อิทธิพลของตำแหน่งลวดอิเล็กโทรดต่อสนามไฟฟ้าและรูปแบบการไหลภายในท่อ
Influence of Electrode Wire Position on Electric Fields and Flow Pattern in Duct

ทศพร กลิ่นมาลี[1*], ไชยณรงค จักรธรานนท์[1]

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งลวดอิเล็กโทรดต่อสนามไฟฟ้าและรูปแบบการไหลภายในท่อ ศึกษาโดยทำการจำลองด้วยโมเดลในรูปแบบสามมิติ ลวดอิเล็กโทรดถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหล และ ลวดกราวด์สองเส้นจะถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างของอุโมงค์ลมในแนวขนานกับทิศทางการไหล โดยติดตั้งที่ระดับสูงจากผนังด่านล่างของอุโมงค์ลม 1 cm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า V = 20 kV ความเร็วเฉลี่ยของลมที่ทางเข้าหน้าตัดทดสอบประมาณ 0.33 m/s จากผลการจำลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งลวดอิเล็กโทรด และ ลวดกราวด์ส่งผลทำให้ตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด และความเร็วลมสูงสุดเปลี่ยนแปลงไป ความเข้มของสนามไฟฟ้ายังคงขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ ลวดกราวด์ สนามไฟฟ้า และ รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งลวดอิเล็กโทรด

คำหลัก: การไหลของของไหล, สนามไฟฟ้า, อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์

Abstract

This research studies influence of electrode wire position on electric fields and flow pattern in duct. The study by simulation with three dimensions model. Electrode wires are installed perpendicular to flow direction and two ground wires are placed along both sidewalls of the tunnel. By installing the high walls of the wind tunnel of 1 cm. The voltage test is V = 20 kV. The average speed at the inlet is a value of about 0.33 m/s. The numerical results show that when relocating the electrode wire and ground wire, the maximum electric field intensity and the maximum airflow velocity changed. The intensity of the electric field still depends on the distance between the electrode and the ground wire. The electric field and the flow pattern depend on electrode wire position.

Keywords: Fluid Flow, Electric Field, Electrohydrodynamics.

1 บทนำ

ความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นและปัญหาภาวะโลกร้อน นักวิจัยหลายคนให้ความสนใจอย่างมากในการค้นคว้าวิธีที่จะช่วยในการประหยัดพลังงาน หนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากคือ อุตสาหกรรมอบแห้ง วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ ตัวอย่างเช่น เซรามิก และ ไม้ เนื่องจากผลกระทบของชั้นการไหลบาวดารี่เลเยอร์(Boundary layer) หรือการไหลแบบแยก (Flow separation) [1-3] จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิววัสดุจะถูกปิดกั้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาการอบแห้งและ การใช้พลังงาน เพิ่มสูงขึ้นมาก

การควบคุมการไหลโดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นวิธีที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ และ ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้งได้ กลไกสำคัญของวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศโดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง

อนุภาคของอากาศที่ถูกชาร์จจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจากอิเล็กโทรดไปสู่ลวดกราวด์ และสิ่งนี้นำไปสู่การถ่ายเทโมเมนตัมในหมู่อนุภาคอากาศพร้อม ๆ กัน อิทธิพลของความแตกต่างของความเร็วระหว่างชั้นการไหลของอากาศจึงทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ การหมุนวนของอากาศดังกล่าว

ทำให้ความชื้นและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของวัสดุพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก [1-4]

Chaktranond และ Rattanedecho [1] ทำการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเพื่อลดความชื้นและ เพิ่มการถ่ายเทความร้อนของแพคเบดซึ่งใช้แทนวัสดุพรุน นอกจากนี้ยังศึกษาผลที่เกิดจากชั้นของความพรุนที่แตกต่างกัน เมื่อมีการใช้แรงดันไฟฟ้าร่วมด้วยจะส่งผลทำให้เกิดการหมุนอยู่บริเวณลวดกราวด์ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจำนวนมากบนพื้นผิวของแพคเบด และส่งผลโดยตรงกับอัตราการอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การจัดเรียงชั้นของรูพรุนที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อแรงดันแคพิลลารี(Capillary pressure) ซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ

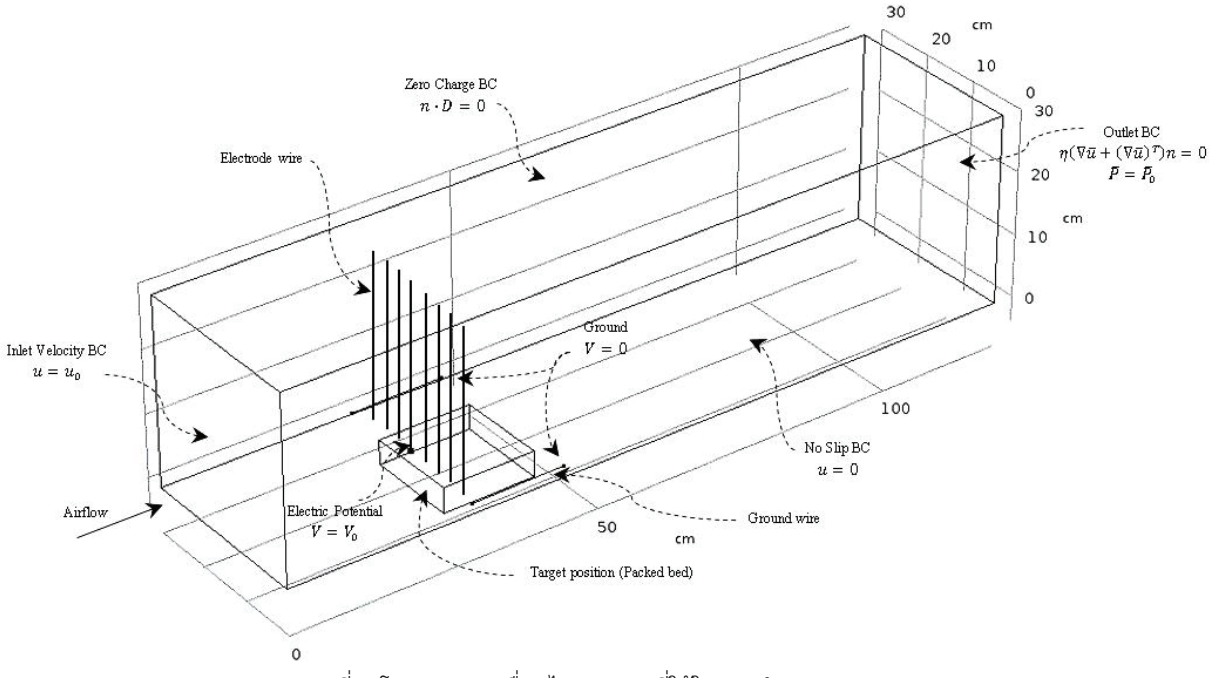
Lai และ Lai [5] เพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งโดยการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดทองแดงไว้ทางด้านบนบรรจุภัณฑ์ วางแผ่นกราวด์ไว้ทั้งด้านบนและด้านใต้ของแพคเบด ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และความเร็วลมที่ทางเข้า Lai และ Wang [6] พบว่าการให้ความร้อนใต้แพคเบดสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้มากขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของลมโคโรนามีประสิทธิภาพสูงเมื่อความชื้นสูงซึ่งจะอยู่ในช่วงต้นของการอบแห้ง

Ahmedou and Havet [7] ทำการจำลองการไหลในแบบสองมิติเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้สนามไฟฟ้าร่วม ในการจำลองลวดอิเล็กโทรดถูกสมมุติให้เป็นจุด อิเล็กโทรดจะถูกติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งตรงกลางของโดเมน ลวดกราวด์จะถูกติดตั้งไว้ที่ผนังด้านล่าง และที่ผนังด้านล่างยังมีการให้ความร้อน ผลการศึกษาพบว่าการไหลของอากาศที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ต่ำลมโคโรน่าจะสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้าร่วม

Saenewong Na Ayuttaya และ คณะ [8] ศึกษาการไหลของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าด้วยการจำลองในรูปแบบสองมิติซึ่งสมมติว่าอิเล็กโทรดและลวดกราวด์เป็นวงกลมเล็ก ๆ ผลการวิจัยพบว่าความเร็วลมที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์

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

งานวิจัยนี้จะทำการจำลองในรูปแบบสามมิติเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า และ รูปแบบการไหลของอากาศที่เป็นมาจากแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยทำตามการทดลองที่ทำโดย Nuknan และคณะ [10] ในการทดลองของ Nuknan และคณะ [10] แพคเบดจะทางด้านใต้อุโมงค์ลม 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 ในแบบจำลองจะสมมุติให้อิเล็กโทรด(Electrode) เป็นจุด และ ลวดกราวด์ (Ground wire) จะสมมุติให้เป็นเส้น อยู่ที่ผนังด้านข้างของแบบจำลองห่างจากผนังด้านข้าง 1 cm และ สูงจากพื้นขึ้นมา 1 cm รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้า และ ลวดกราวด์ รูปแบบเดิม

รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้า และ ลวดกราวด์รูปแบบใหม่ โดยทำการย้ายตำแหน่งลวดกราวด์ให้เข้าไปใกล้กับตำแหน่งที่สนใจ(Target position)ตำแหน่งของลวดกราวด์ (Ground wire) จะถูกติดตั้งห่างจากผนังด้านข้าง 10.25 cm และ สูงจากพื้นขึ้นมา 1 cm

การไหลของอากาศภายในโดเมนสามารถคำนวณได้จากสมการของความต่อเนื่อง และ สมการนาเวียร์-สโตกส์ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลนิวโตเนียนและเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอโดยกำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 0.33 m/s และที่ทางออกเป็นความดันที่ไม่มีความบรรยากาศ(P_0=101 kPa) ผนังด้านบนและด้านล่างเป็นกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถล(No slip boundary condition) ความเร็วเท่ากับศูนย์ และ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลจะถือว่าเป็นค่าคงที่

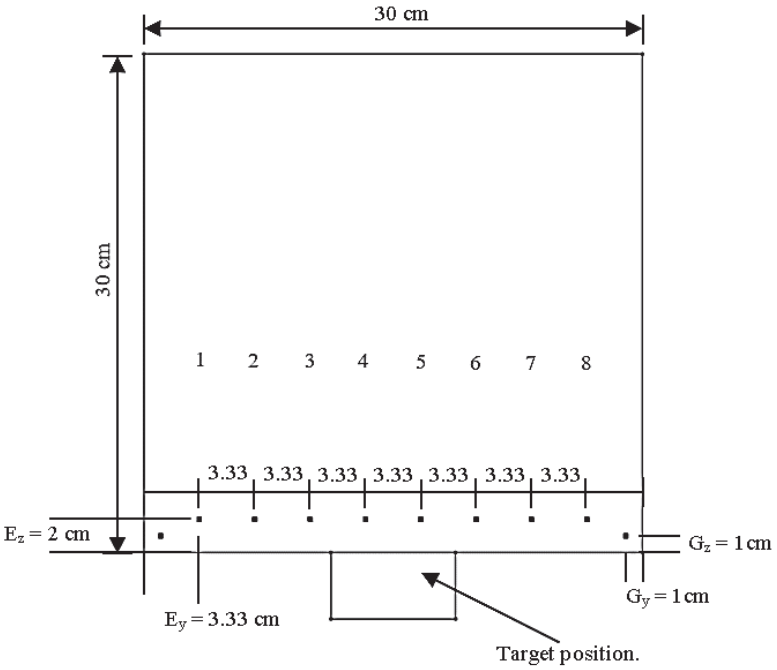
$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

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

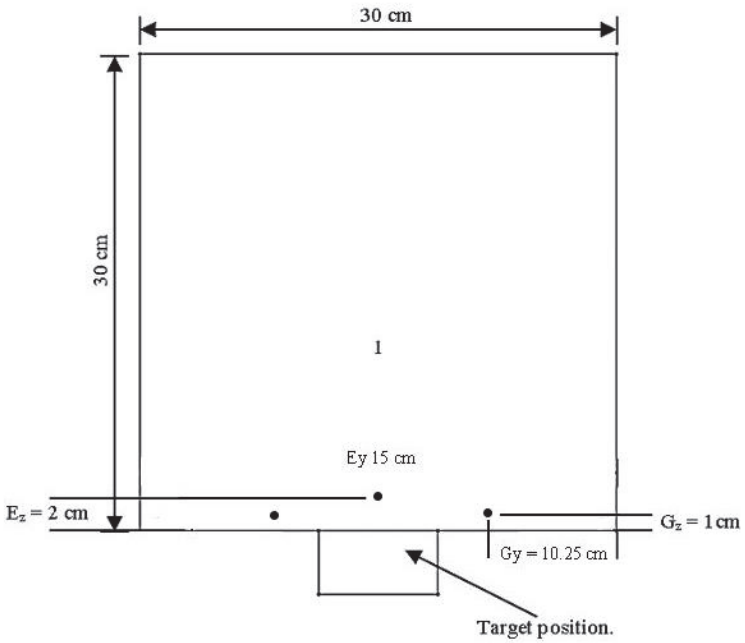
เมื่อ $\vec{u}$ คือ ความเร็วของอากาศ, t คือ เวลา, $\vec{p}$ คือ ความดัน, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.06 kg/m^3), μ คือ ความหนืด (19.99×10^{-6} Pa.s), และ Fee คือ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า หรือ แรงคูลอมสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\vec{F}_{ee} = q\vec{E} \tag{3}$$

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



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้าและลวดกราวด์



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งลวดไฟฟ้าและลวดกราวด์รูปแบบใหม่

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

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

เมื่อ ε คือ ค่าเพอร์มิติวิตี้ของอากาศอิสระ (8.85522 $\times 10^{-12}$ F/m) และ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลวดไฟฟ้า สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลอง จะแสดงไว้ดังรูปที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลวดไฟฟ้า และ ลวดกราวด์ มีค่าเท่ากับ V = 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 เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของซีพียูและ หน่วยความจำของตัวเครื่อง อย่างไรก็ตามยังเพียงพอสำหรับการจำลองในครั้งนี้ ทำการแก้สมการควบคุมโดยใช้โปรแกรม COMSOL Muliphysics 4.4

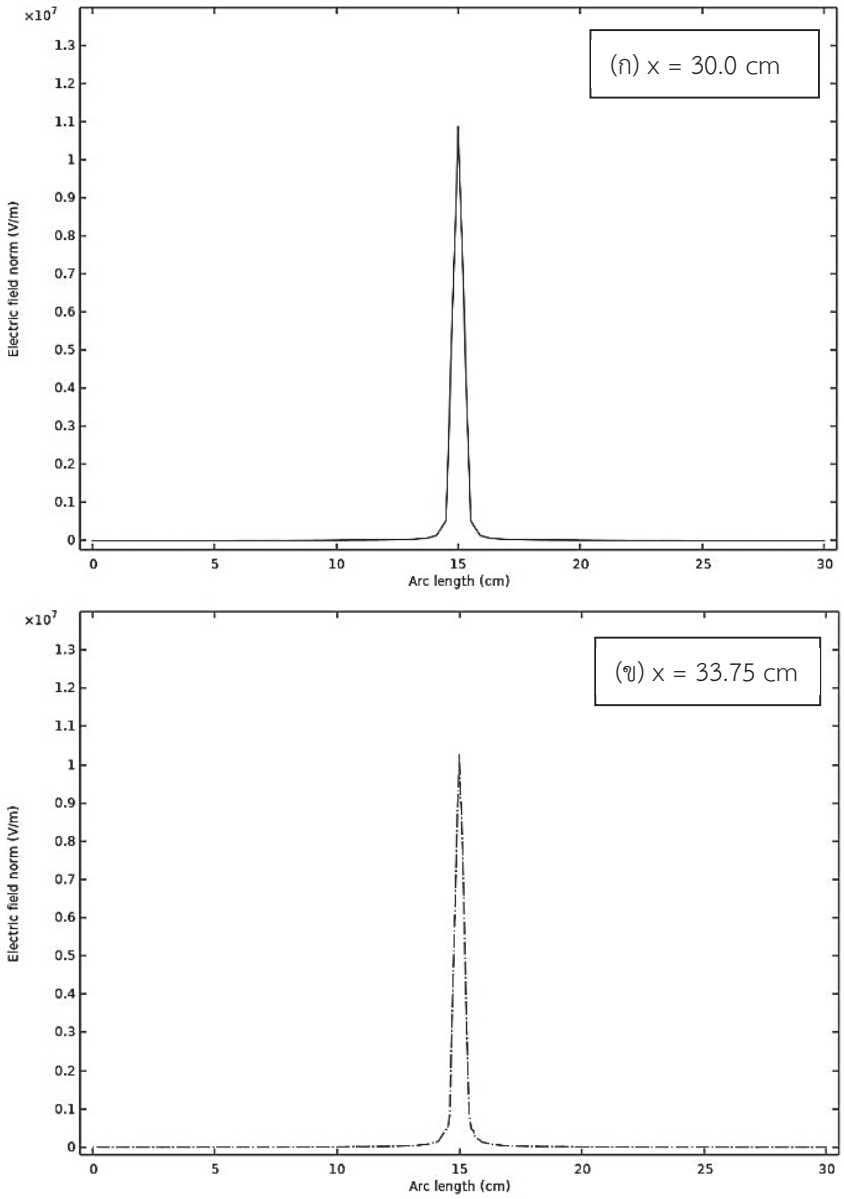
3 ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ y-z ในสองกรณี (ก) x = 30 cm (ข) x = 33.75 cm จะทำการติดตั้งอิเล็กโทรดจำนวน 1 เส้น หรือ n = 1 โดยที่ n คือจำนวนเส้นของอิเล็กโทรด จากรูปเห็นได้ชัดว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า เมื่อทำการสังเกตแต่ละเส้นจะพบว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะสูงที่สุดที่ตำแหน่งปลายอิเล็กโทรด จากนั้นจะลดลงเมื่อระยะ r เพิ่มขึ้น เมื่อ r คือ ระยะห่างโดยวัดจากจุดศูนย์กลางของอิเล็กโทรด จากการจำลองพบว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับ r^5 ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา แม้จะทำการขยับลวดกราวด์มาใกล้กับตำแหน่งที่สนใจ(Target position) แต่สนามไฟฟ้ามีค่าลดลง

รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ y-z ในสองกรณี (ก) x = 30 cm (ข) x = 33.75 cm เมื่อทำการเลื่อนลวดไฟฟ้าไปตามแนวแกน x พบว่าตำแหน่งของสนามไฟฟ้าสูงสุดก็เกิดการเลื่อนไปตามลดไฟฟ้าด้วยเช่นกันซึ่งการเลื่อนของตำแหน่งไฟฟ้าสูงสุดนี้จะส่งผลกับการไหลของอากาศโดยตรง

นอกจากนี้ยังพบว่าความเข่มของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ ลวดกราวด์ สังเกตได้จากการที่เมื่อระยะห่างทางแกน y เปลี่ยนไปซึ่งระยะที่ y = 15



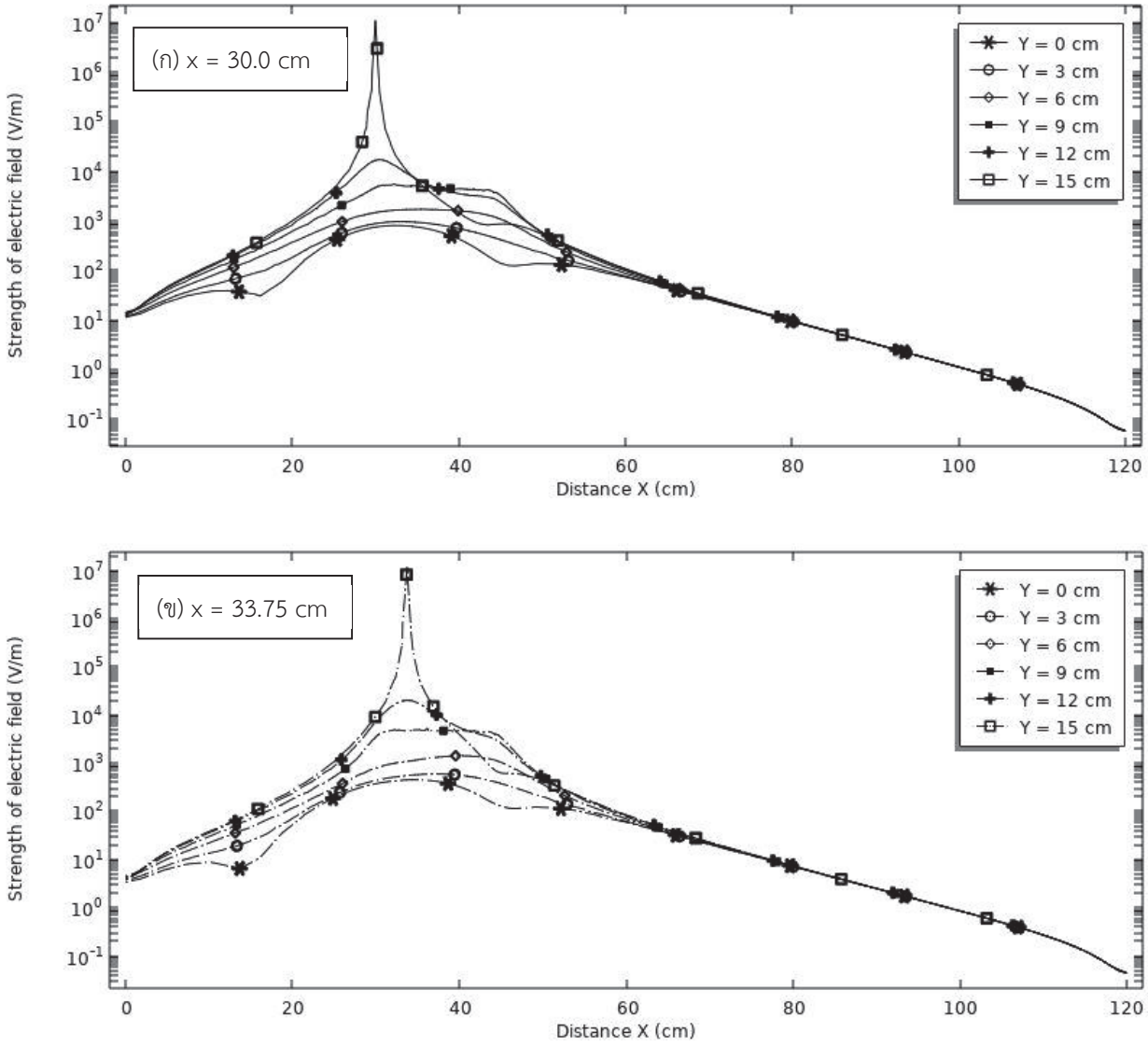
รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ y-z ในสองกรณี (ก) x = 30 cm (ข) x = 33.75 cm

cm จะมีความเข้มของสนามฟ้าสูง เพราะตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งของลวดไฟฟ้า แต่จะค่อย ๆ ลดลงที่ y = 12 และ 9 cm ส่วนที่ตำแหน่ง y = 0, 3 และ 6 cm นั้นเป็นตำแหน่งที่ไม่ค่อยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

3.2 รูปแบบการไหลภายใต้สนามไฟฟ้า

รูปที่ 6 แสดงความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 1 เส้น x = 30 cm y = 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 cm จากรูปพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลวนของอากาศได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าที่ตำแหน่งลวดไฟฟ้า (ที่ตำแหน่ง x = 30 cm, y = 15 cm) จะเกิดการไหลวนค่อนข้างมาก การไหลวนดังกล่าวยังสามารถช่วยทำลายชั้นการไหลบาวดารี่เลเยอร์ได้อีกด้วย เมื่อระยะห่างโดยวัดจากตำแหน่งลวดกราวด์(d) เพิ่มขึ้นอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะลดลงซึ่งส่งผล อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ลดลงในบริเวณอื่น ๆ (y = 0, 3, 6 และ 9 cm) ยังไม่พอที่จะสามารถเหนี่ยวนำการไหลของอากาศในบริเวณนั้นให้มีทิศทาง เปลี่ยนไปจากการไหลหลัก(Main flow) ได้

แต่จะพบว่าที่ y = 12 cm ยังสามารถที่จะเหนี่ยวนำการไหลได้บางส่วนเนื่องจากยังคงเป็นบริเวณที่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้า แต่ยิ่งเข้าใกล้ลวดกราวด์อิทธิพลของสนามไฟฟ้าก็จะค่อย ๆ อ่อนลง แสดงให้เห็นที่ตำแหน่ง y = 0, 3, 6



รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระนาบ y-z ในสองกรณี (ก) x = 30 cm (ข) x = 33.75 cm

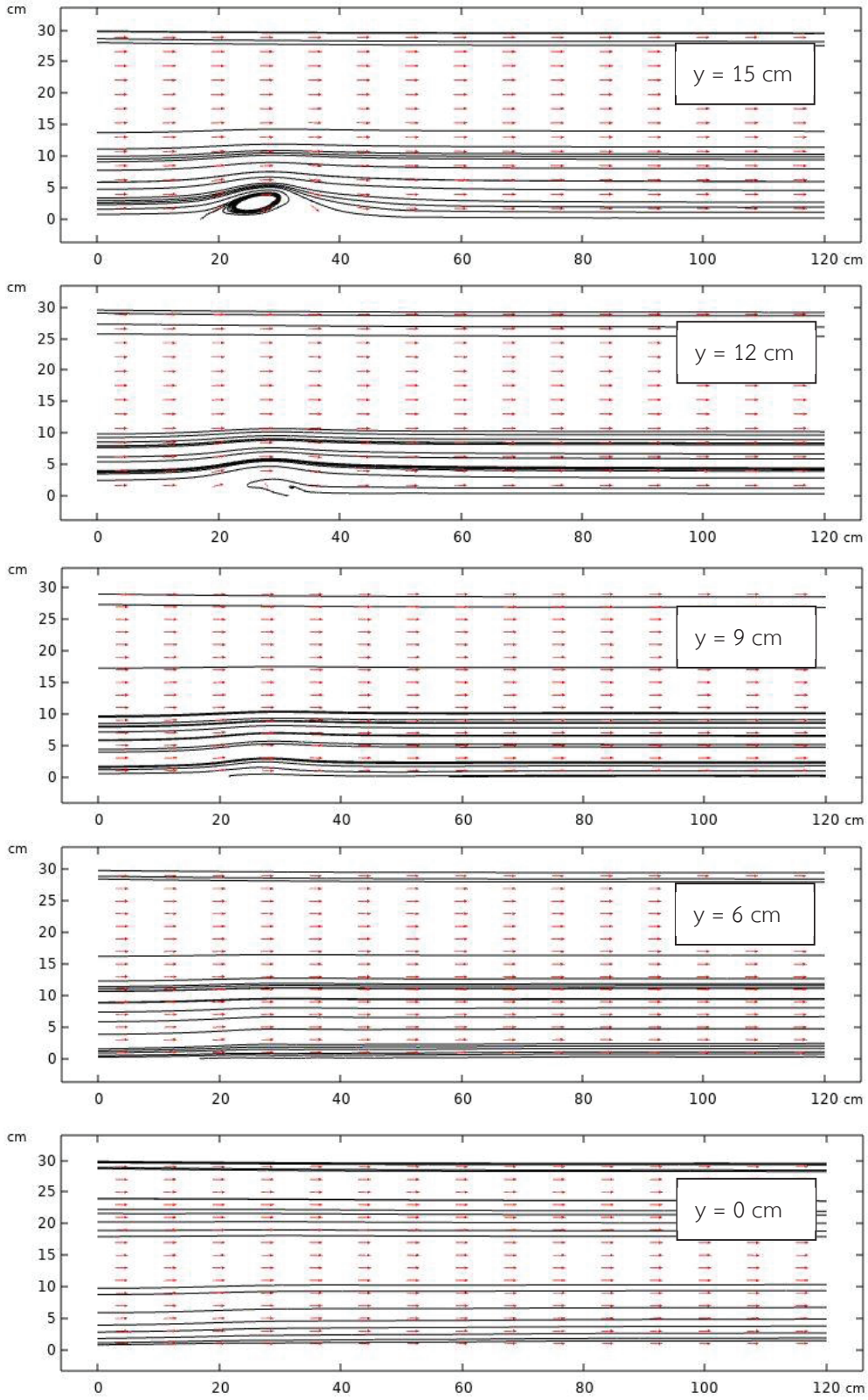
และ 9 cm การไหลบริเวณนั้นจะไม่มีการหมุนวนหรือเกิดการปั่นป่วนแต่อย่างใด หรือ ถ้าเกิดก็เกิดน้อยมาก

รูปที่ 7 แสดงความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 1 เส้น x = 33.75 cm y = 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 cm จะสังเกตว่าตำแหน่งของการหมุนวนที่เกิดบริเวณ y = 15 cm จะเลื่อนไปทาง x = 33.75 cm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเหนี่ยวนำการไหลเป็นผลมาจากตำแหน่งของลวดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ระยะ y = 0, 3, 6, 9 และ 12 รูปแบบการไหลก็จะคล้ายกับ ที่ตำแหน่ง x = 30 cm ซึ่งได้อธิบายไปในข้างต้น

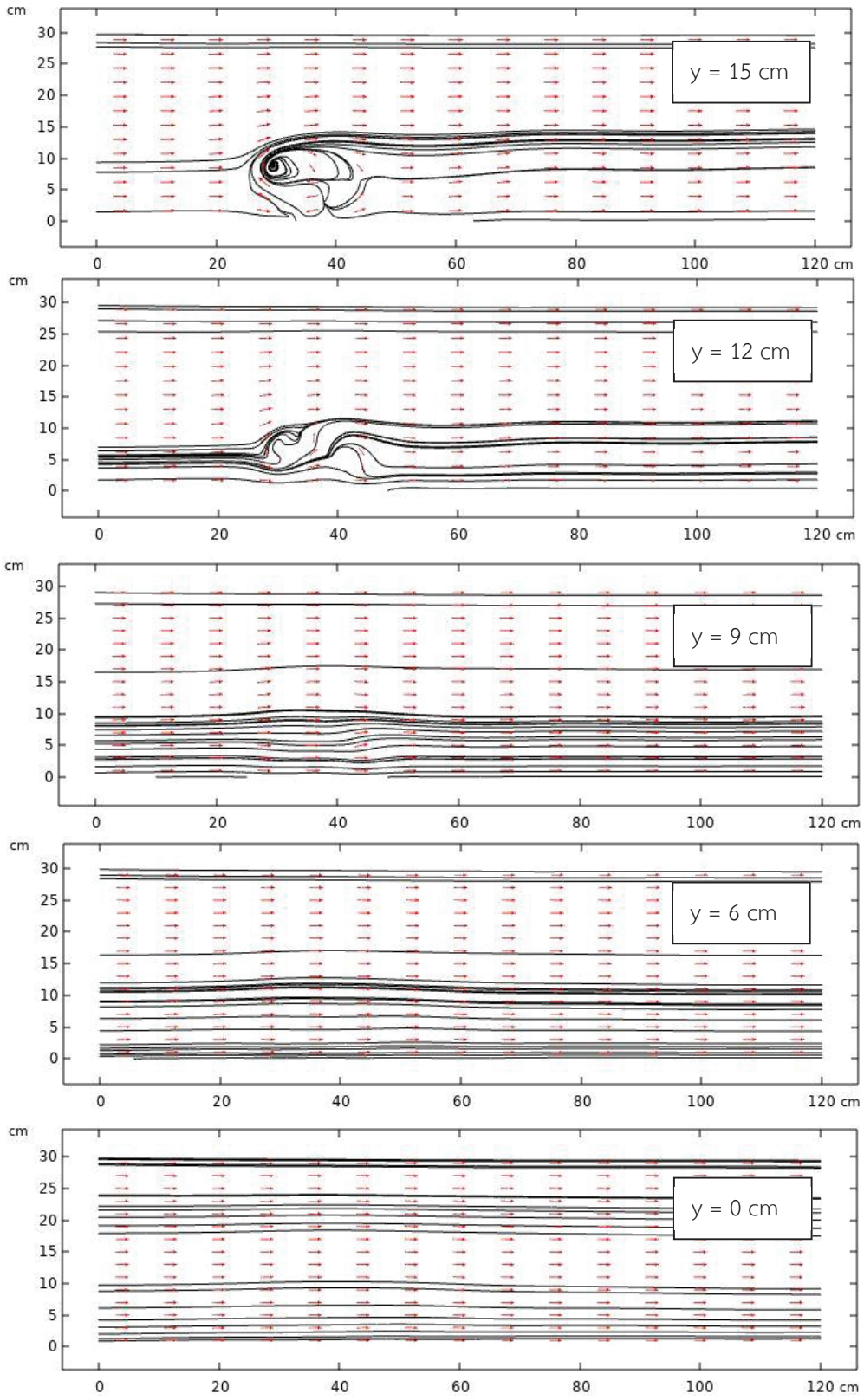
4 สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการไหลของอากาศเนื่องจากสนามไฟฟ้าผ่านการจำลองในแบบสามมิติ จากผลการจำลองทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

- ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงที่บริเวณปลายของอิเล็กโทรด และ จะลดลงอย่างมากเมื่อยิ่งห่างออกจากจุดศูนย์กลางของอิเล็กโทรด ($E \propto 1/r^5$) นอกจากนี้ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และลวดกราวด์แม้จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของลวดกราวด์ และลวดไฟฟ้า



รูปที่ 6 แสดงความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 1 เส้น x = 30 cm y = 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 cm



รูปที่ 7 แสดงความเร็วลมเนื่องจากสนามไฟฟ้าในระนาบ x-z ในกรณีอิเล็กโทรด 1 เส้น x = 33.75 cm y = 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 cm

- ณ บริเวณตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดจะส่งผลทำให้บริเวณตำแหน่งนั้นมีความเร็วของลมสูงสุดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการไหลวนของอากาศ ณ บริเวณนั้นอีกด้วย

- ตำแหน่งการไหลวนที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งของลวดไฟฟ้ายังส่งผลดีทำให้การไหลวนดังกล่าวครอบคลุมตำแหน่งที่สนใจ(Target position)

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. (2 0 1 3). 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