

ผลของการเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า

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

รัชพงศ์ กรวิชรินทร์ ไชยณรงค์ จักรธรานนท์* และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งในวัสดุพอร์นโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ จำนวนขั้วอิเล็กโทรด ($n = 1, 3$, และ 4 ขั้ว) และ ระยะระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ ($L = 2 - 8$ cm) แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพื่อทำให้เกิดโคโรนาวินด์ (Corona wind) ถูกใช้ที่ 15 kV อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนถูกควบคุมที่ 60°C และ 0.35 m/s ตามลำดับ วัสดุพอร์นที่ใช้ประกอบด้วย น้ำ อากาศ และลูกแก้วซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm ผลจากการทดลองพบว่า การเพิ่มจำนวนขั้ว n มีผลต่อลักษณะของการหมุนวนกระแสลมอย่างมาก และยังส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงมากขึ้น เมื่อระยะ L มีค่าน้อยลงลมหมุนวนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงแต่มีความแรงของการหมุนที่มากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพอร์นมีค่าสูงขึ้นมาก

คำหลัก: อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง วัสดุพอร์น 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°C and 0.35 m/s, respectively. A porous medium is composed of water, air and glass beads of 0.125 mm in diameter. The results show that an increase of the number of electrodes affects the characteristics of circulating hot-air streams greatly. Moreover, it increases the drying rate substantially. When distance L becomes smaller, the size of Corona wind is smaller but the 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

การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีความสำคัญอย่างมากต่อประเทศอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ประเทศไทย วิธีการอบแห้งที่นิยมทำกันมากที่สุด คือ การใช้ลมร้อน แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปมีประสิทธิภาพยังไม่ดีพอ ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) ได้ถูกนำมาศึกษา วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม อาทิ Lai และ Lai [1-2] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า โดยจำลองกระบวนการอบแห้ง และใช้แพ็คเกจ (Packed Bed) ซึ่งเป็นภาชนะบรรจุเม็ดทรายแก้ว แทนวัสดุที่ต้องการอบแห้ง การสร้าง

สนามไฟฟ้าทำได้โดยนำลวดและแผ่นทองแดงวางไว้ที่ด้านบนและด้านล่างของแพ็คเกจตามลำดับ แล้วจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ลวดทองแดง จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ก็ต่อเมื่อสนามไฟฟ้า เกิดขึ้นในแนวขวางกับทิศทาง การไหลของอากาศ (Cross - flow direction) ซึ่งความสามารถของการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้งนั้นแปรผันกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งการเกิดกระแสลมหมุนวนหรือโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Chakranond และคณะ [4-7] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 4 เส้นติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและลวดกราวด์ 1 แท่งติดตั้งในแนวขวางกับอุโมงค์ลม ผลการทดลองพบว่า ลมหมุนวนของโคโรนาวินด์ ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างแพ็คเกจดีขึ้น และขนาดของสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่าง

*ผู้ติดต่อ: E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th โทรศัพท์: 02-5643001-9 ต่อ 3144, โทรสาร: ต่อ 3049

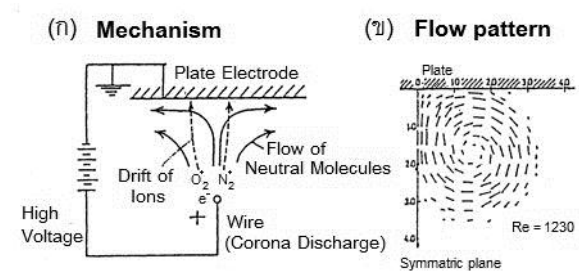
มาก ทั้งนี้เนื่องจากลมที่หมุนวนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient) ระหว่างลมร้อนและผิวหน้าของแพคเกจ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษา อิทธิพลของระยะห่างระหว่างลวดอิเล็กโทรดและกราวด์ และจำนวนอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเกจ

2. หลักการเพิ่มการถ่ายเทมวลด้วยโคโรนาวินด์

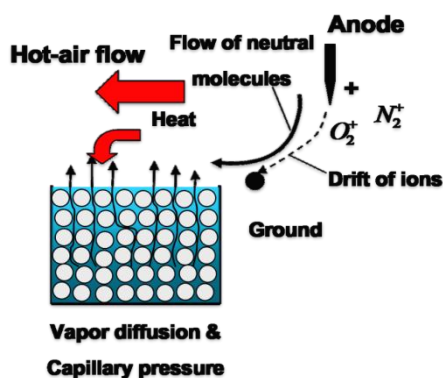
กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงปล่อยจากอิเล็กโทรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆ จะถูกไอออไนซ์ (Ionized) และถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศส่วนนี้เคลื่อนที่ จะเหนี่ยวนำอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ให้เคลื่อนที่ไปด้วย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

แนวคิดของการปรากฏการณ์โคโรนาวินด์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน แสดงในรูปที่ 2 โดยลมร้อนจะไหลผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้กระแสอากาศหมุนวน ซึ่งเพิ่มพาความร้อนระหว่างลมร้อนและผิวหน้าของแพคเกจมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีขึ้น [7]



รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรนาวินด์ [3]

(ก) การเคลื่อนที่ของอากาศที่ถูกชาร์จ (ข) กระแสลมหมุนวน



รูปที่ 2 กลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้งโดยใช้โคโรนาวินด์ [7]

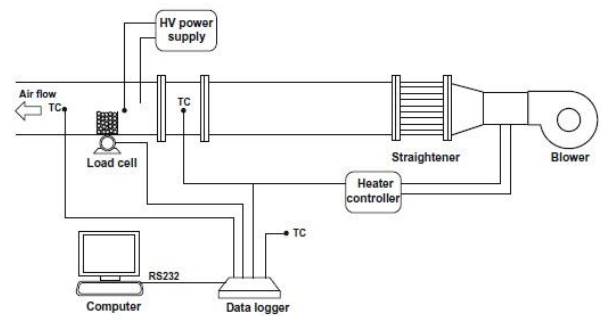
3. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

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

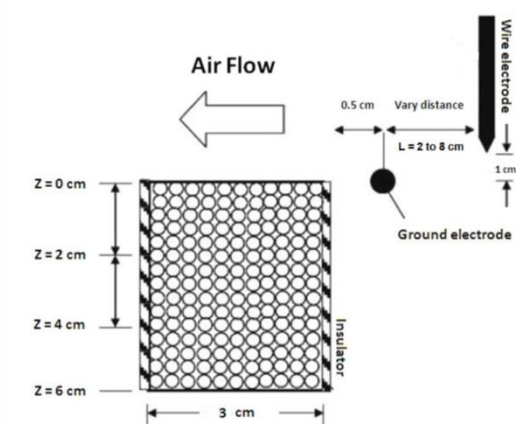
กล่องแพคเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 3 cm (กว้าง) X 12 cm (ยาว) X 6 cm (สูง) ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) โดยบรรจุน้ำและเมล็ดทรายแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (Initial saturation) ของแพคเกจมีค่า $s = 0.5$ และอุณหภูมิภายในแพคเกจวัดค่าด้วยสายไฟเบอร์ออปติก (Luxtron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

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองได้ถูกทดสอบว่าไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สปาร์กของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1

พารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดสอบ [7]



รูปที่ 4 ขนาดของแพคเกจและตำแหน่งของอิเล็กโทรด

ตารางที่ 1 สภาพทดสอบ

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)
จำนวนขั้วอิเล็กโทรด	n (ขั้ว)
ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับกรวด	L (cm)
ความลึกวัดจากผิวของแพคเกจ	z (cm)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

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

4.1 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกรวด

ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับกรวดที่ทดลองที่ $L = 2, 4, 6$ และ 8 cm และกำหนดให้จำนวนขั้วอิเล็กโทรด $n = 4$ รูปที่ 6 และ 7 เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและกรวดยิ่งน้อยลงแล้ว อุณหภูมิภายในแพคเกจมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผิวของแพคเกจของกรณี $L = 2$ cm จะมีค่ามากกว่ากรณีอื่นๆ ดังนั้นกรณีนี้ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับกรวดที่ลดลง มีผลต่ออัตราการระเหยของความชื้นจากแพคเกจสามารถสังเกตได้จากอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (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

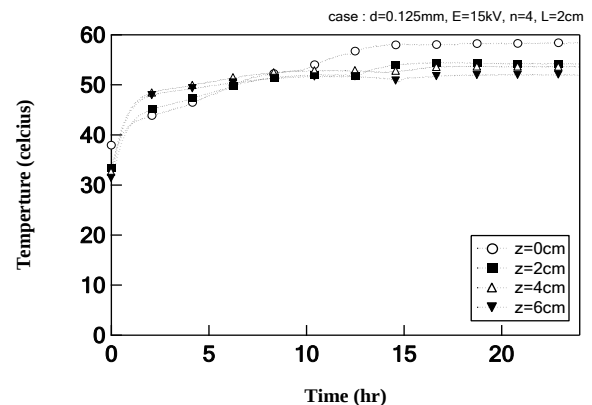
4.2 อิทธิพลของจำนวนขั้วอิเล็กโทรด

ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการระเหยของมวลน้ำออกจากแพคเกจ 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 ในการใช้ขั้วอิเล็กโทรดยิ่งมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณผิวหน้าของแพคเกจ

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าในการอบแห้งแบบใช้สนามไฟฟ้าร่วม หากจำนวนอิเล็กโทรดยิ่งมากยังสามารถระเหยมวลน้ำออกจากแพคเกจได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากผลอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4

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



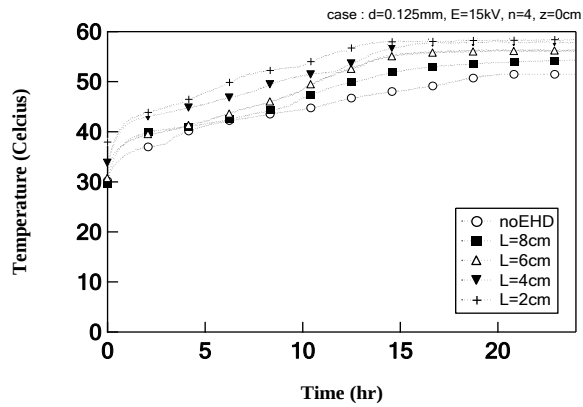
รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในแพคเกจที่ระดับความลึก (z) ต่างๆ ของกรณี $n = 4$ และ $L = 2$ cm

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

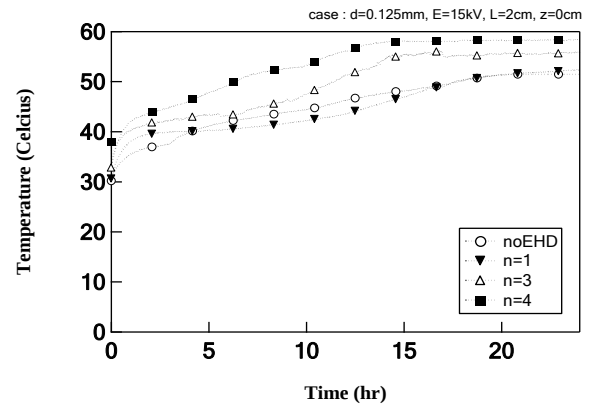
กรณีทดลอง	อัตราการอบแห้ง (g/hr)
ไม่ใช้สนามไฟฟ้า	2.68
$L = 8$ cm	4.00
$L = 6$ cm	4.15
$L = 4$ cm	4.32
$L = 2$ cm	5.36

ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ในกรณีเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วอิเล็กโทรด (n)

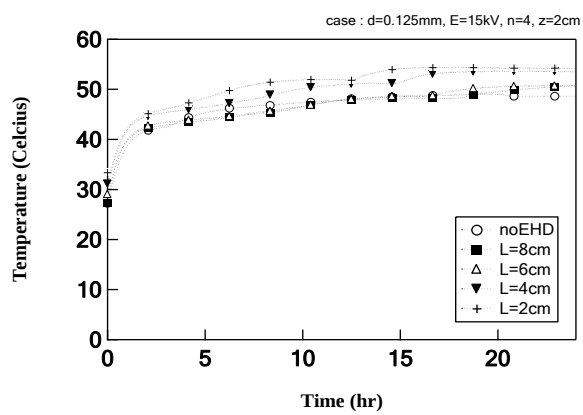
กรณีทดลอง	อัตราการอบแห้ง (g/hr)
ไม่ใช้สนามไฟฟ้า	2.68
$n = 1$	3.23
$n = 3$	3.62
$n = 4$	5.36



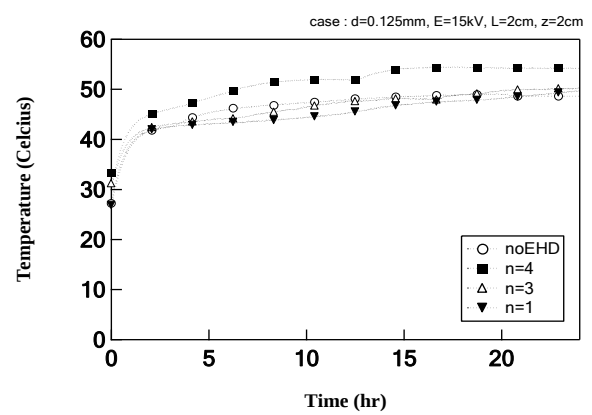
รูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวแพคเบด
($z = 0$ cm) เมื่อ $n = 4$ และ $L = 2, 4, 6$ และ 8 cm



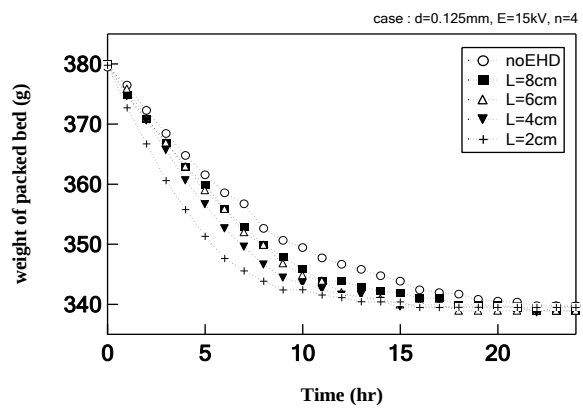
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวแพคเบด
($z = 0$ cm) เมื่อ $L = 2$ cm และ $n = 1, 3$ และ 4



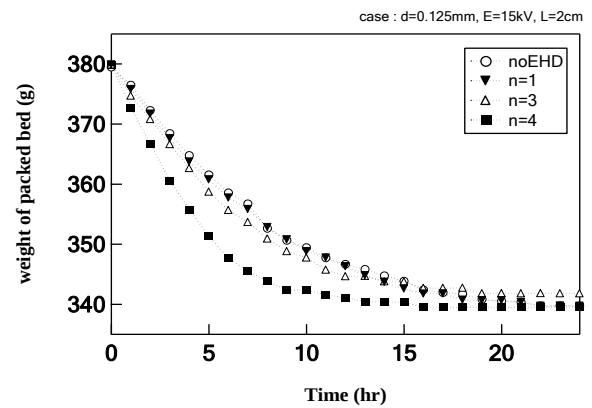
รูปที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแพคเบดที่ความลึก $z = 2$ cm เมื่อ $n = 4$ และ $L = 2, 4, 6$ และ 8 cm



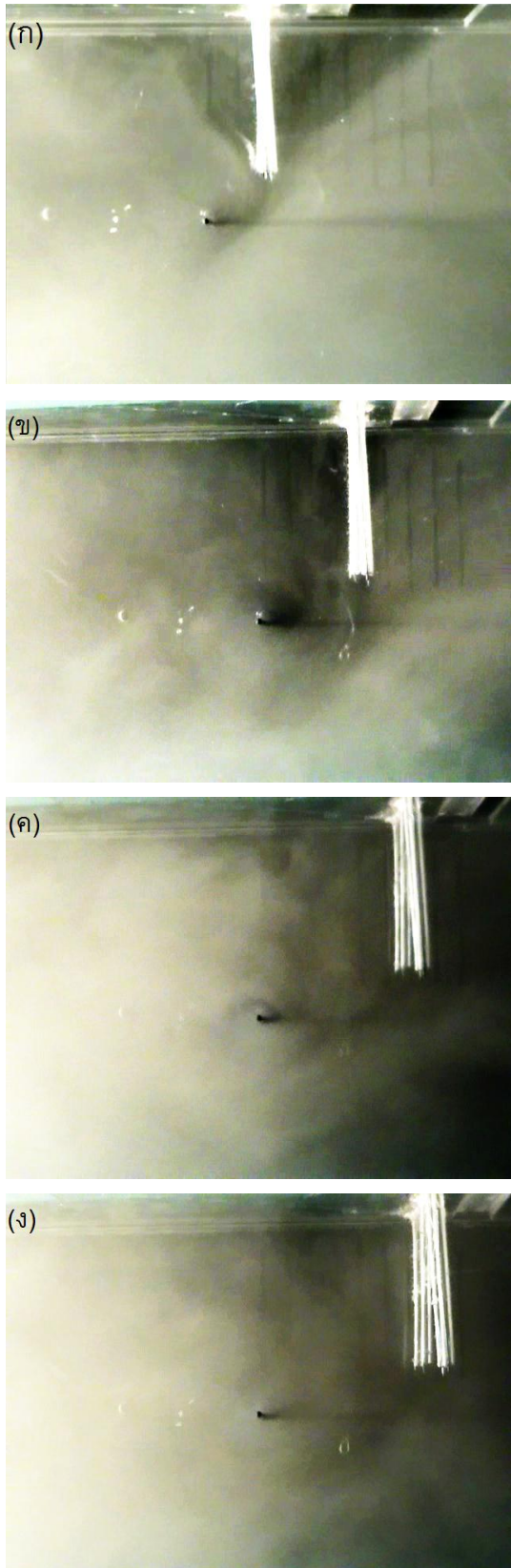
รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแพคเบดที่ความลึก $z = 2$ cm เมื่อ $L = 2$ cm และ $n = 1, 3$ และ 4



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



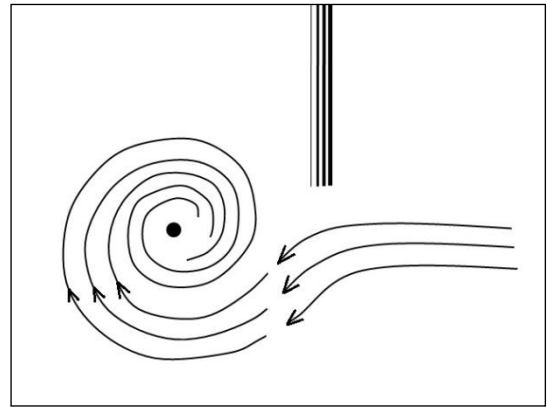
รูปที่ 12 โครนาวิคส์ ที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ

(ก) $L = 2$ cm

(ข) $L = 4$ cm

(ค) $L = 6$ cm

(ง) $L = 8$ cm



รูปที่ 13 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของโครนาวิคส์

4.3 การเปรียบเทียบลักษณะลมหมุน

เพื่ออธิบายลักษณะลมหมุนวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ภาพการหมุนของลมร้อนภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคควันรูป (Flow visualization with incense-smoke technique)

จากการสังเกตจากภาพต่อเนื่องที่ถ่ายจากวิดีโอ ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนตัวของกลุ่มควันรูปรอบๆกราวด์ จะเห็นว่า เมื่อระยะห่างระหว่างลวดอิเล็กโตรดและกราวด์น้อย เช่นที่ $L = 2$ cm ลมหมุนวนจะมีขนาดเล็ก แต่มีความเร็วของการหมุนวนสูง หากเพิ่มระยะห่าง L มากขึ้น ลมหมุนวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความแรงลมหมุนมีขนาดลดลง และการใช้อิเล็กโตรด 1 เส้น จะให้ความแรงของลมหมุนที่น้อยกว่าการใช้อิเล็กโตรด 3 และ 4 เส้น

ทั้งนี้เนื่องจากแรงอิเล็กโตรโอสแตติกไดนามิกส์แปรผันตามเกรเดียนต์ของสนามไฟฟ้าและขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้า ($\vec{F}_{EHD} \propto \nabla V$ และ $\vec{E}$) ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและกราวด์มีค่าน้อย ทำให้แรงอิเล็กโตรโอสแตติกมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดความแรงของชั้นการไหลแบบเฉือน (Shear flow layer) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเร็วระหว่างอากาศที่ถูกไอโอไนซ์กับอากาศที่เป็นกลางมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้ความแรงของการหมุนมีค่าสูงขึ้น ด้วยผลดังกล่าวนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างแพคเกจและลมร้อนมีค่ามากขึ้น

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการจัดวางอิเล็กโตรดและจำนวนอิเล็กโตรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนของวัสดุพูนในกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า และสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ในกรณีที่ใช้จำนวนขั้วอิเล็กโตรดเท่ากัน ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับกราวด์นั้นมีผลต่ออัตราการระเหยของมวลน้ำ ยิ่งระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและกราวด์ยิ่งใกล้กันมากเท่าไรก็จะยิ่งเพิ่มอัตราการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น

(2) กรณีระยะของขั้วอิเล็กโตรดและกราวด์เท่ากัน จำนวนขั้วอิเล็กโตรดที่ใช้มีผลต่ออัตราการระเหยของมวลน้ำเป็นอย่างมาก ยิ่งจำนวนอิเล็กโตรดมากยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้า การใช้อิเล็กโตรด 4 ขั้ว มีอัตราการอบแห้งดีขึ้น 2 เท่า ในขณะที่ การใช้อิเล็กโตรด 3 หรือ 1 ขั้ว มีอัตราการอบแห้งที่ขึ้นประมาณ 1.3 เท่า

(3) อิทธิพลของโคโรनावินต์ทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าของแพคเกจสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิภายในแพคเกจมีค่าสูงเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อระยะระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับกราวด์ที่ยังเข้าใกล้กันมาก ทำให้โคโรनावินต์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กแต่หมุนแรงขึ้น และเมื่อใช้จำนวนขั้วอิเล็กโตรดที่มากขึ้น ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรनावินต์ที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่แพคเกจได้ดีขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ และทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

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