

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## การเพิ่มการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวดิ่งโดยการใช้ลมโคลโน่า

เจษฎาภรณ์ ปรียด่างกล<sup>1\*</sup> วีรชัย ชัยวรพฤกษ์<sup>2</sup> และ เสาวนิตย์ เลขวัต<sup>3</sup>

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

<sup>2</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>3</sup> คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>1</sup> 25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

<sup>2</sup> 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>3</sup> 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

---

รับบทความ 8 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ 23 ธันวาคม 2564 ตอบรับบทความ 14 มีนาคม 2565

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นร้อนแนวดิ่งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ โดยทำการทดสอบบนผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ ภายในส่วนทดลองขนาดกว้าง 1 เมตร x ยาว 1 เมตร x สูง 1.5 เมตร ขั้วอิเล็กโทรดถูกติดตั้งด้านใน ส่วนทดลอง โดยทำมุมตั้งฉากกับแผ่นร้อนแนวดิ่ง มีระยะห่าง 1 เซนติเมตร พิจารณาที่ความสูงแผ่นร้อน 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นร้อนซึ่งตรงกับขั้วอิเล็กโทรด (ตำแหน่ง A) และตำแหน่งเหนือตำแหน่งแรก 2 เซนติเมตร (ตำแหน่ง B) เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความดันไฟฟ้าแรงดันสูงและระยะห่างระหว่างตำแหน่งในแนวดิ่งบนแผ่นร้อนต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดโดยมีอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด 1.06 และ 1.03 ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าลง นอกจากนี้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าขนาด 5-10 กิโลโวลต์ ที่มีความแม่นยำได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วย ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต

**คำสำคัญ :** การพาความร้อนแบบธรรมชาติ; การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน; อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์; ลมโคลโน่า

---

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 6441 5459, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: jetsadaporn.pri@mahidol.edu

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## Augmentation of Natural Convection of Vertical Plate using Corona Wind

Jetsadaporn Priyadumkol<sup>1\*</sup> Weerachai Chaiworapuek<sup>2</sup> and Saowanit Lekhavat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Mahidol University

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>3</sup> Faculty of Logistics, Burapha University

<sup>1</sup> 25/25 Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom 73170

<sup>2</sup> 50 Ngamwongwan Road Ladyao, Chatuchak District Bangkok 10900

<sup>3</sup> 169 Long Hard-Bangsaen Road Tambon Saensuk Amphoe Muang Chonburi 20131

---

*Received 8 June 2021; Revised 23 December 2021; Accepted 14 March 2022*

### Abstract

This research investigated the high voltage on natural convection of a vertical flat plate from 5, 6, 7, 8, 9 and 10 kV. The experiment was carried out on a constant heat flux surface in the test section of 1 m width x 1 m length x 1.5 m height. The discharge electrode was installed inside the test section. The discharge electrode is perpendicular to the vertical plate with a distance of 1 cm. Two positions are considered: the center of plate, which corresponds to discharge electrode (position A) and the position above the first position of 2 cm (position B). The effect of high voltage and positions on the plate are considered to enhance heat transfer efficiency. The results show that high voltage of 10 kV can increase the heat transfer enhancement ratio up to 1.06 and 1.03 at position A and B, respectively. The heat transfer efficiency decreases with the decrease of the high voltage. In addition, an accurately predictive formula for the Nusselt number under 5-10 kV is also proposed in this paper. Therefore, the obtained experimental results will be important information in order to develop the higher efficiency heat exchangers in the future.

**Keywords :** Natural Convection; Heat Transfer Enhancement; Electrohydrodynamics; Corona Wind

---

\* Corresponding Author. Tel.: +669 6441 5459, E-mail Address: jetsadaporn.pri@mahidol.edu

## 1. บทนำ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น โดยในปี 2562 พบว่าแนวโน้มความต้องการการใช้พลังงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับรายได้ประชาชาติ โดยปริมาณการใช้พลังงานในภาคขนส่ง มีความต้องการมากที่สุดร้อยละ 39 รองลงมาคือภาคอุตสาหกรรมการผลิตร้อยละ 36 สำหรับบ้านอยู่อาศัยและธุรกิจการค้ามีสัดส่วนคือร้อยละ 13 และ 8 ตามลำดับ [1] อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับภาคอุตสาหกรรม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเพราะมีจำนวนจำกัด จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างประหยัดและทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

การผลักดันนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (Thailand 4.0) ที่มุ่งเน้นพัฒนาภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่โดยการเพิ่มมูลค่าด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง หรือเรียกว่าอุตสาหกรรมแห่งอนาคตนั้น พบว่าอุตสาหกรรมกลุ่มเป้าหมายหลายประเภทเชื่อมโยงกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Smart Electronics) การเกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ (Agriculture and Biotechnology) และอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ (Robotics) เพื่อการอุตสาหกรรม เป็นต้น [2] การเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ให้มีความสูงขึ้นนั้น เป็นหนึ่งในวิธีที่สำคัญอย่างยิ่งที่สามารถช่วยประหยัดการใช้พลังงานได้

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือวิธีพาสซีฟ (Passive Method) และวิธีแอคทีฟ (Active Method) โดยหลักการของวิธีพาสซีฟคือการปรับปรุงพื้นผิวหรือโครงสร้างภายใน โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากภายนอก เช่น การทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ (Rough Surfaces) ขณะที่วิธีแอคทีฟ คือการนำแหล่งพลังงานจากภายนอกเข้าไปเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ทำให้ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) ลดลง ส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น [3]

ปัจจุบันสนามไฟฟ้า (Electric Field) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบถ่ายเทความร้อน (Electrohydrodynamic, EHD) ในงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากทำให้เกิดลมโคโลน่า (Corona Wind) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน จุดเด่นของระบบนี้คือ ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่, ใช้พลังงานขับเคลื่อนต่ำ และทำงานได้เงียบมากกว่าการติดตั้งพัดลมแบบหมุน นอกจากนี้การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวโน้มพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงแต่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดฟลักซ์ความร้อนมากขึ้น เช่น หลอดไฟ LED และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การจัดการความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีความสำคัญเพราะส่งผลต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพในการใช้งานของอุปกรณ์ [4]-[6]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของตำแหน่งต่างๆบนแผ่นเรียบที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่างกัน นอกจากนี้ได้สร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์เมื่อใช้อิเล็กโทรดทำมุมตั้งฉากกับแผ่นร้อนแนวตั้งที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่

### 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าต่อการถ่ายเทความร้อน

การเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากแรงดันโคโลน่าได้รับความสนใจในการศึกษาอิทธิพลของแรงดันโคโลน่าต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [7] ในปี 1995 Owsenek et al. [8] ได้ศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวนอนภายใต้สนามไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด พบว่าการเกิดโคโลน่าดีสชาร์จสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้น 25 เท่า และประสิทธิภาพลดลงเมื่อระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นเรียบแนวนอนลดลง ปี 2016 Shin et al. [9] ศึกษาลมโคโลน่าเพื่อระบายความร้อน

ออกจากแผ่น LED โดยสอบเทียบการทดลองจริงและการจำลองโดย Computational Fluid Dynamics (CFD) แรงดันไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30 kV ถูกใช้เพื่อสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพระบายความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 150 เมื่อเทียบกับการพาความร้อนตามธรรมชาติที่ขนาดเดียวกัน ปี 2017 Tsui et al. [10] ได้ทำการทดลองผลการถ่ายเทความร้อนของลมโคลโลน่าที่แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6-19 kV ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 2.6-4.8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคลโลน่ามีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาการดิสชาร์จของแผ่นบาง พบว่าโคลโลนาดิสชาร์จจะเกิดขึ้นที่มุมข้างของแผ่นบางอย่างชัดเจน ขณะบริเวณกลางแผ่นเกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในปีเดียวกัน Lee and Lau [11] แสดงประสิทธิภาพการระบายความร้อนบนพื้นผิวแนวนอนเมื่อช่วงแรงดันไฟฟ้า 9-12 kV โดยใช้ประจุบวกและประจุลบที่ค่าความชื้นต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าที่ 12 kV และพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงทั้งประจุบวกและประจุลบ ต่อมาในปี 2020 Tsui et al. [12] ออกแบบให้มีการสั้นของขั้วอิเล็กโทรดเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน พบว่า การสั้นของขั้วอิเล็กโทรดมีผลเมื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้าปริมาณไม่สูงมากนัก จะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้

การศึกษาการใช้เข็มอิเล็กโทรดที่วางเรียงกันหลายเข็มบนแผงระบายความร้อน [13], [14] อาทิ ปี 1997 Owsenek et al. [13] ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นแนวนอน เปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรดตัวเดียวกับอิเล็กโทรดหลายตัว พบว่า ผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้อิเล็กโทรดหลายตัวของอิเล็กโทรดตัวเดียว มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อย

กว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดตัวเดียว ในปี 2009 Huang et al. [14] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) ของแผงระบายความร้อน โดยได้ศึกษาการจัดเรียงเข็มอิเล็กโทรดจำนวน 4 แบบคือติดตั้ง 4, 6, 16 และ 60 เข็ม ประสิทธิภาพมีค่าลดลงเมื่อแผงระบายความร้อนมีปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น

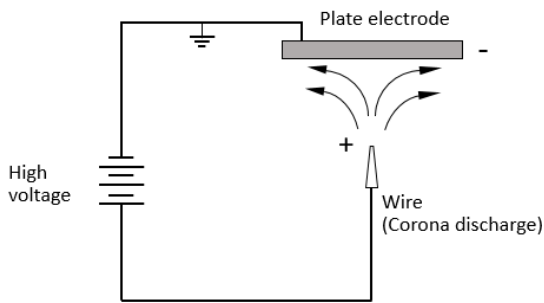
นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ Molki and Bhamidipati [15] ทดสอบค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 2,500 ถึง 13,000 ภายในติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดแบบบาง ระบบสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0-10.5 kV พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 10.5 kV มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดโดยเพิ่มจากไม่มีแรงดันไฟฟ้าร้อยละ 23 สำหรับค่าเรย์โนลด์ 2,500 และร้อยละ 14 สำหรับค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 13,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้น ในปี 2008 Go et. al [16] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้โคลโลนาดิสชาร์จ ปัจจัยที่มีผลได้แก่ขนาดของกระแสโคลโลน่า พลิกซ์ความร้อน การจัดเรียงอิเล็กโทรด และระยะห่างอิเล็กโทรด พบว่าเมื่อชั้นของไหลเปลี่ยนแปลงที่ผิวความร้อนมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 200

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของโคลโลนาดิสชาร์จที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อนในตำแหน่งข้างเคียงขั้วอิเล็กโทรดยังมีข้อมูลน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบของตำแหน่งตรงขั้วอิเล็กโทรดพอดี

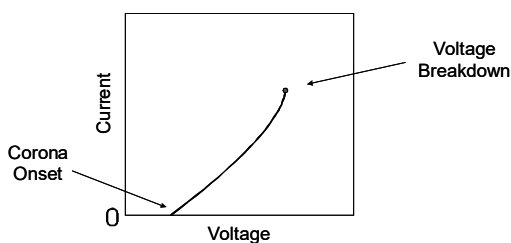
## 1.2 กลไกการเกิดโคลโลนาดิสชาร์จ

สำหรับการเกิดโคลโลนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ในอิเล็กโทรดแบบเข็มและแผ่นราบ

(Needle- Plate Electrodes) เริ่มจากการดิสชาร์จที่ปลายเข็ม (Corona Electrode) มีขั้วอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ไหลผ่านอากาศที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง และเกิดการแตกตัวของไอออนอากาศที่สร้างขึ้นรอบๆ ขั้วอิเล็กโทรด แล้วเคลื่อนไปยังแผ่นราบ (Plate Electrode) ระหว่างทางไอออนหนักจะกระทบกับโมเลกุลของอากาศเพื่อถ่ายเทแรงเฉื่อย (Inertia Force) ไอออนนี้จะถูกเร่งภายในสนามไฟฟ้าและถ่ายโอนพลังงานไปยังอนุภาคโดยรอบ และผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการไหลลักษณะหมุนวนระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว เรียกว่าลมโคโลน่า (Corona Wind) ดังแสดงในรูปที่ 1 [4], [16]-[18]



รูปที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมโคโลน่า



รูปที่ 2 คุณลักษณะกระแสกับแรงดันของโคโลน่า ดิสชาร์จ [20]

โคโลน่าดิสชาร์จจะแสดงในรูปของคุณลักษณะกระแสกับแรงดัน (Voltage-Current Characteristics) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันตั้งต้นโคโลน่า (Corona Onset Voltage) กระแสโคโลน่า

(Corona Current) อยู่ในระดับระดับไมโครแอมป์ ( $\mu\text{A}$ ) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเกิดสปาร์ก (Spark) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดเข็มมีค่าสูงสุด (Voltage Breakdown) สามารถเห็นเป็นประกายโคโลน่า [19]

โคโลน่าดิสชาร์จแบบเข็มและแผ่นราบอยู่ภายใต้สมการอนุพันธ์พื้นฐานของไฟฟ้าสถิต, การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน แรงระหว่างของไหลและสนามไฟฟ้า หรือ Corona Wind หรือ Electrohydrodynamic (EHD) ปรากฏในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\vec{F} = q\vec{E} - \frac{1}{2}|\vec{E}|^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left( \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} |\vec{E}|^2 \right) \quad (1)$$

เทอมแรกคือแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb Force) เป็นผลจากประจุอิสระในของไหลกับสนามไฟฟ้า และมีผลอย่างมากในกรณีการเกิด Corona Wind เทอมสองคือแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริก ( $\varepsilon$ ) และเทอมสามคือแรงจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า [13]

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การออกแบบการทดลอง

ส่วนการทดลองขนาดกว้าง 1 เมตร × ยาว 1 เมตร × สูง 1.5 เมตร ทำมาจากพลาสติกใส ด้านล่างสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร เพื่ออากาศสามารถเคลื่อนที่จากด้านล่างไหลขึ้นด้านบนตามหลักการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ สำหรับห้องที่ทำการทดลองติดตั้งเครื่องปรับ อากาศควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 3$  %RH ขณะที่ยานเป็น ส่วนการทดลองได้ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมขนาด กว้าง 0.2 เมตร × สูง 0.9 เมตร กระแสไฟฟ้าที่เข้าแผ่นกำเนิดความร้อนถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่า 1.2 แอมแปร์ โดยค่ากระแสจะถูกวัดค่าโดยอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณ

กำลังไฟฟ้าของแผ่นกำเนิดความร้อนที่มีค่าต่าง ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม สมมติให้มีค่าคงที่เท่ากับ 220 โวลต์ ตลอดทุกกรณีในการทดลอง

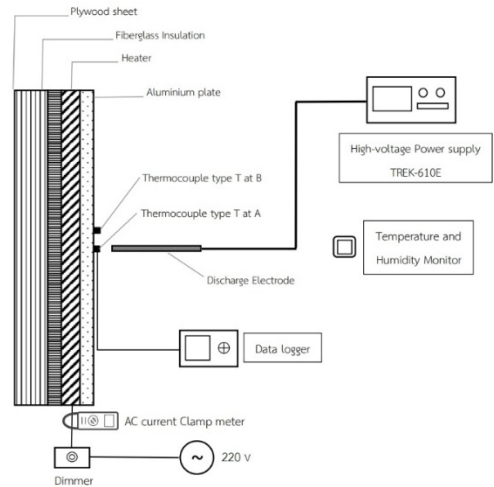
การทดลองนี้ได้ติดตั้งฉนวนกันความร้อนหรือไฟเบอร์กลาสขนาดเท่ากับแผ่นกำเนิดความร้อนวางที่ด้านหลังเพื่อลดการสูญเสียความร้อน โดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบหัวเปลี่ยน ชนิด k จำนวน 1 ตัว มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ร้อยละ  $\pm 1$  ติดที่ด้านหลังตำแหน่งกึ่งกลาง เพื่อใช้ในการคำนวณความร้อนสูญเสีย

อุณหภูมิผิวของแผ่นอลูมิเนียมถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบาง ชนิด T จำนวน 2 ตัว มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ร้อยละ  $\pm 0.75$  โดยตัวแรกติดตั้งที่ความสูงจากขอบด้านล่าง 45 เซนติเมตร (ความสูงครึ่งหนึ่งของแผ่นอลูมิเนียม) ซึ่งตรงกับ ความสูงของขั้วอิเล็กโทรด จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (ตำแหน่ง A) ขณะที่ตัวที่สองติดตั้งเหนือตัวแรก 2 เซนติเมตร (ตำแหน่ง B) ข้อมูลอุณหภูมิของผิวถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น Midi LOGGER GL240) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (Trek รุ่น 610E High-Voltage) มีช่วงความดันที่ปรับได้ 1-10 กิโลโวลต์

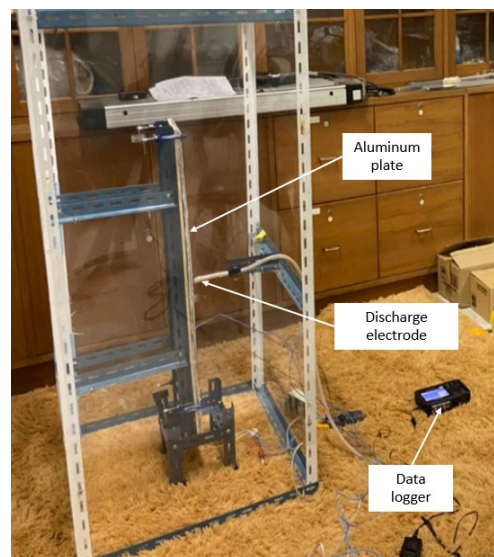
ขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงถูกติดตั้งโดยห่างจากผิวแผ่นอลูมิเนียมในแนวตั้งฉาก มีระยะ 1 เซนติเมตร โดยแผ่นอลูมิเนียมวางสูงจากพื้นด้านล่างระยะ 15 เซนติเมตร บริเวณด้านหลังแผ่นอลูมิเนียมติดกับแผ่นกำเนิดความร้อน แผ่นฉนวนกันความร้อน และแผ่นยึด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่ไม่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้ารบกวน เริ่มต้นเปิดแผ่นกำเนิดความร้อนเพื่อสร้างสภาวะอัตราการถ่ายความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่ และรอให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในส่วน

ทดลองเข้าสู่สมดุล จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิเป็นเวลา 10 นาที ที่อัตราการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูล 0.5 วินาทีต่อข้อมูล และส่วนที่สองของการทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยทำการเปิดใช้แรงดันไฟฟ้ารูปแบบต่อเนื่อง โดยควบคุมสภาวะต่างๆให้เหมือนส่วนแรก และบันทึกข้อมูลต่ออีก 10 นาที ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบในแต่ละกรณีเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลอง



รูปที่ 3 แผนภาพส่วนทดลองจากมุมมองด้านข้าง



รูปที่ 4 ส่วนทดลองจากมุมมองด้านข้าง

## 2.2 การประมวลผลข้อมูล

กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์กำเนิดความร้อน,  $Q$  สามารถคำนวณได้จากกระแสไฟฟ้า,  $I$  และความต่างศักย์ไฟฟ้า,  $V$  ดังแสดงในสมการดังนี้

$$Q = IV = qA_s \quad (2)$$

เมื่อ  $q$  และ  $A_s$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือฟลักส์ความร้อนสุทธิ ( $q_{eff}$ ) มีค่าน้อยกว่าฟลักส์ความร้อนที่เตรียมจากแผ่นทำความร้อนเนื่องจากมีความร้อนสูญเสียความร้อนด้านหลังแผ่นทำความร้อน โดยสามารถหาฟลักส์ความร้อนที่สุทธิ

$$q_{eff} = q - q_{loss} \quad (3)$$

ความร้อนสูญเสียด้านหลังแผ่นทำความร้อนสามารถหาได้จาก [12]

$$q_{loss} = k\Delta T / \Delta x \quad (4)$$

เมื่อ  $k$  สัมประสิทธิ์การนำความร้อนแผ่นของฉนวนไฟเบอร์กลาสและไม้อัด  $\Delta T$  ผลต่างของอุณหภูมิ และ  $\Delta x$  คือ ระยะห่างของตำแหน่งทั้งสอง โดยกำหนดให้ ขอบด้านข้างมีการสูญเสียความร้อนและผลการแผ่รังสีความร้อนน้อยมากจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในที่นี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,  $h$  หาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิต่อหน่วยพื้นที่ อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน,  $T_s$  และอุณหภูมิอากาศโดยรอบส่วนทดลอง,  $T_\infty$

$$h = q_{eff} / (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

สำหรับคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในสมการต่างๆ สามารถหาได้จากอุณหภูมิจำกัด,  $T_f$  ซึ่งคำนวณจากการ

เฉลี่ยอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์และอุณหภูมิอากาศโดยรอบส่วนทดลอง [21]

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (6)$$

เลขนัสเซลล์ท์,  $Nu$  สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน,  $L_c$  และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ,  $k$  [21]

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (7)$$

เมื่อระบบเกิดสนามไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด จะมีการนิยามตัวแปรไร้มิติแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีแรงดันไฟฟ้ารบกวน,  $h_{ec}$  และไม่มีแรงดันไฟฟ้ารบกวน,  $h_{nc}$  ตัวแปรไร้มิตินี้จะถูกเรียกว่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อน,  $\eta$  [22]

$$\eta = \frac{h_{ec}}{h_{nc}} \quad (8)$$

## 2.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทดลอง

งานวิจัยนี้แสดงค่านัสเซลล์ท์กรณีไม่มีแรงดันไฟฟ้ารบกวนในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เทียบกับทฤษฎีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของ Churchill and Chu [24] ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์ท์, เลขพรันด์เทิล,  $Pr$  และเลขเรย์ลี,  $Ra$  คือ

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (9)$$

เลขเรย์ลีเป็นตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายอัตราส่วนของแรงลอยตัว แรงหนืดและเลขพรันด์เทิล

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3 Pr}{\nu^2} \quad (10)$$

เมื่อ  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของของไหล,  $L_c$  คือความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน และ  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์

ร้อยละของความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (11)

$$\%Error = \frac{Nu_{exp} - Nu_{theory}}{Nu_{theory}} \times 100 \quad (11)$$

โดย  $Nu_{exp}$  คือเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลอง และ  $Nu_{theory}$  คือเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทฤษฎี

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลท์จากการทดลองเทียบกับทฤษฎีของ Churchill and Chu [24] มีค่าเท่ากับ 9.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการสอบเทียบกับงานวิจัยของ Tsui et al [12] จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะทำการทดลองเกี่ยวกับแรงดันโคโลนาต่อไป

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า Nu จากการทดลองและคำนวณจากทฤษฎี Churchill and Chu

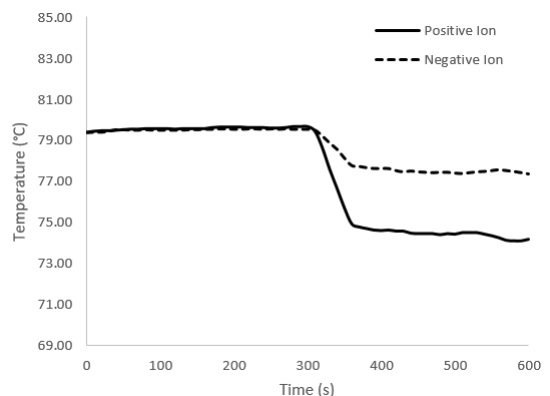
Theory	Nu	%error
Churchill Chu's correlation	159.49	9.15
Average experimental result without corona wind	144.89	-

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดประจุบวกและประจุลบ

พฤติกรรมของการปล่อยประจุที่ขั้วอิเล็กโทรดเมื่อใช้ชนิดประจุบวกและประจุลบ ที่กระทำต่อการถ่ายเท

ความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียม โดยเริ่มต้นยังไม่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าปล่อยไอออน มีอุณหภูมิเท่ากับ 79.54 องศาเซลเซียส จนกระทั่งวินาทีที่ 300 ได้ทำการปล่อยประจุ พบว่าอุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมลดลงเรื่อยๆ โดยอุณหภูมิเริ่มคงที่ที่วินาที 360 โดยตั้งแต่วินาทีที่ 360 ถึง วินาทีที่ 600 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 77.49 องศาเซลเซียส และ 74.46 องศาเซลเซียส เมื่อปล่อยประจุไอออนลบและไอออนบวก ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อใช้ประจุไอออนบวกอุณหภูมิแผ่นอลูมิเนียมลดลงต่ำกว่าเมื่อใช้ประจุไอออนลบอย่างชัดเจน เนื่องจากประจุไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าทำให้เมื่อประจุเคลื่อนที่ปะทะแผ่นเรียบและสามารถทำลายชั้นขีดผิวของแผ่นเรียบส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น



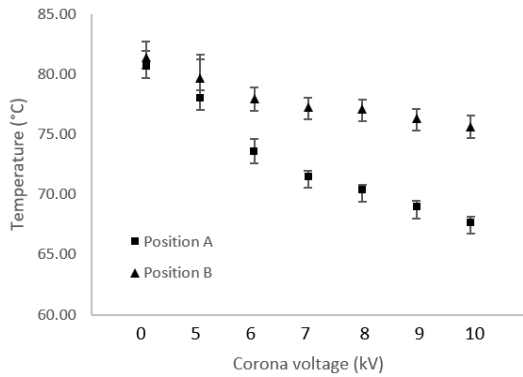
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดไอออนบวกและไอออนลบ

#### 3.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 5-10 กิโลโวลต์

จากหลักการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพลั๊กความร้อนของแผ่นเรียบแนวดิ่งมีค่าคงที่ โดยที่ตำแหน่ง A และ B มีอุณหภูมิเริ่มต้นคือ 80.65 และ 81.42 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อยังไม่เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงประจุบวก ภายหลังเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าประจุ บวก 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่ง A มีอุณหภูมิ 78.05, 73.55, 71.52,



70.38, 69.01 และ 67.71 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ตำแหน่ง B มีอุณหภูมิ 79.68, 77.95, 77.25, 77.12, 76.32 และ 75.65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าตำแหน่ง B ที่อยู่สูงกว่าตำแหน่ง A จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า และอุณหภูมิของทั้งตำแหน่ง A และ B มีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6

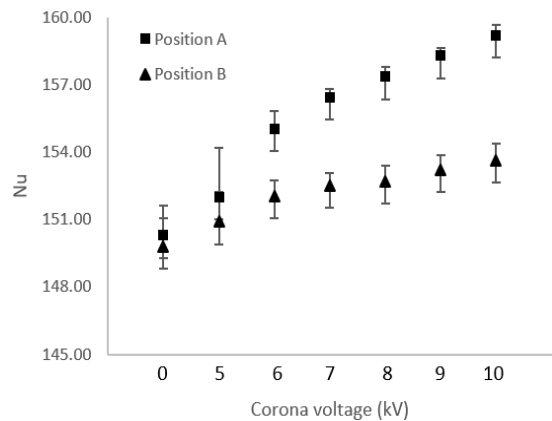


รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิของแผ่นร้อนที่ตำแหน่ง A และ B เมื่อมีและไม่มีแรงดันไฟฟ้าประจุบวก

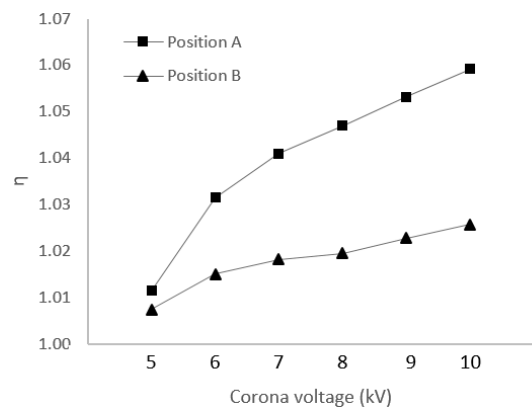
จากรูปที่ 7 การคำนวณเลขนีสเซลล์จากอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B เมื่อยังไม่เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงประจุบวก มีค่าเท่ากับ 150.29 และ 149.79 ตามลำดับ ภายหลังเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 6 ค่า คือ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ พบว่า ที่ตำแหน่ง A มีเลขนีสเซลล์ คือ 152.01, 155.03, 156.44, 157.35, 158.29 และ 159.18 ขณะที่ตำแหน่ง B มีเลขนีสเซลล์ คือ 150.91, 152.04, 152.52, 152.71, 153.21 และ 153.64 ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นค่าเซลล์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าเซลล์ของตำแหน่ง A กับ B เห็นได้ชัดว่าค่าเซลล์ของตำแหน่ง A มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง B ทำให้ตำแหน่ง A มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าตำแหน่ง B

รูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีลมโคลนารบกววน และไม่มีลม

โคลนารบกววน ที่ตำแหน่ง A และ B จากผลการทดลอง พบว่าการใช้ลมโคลนารบกววนที่แรงดันไฟฟ้า 5-10 กิโลโวลต์ ทำให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นในทุกกรณี โดยที่ตำแหน่ง A เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด เท่ากับ 1.06 ขณะที่ตำแหน่ง B เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ มีอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.03



รูปที่ 7 ค่าเซลล์ของแผ่นร้อนที่ตำแหน่ง A และ B เมื่อมีและไม่มีแรงดันไฟฟ้าประจุบวก



รูปที่ 8 อัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 5 -10 กิโลโวลต์

จากผลการศึกษพบว่าค่าอุณหภูมิและค่าเซลล์แปรผกผันกัน โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจะ

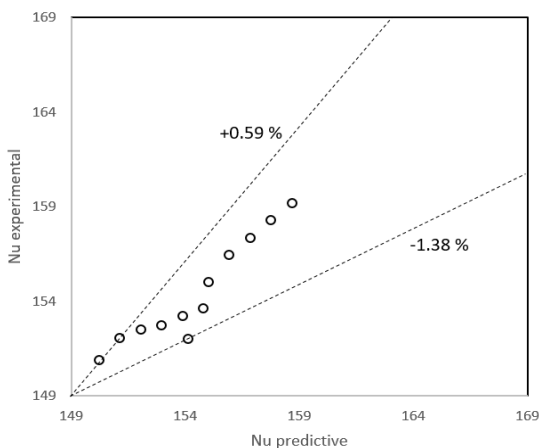
ทำให้อุณหภูมิลดลงขณะที่ค่า Nusselt จะสูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการระบายความร้อนคือปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย และตำแหน่งของหัวอิเล็กทรอนิกส์กับตำแหน่งบนแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งตำแหน่งที่ตรงกับหัวอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าตำแหน่งที่อยู่เอียงหัวอิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการการทำนายค่า Nusselt เมื่อหัวอิเล็กทรอนิกส์ทำมุมตั้งฉากกับแผ่นร้อนแนวตั้ง มีระยะห่าง 1 เซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและตำแหน่งของแผ่นร้อนแนวตั้งดังนี้

$$y = 149.538 + 0.913x_1 - 1.939x_2 \quad (12)$$

เมื่อ  $y$  คือ นัสเซลน์เบอร์ ( $Nu$ ),  $x_1$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 kV,  $x_2$  คือ ตำแหน่งของแผ่นร้อนในแนวตั้ง ตำแหน่ง A และ B

จากสมการที่ได้พบว่าค่า Nusselt จากสมการทำนายมีร้อยละของความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับการทดลองอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ -1.38 ถึง 0.59 ดังนั้นสมการนี้จึงเป็นสมการสำคัญที่จะสามารถนำมาใช้ทำนายการเพิ่มขึ้นของการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงแรงดันไฟฟ้าชนิดบวก 5-10 กิโลโวลต์ และความสูงจากหัวกำเนิดโคโลนาในแนวตั้ง 0-2 เซนติเมตร ได้ต่อไป



รูปที่ 9 ร้อยละของ  $Nu$  จากการทดลองเทียบสมการทำนาย  $Nu$  ที่ได้งานวิจัยนี้

#### 4. สรุป

การถ่ายเทความร้อนของแผ่นอลูมิเนียมเมื่อใช้ประจุไอออนบวกมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ประจุไอออนลบ โดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น และพบว่าเครื่องกำเนิดความดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 10 กิโลโวลต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด 1.06 และ 1.03 ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ เทียบกับการไม่ใช้เครื่องกำเนิดความดันไฟฟ้า นอกจากนั้นสมการทำนายความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชนิดบวก 5 ถึง 10 กิโลโวลต์ ที่ความสูงจากหัวกำเนิดโคโลนาบนแผ่นร้อนแนวตั้งระยะ 0 ถึง 2 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ -1.38 ถึง 0.59 เมื่อเทียบกับการทดลองจริง ทำให้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แรงดันไฟฟ้าได้ต่อไปนอกจากนี้อนาคตควรมีการศึกษาปัจจัยของระยะห่างของหัวอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นๆที่สนใจบนแผ่นอลูมิเนียมทำให้การหาสมการการทำนายค่า Nusselt มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ทดสอบ และขอขอบคุณณัฐรี วรจินดา, ศตพล ทองมี, ชญาดา งามดี และ อาทิตยา มนูญโย ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2562  
 [2] The Achievement in Implement of the Government Policy and Industrial Strategy Fiscal Year 2016, Ministry of Industry, 2016.

- [3] A. E. Bergles, “ The Implications and Challenges of Enhanced Heat Transfer for the Chemical Process Industries,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 79, no. 4, pp. 437–444, 2001.
- [4] D. H. Shin, S. H. Baek and H. S. Ko, “Development of Heat Sink with Ionic Wind for LED Cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 516–528, 2016.
- [5] N. E. Jewell-Larsen, H. Ran, Y. Zhang, M. Schwiebert and K. A. Honer, “ Electrohydrodynamic ( EHD) Cooled Laptop,” in *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium* · April 2009.
- [6] I. Y. Chen, M. Z. Guo, K. S. Yang, and C. C. Wang, “Enhanced Cooling for LED Lighting using Ionic Wind,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.57, pp. 285–291, 2013.
- [7] M. Molki and K. L. Bhamidipati, “ Enhancement of Convective Heat Transfer in the Developing Region of Circular Tubes using Corona Wind,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 4301–4314, 2004.
- [8] B. L. Owsenek, J. S. Yagoobi and R. H. Page, “ Experimental Investigation of Corona Wind Heat Transfer Enhancement with a Heated Horizontal Flat Plate,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 117, pp. 309–315, 1995.
- [9] D. H. Shin, S. H. Baek and H. S. Ko, “ Development of Heat Sink with Ionic Wind for LED Cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 516–528, 2016.
- [10] L. Léger, E. Moreau and G. G. Touchard, “ Effect of a DC Corona Electrical Discharge on the Airflow Along a Flat Plate,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 38, no. 6, 2002.
- [11] J. R. Lee and E. V. Lau, “Effects of Relative Humidity in the Convective Heat Transfer over Flat Surface using Ionic Wind,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 554–560, 2017.
- [12] Y. Y. Tsui, T. K. Wei and C. C. Wang, “A Novel Means Combining Corona Discharge and Electrostatic Force-Induced Vibration for Convective Heat Transfer,” *Journal of Heat Transfer*, Transactions of the ASME 142, 2020.
- [13] B. L. Owsenek and J. S. Yagoobi, “ Theoretical and Experimental Study of Electrohydrodynamic Heat Transfer Enhancement Through Wire-Plate Corona Discharge,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, pp. 604–610, 1997.
- [14] R. T. Huang, W. J. Sheu and C. C. Wang, “ Heat Transfer Enhancement by Needle-Arrayed Electrodes – An EHD Integrated Cooling System,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1789–1796, 2009.

- [15] M. Molki and K. L. Bhamidipati, "Enhancement of Convective Heat Transfer in the Developing Region of Circular Tubes using Corona Wind," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 4301–4314, 2004.
- [16] D. B. Go, R. A. Maturana, T. S. Fisher and S. V. Garimella, "Enhancement of External Forced Convection by Ionic Wind," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 6047–6053, 2008.
- [17] T. Stegmaier, A. Dinkelmann, V. V. Arnim and A. Rau, "Corona and Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment of Textiles for Technical Applications," *Plasma technologies for textiles*, pp. 129-157, 2007.
- [18] A. Yabe, Y. Mori and K. Hijikata, "Active Heat Transfer Enhancement by Utilizing Electric Fields," *Annual Reviews of Heat Transfer*, vol. 7, pp. 193-244, 1996.
- [19] P. Intra, *Aerosol Charging Technology by Electric Field: Theory and Innovation*, 2<sup>nd</sup> Edition, 2560.
- [20] F. Yang, "Corona-Driven Air Propulsion for Cooling of Microelectronics," Thesis, University of Washington, 2002.
- [21] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer – Fundamentals & Applications*. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [22] R. T. Huang, W. J. Sheu and C. C. Wang, "Heat Transfer Enhancement by Needle-Arrayed Electrodes – An EHD Integrated Cooling System," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1789–1796, 2009.
- [23] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [24] Y. A. Cengel, *Heat and Mass transfer: A practical approach*. 3rd ed, McGraw Hill, 2006.