

# การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโคโรนาวินด์และที่มีผลต่อวัสดุตัวอย่างด้วยการจำลองแบบสองมิติ

## Study on Influence of Electrode Position on Corona Wind Pattern and on Sample with a Two-Dimensional Simulation

<sup>1,2</sup> สุวิมล เสน่ห์วงศ์ ณ อยุธยา

<sup>1</sup> ไซยณรงค์ จักรธรานนท์

<sup>1</sup> ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

<sup>2</sup> อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ปทุมธานี 12120

โทร 02-5643001-9

<sup>2</sup> กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ส่วนการศึกษา

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

จังหวัดนครนายก 26001

โทร 037-393487

\* อีเมล [joysuwimon1@hotmail.com](mailto:joysuwimon1@hotmail.com)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นสังเกตการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไหลผ่านวัสดุตัวอย่างซึ่งในที่นี้เป็นวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ในการคำนวณใช้ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 0.35 เมตรต่อวินาที ( $Re_H \approx 2200$ ) จากการคำนวณพบว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอิเล็กโทรดมีผลต่อการรูปแบบการไหล (Flow pattern) ของไหล และเมื่อมีการนำวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางขวางภายในท่อ ทำให้รูปแบบการไหลของของไหลและวอร์ทิซิตี (Vorticity) ของของไหลเปลี่ยนแปลงไป อันก่อให้เกิดการลดบาวาดีเลย์เออร์รี่ที่ผิวของวัตถุ อันก่อให้เกิดการอบแห้งที่ดีขึ้นตามไปด้วย

คำสำคัญ: สนามไฟฟ้า รูปแบบการไหล โคโรนาวินด์ วัสดุตัวอย่าง วอร์ทิซิตี

Abstract

This research numerically investigates the effects of electrode-ground wire positions. On the electrohydrodynamics flow passing a sample or rectangular object. On bulk mean velocity of air is controlled at 0.35 m/s ( $Re_H \approx 2200$ ). The results show that adjusting the position of electrode affects the Corona wind pattern. In addition, with adjusting the position of sample, flow pattern and vorticity are changed. Moreover, vorticity of airflow above sample is influenced with sample drying.

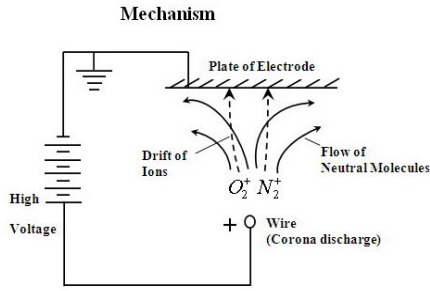
Keywords: Electric field, Flow pattern, Corona wind, Sample, Vorticity

### 1. บทนำ

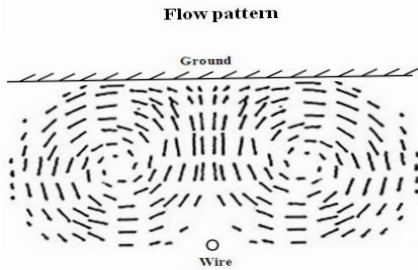
กระบวนการอบแห้ง (Drying process) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญยิ่งต่ออุตสาหกรรมเกษตร เนื่องจากเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีอายุยาวนานขึ้น โดยเทคนิคการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Conventional drying technique) คือ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot air drying) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ต้องการให้แก่ผลิตภัณฑ์และยังสามารถควบคุมช่วงเวลาการใช้งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนต้องการเวลาสำหรับการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก [1] ปัจจุบันนี้จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มปรับปรุงวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นการอบแห้งแบบดั้งเดิมกับร่วมวิธีใหม่ เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น มีวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การเพิ่มอัตราการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า หรือเรียกว่าอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics; EHD)

การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยวิธีการอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ สามารถอธิบายกลไกการเกิดด้วยรูปที่ 1 กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังอิเล็กโทรดขั้วบวก ทำให้อากาศที่อยู่ใกล้ๆ ถูกไอออไนซ์ (Ionized) และผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศเคลื่อนที่ที่จะชนกับโมเลกุลอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ดังรูปที่ 1 (ก) และเกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum transfer) ผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการหมุนวนของกระแสลมแบบทุติยภูมิ (Secondary bulk flow) หรือเรียกว่าโคโรนาวินด์ จากการศึกษาของ Yabe และคณะ [2] แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Electric body force) เหนี่ยวนำให้เกิดอากาศหมุนวนเป็นสองลูก (Vortices) ที่สมมาตรกันสองลูก โดยมีการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)

(ก)



(ข)



รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรนาวิคิต [2]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายกลุ่ม [3-13] ศึกษากระบวนการอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานด้านต่างๆ อาทิ Kasayapanand [4] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของของไหลผ่านกลุ่มท่อ (Tube bank) ภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์กลไกการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับร่วมกับโคโรนาวิคิตซึ่งเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าจากกลุ่มอิเล็กโตรด พบว่าเทอมอลบาวตารีเลเยอร์ (Thermal boundary layer) ภายในท่อถูกรบกวนโดยผลของสนามไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้า อันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของของไหล ทำให้สัมประสิทธิ์การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แต่ลดลงที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่ม

Ahmedou และคณะ [7] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลในผลิตภัณฑ์อาหารด้วยวิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ พบว่าความเร็วของอากาศที่ต่ำและระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์อาหารและกระแสโคโรนาใกล้กว่า จะมีการเพิ่มอัตราการอบแห้งที่ดี และเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้เห็นสนามการไหล (Velocity field) ของของไหลที่หมุนวนอันเป็นผลมาจากไอออนิกวินด์ (Ionic wind)

Chaktranond และคณะ [12] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งด้วยอิเล็กโตรไดนามิกส์ในวัสดุพูนที่จัดวางภายในท่อ โดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลมถูกใช้อยู่ในช่วง 0 ถึง 15 kV อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบคงที่ที่ประมาณ 60 °C และ 0.35 m/s ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงชั้นของลูกแก้วในวัสดุพูนมีผลต่อกลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพคเบต ซึ่งอิทธิพลของโคโรนาวิคิตที่เกิดขึ้นในกระแสลมร้อนเหนือแพคเบตทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการเพิ่มขนาดของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้อุณหภูมิผิวหน้าแพคเบตสูงเร็วขึ้น

Saneewong Na Ayuttaya [13] ศึกษาการจัดเรียงอิเล็กโตรดที่มีผลต่อรูปแบบของโคโรนาวิคิต พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับกราวด์ยิ่งน้อยยิ่งทำให้เพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าและเกิดเป็นโคโรนาวิคิตขนาดเล็ก แต่มีความรุนแรงมากกว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดกับกราวด์ที่มาก เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโตรดยิ่งทำให้เพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าและโคโรนาวิคิตเป็นวงกว้างมากยิ่งขึ้น

จากที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ศึกษาการอบแห้งของวัสดุตัวอย่างที่วางไว้ในท่อ แต่ยังไม่ได้ศึกษาว่าวัสดุตัวอย่างที่วางขวางทางการไหลของของไหลมีผลต่อรูปแบบของโคโรนาวิคิตที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการหาตำแหน่งของอิเล็กโตรดที่เหมาะสมที่มีผลต่อรูปแบบของโคโรนาวิคิต รวมทั้งตำแหน่งของวัสดุตัวอย่างที่ได้รับอิทธิพลจาก EHD มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลดบาวตารีเลเยอร์ที่ดียิ่งขึ้น

## 2. การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

ในการคำนวณพิจารณาการไหลแบบสองมิติและการไหลของอากาศถูกสมมติให้เป็นกรไหลแบบอัดตัวไม่ได้ สำหรับปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของของไหลพิจารณาจากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}_E, \quad (2)$$

เมื่อพิจารณาอัตรากระทำระหว่างของไหลและสนามไฟฟ้าพิจารณาจากแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb force) แสดงด้วยสมการ

$$\vec{F}_E = q\vec{E}, \quad (3)$$

ในระบบการทำความร้อน โดยปกติการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระทำโดยการจำลองผ่านสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ลงไปก็สามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q \quad (4)$$

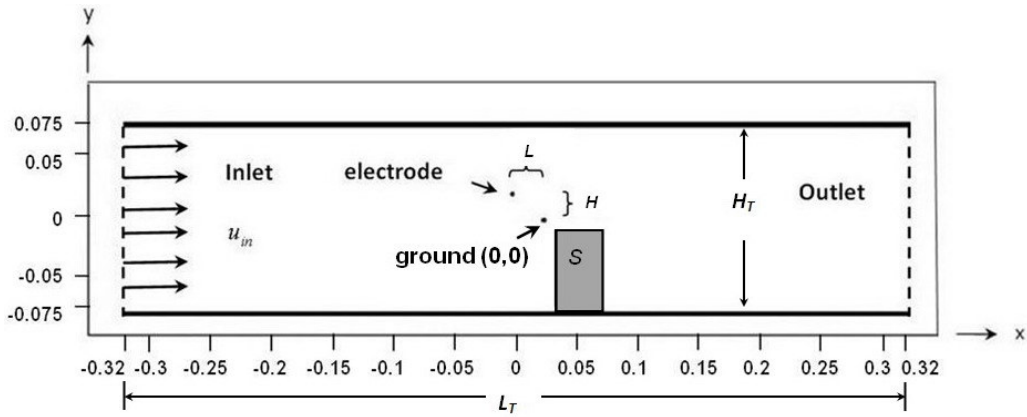
โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าอธิบายจากสมการที่ 5

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (5)$$

พิจารณาสมการการหมุนวน (Vorticity) ของของไหล

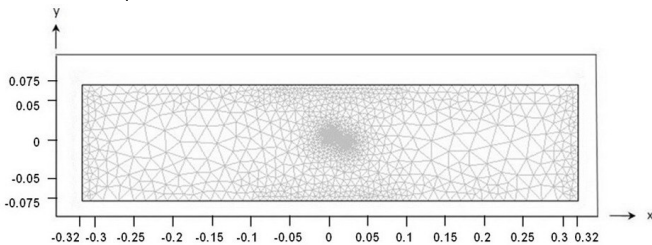
$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \quad (6)$$

## 3. โดเมนของการคำนวณ



รูปที่ 2 โดเมนการคำนวณที่มีวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมวางภายในท่อ

ในการพิจารณารูปแบบการเกิดของโคโรนาวินต์จึงกำหนดโดเมนการคำนวณเป็นแบบจำลองอุโมงค์ลมสองมิติมีขนาดยาว ( $L_T$ ) x สูง ( $H_T$ ) เท่ากับ 0.64 m x 0.15 m ให้ด้านบนและด้านล่างของอุโมงค์ทำจากฉนวน อีเล็กโทรดและกราวด์สมมติเป็นจุด สมมติให้กราวด์อยู่ที่พิกัด (0,0) เสมอ ความสูงของอีเล็กโทรดและกราวด์ในแนวแกน y เท่ากับ  $H$  โดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและระยะของอีเล็กโทรดในแนวแกน x จากกราวด์ ( $L$ ) เพื่อศึกษาตำแหน่งของอีเล็กโทรดที่เหมาะสมที่มีผลต่อรูปแบบของโคโรนาวินต์ เมื่อมีวัสดุตัวอย่าง (Sample; S) ในที่นี้ใช้เป็นวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมแทนวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งวางขวางทิศทางการไหลของของไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมรูปที่ 2 แสดงตำแหน่งวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 3.5 cm และสูง 6 cm เป็นวัสดุไม่ลื่นไถล (No slip) โดยไม่คำนึงถึงความชื้นบรรจุและค่าความพรุน



รูปที่ 3 ตัวอย่างกริดที่ใช้ในการคำนวณ

การวิเคราะห์ปัญหาในสภาวะคงตัว (Steady state) โดยใช้ระเบียบวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติชนิดเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular element) จากโปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics 3.4 ประมาณ 10,000 เอลิเมนต์ โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.01% ตั้งรูปที่ 3 ให้แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เท่ากับ 15 kV [14] และมีความเร็วลมที่ทางเข้าเท่ากับ 0.35 m/s ( $Re_H \approx 2200$ ) [12] ซึ่งจำนวนกริดที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อคำตอบ

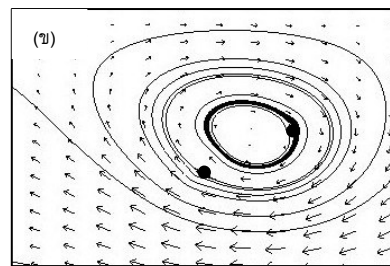
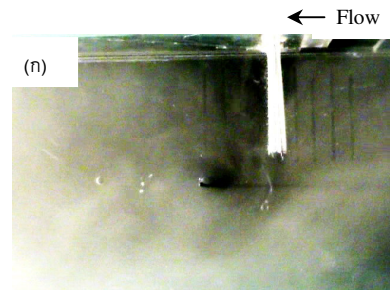
สภาวะขอบเขต (Boundary condition) ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ

	$u(m/s)$	$V(kV)$	$q(C/m^3)$
Electrode	$u_0 = 0$	$V = 15$	$q_0 = 3$
Ground	$u = 0$	$V = 0$	$q = 0$
Inlet	$u = u_{in}$	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial q/\partial x = 0$
Outlet	$\partial u/\partial x = 0$	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial q/\partial x = 0$
Upper wall	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial q/\partial y = 0$
Lower wall	$u = 0$	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial q/\partial y = 0$

#### 4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

##### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ



รูปที่ 4 รูปแบบการไหลของของไหล (ก) การทดลอง [16] (ข) โปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics

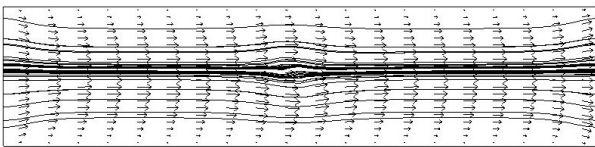
ก่อนทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้โปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทำการเปรียบเทียบจากการทดลองของรัชพงศ์ กรวิชัยรินทร์และคณะ [15] ซึ่ง

อธิบายลักษณะลมหมุนวนที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายใต้ลมร้อนด้วยเทคนิคควันรูป (Flow visualization with incense-smoke technique) ดังรูปที่ 4 (ก) แสดงรูปแบบการไหลของของไหลที่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าความเร็วลมที่ 15 kV และ 0.35 m/s ตามลำดับ เปรียบเทียบกับรูปแบบของไหลที่ได้จากโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ในสภาวะทดสอบเดียวกัน ดังรูปที่ 4 (ข) พบว่ารูปแบบการไหลเป็นไปในลักษณะเดียวกัน จากรูปที่ 4 (ก) สามารถเห็นว่ากระแสลมเคลื่อนจากปลายขั้วอิเล็กโทรดมาหมุนวนใกล้กับบริเวณตำแหน่งกราวด์ ซึ่งการคำนวณจากโปรแกรมและการทดลองมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถนำมาใช้คำนวณปัญหาที่จะวิเคราะห์ได้

#### 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด

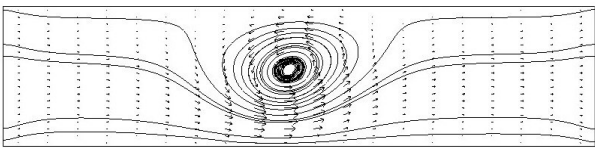
เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าพบว่าอากาศเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไม่เกิดการหมุนวน ดังรูปที่ 5

Flow →

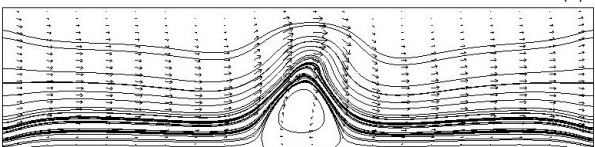


รูปที่ 5 รูปแบบการไหลของของไหลไม่ใช้สนามไฟฟ้า ( $V=0$  kV)

Flow →



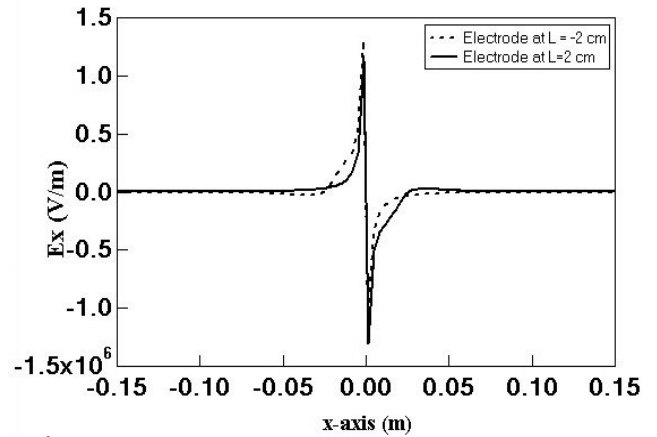
(ก)



(ข)

รูปที่ 6 รูปแบบการไหลของของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรดที่  $H = 1$  cm (ก)  $L = -2$  cm (ข)  $L = 2$  cm

การวางอิเล็กโทรดในตำแหน่งที่สูงกว่ากราวด์มีผลทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear flow) ของประจุกับอากาศ เมื่อปล่อยแรงดันไฟฟ้าทำให้อากาศเกิดการหมุนวนเปลี่ยนทิศทาง [13] จึงกำหนดให้  $H = 1$  cm เสมอ แต่เมื่อพิจารณา  $L$  พบว่าในรูปที่ 6 (ก) เมื่อวางอิเล็กโทรดทางด้านซ้ายของกราวด์ที่  $L = -2$  cm ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศไปทางด้านบน แต่เมื่อวางอิเล็กโทรดทางด้านขวาของกราวด์ที่  $L = 2$  cm ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่าการหมุนวนของอากาศเกิดทางด้านล่างภายในท่อ พิจารณาสภาพไฟฟ้าที่  $y = 0$  m คือ ระดับกึ่งกลางของท่อ จากรูปที่ 7 พบว่าสนามไฟฟ้าทั้งสองกรณีเกิดลักษณะเดียวกัน เมื่อวางอิเล็กโทรดทางด้านซ้ายของกราวด์ ( $L = -2$  cm) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดทางด้านซ้ายของกราวด์ แต่เมื่อพิจารณาอิเล็กโทรดวางทางด้านขวาของกราวด์ ( $L = 2$  cm) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดเกิดทางด้านขวาของกราวด์ โดยสนามไฟฟ้าทั้งสองกรณีเกิดเป็นลักษณะที่สมมาตรกัน



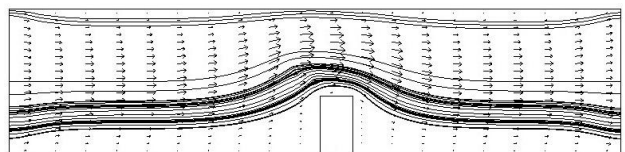
รูปที่ 7 สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด พิจารณาที่  $y = 0$  m

#### 4.3 ผลของการไหลของอากาศผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

##### 4.3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด เมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางด้านขวาของกราวด์

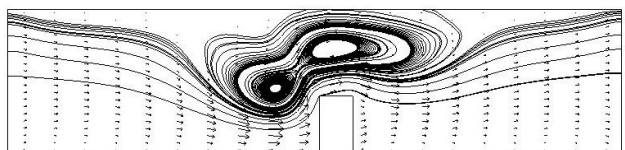
เมื่อนำวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมาวางทางขวาของกราวด์ พิจารณารูปที่ 8 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลเมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้า ของไหลไหลผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยมจะเกิดการหลบสิ่งกีดขวาง แล้วจึงกลับเป็นการไหลแบบเดิม

Flow →

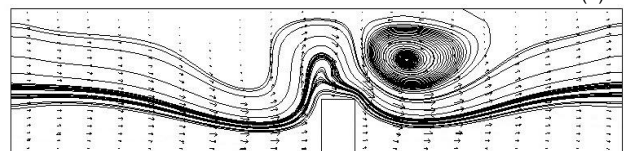


รูปที่ 8 รูปแบบการไหลของของไหลที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้า ( $V=0$  kV) เมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางด้านขวาของกราวด์

Flow →



(ก)

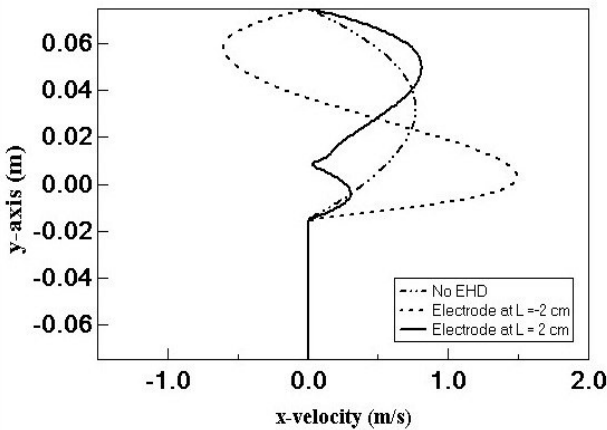


(ข)

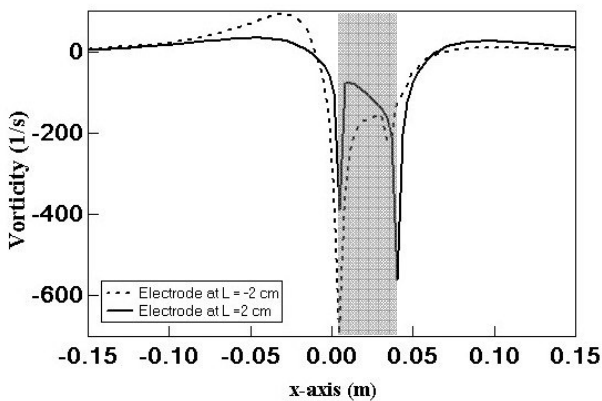
รูปที่ 9 รูปแบบการไหลของของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด (ก)  $L = -2$  cm (ข)  $L = 2$  cm เมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางทางด้านขวาของกราวด์

เมื่อพิจารณาการวางอิเล็กโทรดและกราวด์แบบ Chakranond ( $L = -2$  cm) [12] ดังรูปที่ 9 (ก) พบว่าการไหลก็ยังคงมีลักษณะการหมุนวนตามรูปแบบการเกิดของโคโรนาวินด์ตามปกติ แต่มีการแยกการหมุนวนออกเป็นสองลูกเนื่องจากของไหลปะทะกับขอบวัตถุทรงสี่เหลี่ยม โดยด้านหน้าของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมเกิดการหมุนวนเป็นโคโรนาวินด์ที่มีความหนาแน่นของการหมุนวนมากกว่า ส่วน

ด้านบนให้ค่าการหมุนวนที่เบาบางกว่า เนื่องจากความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เบาบางกว่านั่นเอง การหมุนวนของลมได้มาจากผลของแรงเฉือนของอากาศกับสนามไฟฟ้า แต่เมื่อพิจารณาการวางอิเล็กโทรดที่  $L = 2$  cm ดังรูปที่ 9 (ข) เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเปลี่ยนไป อีกทั้งยังมีผลจากการวางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมมาบังตำแหน่งการหมุนวนเดิม ทำให้ของไหลเกิดการหมุนวนด้านหลังอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาผิวบนของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมจากรูปที่ 9 (มีแรงดันไฟฟ้า) เปรียบเทียบกับรูปที่ 8 (ไม่มีแรงดันไฟฟ้า) พบว่าการใช้สนามไฟฟ้าสามารถทำให้กระแสลมแบบที่ผิวบนของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมได้มากกว่าอันจะทำให้ลดบวตาริเลเยอร์ได้ดีกว่าตามไปด้วย



รูปที่ 10 ความเร็วของของไหลในแนวแกน x เมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม ( $x=0.0225$  m)



รูปที่ 11 วอริซิตีของของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรดพิจารณาที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม ( $y = -0.015$  m) เมื่อมีวัสดุตัวอย่างวางทางด้านขวาของกราวด์

พิจารณาความเร็วของของไหลในแนวแกน x เมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม ( $x = 0.0225$  m) ที่  $y = -0.075$  ถึง  $0.075$  m คือ ความสูงของท่อ ( $H_t$ ) จากรูปที่ 10 พบว่าที่  $y = -0.075$  ถึง  $-0.015$  m คือ ความเร็วในอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวัสดุไม่ลื่นไถล (No-slip condition) ความเร็วบริเวณดังกล่าวจึงเป็นศูนย์ ต่อมาพิจารณาความเร็วในแนวแกน x ที่ไม่มี EHD พบว่ามีลักษณะเป็นการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) เมื่อพิจารณาที่  $L = 2$  cm ของไหลผลักให้สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่น้อย

แสดงว่าของไหลบริเวณนี้เคลื่อนที่ช้า แต่เมื่อพิจารณาที่  $L = -2$  cm พบว่าความเร็วของของไหลที่บริเวณใกล้ขอบบนของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่มี EHD และ  $L = 2$  cm แสดงว่าสนามไฟฟ้าสามารถผลักให้ของไหลเคลื่อนที่ไปได้เร็วยิ่งขึ้น อันจะส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย

เนื่องจากการศึกษาอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมที่มีขอบทุกด้านเป็นวัสดุไม่ลื่นไถลจึงใช้การพิจารณาจากค่าวอริซิตีแทน ทำให้สามารถทราบการหมุนวนของของไหลที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทมวลจากรูปที่ 11 เมื่อวางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมทางด้านขวาของกราวด์ที่ตำแหน่ง  $x = 0.005$  ถึง  $0.04$  m พบว่าค่าวอริซิตีจะเกิดเด่นชัดที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งค่าวอริซิตีเป็นปริมาณเวกเตอร์ การที่ค่าติดลบแสดงว่าทิศทางการหมุนวนกับทิศทางอ้างอิง จากรูปพบว่าค่าวอริซิตีมีค่ามากที่สุดที่ขอบซ้ายและขอบขวา เมื่อวางอิเล็กโทรดด้านซ้ายและด้านขวาของกราวด์ ตามลำดับ

### 4.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด เมื่อมีอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมวางด้านซ้ายของกราวด์

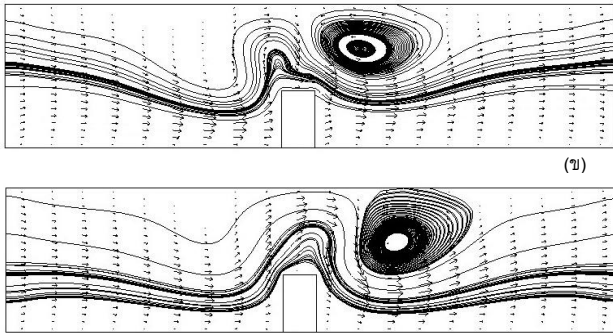
มีการนำอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมมาวางวางด้านซ้ายกราวด์ที่ตำแหน่ง  $x = -0.04$  ถึง  $-0.005$  m เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้า พบว่ารูปแบบการไหลของของไหลมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 8 แต่เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้า พบว่ารูปแบบการไหลเป็นดังรูปที่ 12 เมื่อของไหลกระทบผิวอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมจะเปลี่ยนทิศทางการของกระแสลม และจะเกิดการหมุนวนด้านหลังวัสดุตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันทั้งสองรูป แตกต่างกันที่รูปที่ 12 (ก) เมื่อของไหลไหลเป็นเส้นตรงเมื่อโดนเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าจะเกิดเส้นการไหลที่โค้งไปทางอิเล็กโทรดที่วางด้านซ้ายของกราวด์ แต่รูปที่ 12 (ข) เส้นการไหลจะโค้งไปทางด้านขวา เนื่องจากอิเล็กโทรดที่วางด้านขวาของกราวด์นั่นเอง

เมื่อพิจารณาความเร็วของของไหลในแนวแกน x เมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยม ( $x = -0.0225$  m) ที่  $y = -0.075$  ถึง  $0.075$  m จากรูปที่ 13 พบว่าความเร็วในแนวแกน x ที่ไม่มี EHD มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาที่  $L = 2$  cm ของไหลผลักให้สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่น้อย ซึ่งความเร็วส่วนใหญ่จะไปที่ขอบท่อด้านบน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ แต่เมื่อพิจารณาที่  $L = -2$  cm พบว่าความเร็วของของไหลที่บริเวณใกล้ขอบบนของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่มี EHD แสดงว่าสนามไฟฟ้าสามารถนำกระแสลมมาใช้ในการถ่ายเทมวลได้

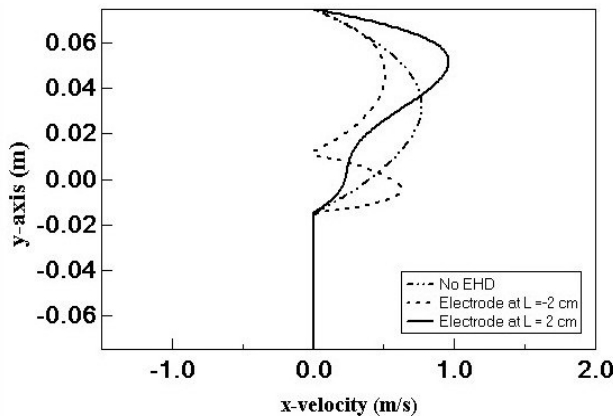
เมื่อพิจารณาการวางอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมทางด้านซ้ายของกราวด์ พบว่าค่าวอริซิตีจะเกิดเด่นชัดที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมเช่นกัน แต่ในกรณีนี้จะเห็นว่าค่าวอริซิตีจะเด่นที่  $L = -2$  cm เท่านั้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาการไหลของของไหลในรูปที่ 14 พบว่ารูปที่ 14 (ก) ของไหลแบบบนผิวของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมได้ดีกว่ารูปที่ 14 (ข) จึงเป็นผลทำให้เกิดการหมุนวนที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงสี่เหลี่ยมเป็นอย่างดีอันจะส่งผลต่อค่าวอริซิตีที่ดีกว่าด้วย

Flow →

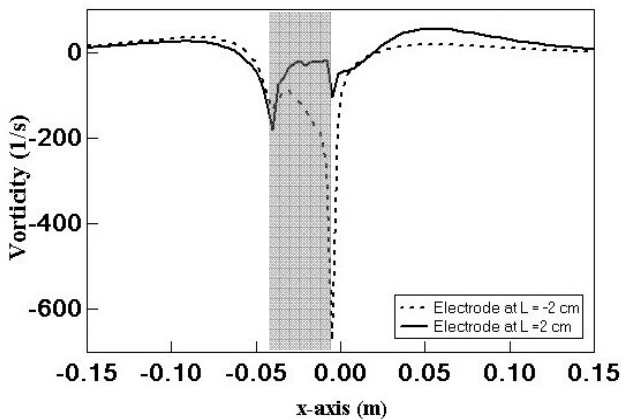
(n)



รูปที่ 12 รูปแบบการไหลของของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด พิจารณาที่  $y = -0.015$  m (ก)  $L = -2$  cm (ข)  $L = 2$  cm เมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางด้านซ้ายของกราวด์



รูปที่ 13 ความเร็วของของไหลในแนวแกน x เมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ( $x = -0.0225$  m)



รูปที่ 14 ความเร็วของของไหลในแนวแกน x ที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด พิจารณาที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ( $y = -0.015$  m) เมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมวางด้านซ้ายของกราวด์

#### 4.4 ผลของค่าวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอิเล็กโทรด และวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าไปที่ปลายขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดโคโรนาในอากาศบริเวณเหนือวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของของไหล เป็นผลให้เกิดการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง จึงนำเสนอค่าวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมดังตารางที่ 2 เนื่องจากวอร์ทิสิตีที่ส่งไปที่ผิวยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้ลดบาวดารีเลเยอร์ที่ผิวได้เร็ว อันจะทำให้วัสดุที่ต้องการอบแห้งแห้งเร็วยิ่งขึ้น

จากตารางแสดงให้เห็นว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าและลมที่เท่ากัน แต่แตกต่างกันที่ตำแหน่งการวางอิเล็กโทรด และตำแหน่งการวางวัตถุทรงสี่เหลี่ยมที่ต้องการอบแห้งจะทำให้ได้วอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมต่างกัน พบว่าเมื่อวางอิเล็กโทรดไว้ด้านซ้ายของกราวด์ จะเพิ่มความเร็วลมที่ติดวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 13 (ก) การหมุนวนของของไหลหนาแน่นมากบริเวณผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมอันจะทำให้เกิดค่าวอร์ทิสิตีมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 15 (ข) การหมุนวนของของไหลเกิดไกลจากผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ทำให้ค่าวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมน้อย ส่งผลต่อการอบแห้งที่ไม่ดีตามไปด้วย

ตารางที่ 2 ค่าวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

ค่าวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม(1/s)		
วัตถุทรงสี่เหลี่ยมวาง	$L = -2$ cm	283.107
ด้านขวาของกราวด์	$L = 2$ cm	177.542
วัตถุทรงสี่เหลี่ยมวาง	$L = -2$ cm	186.137
ด้านซ้ายของกราวด์	$L = 2$ cm	51.974

#### 5. บทสรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขในแบบจำลองสองมิติ พบว่า

(1) การวางอิเล็กโทรดทางด้านซ้ายของกราวด์ เมื่อไม่มีวัสดุตัวอย่างทำให้เกิดการหมุนวนของโคโรนาในทิศทางบน ส่วนการวางอิเล็กโทรดทางด้านขวาของกราวด์จะทำให้เกิดการหมุนวนในทิศทางตรงกันข้าม

(2) พิจารณาสภาพไฟฟ้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ เมื่อไม่มีวัตถุทรงสี่เหลี่ยม พบว่าเมื่อวางอิเล็กโทรดทางด้านซ้ายของกราวด์ ( $L = -2$  cm) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดทางด้านซ้ายของกราวด์ แต่เมื่อพิจารณาอิเล็กโทรดวางทางด้านขวาของกราวด์ ( $L = 2$  cm) จะให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดเกิดทางด้านขวาของกราวด์ แต่ให้สนามไฟฟ้าเกิดแบบเดียวกัน เป็นลักษณะที่สมมาตรกัน

(3) การวางอิเล็กโทรดไว้ทางด้านซ้ายของกราวด์จะเพิ่มความเร็วลมที่ติดวอร์ทิสิตีที่ผิวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมเมื่อมีวัตถุทรงสี่เหลี่ยม อันจะส่งผลต่อการอบแห้งที่ดียิ่งขึ้นด้วย รวมทั้งงานวิจัยนี้ยังสนับสนุนงานวิจัยของ Chakranond [13] ในการวางตำแหน่งของอิเล็กโทรด กราวด์และวัตถุทรงสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมแล้ว

(4) ค่าวอร์ทิสิตีที่มีความรุนแรงยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดการลดบาวดารีเลเยอร์ที่ผิวของวัตถุที่ต้องการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวล อันจะก่อให้เกิดการอบแห้งที่เร็วยิ่งขึ้นตามไปด้วย

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย

#### คำอธิบายสัญลักษณ์



## สัญลักษณ์

$E$	สนามไฟฟ้า (V/m)
$F_E$	แรงเนื่องจากประจุ ( $C/m^2s$ )
$H_T$	ความสูงของท่อ (m)
$H$	ระยะห่างของอิเล็กโทรดแลกราวตีในแนวแกน $y$ (m)
$L_T$	ความยาวของท่อ (m)
$L$	ระยะห่างของอิเล็กโทรดแลกราวตีในแนวแกน $x$ (m)
$P$	ความดัน (Pa)
$q$	ประจุไฟฟ้า ( $C/m^3$ )
$Re$	เรย์โนลด์นัมเบอร์
$S$	วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม
$t$	เวลา (s)
$u$	ความเร็วลม (m/s)
$V$	แรงดันไฟฟ้า (kV)

## สัญลักษณ์กำกับล่าง

$in$	ทางเข้า
$o$	ขั้วอิเล็กโทรด
$x$	พิกัดในแนวแกนนอน
$y$	พิกัดในแนวแกนตั้ง

## อักษรกรีก

$\varepsilon$	เปอร์มิตติวิตีของของไหล (F/m)
$\mu$	ความหนืดพลศาสตร์ (Pa.s)
$\rho$	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )
$\omega$	วอทิวิตี ( $s^{-1}$ )

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lai, F.C. and Sharma, R.K. (2005). EHD enhanced drying with multiple needle electrodes, *J. Electrostatics*, vol. 63, pp.223-237.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kasayapanand, N. (2006). Numerical study of electrode bank enhanced heat transfer. *Applied Thermal Engineering* 26, pp.1471-1480.
- [5] Kasayapanand, N. and Kiatsiriroat, T. (2005). EHD enhanced heat transfer in wavy channel, *International communications in heat and mass transfer*, vol. 32, pp. 809-821.
- [6] Ahmedou, A.O., and Havet, M. (2009). Analysis of the EHD Enhancement of Heat Transfer in a Flat Duct, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 16, pp.489-494.
- [7] Ahmedou, A.O., Rouaud, O., and Havet, M. (2009). Assessment of the electrohydrodynamic drying process, *Food bioprocess technol* 2, pp.240-247.
- [8] Lai, F.C., and Lai, K. W., (2002). EHD-enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology*, 20(7), pp.1393-1405.
- [9] Alem, R. A., and Lai, F.C. (2005). EHD-enhanced drying of partially wetted glass beads. *Drying Technology*, 23: pp.597-609.
- [10] Lai, F.C. (2010). A prototype of EHD-enhanced drying system. *Journal of Electrostatics* 68, pp.101-104.
- [11] Huang, M., and Lai, F.C. (2010). Numerical study of EHD enhanced water evaporation, *J. Electrostatics* 68, pp.364-370.
- [12] Chakranond, C., and 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, 1049–1056.
- [13] Saneewong Na Ayuttaya, S., Chakranond, C. and Ratanadecho, P. (2010). Influence of Electrode Wire Structure on Corona Wind in a 2-D Rectangular Duct Flow (Numerical Analysis). *Paper presents in the 1<sup>st</sup> International Conference on Mechanical Engineering*, 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani, Thailand.
- [14] สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ธัชพงศ์ กรวิชรินทร์, รวิสุต สุนทรินคะ และ ปิยฉัตร บรรลุศิลป์ (2553). อิทธิพลของตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นแบบไม่มีตัวในระหว่าง กระบวนการอิเล็กโทรไดโอดนามิกส์, *การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 9)* หน้า 224 – 230, วันที่ 11-12 มีนาคม 2553, โรงแรมปัดดาเวีย รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
- [15] ธัชพงศ์ กรวิชรินทร์, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2553). ผลของการเรียงขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24*, วันที่ 20 -22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัยแกรนด์แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี