



ผลกระทบของการจัดวางอิเล็กโทรดต่อรูปแบบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม Effect of the Electrode Placement on the Flow Pattern in Square Duct

ทศพร กลิ่นมาลี*, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
*ติดต่อ: fresh_k1991@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการจัดวางอิเล็กโทรดต่อรูปแบบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม ศึกษาโดยทำการจำลองด้วยโมเดล ในรูปแบบสามมิติ ลวดอิเล็กโทรดถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหล และลวดกราวด์สองเส้นจะถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างของอุโมงค์ลมในแนวขนานกับทิศทางของการไหล โดยติดตั้งที่ระดับสูงจากผนังด้านล่างของอุโมงค์ลม 1 cm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า $V = 20$ kV ความเร็วเฉลี่ยของลมที่ทางเข้าหน้าตัดทดสอบประมาณ 0.33 m/s จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปร่าง และ ตำแหน่งของลมเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของอิเล็กโทรด การติดตั้งให้อิเล็กโทรดมีระยะเข้าใกล้ลวดกราวด์มากขึ้นจะส่งผลทำให้การไหลของลมบริเวณนั้นมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์

คำหลัก: การไหลของของไหล, สนามไฟฟ้า, อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์

Abstract

This research studies the effect of electrode placement on the flow pattern in square duct. Study by simulation with three dimensions model. Electrode wires are installed normal to flow direction and two ground wires are placed along both sidewalls of tunnel. By installing the high walls of the wind tunnel of 1 cm. The voltage test is $V = 20$ kV. The average speed at inlet is value of about 0.33 m/s. The results show that the shape and position of the flow pattern change according to the position of the electrode. Installing the electrode closer to the ground wire will result in higher velocity air flow in that area. The intensity of the electric field depends on the distance between the electrode and the ground wire.

Keywords: Fluid Flow, Electric Field, Electrohydrodynamics.

1 บทนำ

ความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นและปัญหาภาวะโลกร้อน นักวิจัยหลายคนให้ความสนใจอย่างมากในการค้นคว้าวิธีที่จะช่วยในการประหยัดพลังงาน หนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากคือ อุตสาหกรรมอบแห้ง วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ ตัวอย่างเช่น เซรามิก และ ไม้ เนื่องจากผลกระทบของชั้นการไหลบาวาร์เรลเยอร์ (Boundary layer) หรือการไหลแบบแยก (Flow separation) [1-3] จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิววัสดุจะถูกปิดกั้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาการอบแห้ง และ การใช้พลังงาน เพิ่มขึ้นมาก

การควบคุมการไหลโดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นวิธีที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ และ ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้งได้ กลไกสำคัญของวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง

อนุภาคของอากาศที่ถูกชาร์จจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจากอิเล็กโทรดไปสู่ลวดกราวด์ และสิ่งนี้นำไปสู่การถ่ายเทโมเมนตัมในหม้ออนุภาคอากาศพร้อม ๆ กัน อิทธิพลของความแตกต่างของความเร็วระหว่างชั้นการไหลของอากาศจึงทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ การหมุนวนของอากาศดังกล่าวทำให้ความชื้นและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของวัสดุพูนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก [1-4]



Chaktranond และ Rattanedecho [1] ทำการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเพื่อลดความชื้นและเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของแพคเกจซึ่งใช้แทนวัสดุพูน นอกจากนี้ยังศึกษาผลที่เกิดจากชั้นของความพรุนที่แตกต่างกัน เมื่อมีการใช้แรงดันไฟฟ้าร่วมด้วยจะส่งผลทำให้เกิดการหมุนอยู่บริเวณลวดกราวด์ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจำนวนมากบนพื้นผิวของแพคเกจ และส่งผลโดยตรงกับอัตราการอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การจัดเรียงชั้นของรูพรุนที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อแรงดันแคปิลลารี (Capillary pressure) ซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ

Lai และ Lai [5] เพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งโดยการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดทองแดงไว้ทางด้านบนบรรจุภัณฑ์ วางแผ่นกราวด์ไว้ทั้งด้านบนและด้านใต้ของแพคเกจ ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และความเร็วลมที่ทางเข้า Lai และ Wang [6] พบว่าการให้ความร้อนใต้แพคเกจสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้มากขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของลมโคโรนามีประสิทธิภาพสูงเมื่อความชื้นสูงซึ่งจะอยู่ในช่วงต้นของการอบแห้ง

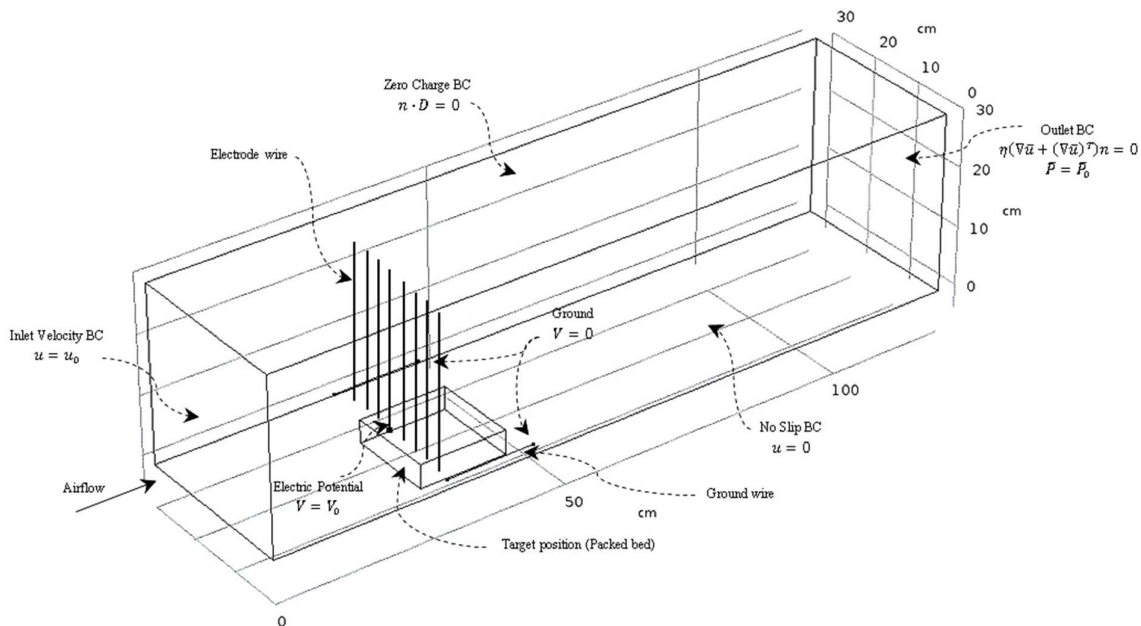
Ahmedou and Havet [7] ทำการจำลองการไหลในแบบสองมิติเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้สนามไฟฟ้าร่วม ในการจำลองลวดอิเล็กโทรดถูกสมมติให้เป็นจุด อิเล็กโทรดจะถูกติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งตรงกลางของโดเมน ลวดกราวด์จะถูกติดตั้งไว้ที่ผนัง

ด้านล่าง และที่ผนังด้านล่างยังมีการให้ความร้อน ผลการศึกษาพบว่า การไหลของอากาศที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ต่ำลมโคโรนาจะสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นไปถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้าร่วม

Saenewong Na Ayuttaya และ คณะ [8] ศึกษาการไหลของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าด้วยการจำลองในรูปแบบสองมิติซึ่งสมมติว่าอิเล็กโทรดและลวดกราวด์เป็นวงกลมเล็กๆ ผลการวิจัยพบว่าความเร็วลมที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์

Ghassem Heidarinejad และ Reza Babaei [9] ทำการจำลองโดยใช้วิธี large eddy simulations เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยของน้ำโดยสนามไฟฟ้าที่เรียกว่า Electrohydrodynamics (EHD) ผลการศึกษาพบว่าอัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้นเมื่อใช้สนามไฟฟ้า นอกจากนี้อิทธิพลที่เกิดจาก EHD จะลดต่ำลงเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) สูงขึ้น

งานวิจัยนี้จะทำการจำลองในรูปแบบสามมิติเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและรูปแบบการไหลของอากาศที่เป็นมาจากแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยทำตามการทดลองที่ทำโดย Nuknan และคณะ [10] ในการทดลองของ Nuknan et al. [10] แพคเกจจะทางด้านใต้อุโมงค์ลม บทความนี้มุ่งเน้นไปที่อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อรูปแบบการไหลของอากาศ ดังนั้นจึงไม่สนใจการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 1 โดเมน และ เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ



2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รูปที่ 1 แสดงขนาดของโดเมนที่ใช้การคำนวณ ยาว 1.2 m x กว้าง 0.3 m x สูง 0.3 m ในแบบจำลองจะสมมติให้อิเล็กโทรด(Electrode) เป็นจุด และ ลวดกราวด์ (Ground wire) จะสมมติให้เป็นเส้น อยู่กึ่งกลางด้านข้างของแบบจำลอง ห่างจากผนังด้านข้าง 1 cm และ สูงจากพื้นขึ้นมา 1 cm รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้า และ ลวดกราวด์

การไหลของอากาศภายในโดเมนสามารถคำนวณได้จากสมการของความต่อเนื่อง และ สมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลนิวโตเนียนและเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอโดยกำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 0.33 m/s และที่ทางออกเป็นความดันที่ไม่มีน้ำหนัก(Pressure, no viscous stress) มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ($P_0=101$ kPa) ผนังด้านบนและด้านล่างเป็นกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถล(No slip boundary condition) ความเร็วเท่ากับศูนย์ และ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลจะถือว่าเป็นค่าคงที่

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

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}_{ee} \quad (2)$$

เมื่อ \vec{u} คือ ความเร็วของอากาศ, t คือ เวลา, \bar{p} คือ ความดัน, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.06 kg/m^3), μ คือ ความหนืด ($19.99 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$), และ \vec{F}_{ee} คือ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า หรือ แรงคูลอมสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

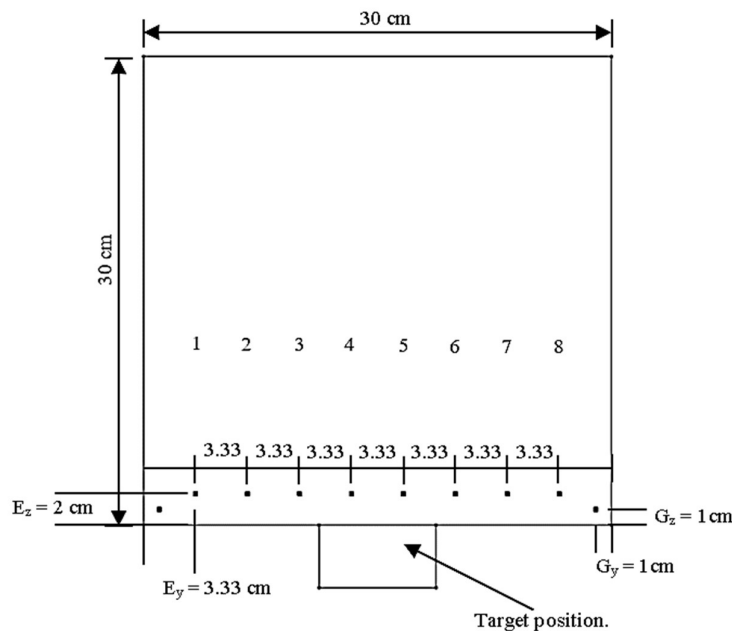
$$\vec{F}_{ee} = q\vec{E} \quad (3)$$

เมื่อ q คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า(space charge density) และ \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า สำหรับสนามไฟฟ้าสามารถทำการคำนวณได้จากสมการของแมกซ์เวลล์

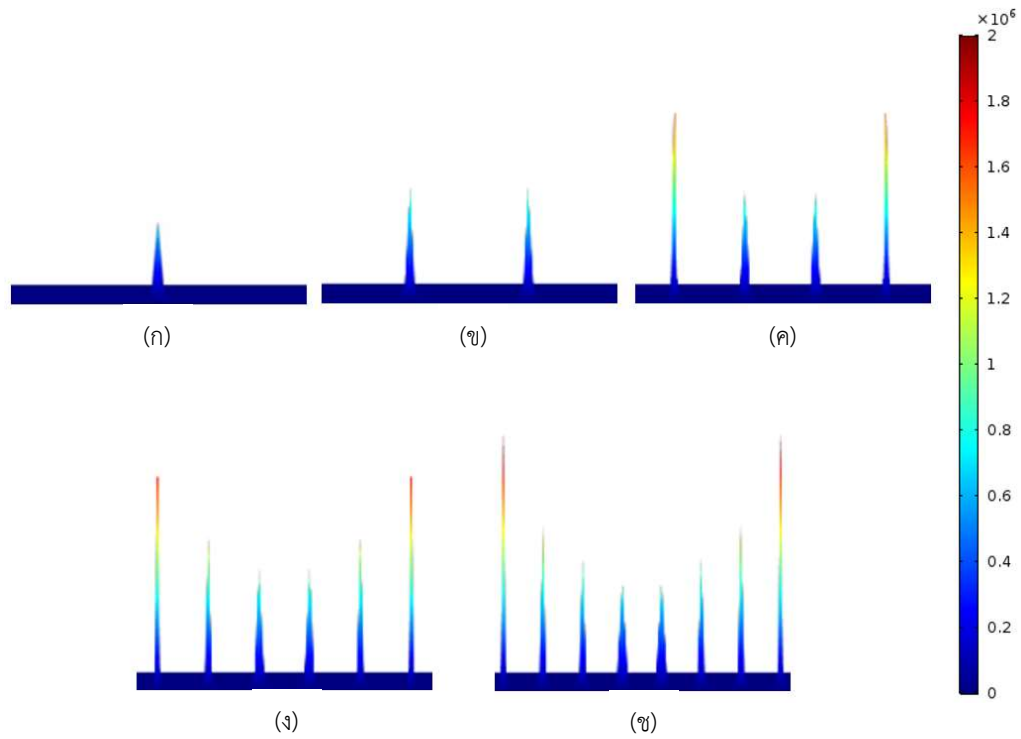
$$q = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

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

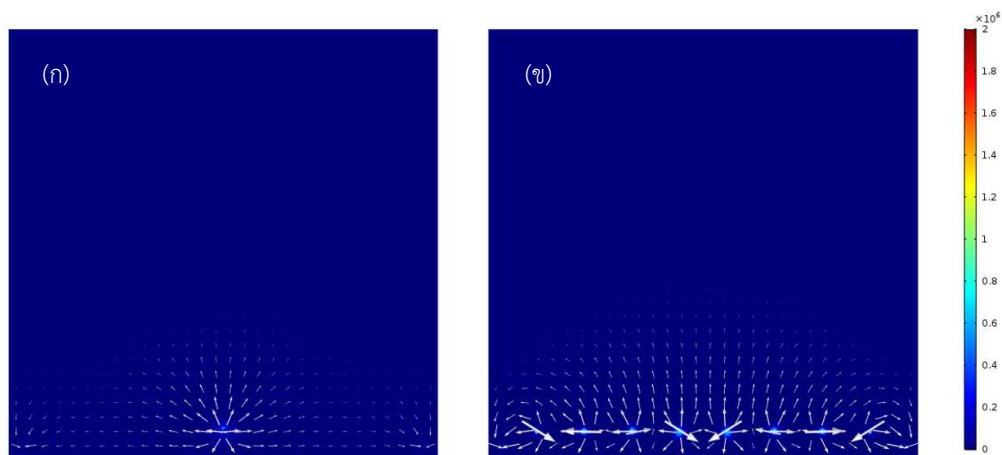
เมื่อ ϵ คือ ค่าเพอร์มิติวิตีของอากาศอิสระ ($8.85522 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) และ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลวดไฟฟ้า สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลอง จะแสดงไว้ดังรูปที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลวดไฟฟ้า และ ลวดกราวด์ มีค่าเท่ากับ $V =$



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้าและลวดกราวด์



รูปที่ 3 สนามไฟฟ้าในแต่ละกรณีโดย n คือ จำนวนของอิเล็กโทรด : (ก) $n = 1$,
(ข) $n = 2$, (ค) $n = 4$, (ง) $n = 6$, และ (ช) $n = 8$



รูปที่ 4 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ y-z : (ก) $n = 1$, (ข) $n = 8$



20 kV และ $V = 0$ ตามลำดับ กำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตบริเวณผนังของโดเมนสนามไฟฟ้ามีค่าประจุเป็นศูนย์ดังสมการที่ (6)

$$n \cdot D = 0 \quad (6)$$

เมื่อ n คือ ทิศทางออกเป็นบวก และ D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า การคำนวณจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณประมาณ 100000 เอลิเมนต์ เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของซีพียู และ หน่วยความจำของตัวเครื่อง อย่างไรก็ตามยังเพียงพอสำหรับการจำลองในครั้งนี้ ทำการแก้สมการควบคุมโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.4

3 ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

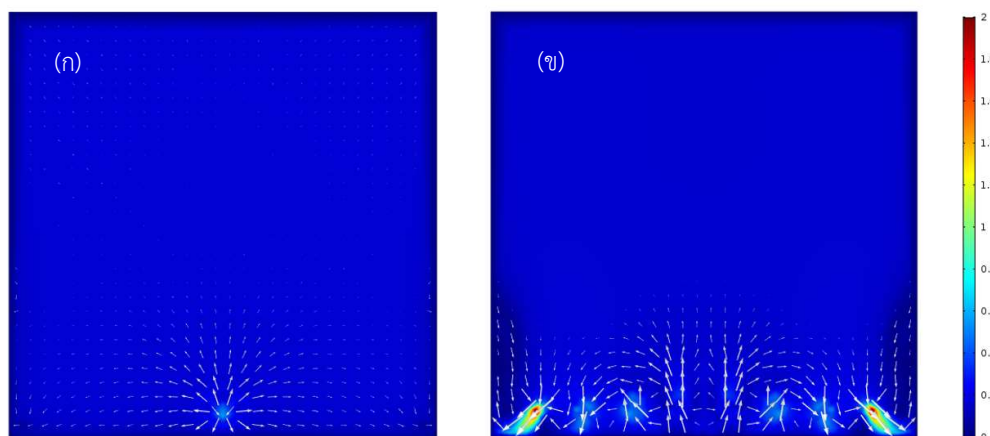
รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ $x-z$ ในแต่ละกรณี โดยจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 กรณี สำหรับกรณี (ก) จะทำการติดตั้งอิเล็กโทรดจำนวน 1 เส้น หรือ $n = 1$ โดยที่ n คือ จำนวนเส้นของอิเล็กโทรด กรณี (ข) $n = 2$, กรณี (ค) $n = 4$, กรณี (ง) $n = 6$, และ กรณี (ช) $n = 8$ จากรูปเห็นได้ชัดว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กโทรด เมื่อทำการสังเกตแต่ละเส้นจะพบว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะสูงที่สุดที่ตำแหน่งปลายอิเล็กโทรด จากนั้นจะลดลงเมื่อระยะ r เพิ่มขึ้น เมื่อ r คือ ระยะห่าง

โดยวัดจากจุดศูนย์กลางของอิเล็กโทรด จากการจำลองพบว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับ r^2 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะ d เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าลดลงด้วยเช่นกันซึ่ง d คือ ระยะห่างโดยวัดจากตำแหน่งลวดกราวด์ ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับ d^2

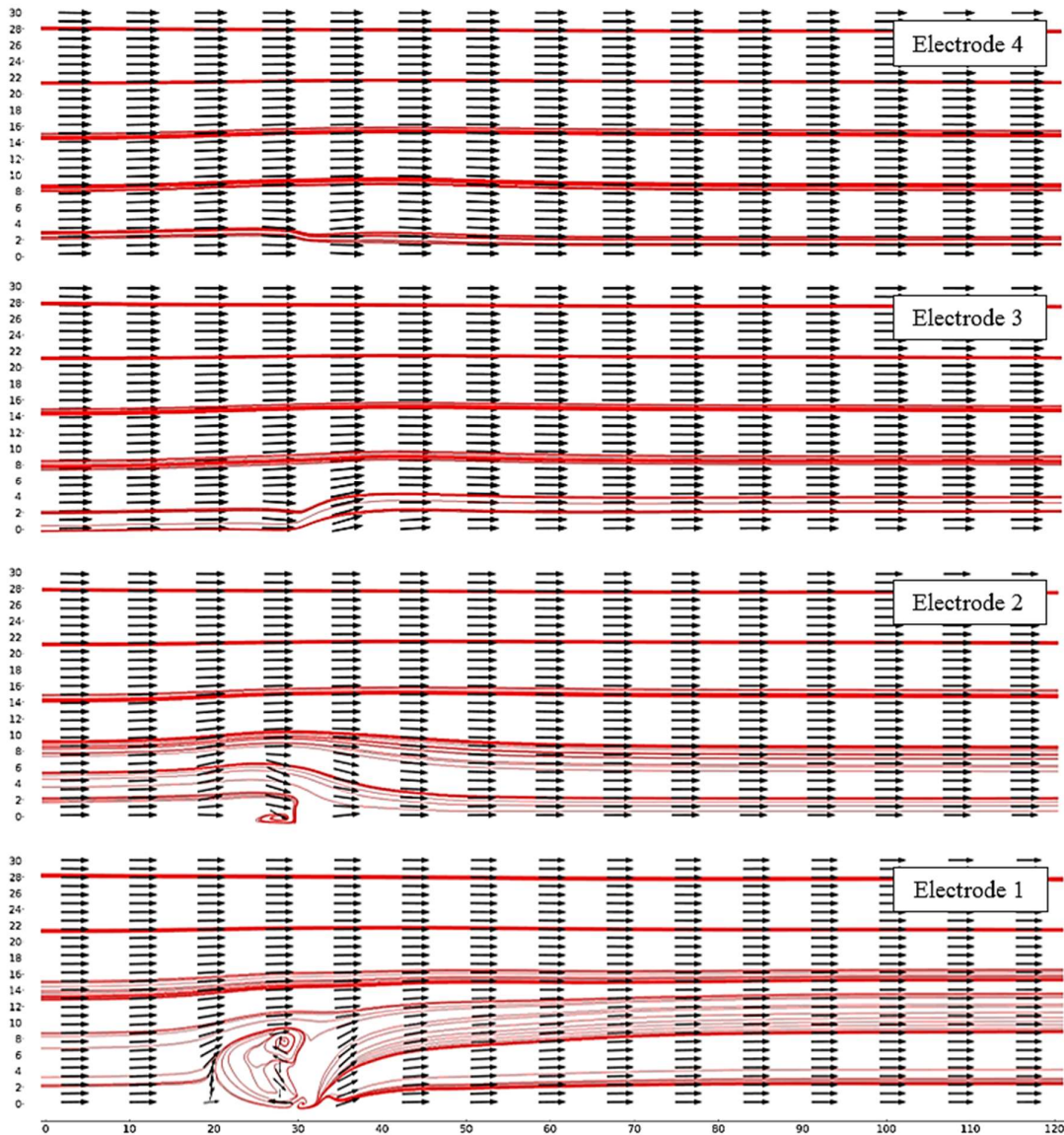
รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ $y-z$ ระหว่างอิเล็กโทรด 1 เส้น และ 8 เส้น จากรูปพบว่าเมื่อจำนวนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์ลดลง การที่ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

3.2 รูปแบบการไหลภายใต้สนามไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ $y-z$ ระหว่างอิเล็กโทรด 1 เส้น และ 8 เส้น จากรูปพบว่าความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในกรณีอิเล็กโทรด 8 เส้น มีความเร็วลมที่มากกว่ากรณีอิเล็กโทรด 1 เส้น อย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าในกรณีอิเล็กโทรด 8 เส้น จะมีความเข้มที่สูงกว่าโดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งใกล้ลวดกราวด์ นอกจากนี้บริเวณนั้นยังพบว่าลมบางส่วนมีการไหลวนซึ่งการไหลวนนี้ก็เป็นผลมาจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5 ความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ $y-z$: (ก) $n = 1$, (ข) $n = 8$



รูปที่ 6 ความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 8 เส้น

รูปที่ 6 แสดงความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 8 เส้น จากรูปพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลวนของอากาศได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง Electrode 1 (ที่ตำแหน่ง $E_x = 30$ cm, $E_y = 3.3333$ cm) จะเกิดการไหลวนค่อนข้างมากซึ่งเป็นผลจากตำแหน่งที่ใกล้กับลวดกราวด์มากที่สุด การไหลวนดังกล่าวยังสามารถช่วยทำลายชั้นการไหลบาวาร์เลเยอร์ได้อีกด้วย ณ ตำแหน่ง Electrode 2 (ที่ตำแหน่ง $E_x = 30$ cm,

$E_y = 6.6666$ cm) ก็จะมียังมีการไหลวนแต่จะไม่เท่ากับตำแหน่ง Electrode 1 เมื่อระยะห่างโดยวัดจากตำแหน่งลวดกราวด์ (d) เพิ่มขึ้นอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะลดลงซึ่งส่งผลทำให้ไม่เกิดการไหลวน ในบริเวณ Electrode 3 (ที่ตำแหน่ง $E_x = 30$ cm, $E_y = 9.9999$ cm) และ Electrode 4 (ที่ตำแหน่ง $E_x = 30$ cm, $E_y = 13.3332$ cm) อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ลดลงในบริเวณดังกล่าวจึงพอที่จะสามารถเหนี่ยวนำการไหลของอากาศในบริเวณนั้นให้มีทิศทาง



เปลี่ยนไปจากการไหลหลัก(Main flow) ได้บ้างเล็กน้อยซึ่งสังเกตได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6

4 สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการไหลของอากาศเนื่องจากสนามไฟฟ้าผ่านการจำลองในแบบสามมิติ จากผลการจำลองทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

- ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงที่บริเวณปลายของอิเล็กโทรด และ จะลดลงอย่างมากเมื่อยิ่งห่างออกจากจุดศูนย์กลางของอิเล็กโทรด ($E \propto 1/r^2$) นอกจากนี้ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ ลวดกราวด์ ($E \propto 1/d^2$)

- ณ บริเวณตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด จะส่งผลทำให้บริเวณตำแหน่งนั้นมีความเร็วของลมสูงสุดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการไหลวนของอากาศ ณ บริเวณนั้นอีกด้วย

5 เอกสารอ้างอิง

- [1] 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*, vol. 34, pp. 1049 - 1056.
- [2] Wang, W., Yang, L., Wu, K., Lin, C., Huo, P., Liu, S., Huang, D., and Lin, M. (2017). Regulation- controlling of boundary layer by multi-wire-to-cylinder negative corona discharge, *Thermal Engineering*, vol. 119, pp. 438 - 448.
- [3] Lai, F.C., and Zhang, J. (2011). Effect of emitting electrode number on the performance of EHD gas

pump in a rectangular channel, *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 486 - 493.

[4] Lee, J.R., and Lau. E.V. (2017). Effects of relative humidity in the convective heat transfer over flat surface using ionic wind, *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 554 - 560.

[5] Lai, F.C., and Lai, K.W. (2002). EHD-Enhanced drying with wire electrode, *Drying Technology*, vol. 20, pp. 1393 - 1405.

[6] Lai, F.C., and Wang, C.C. (2009). EHD-enhanced water evaporation from partially wetted glass beads with auxiliary heating from below, *Drying Technology*, vol. 27, pp. 1199 - 1204.

[7] Ahmedou, A.O., Rouaud, O., and Havet, M. (2009). Assessment of the electrohydrodynamic drying process, *Food Bioprocess Technology*, vol. 2, pp. 240 - 247.

[8] Sanewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C., and Rattanadecho, P. (2013). Numerical analysis of electric force influence on heat transfer in a channel flow (Theory based on saturated porous medium approach), *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, pp. 361 - 374.

[9] Heidarinejad, G., and Babaei, R. (2015). Numerical investigation of electrohydrodynamics (EHD) enhanced water evaporation using large eddy simulation turbulent model, *Journal of Electrostatics*, vol. 77, pp. 76 - 87.

[10] Chaktranond, C., Nuknan., N., and Rattanadecho, P. (2014). Investigation of spiral flow generation using electrohydrodynamics for enhancement of hot-Air drying efficiency, *Thai Science and Technology Journal*, vol. 22, pp. 906 - 913