

ผลของการจัดวางอิเล็กโทรดหลายแท่งต่อการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า

Effects of Multi – Electrode Layout on Hot-Air Drying Cooperating with Electric Fields

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*

อัชพงศ์ กริวัชรินทร์

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ชยุตพล ชัยรุ่งเรือง

ศุภโชค แซ่พั้ว

ชิตณรงค์ แดงประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อำเภอคลองหลวง

จังหวัดปทุมธานี 12120

*Email: cchainar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) เทคนิคถูกใช้เพื่อเพิ่มการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบดพอร์น (Porous packed bed) บทความนี้ศึกษาผลของจำนวนอิเล็กโทรด (n) และตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง รวมถึงรูปแบบการไหลของลมร้อนภายใต้สนามไฟฟ้า ในการทดลองกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงถูกใช้ที่ 15 kV ผลจากภาพการไหลแสดงให้เห็นว่ากระแสลมจะเกิดการหมุนวนเมื่อไหลผ่านสนามไฟฟ้า อีกทั้งลักษณะและตำแหน่งการเกิดลมหมุนวนจะขึ้นกับตำแหน่งการจัดวางแท่งอิเล็กโทรด นอกจากนี้ขนาดความแรงของลมหมุนถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยทั้งจากการเพิ่มจำนวน n และการลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ โดยลมหมุนมีขนาดวงกว้างใหญ่ขึ้นเมื่อระยะห่างมากขึ้น การใช้ EHD ร่วมทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่ไหลออกจากแพคเบดมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้อิเล็กโทรดหลายแท่งและระยะห่างน้อยมากๆ ทำให้บริเวณที่ผิวของแพคเบดอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยลมร้อน อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์

Abstract

Electrohydrodynamic technique is used for enhancing the convective heat transfer on surface of porous packed bed. This paper investigates the effects of the number of electrodes (n) and electrode layout on drying efficiency, as well as, flow under electric fields. In experiments, high electric voltage is applied at 15 kV. It is shown from flow visualization that circulation of flow depends on electrode layout. Additionally, the strength of circulating flow is increased by either increase of n or decrease of the spacing between electrode and ground wires. Size of circulating flow becomes larger when the spacing is wider. By cooperating with EHD, the rates of heat transfer and of moisture removal of packed bed are considerably increased. In particular, surface temperature of packed bed rapidly is increased by multi-electrode wires and small spacing.

Keywords: Hot-air drying, Electrohydrodynamics.

1. บทนำ

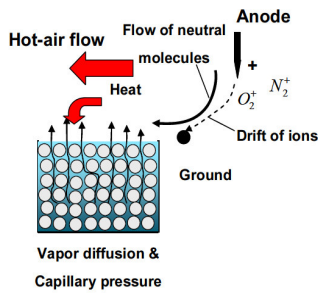
ด้วยวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและเศรษฐกิจทำให้ประเทศต่างๆ ให้ความสนใจด้านการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากที่สุด สำหรับประเทศอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับการเกษตรวิธีการรักษาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่กำลังถูกให้ความสนใจอย่างมาก ด้วยเหตุผลนี้การพัฒนาวิธีการอบแห้งจึงเป็นสิ่งมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้พลังงานสูงและระยะเวลาการอบแห้งนาน

Isobe และ คณะ [1] ศึกษาอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์สำหรับการอบแห้ง ณ อุณหภูมิบรรยากาศที่ไม่มีลมพัด โดยติดตั้งอิเล็กโทรดกับกราวด์แบบ point-to-plate กล่าวคืออิเล็กโทรดทองแดง 1 แท่งติดตั้ง

อยู่บนเนื้อแผ่นจานกราวด์อลูมิเนียม และรายงานว่าการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงไม่เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุแต่ทำให้อัตราการอบแห้ง agar gel เร็วขึ้นเป็น 3 เท่าของการอบแบบปกติที่ควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการอบแห้งแปรผันตามความแข็งแรงของสนามไฟฟ้าที่ใช้ แต่แปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับแผ่นอลูมิเนียม

Cao และ คณะ [2] ใช้ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและติดตั้งอิเล็กโทรดกับกราวด์แบบ Multi-point-to-plate โดยอิเล็กโทรดทองแดงจำนวน 16 แท่งติดตั้งอยู่บนเนื้อแผ่นกราวด์สแตนเลส ผลทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ที่น้อยลง

Lai และ Sharma [3] วางแพคเบตที่ใส่น้ำและลูกแก้วขนาดหนึ่งในไมโครโมลและติดตั้งอิเล็กโทรดกับกรวดแบบ Multi-point-to-plate โดยอิเล็กโทรดนิเกิล (Nickel) จำนวน 3 แห่งติดตั้งในแนวตั้งจากการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือเหนือแพคเบตซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง ผลทดลองรายงานว่าการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือเหนือแพคเบตซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง ผลทดลองรายงานว่าการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือเหนือแพคเบตซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง ผลทดลองรายงานว่าการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือเหนือแพคเบตซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง



รูปที่ 1 กลไกการเพิ่มการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า [4]

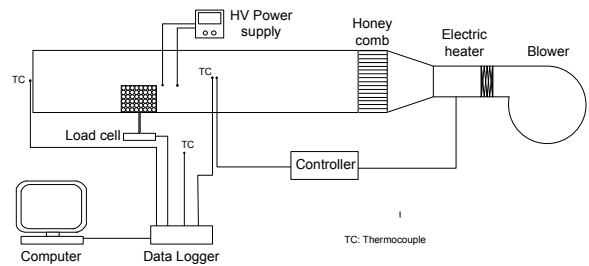
Chaktranond และ Rattanedecho [4] ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าในแพคเบตที่มีความพรุนสองค่า (ชั้นที่มีเม็ดแก้วขนาดใหญ่และชั้นที่มีเม็ดแก้วขนาดเล็ก) โดยติดตั้งอิเล็กโทรดทองแดง 4 แห่งในตั้งฉากกับการไหลและเส้นลวดกรวดทองแดงติดตั้งอยู่เหนือแพคเบตดังรูปที่ 1 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะเกิดลมหมุนรอบๆ ลวดกรวดและเป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงความพรุนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (Capillary pressure) ที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้อัตราการระเหยของน้ำของการจัดเรียงแบบที่ชั้นเม็ดแก้วขนาดเล็กอยู่ด้านบนเร็วกว่าการจัดเรียงแบบที่ชั้นเม็ดแก้วขนาดใหญ่อยู่ด้านบน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาต่อจากงานวิจัยของ Chaktranond และ Rattanedecho [4] โดยศึกษาผลของการจัดเรียงแท่งอิเล็กโทรดและจำนวนแท่งอิเล็กโทรดที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุที่มีค่าความพรุนค่าหนึ่งๆ

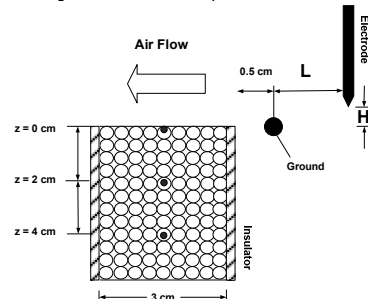
2. วิธีการทดลอง

แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 ในการทดลองวัสดุพรุนถูกแทนด้วยแพคเบตซึ่งติดตั้งอยู่ภายในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 15 cm X 15 cm ลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C และความเร็วลมที่ 0.35 m/s กล้องแพคเบตมีขนาด 3 cm (กว้าง) X 12 cm (ยาว) X 6 cm (สูง) ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ผิวภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ยกเว้นที่ผิวหน้าเปิดสู่ลมร้อน ภายในประกอบด้วยน้ำและเม็ดแก้ว (Glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm (ค่าความพรุน, $\phi \sim 0.385$) และค่าความอิมิตัว

เริ่มต้น (Initial saturation) ของแพคเบตมีค่า $s = 0.5$ ดังแสดงในรูปที่ 2 อุณหภูมิภายในแพคเบตถูกวัดด้วยลวดไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to ± 0.5 °C) จำนวน 3 เส้น ซึ่งติดตั้งที่ระยะ (z) เท่ากับ 0, 2, และ 4 cm (วัดจากผิวด้านบนลงไปในแพคเบต) ค่าน้ำหนักของแพคเบตที่ ณ เวลาต่างๆ ถูกวัดโดยโหลดเซลล์ (Load cell) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Glassman, Model MJ30N400) ถูกใช้สร้างแรงดันทดสอบที่ 15 kV และกำหนดให้กรวดอยู่ที่ตำแหน่งที่ L และ H เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งอิเล็กโทรดและแพคเบต

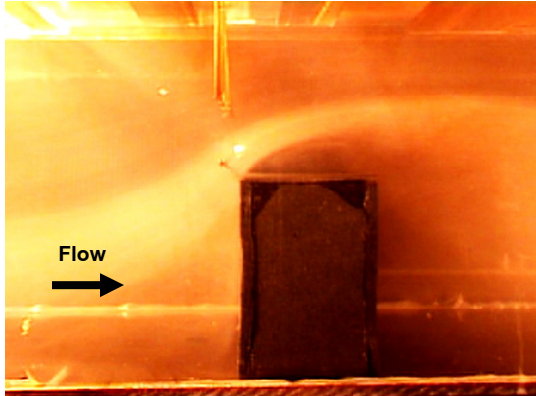
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการไหลของลม

เพื่อสังเกตการไหลของลมภายใต้สนามไฟฟ้างานวิจัยนี้ใช้ควมรูปแสดงเส้นทางการไหลของลม และติดตั้งหลอดไฟแสงสว่างขนาด 500 W จำนวน 2 ดวงส่องในแนว 45 องศากับอุโมงค์ลม และบันทึกภาพการไหลของลมโดยใช้กล้องดิจิทัลโซนี่ (SONY DCR-PC 108/PC 109E) และความเร็วลมเฉลี่ยขณะถ่ายภาพ ~ 0.1 m/s

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า L (cm) ที่เป็นค่าบวกเป็นระยะที่แท่งอิเล็กโทรดติดตั้งอยู่ด้านบนของลวดกรวด และกำหนดให้ค่า H (cm) เป็นระยะที่อิเล็กโทรดติดตั้งอยู่สูงกว่าตำแหน่งลวดกรวด

เพื่อสังเกตลักษณะของลมที่ไหลผ่านแพคเบตและผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการไหลของลม ที่ผิวด้านบนของแพคเบตถูกปิดด้วยแผ่นยาง เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าลมเกิดการไหลแยก (Flow separation) ที่ผิวหน้าของแพคเบต ซึ่งจะเป็นเหตุให้การถ่ายความร้อนจากลมร้อนสู่ผิวแพคเบตไม่ดี

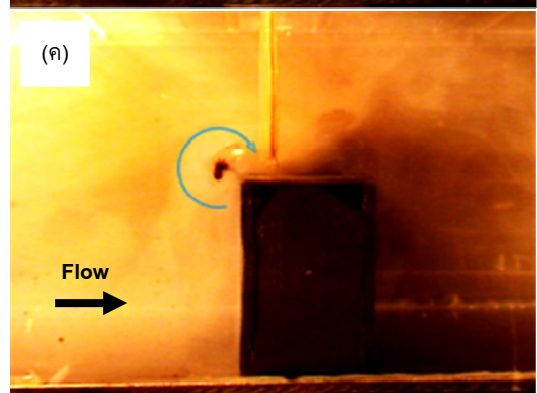
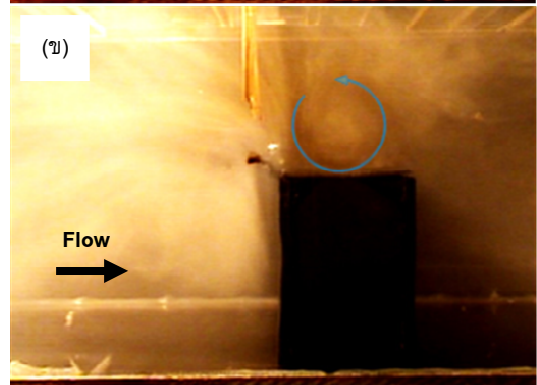
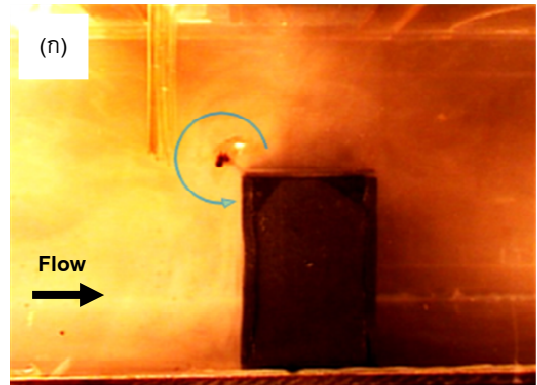


รูปที่ 4 ภาพการไหลของลมเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า

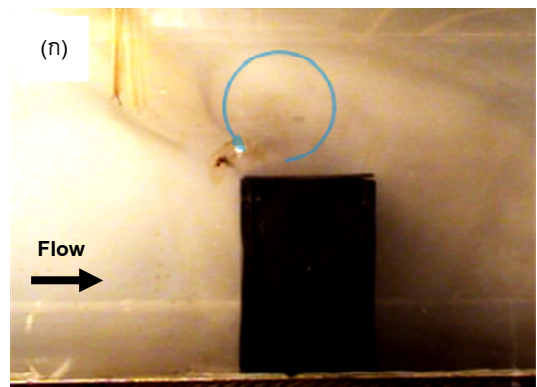
เมื่อสนามไฟฟ้าถูกใช้ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่ง $n = 4$ ลมหมุนที่เกิดขึ้นทำให้การไหลแยกมีขนาดความหนาลดลง นอกจากนี้ตำแหน่งการหมุนของลมเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของอิเล็กโทรด ลมหมุนเกิดที่ด้านหน้าของแพคเบตเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหน้าของลวดกราวด์ ($L = 2, H = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และลมหมุนย้ายตำแหน่งการเกิดไปที่ผิวหน้าของแพคเบตเมื่ออิเล็กโทรดติดตั้งแนวเดียวกับลวดกราวด์ ($L = 0, H = 2$) แต่จากรูปที่ 5 (ค) แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหลังของกราวด์พื้นที่บางส่วนของผิวหน้าของแพคเบตไม่ได้รับอิทธิพลจากการลมหมุนวนและการไหลแยกสามารถถูกสังเกตได้อีกครั้ง

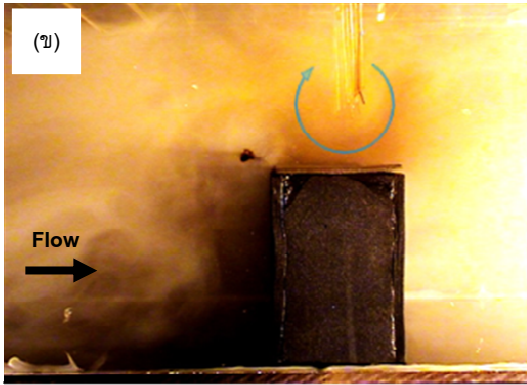
จากรูปที่ 6 พบว่าความแรงของการหมุนจะลดลงเมื่อระยะห่าง L มีค่ามากขึ้นแต่เส้นผ่านศูนย์กลางการหมุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยลง โดยแรงคูลอมบ์แปรผันตามค่าสนามไฟฟ้า ($\vec{F}_c = q\vec{E}$ ที่ซึ่ง q คือ ความแน่นของประจุไฟฟ้า) และขนาดของสนามไฟฟ้าผกผันกับระยะทางกำลังสอง ($\|\vec{E}\| \propto R^{-2}$ ที่ซึ่ง R คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์) แรงคูลอมบ์ที่ลดลงส่งผลทำให้แรงที่เหนี่ยวนำอากาศที่ไม่ถูกไอออนไนซ์หรือแรงเนื่องจากการไหลแบบเฉือน (Shear flow) เพื่อเกิดการหมุนวนมีขนาดน้อยลงตาม ดังนั้นความแรงของการหมุนวนจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะ L มีค่ามากขึ้น แต่หมุนด้วยวงที่กว้างขึ้นตามรัศมีความโค้งที่กว้างขึ้น

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าลมหมุนในรูปที่ 6 (ก) ซึ่ง $L = 4$ มีทิศทางที่ตรงข้ามกับการหมุนของลมในรูปที่ 6 (ข) ซึ่ง $L = -4$ รวมถึงขนาดและความแรงของการหมุนมากกว่า รูปที่ 6 (ข) ทั้งนี้เพราะในรูปที่ 6 (ก) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับทิศทางไหลของอากาศ (Flow direction) ส่วนรูปที่ 6 (ข) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่สวนทิศทางกับการไหล ทำให้แรงเนื่องจากการไหลแบบเฉือนมีค่าน้อยลง



รูปที่ 5 ภาพการไหลของลมภายใต้สนามไฟฟ้า (ก) $L = 2, H = 0$ (ข) $L = 2, H = 0$ (ค) $L = -2, H = 0$





รูปที่ 6 ภาพการไหลของลมภายใต้สนามไฟฟ้าที่ $H = 2$
(ก) $L = 4$ และ (ข) $L = -4$

3.2 ผลของจำนวนแท่งอิเล็กโทรด (n) ที่มีต่อการอบแห้ง

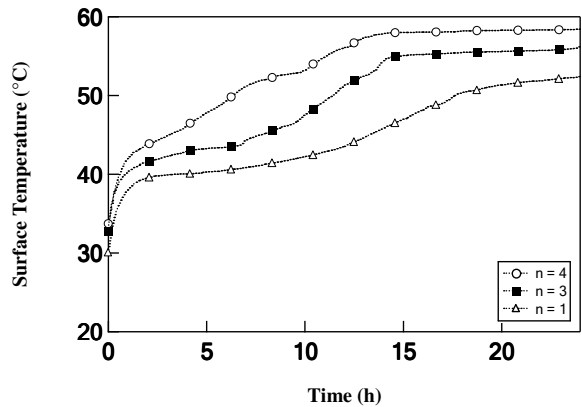
เมื่อจำนวนแท่งอิเล็กโทรด n มีค่ามากขึ้นมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่แพคเบตดีขึ้น ดังเห็นได้จากรูปที่ 7 อุณหภูมิที่ผิวของของแพคเบตมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดมากขึ้นมีผลทำให้การนำความร้อนออกจากแพคเบตดีขึ้น ดังเห็นได้จากรูปที่ 8 การสูญเสียความชื้นของแพคเบตมีค่าเพิ่มเร็วยิ่งขึ้น

เมื่อจำนวนอิเล็กโทรดมีค่ามากขึ้นทำให้สนามไฟฟ้า (E) มีค่ามากขึ้นและกระจายตัวในบริเวณที่กว้างมากขึ้น ส่งผลทำให้แรงคูลอมบ์มีขนาดมากขึ้นและมีการกระจายตัวที่มากขึ้นตาม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้อากาศที่อยู่รอบๆ มีการหมุนวนที่รุนแรงขึ้น ดังนั้นการระเหยของน้ำออกจากบริเวณผิวหน้าของแพคเบตได้เร็วขึ้นและการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบตดีขึ้น

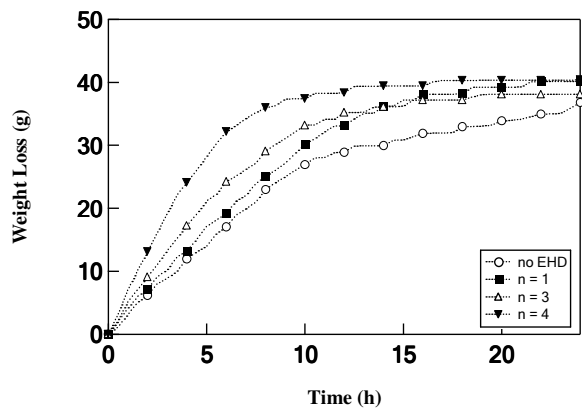
3.3 ผลของตำแหน่งของอิเล็กโทรดที่มีต่อการอบแห้ง

จากรูปที่ 9 พบว่าตำแหน่งของอิเล็กโทรดมีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเบต โดยตำแหน่งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อ $L = 0$ และ $H = 2$ ทั้งนี้เพราะตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่อิเล็กโทรดและกราวด์ใกล้กันมากที่สุด ดังนั้นแรงคูลอมบ์มีค่ามากที่สุด และทำให้ความรุนแรงของการหมุนวนมีค่ามากที่สุด อีกทั้งตำแหน่งนี้ทำให้ลมหมุนวนเกิดขึ้นทั่วผิวหน้าของแพคเบต ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก)

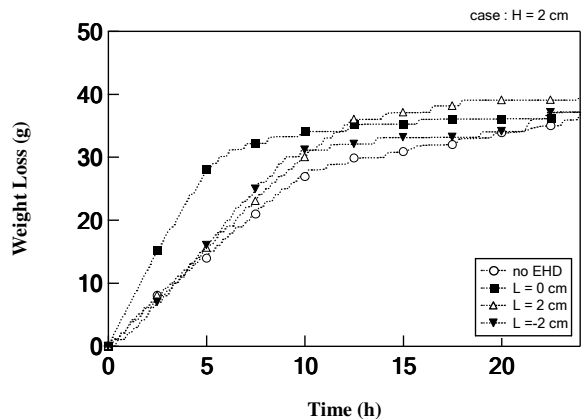
เมื่อเปรียบเทียบผลของการติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหน้าและที่ด้านหลังของลวดกราวด์พบว่า การติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหน้ามีผลทำให้อัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตสูงกว่าการติดตั้งที่ด้านหลังประมาณ 1.3 เท่า (พิจารณาในช่วงอัตราคงที่ของการอบแห้ง) ดังแสดงในรูปที่ 10 ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นการติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหลังของลวดกราวด์มีผลทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่สวนทางกับทิศของการไหล ส่งผลทำให้แรงเนื่องจากการไหลเฉือนมีค่าน้อยลง (การหมุนวนมีขนาดและความรุนแรงน้อยลง) และนอกจากนี้ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการหมุนวนเกิดขึ้นเพียงบางส่วนของผิวหน้าของแพคเบต



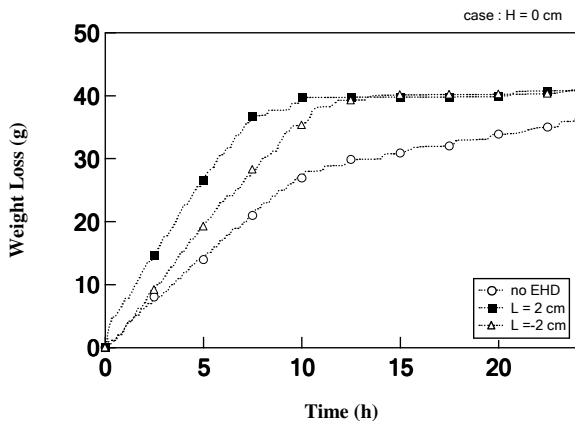
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเบตที่สภาวะต่างๆ ที่อิเล็กโทรดจำนวนต่างๆ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเบตเมื่อ ระยะ $H = 2$ ที่ระยะ L ต่างๆ



รูปที่ 10 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเบตที่ระยะ L ต่างๆ เมื่อ ระยะ H = 0

สรุป

งานวิจัยทำการศึกษามูลของการจัดวางอิเล็กที่มีผลต่อการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. จากภาพถ่ายการไหลของลมแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโตรดมีผลต่อลักษณะและตำแหน่งการหมุนของลมที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโตรดและกราวด์น้อยทำให้เกิดการหมุนที่รุนแรงแต่ขนาดการหมุนเป็นวงแคบ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเมื่อระยะห่างมากขึ้นทำให้การหมุนมีความรุนแรงน้อยลงแต่ขนาดการหมุนเป็นวงกว้าง
2. ขนาดและตำแหน่งของการเกิดลมหมุนวนขึ้นกับตำแหน่งการติดตั้งแท่งอิเล็กโตรด กล่าวคือลมหมุนจะมีความรุนแรงและเกิดก่อนไปทางบริเวณด้านหน้าของแพคเบตเมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งบริเวณด้านหน้าของลวดกราวด์ และลมหมุนจะเกิดบริเวณกลางผิวหน้าของแพคเบตเมื่ออิเล็กโตรดถูกติดตั้งที่ตำแหน่งแนวเดียวกับลวดกราวด์ ส่วนลมหมุนจะมีขนาดและความรุนแรงน้อยลงเมื่อติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหลังของลวดกราวด์
3. อัตราความชื้นระเหยจากผิวหน้าของแพคเบตได้เร็วขึ้นและความร้อนถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพคเบตได้เร็วขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากลักษณะและความแข็งแกร่งของลมหมุนวนซึ่งได้รับอิทธิพลจากแรงคูลอมปีทีที่กระจายตัวมากขึ้นเมื่อใช้จำนวนแท่งอิเล็กโตรดหลายแท่งหรืออิทธิพลของแรงคูลอมปีทีมากขึ้นเมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและกราวด์มีค่าน้อยลง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Isobe, S., Barthakur, N., Yoshino, T., Okushima, L., and Sase, S. Electrohydrodynamic drying characteristics of agar gel. *Food Sci. Technol. Res.*, 5(2), 1999, pp. 132-136.
- [2] Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S., and Lu, Z.H. Drying enhancement of rough rice by an electric field. *Biosys. Eng.*, 87(4), 2004, pp. 445-451.
- [3] Lai, F.C, and Sharma, R.K. EHD-enhanced drying with multiple needle electrode. *J. Electrostatics*, 63, 2005, pp. 223-237.
- [4] Chaktranond, C., and Rattanadecho, P. 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 (8), 2010, pp. 1049-1056.