

# อิทธิพลของตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโทรดที่มีผลต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนแบบไม่อิ่มตัวในระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์

## Influence of Positioned Electrode Arrangement on Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media during an Electrohydrodynamic Process

สุวิมล เส็นวงศ์ ณ ออยุธยา  
ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์  
ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช  
ธัชพงศ์ กรวีร์รินทร์  
รวีสุด สุหนทรินคะ  
ปิยฉัตร บรรลุศิลป์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต  
ปทุมธานี 12120  
ประเทศไทย  
โทร 02-5643001-9  
\* อีเมลล์ [suwimon@crma.ac.th](mailto:suwimon@crma.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบดแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated porous packed bed) ที่อยู่ภายใต้กระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ จำนวนแท่งอิเล็กโทรด ( $n = 1, 3$  และ  $4$  เส้น) และระยะห่างของอิเล็กโทรดกับกราวด์ ( $L = 1$  ถึง  $6$  เซนติเมตร) ในการทดลองใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่  $15$  กิโลโวลต์ ความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนถูกทดสอบที่  $0.35$  เมตรต่อวินาที และ  $60$  องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาของการอบแห้ง  $24$  ชั่วโมง ในการศึกษาครั้งนี้วัสดุพรุนที่ใช้ทดลองประกอบด้วยของเม็ดแก้ว (Glass beads) อากาศ และน้ำ จากการทดลองพบว่าตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโทรดมีผลอย่างเด่นชัดต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุพรุน พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ยิ่งน้อยยิ่งทำให้การเพิ่มความชื้นของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น โดยจำนวนของแท่งอิเล็กโทรดยิ่งมากยิ่งทำให้ความชื้นของสนามไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยและเป็นผลทำให้เกิดการหมุนวนที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (Corona wind) มีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

**คำสำคัญ:** อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง วัสดุพรุน การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

### Abstract

This research aims to enhance heat and mass transfer in an unsaturated porous packed bed with electrohydrodynamic drying technique. The effects of hot-air and the number of the wire electrodes ( $n = 1, 3$  and  $4$ ) longitudinal distance between electrodes and ground wires ( $L = 1$  to  $6$  cm) are examined. The packed bed composes of water, air, and glass bead of  $0.125$  mm in diameter. High electrical voltage is applied at  $15$  kV. In addition, temperature and velocity of hot air are controlled at  $60^\circ\text{C}$  and  $0.35$  m/s, respectively. Each experiment has been investigated for  $24$  hours. The results show that the drying kinetics increase has been strongly when is shorter, and  $n$  increases.

**Keywords:** Electrohydrodynamics (EHD), Drying process, Porous media, Heat and mass transfer

### 1. บทนำ

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

งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนต้องการเวลาสำหรับกระบวนการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุน [1-3]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาวิธีการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งดังกล่าวได้จากหลายงานวิจัย [4-7] Lai และ Sharma [8] ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราการ

อบแห้ง โดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยทำการศึกษาผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่อการเกิดโคโรนาวินด์ เมื่อปล่อยลมร้อนผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จากการวางอิเล็กโทรดแถวเดียว (Single electrode) และหลายแถว (Multiple electrodes) ที่วางขวางทิศทางการไหล โคโรนาวินด์ที่ได้จากการปล่อยกระแสจากอิเล็กโทรดจะไล่ความชื้นที่ผิวของเม็ดแก้ว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 และ 6 มิลลิเมตร) ที่มีความอึดตัวเท่ากับ 1 ขนาดสนามไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเร็วลมเท่ากับ 1 และ 2.8 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความแข็งแรงของโคโรนาวินด์ และอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น และอิเล็กโทรดแถวเดียวจะให้ประสิทธิภาพมากกว่าอิเล็กโทรดหลายแถว

Kasayapanand [9] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของอนุกรมของของไหลผ่านกลุ่มท่อ (Tube bank) ภายใต้สนามไฟฟ้า รวมถึงศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) ผลที่ได้พบว่าการใช้สนามไฟฟ้าเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของของไหลมีค่าน้อย และที่ระยะห่างระหว่างผิวท่อและอิเล็กโทรดสั้นๆ

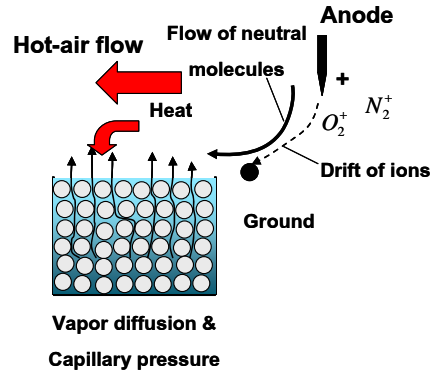
Chaktranond และ Rattanadecho [10] ศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า เพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลมถูกใช้อยู่ในช่วง 0 ถึง 15 กิโลโวลต์ ลูกแก้วที่บรรจุในแพคเกจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มิลลิเมตร อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และ 0.35 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์ที่เกิดในกระแสลมร้อนเหนือแพคเกจทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการเพิ่มขนาดของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้อุณหภูมิภายในแพคเกจสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงชั้นของลูกแก้วในวัสดุพอร์นมีผลต่อกลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพคเกจ โดยแพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงดันคาปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าแพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่

งานนี้ได้ทำวิจัยต่อเนื่องจากงานที่ทำโดย Chaktranond และ Rattanadecho [10] ศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรด โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวนแท่งอิเล็กโทรดตั้งแต่ 1, 3 และ 4 เส้น และระยะห่างของอิเล็กโทรดกับกราวด์ตั้งแต่ 1 ถึง 6 เซนติเมตร โดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงทดสอบที่ 15 กิโลโวลต์

## 2. หลักการการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งโดยใช้โคโรนาวินด์

จากรูปที่ 1 ลมร้อนที่ไหลผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกทำให้เกิดโคโรนาวินด์และเกิดการไหลแบบหมุนวน (Circulating flow) บริเวณเหนือวัสดุพอร์น อิทธิพลของลมร้อนที่หมุนวนจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลจากผิวหน้าและเพิ่มการ

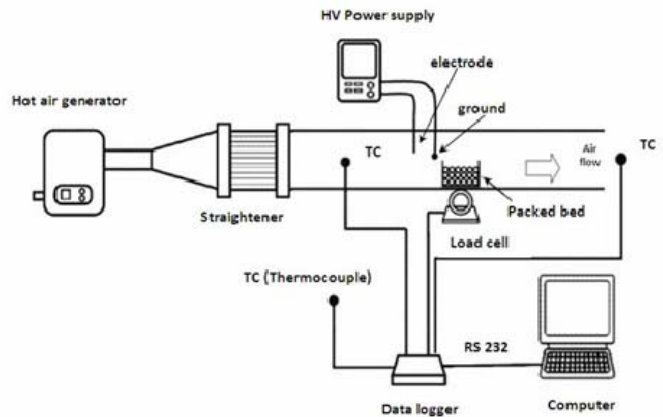
ถ่ายความร้อนจากลมร้อนไปสู่วัสดุพอร์น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น [10]



รูปที่ 1 แสดงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลด้วยโคโรนาวินด์ [10]

## 3. วิธีการทดลองและอุปกรณ์

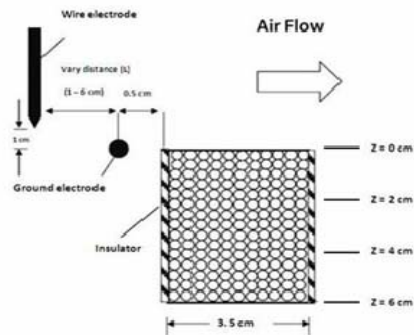
แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 อากาศร้อนไหลผ่านอุโมงค์ลมที่มีหน้าตัดทดสอบ  $15 \times 15$  ตารางเซนติเมตร กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดผ่านอากาศไปยังกราวด์ ขั้วอิเล็กโทรดและกราวด์ซึ่งทำจากลวดทองแดงถูกที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากและขวางกับทิศทางการไหลของอากาศร้อนตามลำดับ



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดสอบ

อุณหภูมิของอากาศถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส หน้าหนักของความชื้นภายในแพคเกจที่เปลี่ยนไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซลล์ (Load cell) กล้องแพคเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) หนา 0.8 มิลลิเมตร ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเกจมี

ขนาด  $3.2 \times 11.8 \times 6$  ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบต ลวดไฟเบอร์ออปติก (LUXTRON Fluoptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส) จำนวน 4 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 2, 4 และ 6 เซนติเมตร (วัดจากผิวด้านบนลงไปในแพคเบต) และแสดงลักษณะการจัดวางอิเล็กโทรดกับกราวด์โดยให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์เป็น L ดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของกระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเบต และน้ำหนักของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Datataker DT505)



รูปที่ 3 แสดงขนาดของแพคเบตและตำแหน่งของอิเล็กโทรด

ในการทดลองความเร็วของอากาศมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.35 เมตรต่อวินาที และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 15 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตารางที่ 1 สภาวะทดสอบ

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	$M_{in}$	12.52 %db
Drying temperature	T	60 °C
Ambient temperature	$T_M$	25 °C
Mean air velocity	$U_b$	0.35 m/s
Applied voltage	V	15 kV
Drying time	t	~ 24 hr
Glass beads	d	0.125

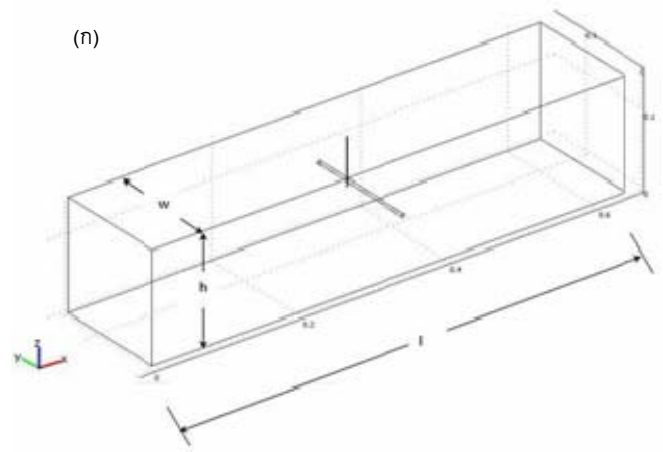
ตารางที่ 2 คุณลักษณะของแพคเบต

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

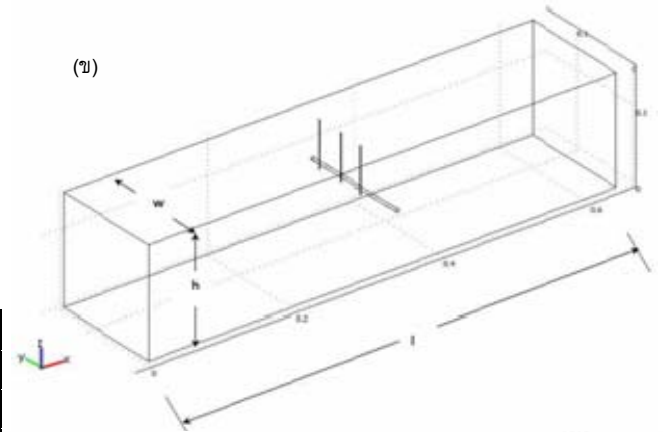
#### 4. การคำนวณสนามไฟฟ้า (Electric field calculation)

เพื่อแสดงแนวเส้นสนามไฟฟ้าจึงกำหนดโดเมนของการคำนวณและขอบเขตเงื่อนไขมีขนาด  $64 \times 15 \times 15$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 กำหนดให้ไอโซพ็อตลัมทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนมีความยาว l ความกว้างเท่ากับ w และความสูงเท่ากับ h โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ จำนวนแท่งอิเล็กโทรดให้เป็น n ศึกษาตั้งแต่  $n = 1$ ,

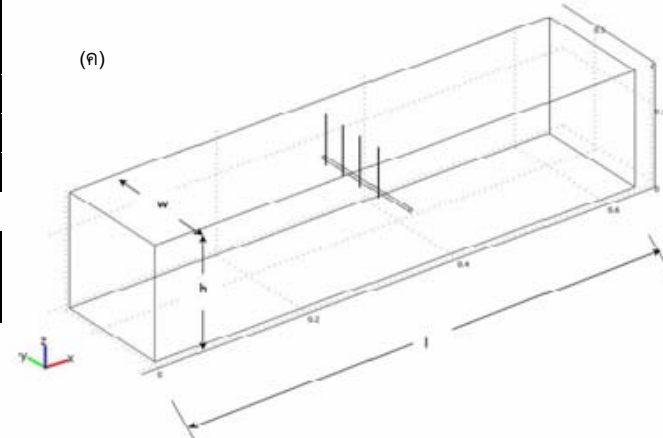
3 และ 4 เส้น โดยตำแหน่งของกราวด์อยู่ห่างจากพิกัดเริ่มต้นในแนวแกน x เป็นระยะ 0.34 เมตรเสมอ ต่อจากนั้นเลือกอิเล็กโทรดให้ห่างจากกราวด์ไปทางด้านซ้ายเป็นระยะ L เมื่อศึกษาที่ L ตั้งแต่ 1 ถึง 6 เซนติเมตร โดยรูปที่ 4 (ก) ถึง (ค) แสดงโดเมนของการคำนวณและเงื่อนไขขอบเขตที่ n ต่างๆ โดยใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 15 กิโลโวลต์ ปลอยที่ปลายเข็มของอิเล็กโทรด



(ก)

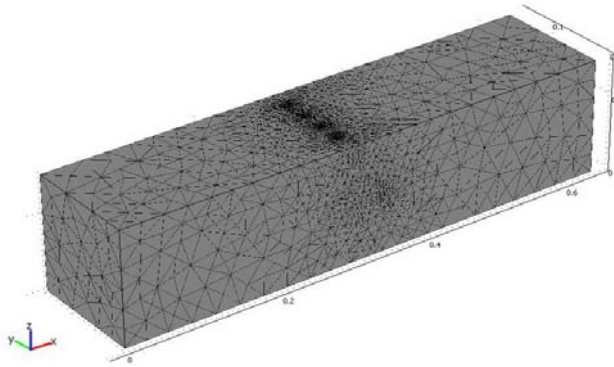


(ข)



รูปที่ 4 แสดงโดเมนของการคำนวณและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้จำนวนอิเล็กโทรดต่างๆ (ก)  $n = 1$  (ข)  $n = 3$  และ (ค)  $n = 4$

การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมในการศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติชนิดเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular element) จำนวน 150,000 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างกริดที่ใช้คำนวณ (Grid generation)

#### 4.1 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในระบบการทำความร้อน โดยปกติการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระทำโดยการจำลองผ่านสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ใช้ธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ลงไปก็สามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ ดังสมการที่ 1

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q \quad (1)$$

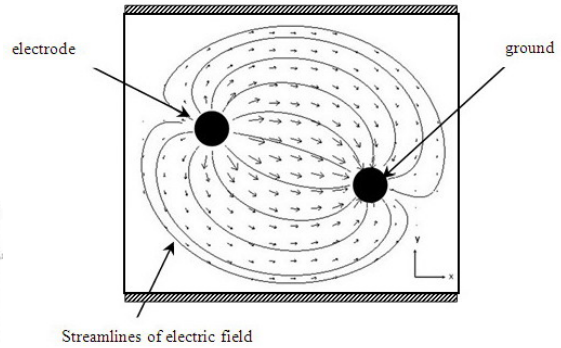
เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของของไหล (Permittivity of fluid, F/m)  $E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field strength, V/m)  $q$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (Charge density) โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าอธิบายจากสมการที่ 2

$$E = -\nabla \cdot V \quad (2)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V)

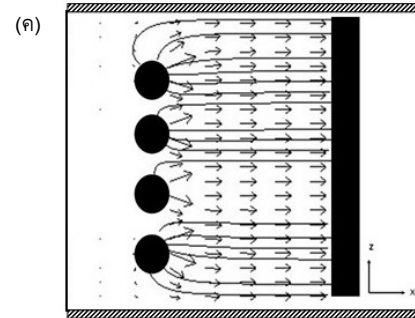
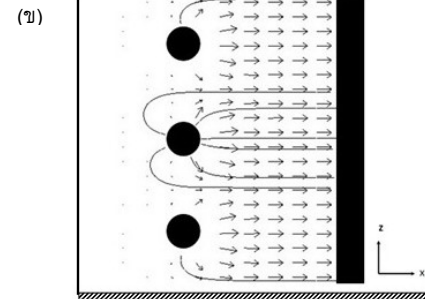
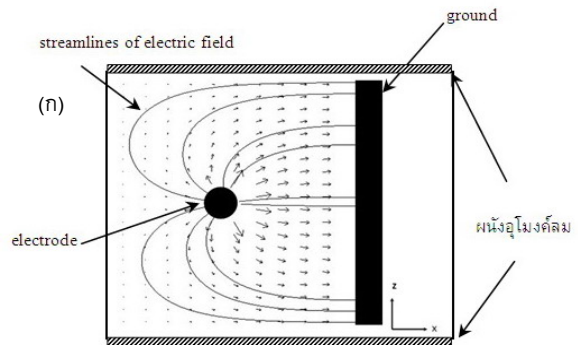
#### 4.2 ผลของการคำนวณรูปแบบสนามไฟฟ้า

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณใช้ Electrostatic module กำหนดให้ห่อเป็นห่อเปล่าสามมิติมีอากาศไหลผ่าน ด้านทุกด้านของห่อทำจากฉนวน กำหนดเป็นพื้นผิวที่ไม่รับประจุ (Zero charge/symmetry) ภายในมีขั้วอิเล็กโทรดกำหนดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric potential) และตัวเหนี่ยวนำประจุกำหนดเป็นกราวด์ (Ground) รูปที่ 6 แสดงทิศทางด้านข้าง (Side view) และรูปที่ 7 แสดงทิศทางด้านบน (Top view)



Streamlines of electric field

รูปที่ 6 แสดงทิศทางด้านข้างของสนามไฟฟ้า



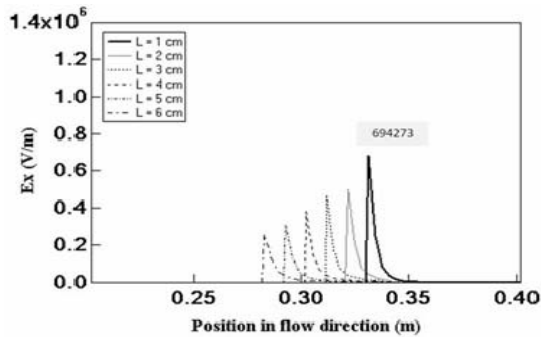
รูปที่ 7 แสดงทิศทางด้านบนของสนามไฟฟ้า

เมื่อ (ก)  $n = 1$  (ข)  $n = 3$  และ (ค)  $n = 4$

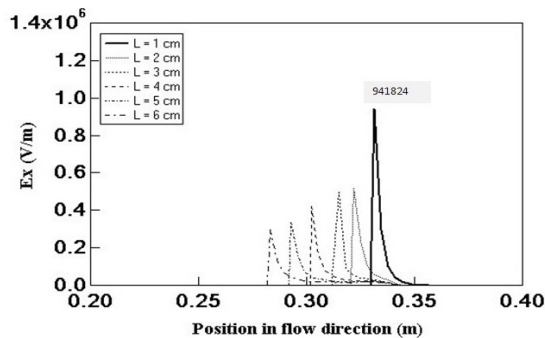
จากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยจากปลายขั้วอิเล็กโทรด สนามไฟฟ้าทั้งหมดจะวิ่งเข้ามาหากกราวด์เป็นลักษณะสมมาตร ทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์ โดยความเข้มที่สูงที่สุดเกิดที่ปลายขั้วอิเล็กโทรด

### 4.3 ผลของจำนวนแท่งอิเล็กโทรด

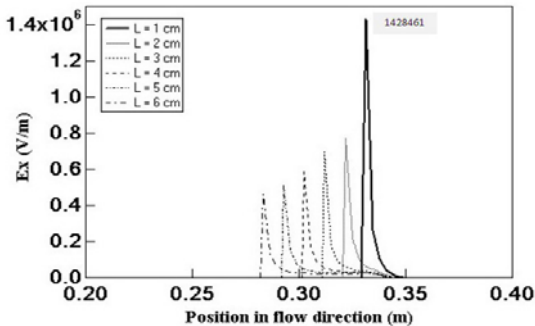
การจัดวางตำแหน่งของอิเล็กโทรดมีผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้า รูปที่ 8 ถึง 10 ทำการศึกษา  $n = 1, 3$  และ 4 เปรียบเทียบกับ  $L$  ตั้งแต่ 1 ถึง 6 เซนติเมตร



รูปที่ 8 แสดงสนามไฟฟ้าที่  $n = 1$  ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6



รูปที่ 9 แสดงสนามไฟฟ้าที่  $n = 3$   
พิจารณาอิเล็กโทรดเส้นที่ 2 ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6

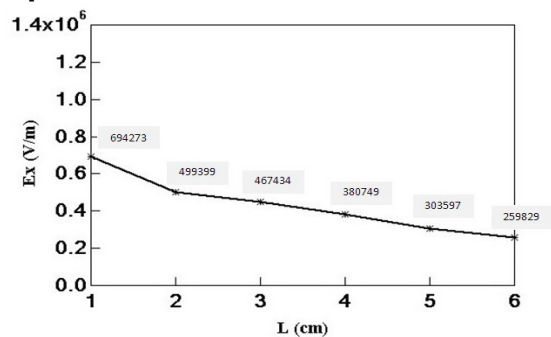


รูปที่ 10 แสดงสนามไฟฟ้าที่  $n = 4$   
พิจารณาอิเล็กโทรดเส้นที่ 3 ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6

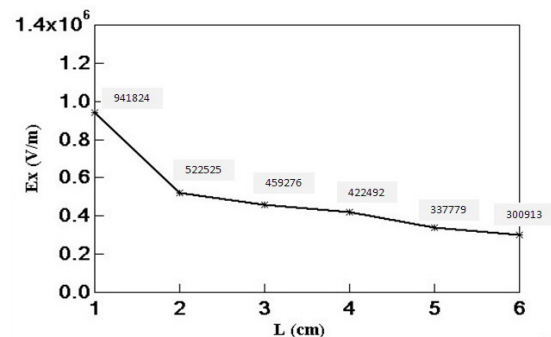
กำหนดให้  $E_x$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน x (Electric field in x component, V/m) เมื่อพิจารณาอิเล็กโทรดแต่ละเส้น รูปที่ 9 ที่  $n = 3$  พบว่าที่ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 2 ให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงที่สุด เนื่องจากที่ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 1 และ 3 เกิดการหักล้างกันกับผนังท่อและอิเล็กโทรดข้างเคียง ส่งผลให้เกิดความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงที่สุดที่ขั้วกลาง ส่วนรูปที่ 10 ที่  $n = 4$  ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 3 ให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงที่สุด เนื่องจากที่ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 1 และ 4 เกิดการหักล้างกันกับผนังท่อและอิเล็กโทรดข้างเคียงเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา แตกต่างกันที่

ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 2 ถูกอิทธิพลจากขั้วข้างเคียงหักล้าง ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด จึงทำให้สนามไฟฟ้าวิ่งเข้ามาที่ปลายอิเล็กโทรดเส้นที่ 3 มากที่สุด แต่ไม่สูงเด่นชัดมากกว่าเส้นอื่นนัก จากรูปที่ 8 ถึง 10 แสดงให้เห็นว่าการจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดมีผลต่อแนวและขนาดของสนามไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อพิจารณา  $n = 1, 3$  และ 4 ทำให้ทราบว่าเมื่อจำนวนแท่งอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น

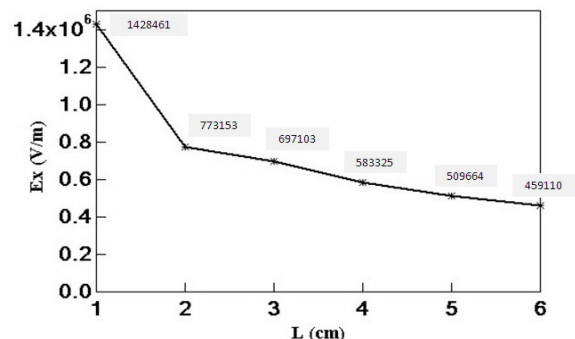
เมื่อพิจารณาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์ที่  $L$  ตั้งแต่ 1 ถึง 6 พบว่าเมื่อระยะห่างยิ่งน้อยยิ่งทำให้การเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น โดยที่  $L = 1$  ให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงอย่างเด่นชัดกว่าที่ตำแหน่งอื่นมาก ซึ่ง  $L$  ตั้งแต่ 2 ถึง 6 ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ลดลงอย่างเป็นเส้นตรง พิจารณาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าในตำแหน่งที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงที่สุดของแต่ละอิเล็กโทรดเปรียบเทียบกับ  $L$  ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ดังรูปที่ 11 ถึง 13



รูปที่ 11 แสดงสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าสูงที่สุดของ  $n = 1$   
ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6



รูปที่ 12 แสดงสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าสูงที่สุดของ  $n = 3$   
ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6



รูปที่ 13 แสดงสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าสูงที่สุดของ  $n = 4$   
ศึกษาที่  $L = 1$  ถึง 6

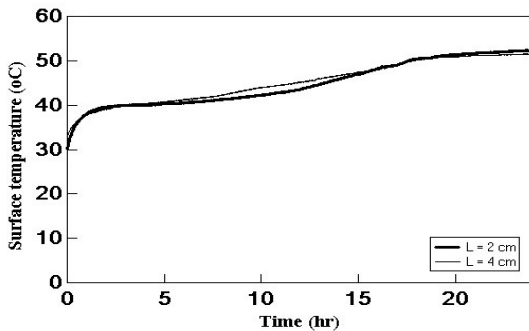
จากรูปพบว่าตำแหน่งที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ปลายอิเล็กโทรด และยังพบว่าตำแหน่งสนามไฟฟ้ากับระยะห่างแปรผกผันกันเป็น  $E \propto \frac{1}{R}$  เมื่อ  $E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า และ  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์

### 5. อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบต

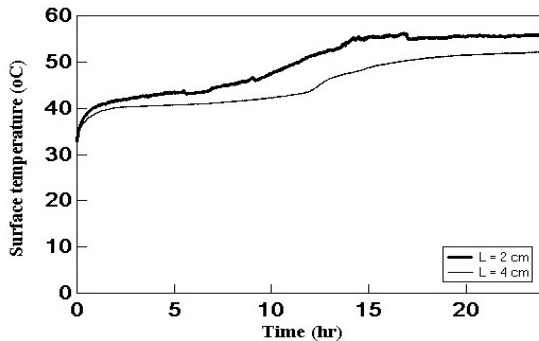
เพื่อสังเกตอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อแพคเบต โดยศึกษาผลของจำนวนอิเล็กโทรด ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ รวมไปถึงผลของอุณหภูมิและมวลที่ผิวของแพคเบต งานวิจัยนี้วัดค่าอุณหภูมิของกระแสลมที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแพคเบต และพบว่าอุณหภูมิของกระแสลมก่อนและหลังแพคเบตมีค่าใกล้เคียงกันมาก จากการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่าอิทธิพลของความร้อนจากลวดอิเล็กโทรดมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบต ต่อมาจึงทำการทดสอบอุปกรณ์โดยทำการปรับเปลี่ยน  $L$  ตั้งแต่ 1 ถึง 6 พบว่าที่  $L = 1$  เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) จึงไม่สามารถทำการทดลองที่ค่านี้ได้

#### 5.1 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์

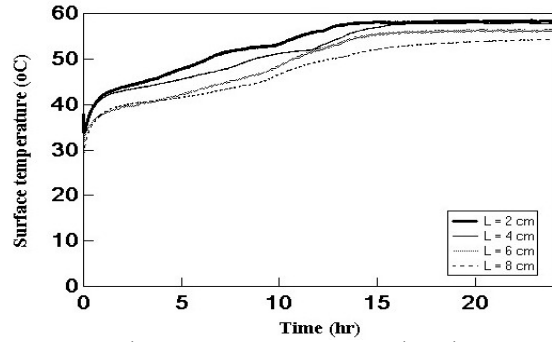
รูปที่ 14 ถึง 16 แสดงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ที่มีผลต่อการอบแห้งของวัสดุพูนโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าที่  $n = 1, 3$  และ 4 พบว่าในช่วง 2 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง



รูปที่ 14 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ผิว เมื่อ  $n = 1$  ที่  $L = 2$  และ 4 ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 15 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ผิว เมื่อ  $n = 3$  ที่  $L = 2$  และ 4 ที่ 15 กิโลโวลต์

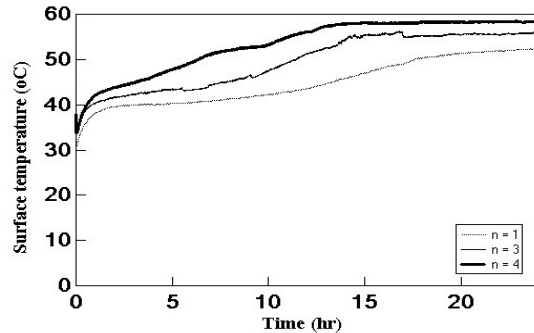


รูปที่ 16 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ผิว เมื่อ  $n = 4$  ที่  $L = 2, 4, 6$  และ 8 ที่ 15 กิโลโวลต์

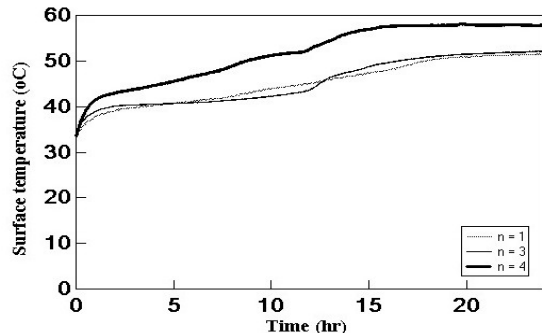
เมื่อศึกษาอุณหภูมิของแพคเบตที่มีการปรับเปลี่ยนระยะห่างของอิเล็กโทรดกับกราวด์ เมื่อศึกษาที่  $n$  ต่าง ๆ จากรูปที่ 14 พบว่าเมื่อ  $n$  เท่ากับ 1 เส้น แทบจะไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิแพคเบต แต่เมื่อเพิ่มจำนวนของอิเล็กโทรดแสดงในรูปที่ 15 เมื่อ  $n = 3$  พบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิแพคเบตอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณารูปที่ 16 จากอุณหภูมิของแพคเบตทำให้ทราบว่าระยะห่างน้อยจะให้การอบแห้งที่เร็วกว่า และจากกรณีศึกษาทั้งหมดที่  $L = 2$  เซนติเมตร ให้ค่าการอบแห้งที่ผิวของแพคเบตที่ดีที่สุด

#### 5.2 ผลของจำนวนอิเล็กโทรด

รูปที่ 17 ถึง 18 แสดงผลของจำนวนอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการอบแห้งของวัสดุพูนโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าที่  $L = 2$  และ 4



รูปที่ 17 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ผิว เมื่อ  $L = 2$  ที่  $n = 1, 3$  และ 4 ที่ 15 กิโลโวลต์

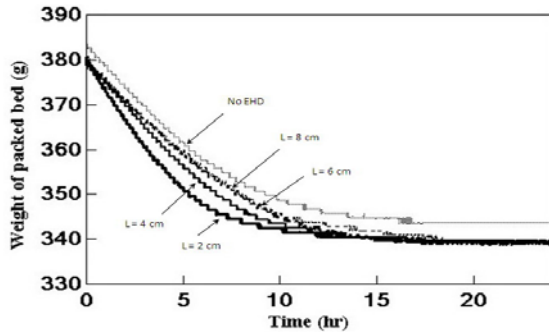


รูปที่ 18 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ผิว เมื่อ  $L = 4$  ที่  $n = 1, 3$  และ 4 ที่ 15 กิโลโวลต์

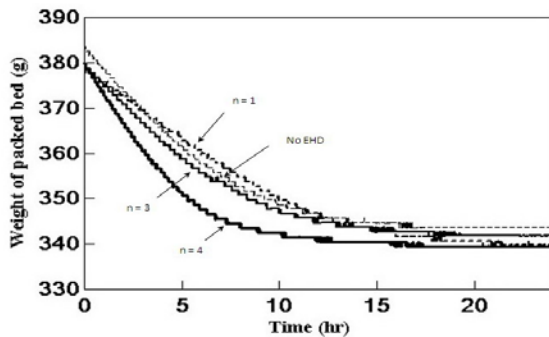
เมื่อศึกษาอุณหภูมิของแพคเบดที่มีการปรับเปลี่ยนจำนวนของอิเล็กโทรด จากรูปที่ 17 เมื่อ  $L = 2$  เมื่อพิจารณา  $n = 1, 3$  และ 4 อุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการมีค่าประมาณ 52, 56 และ 59 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงว่า ที่  $n = 4$  ให้การอบแห้งที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณารูปที่ 18 ที่  $L = 4$  พบว่าที่  $n = 4$  อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของแพคเบดประมาณ 58 องศาเซลเซียส แต่ที่  $n = 1$  และ 3 อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของแพคเบดไม่ค่อยมีความแตกต่างกันมากนัก

### 5.3 ผลของระยะห่างและจำนวนอิเล็กโทรด

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า เมื่อจำนวนของแท่งอิเล็กโทรดมากจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงกว่า รูปที่ 19 จึงพิจารณามวลในกระบวนการอบแห้งที่  $n = 4$  เปรียบเทียบกับระยะต่างๆ ระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ที่  $L = 2, 4, 6$  และ 8 และยังทราบว่าระยะห่างของอิเล็กโทรดยิ่งน้อย ยิ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงกว่า รูปที่ 20 จึงพิจารณามวลในกระบวนการอบแห้งที่  $L = 2$  เปรียบเทียบกับจำนวนอิเล็กโทรดต่างๆ ที่  $n = 1, 3$  และ 4 โดยทั้งสองกรณีเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบมวลในกระบวนการอบแห้งที่เวลาต่างๆ ที่  $n = 4$



รูปที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบมวลในกระบวนการอบแห้งที่เวลาต่างๆ เมื่อ  $L = 2$

จากรูปที่ 19 พิจารณาที่  $n = 4$  พบว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้มวลของแพคเบดลดลงเร็วกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า และยิ่งพบว่าที่  $L = 2$  ให้มวลที่ลดลงเร็วกว่าทุกกรณี เมื่อพิจารณารูปที่ 20 ที่  $L = 2$  พบว่าที่  $n = 4$  ให้มวลของแพคเบดลดลงเร็วที่สุด เมื่อศึกษาที่  $n = 1, 3$  และไม่ใช้สนามไฟฟ้าพบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

### 6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน

ที่อยู่ภายใต้กระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโทรดมีผลอย่างเด่นชัดต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุพูนไม่อิ่มตัว เมื่อทำการคำนวณอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับจำนวนและระยะห่างของแท่งอิเล็กโทรด พบว่าเมื่อจำนวนของแท่งอิเล็กโทรดเท่ากับ 4 เส้น จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงกว่าจำนวน 1 และ 3 เส้น และเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ที่ 2 เซนติเมตรยิ่งทำให้การเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่ 4, 6 และ 8 เซนติเมตร โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์จะมีผลมากกว่าจำนวนอิเล็กโทรด ซึ่งการใช้สนามไฟฟ้าเป็นผลทำให้เกิดการหมุนวนที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (Corona wind) มีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยสนามไฟฟ้ากับระยะห่างแปรผกผันกันเป็น  $E \propto \frac{1}{R}$  ซึ่งผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์ยิ่งน้อย และจำนวนอิเล็กโทรดที่มากทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alem, R. A., and Lai, F.C. (2005). EHD-enhanced drying of partially wetted glass beads. *Drying Technology*, 23: 597-609,
- [2] Lai, F.C. (2010). A prototype of EHD-enhanced drying system. *Journal of Electrostatics* 68 ,101-104.
- [3] Jewell, L. N., Karpov, S., Krichtafovitch, I., Jayanty, V., Hsu, C., and Mamishev, A. (2008). Modeling of corona-induced electrohydrodynamics flow with COMSOL multiphysics, Proc.ESA Annual Meeting on Electrostatics, Paper E1.
- [4] 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.
- [5] Lai, F.C., and Lai, K. W., (2002). EHD-enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology*, 20(7),1393-1405
- [6] Kasayapanand, N. (2006). Numerical study of electrode bank enhanced heat transfer. *Applied Thermal Engineering* 26 ,1471-1480.
- [7] Kasayapanand, N., Tiansuwan, J., Asvapoositkul, W., Vorayos, N., and Kiatsiriroat, T. (2002). Effect of the electrode arrangements in tube bank on the characteristic of electrohydrodynamic heat transfer enhancement: low Reynolds Number, *J.Enhanced Heat Transfer*, vol. 9.
- [8] Lai, F. C., and Sharma, R. K. (2005). EHD-Enhanced drying with multiple needle electrode. *Journal of Electrostatics* 63 ,223-237.
- [9] Kasayapanand, N. (2006). Numerical study of electrode bank enhanced heat transfer. *Applied Thermal Engineering* 26, 1471-1480.
- [10] Chakranond, C., and Ratandecho, P. (2009). Enhancement of mass and heat transfer in the unsaturated packed-bed with electric fields. 8th Conference of Heat and Mass Transfer Network of Thailand.