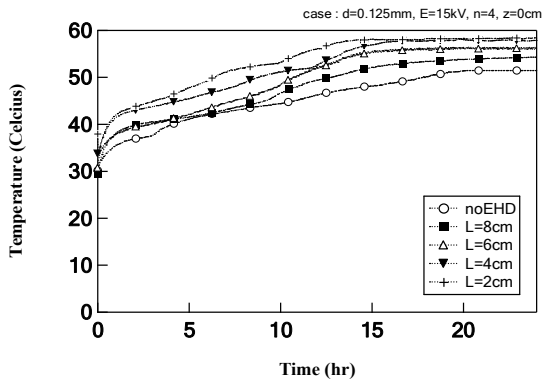
รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในแพคเกจที่ระดับความลึก ( $z$ ) ต่างๆ ของกรณี  $n = 4$  และ  $L = 2$  cm

ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ในกรณีเปลี่ยนแปลงระยะ  $L$  (cm)

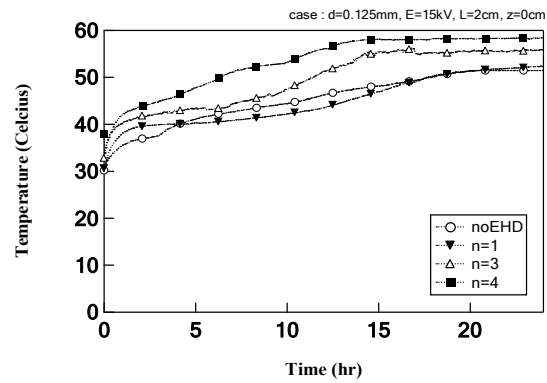
กรณีทดลอง	อัตราการอบแห้ง (g/hr)
ไม่ใช้สนามไฟฟ้า	2.68
$L = 8$ cm	4.00
$L = 6$ cm	4.15
$L = 4$ cm	4.32
$L = 2$ cm	5.36

ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ในกรณีเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วอีเล็กโตรด ( $n$ )

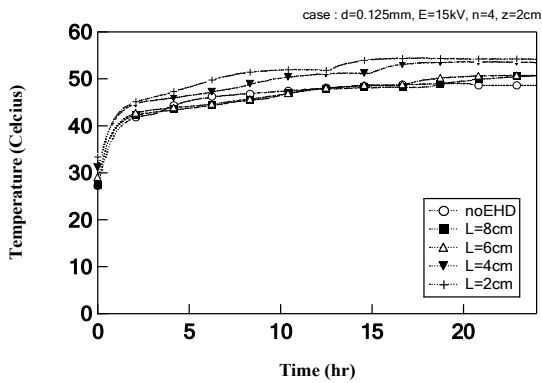
กรณีทดลอง	อัตราการอบแห้ง (g/hr)
ไม่ใช้สนามไฟฟ้า	2.68
$n = 1$	3.23
$n = 3$	3.62
$n = 4$	5.36



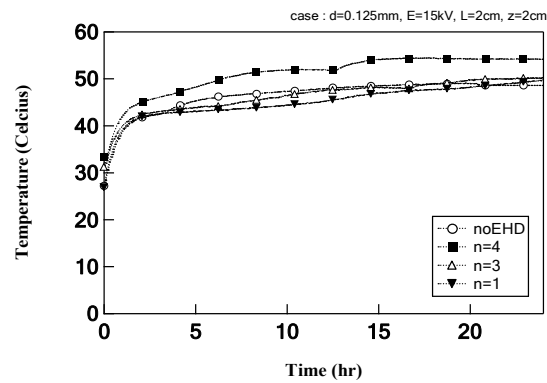
รูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวแพคเบด ( $z = 0$  cm) เมื่อ  $n = 4$  และ  $L = 2, 4, 6$  และ  $8$  cm



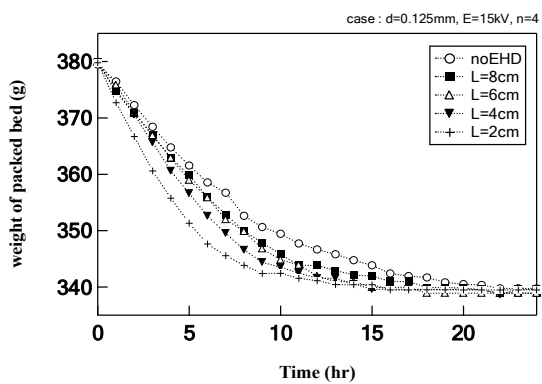
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวแพคเบด ( $z = 0$  cm) เมื่อ  $L = 2$  cm และ  $n = 1, 3$  และ  $4$



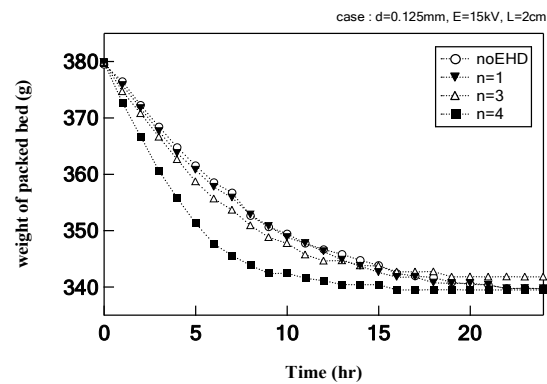
รูปที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแพคเบดที่ความลึก  $z = 2$  cm เมื่อ  $n = 4$  และ  $L = 2, 4, 6$  และ  $8$  cm



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแพคเบดที่ความลึก  $z = 2$  cm เมื่อ  $L = 2$  cm และ  $n = 1, 3$  และ  $4$



รูปที่ 8 น้ำหนักของแพคเบดที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดย  $n = 4$  และ  $L = 2, 4, 6$  และ  $8$  cm



รูปที่ 11 น้ำหนักของแพคเบดที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดย  $L = 2$  cm และ  $n = 1, 3$  และ  $4$

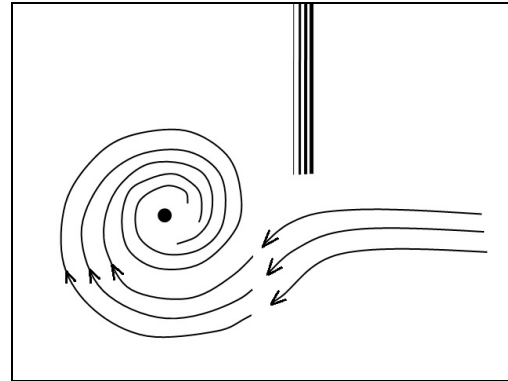




รูปที่ 12 โครनावินด์ ที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ

(ก)  $L = 2$  cm    (ข)  $L = 4$  cm

(ค)  $L = 6$  cm    (ง)  $L = 8$  cm



รูปที่ 13 ไตอะแกรมการเคลื่อนที่ของโครनावินด์

#### 4.3 การเปรียบเทียบลักษณะลมหมุน

เพื่ออธิบายลักษณะลมหมุนวนที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ภาพการหมุนของลมร้อนภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคควันรูป (Flow visualization with incense-smoke technique)

จากการสังเกตจากภาพต่อเนื่องที่ถ่ายจากวิดีโอ แสดงในรูปที่ 12 โดยวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ตัวของกลุ่มควันรูปรอบๆ กราฟต์จะเห็นว่า เมื่อระยะห่างระหว่างลวดอีเล็กโตรดและกราฟต์น้อย เช่นที่  $L = 2$  cm ลมหมุนวนจะมีขนาดเล็ก แต่มีความเร็วของการหมุนวนสูง หากเพิ่มระยะห่าง  $L$  มากขึ้น ลมหมุนวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความแรงลมหมุนมีขนาดลดลง และการใช้อีเล็กโตรด 1 เส้น จะให้ความแรงของลมหมุนที่น้อยกว่าการใช้อีเล็กโตรด 3 และ 4 เส้น

ทั้งนี้เนื่องจากแรงอีเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์แปรผันตามเกรเดียนของสนามไฟฟ้าและขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้า ( $F_{EHD} \propto \nabla V$  และ  $E$ ) ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างอีเล็กโตรดและกราฟต์มีค่าน้อย ทำให้แรงอีเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดความแรงของชั้นการไหลแบบเฉือน (Shear flow layer) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศที่ถูกไอโอไนซ์กับอากาศที่เป็นกลางมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้ความแรงของการหมุนมีค่าสูงขึ้น ด้วยผลดังกล่าวนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างแพคเบตและลมร้อนมีค่ามากขึ้น

## 5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปแบบของการจัดวางอิเล็กโทรดและจำนวนอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนของวัสดุพูนในกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า และสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ในกรณีที่ใช้จำนวนขั้วอิเล็กโทรดเท่ากัน ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับกราวด์นั้นมีผลต่ออัตราการระเหยของมวลน้ำ ยิ่งระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและกราวด์ยิ่งใกล้กันมากเท่าไรก็จะยิ่งเพิ่มอัตราการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น

(2) กรณีระยะของขั้วอิเล็กโทรดและกราวด์เท่ากัน จำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้มีผลต่ออัตราการระเหยของมวลน้ำเป็นอย่างมาก ยิ่งจำนวนอิเล็กโทรดมากยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้า การใช้ขั้วอิเล็กโทรด 4 ขั้ว มีอัตราการอบแห้งดีขึ้น 2 เท่า ในขณะที่ การใช้ขั้วอิเล็กโทรด 3 หรือ 1 ขั้ว มีอัตราการอบแห้งที่ดีขึ้นประมาณ 1.3 เท่า

(3) อิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าของแพคเกจสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิภายในแพคเกจมีค่าสูงเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับกราวด์ที่ยิ่งเข้าใกล้กันมาก ทำให้โคโรนาวินด์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กแต่หมุนแรงขึ้น และเมื่อใช้จำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่มากขึ้น ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาวินด์ที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่แพคเกจได้ดียิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002. EHD enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology*, Vol.20(7), pp. 1393-1405.
- [2] Lai, F.C., and Sharma, R.K., 2005. EHD enhanced drying with multiple needle electrodes. *J. Electrostatics* 63, pp. 223-237.
- [3] Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K., 1996. Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. *Ann Reviews of Heat Transfer*, Vol.7, pp. 193-244.
- [4] Chaktranond, C., Ratanadecho, P., Smathiwat, P., Amornvareesaman, P., and Pradipasena, T., 2007. Enhancement of Mass and Heat Transfer in the Unsaturated Double-layer Packed-bed with Electric fields, *22<sup>nd</sup> National Mechanical Engineering Conference* 15-17 October 2008, Thammasat University, Pathumtani, Thailand, No.TSF-044, PP.424-429.
- [5] ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2552). อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน, *การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8) วันที่ 12-13 มีนาคม 2552, โรงแรมโพธิ์วิลล รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดเชียงราย*
- [6] Chaktranond, C., and Rattanadecho, P. Heat and Mass Transfer Enhancement in Unsaturated Porous Packed beds subjected to Electrohydrodynamics (EHD). *The 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC2009)* October 19-21, 2009, Bangkok, Thailand.
- [7] 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* 34, pp. 1049-1056.