

ผลของการจัดวางอิเล็กโทรดที่มีต่อการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน ในวัสดุพรุนที่อบแห้งด้วยเทคนิคการอบแห้งอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์

Effects of Electrode Arrangement on Enhancement of Heat and Mass Transfer in a Porous Material with Electrohydrodynamic Drying Technique

ไพยณรงค์ จักรธรานนท์* ชัยพงษ์ กรวิชัยรินทร์ สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งวัสดุพรุนโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูง และทำการศึกษาลักษณะการไหลของลมร้อนที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งขั้วอิเล็กโทรด ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ จำนวนขั้วอิเล็กโทรด ($n = 1, 3$ และ 4 ขั้ว) และตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรดเมื่อเทียบกับตำแหน่งของเส้นลวดกราวด์ (ระยะในทิศการไหล $L = -8$ cm ถึง 8 cm และระยะในทิศตั้งฉากการไหล $H = 0$ ถึง 6 cm) แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่า $0 - 30$ kV อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนถูกควบคุมที่ 60°C และ 0.35 m/s ตามลำดับ วัสดุพรุนที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย น้ำ อากาศ และเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อปล่อยสนามไฟฟ้าสู่ลมร้อนทำให้อุณหภูมิและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากวัสดุเพิ่มสูงเร็วมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้สนามไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนขั้ว n และลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและลวดกราวด์มีผลทำให้อัตราการอบแห้งยิ่งเพิ่มสูงขึ้น จากภาพการไหลแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดลมหมุนเหนือวัสดุพรุน และเมื่อระยะ L หรือ H มีค่าน้อยลงลมหมุนจะมีขนาดที่เล็กลงแต่มีการหมุนที่รุนแรงมากขึ้น นอกจากนี้ตำแหน่งของอิเล็กโทรดมีผลต่อทิศทางการหมุนของลมร้อน ตำแหน่งของการเกิดลมหมุนและประสิทธิภาพการอบแห้งที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการอบแห้งอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.3-2 เท่า

คำสำคัญ : อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

Abstract

This research aims to study the enhancement of drying efficiency in a porous material with combining hot-air flow and high electrical voltage fields, and to explore hot-air flow behavior varied with electrode layout. The parameters are the number of electrodes ($n = 1, 3$ and 4) and electrode positions respected to a ground position ($L = -8$ to 8 cm in flow direction, and $H = 0$ to 6 cm in normal flow direction). High electrical voltage is applied in the range of 0 to 30 kV. Temperature and velocity of hot-air flow are controlled at 60°C and 0.35 m/s, respectively. Experimental results show that when electric fields are exposed to hot-air flow, temperature and rate of moisture removal of porous material are rapidly increased as compared without electric fields. In addition, either increase of the number of electrode or decrease of gap between electrode and ground wires enhances the drying rate considerably. It is indicated from flow visualization that effect of electric fields conducts hot-air wind to circulate above porous material. Moreover, circulating wind becomes smaller but more violent when gap L or H decreases. Furthermore, electrode layout affects the direction and location of circulating wind, as well as, drying efficient. With electrohydrodynamics, the rate of drying is enhanced by $1.3 - 2$ times.

Keywords: electrohydrodynamics (EHD), drying process, enhancement of heat and mass transfer

1. บทนำ

ด้วยวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและเศรษฐกิจ ทำให้ประเทศต่างๆ ให้ความสนใจด้านการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากที่สุด สำหรับประเทศอุตสาหกรรมที่เกี่วข้องกับการเกษตรวิธีการรักษาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่กำลังถูกให้ความสนใจอย่างมาก ด้วยเหตุผลนี้การพัฒนาวิธีการอบแห้งจึงเป็นสิ่งมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพของการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้พลังงานสูงและระยะเวลาการอบแห้งนาน

Isobe และคณะ [1] ศึกษาอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์สำหรับการอบแห้ง ณ อุณหภูมิบรรยากาศที่ไม่มีลมพัด โดยติดตั้งอิเล็กโตรดกับกราวด์แบบ point-to-plate กล่าวคืออิเล็กโตรดทองแดง 1 แห่ง

ติดตั้งอยู่เหนือแผ่นกราวด์อลูมิเนียม และรายงานว่าการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงไม่เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุแต่ทำให้อัตราการอบแห้ง agar gel เร็วขึ้นเป็น 3 เท่า ของการอบแบบปกติที่ควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการอบแห้งแปรผันตามความแข็งแรงของสนามไฟฟ้าที่ใช้ แต่แปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโตรดกับแผ่นกราวด์อลูมิเนียม

Cao และคณะ [2] ใช้คู่อุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและติดตั้งอิเล็กโตรดกับกราวด์แบบ multi-point-to-plate โดยอิเล็กโตรดทองแดงจำนวน 16 แห่งติดตั้งอยู่เหนือแผ่นกราวด์สแตนเลส ผลทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดและกราวด์ที่น้อยลง

Lai และ Sharma [3] วางแพคเบดที่ใส่น้ำและลูกแก้วขนาดหนึ่งในอูโมงค์ลมและติดตั้งอิเล็กโตรดกับกราวด์แบบ multi-point-to-plate โดยอิเล็กโตรดนิเกิล (nickel) จำนวน 3 แท่ง ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือเหนือแพคเบดซึ่งฐานทำจากแผ่นทองแดง ผลทดลองรายงานว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความแข็งแรงของสนามไฟฟ้าและความเร็วของลมที่ไหลในทิศทางสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีลมอัตราการอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้า

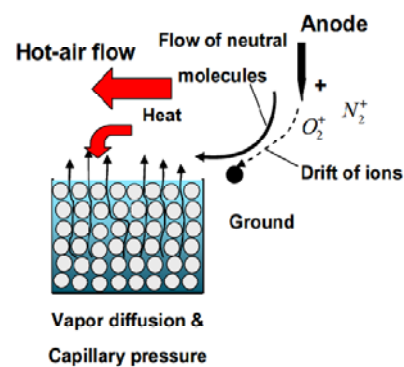
Chakranond และ Rattanedecho [4] ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าในแพคเบดที่มีความพรุนสองค่า (ชั้นที่มีเม็ดแก้วขนาดใหญ่และชั้นที่มีเม็ดแก้วขนาดเล็ก) โดยติดตั้งอิเล็กโตรดทองแดง 4 แท่ง ในตั้งฉากกับการไหลและเส้นลวดกราวด์ทองแดงติดตั้งอยู่เหนือแพคเบด ภาพถ่ายที่ได้จากทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะเกิดลมหมุนรอบๆ ลวดกราวด์และเป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลของการจัดเรียงความพรุนที่ต่างกันทำให้เกิดความดันคาปิลลารี (capillary pressure) ที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้อัตราการระเหยของน้ำของการจัดเรียงแบบที่ชั้นเม็ดแก้วขนาดเล็กอยู่ด้านบนเร็วกว่าการจัดเรียงแบบที่ชั้นเม็ดแก้วขนาดใหญ่อยู่ด้านบน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้งของวัสดุพรุนที่มีความอิมตัวแบบไม่สมบูรณ์โดยใช้ลมร้อนร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) และศึกษาลักษณะการหมุนวนของ

ลมร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากจากจاذวางอิเล็กโตรดและกราวด์

2. หลักการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย EHD

แนวคิดของการปรากฏการณ์โคโรน่าวินด์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุน แสดงในรูปที่ 1 โดยลมร้อนจะไหลผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้กระแสอากาศหมุนวน ซึ่งเพิ่มพาความร้อนระหว่างลมร้อนและผิวหน้าของแพคเบดมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดียิ่งขึ้น [4]



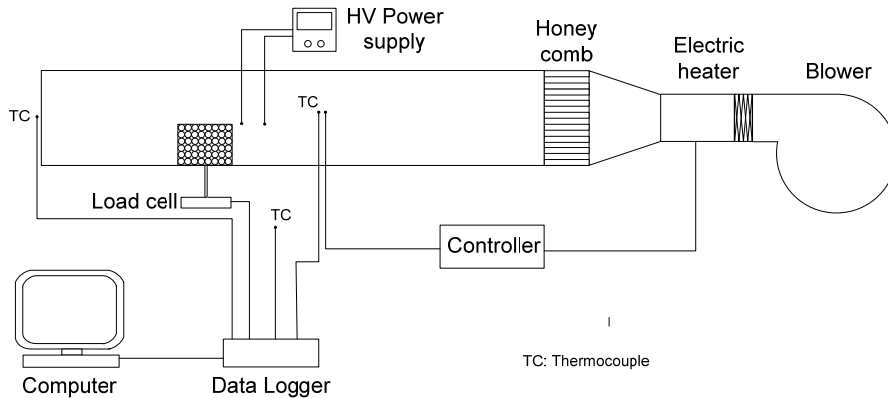
รูปที่ 1 กลไกการเพิ่มการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า [4]

3. ชุดทดสอบและการทดลอง

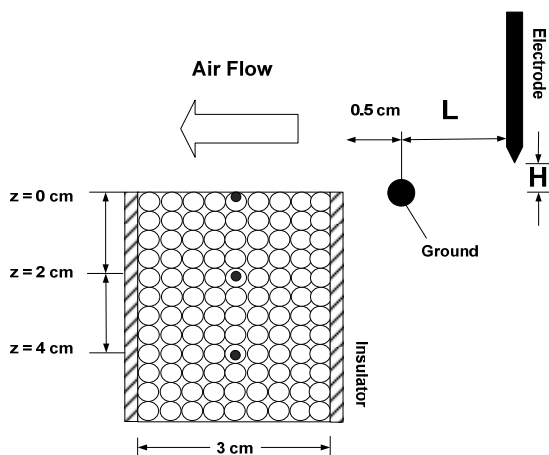
แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 ในการทดลองวัสดุพรุนถูกแทนด้วยแพคเบดซึ่งติดตั้งอยู่ในอูโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 15 x 15 cm ลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C และความเร็วลมที่ 0.35 m/s ก่องแพคเบดมีขนาด 3 x 12 x 6 cm (กว้าง x ยาว x สูง) ทำจากแผ่นอะคริลิก (acrylic plate) ผิวภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวนยางกันความร้อน ยกเว้นที่ผิวหน้าเปิดสู่ลมร้อน ภายในประกอบด้วยน้ำและเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm (ค่าความพรุน, $\phi \sim 0.385$)

และค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) ของแพคเกจมีค่า $s = 0.5$ ดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิภายในแพคเกจถูกวัดด้วยไฟเบอร์ออปติก (Luxtron Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^\circ\text{C}$) จำนวน 3 เส้น ซึ่งติดตั้งที่ระยะ (z) เท่ากับ 0, 2, และ 4 cm (วัดจากผิวด้านบน

ลึกลงไปในแพคเกจ) ค่าน้ำหนักของแพคเกจที่ ณ เวลาต่างๆ ถูกวัดโดยโหลดเซลล์ (load cell) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Glassman, Model MJ30N400) ถูกใช้สร้างแรงดันทดสอบตั้งแต่ 0 - 30 kV และกำหนดให้กราวด์อยู่ที่ตำแหน่งที่ L และ H เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ตำแหน่งอิเล็กโทรดและแพคเกจ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ลักษณะของสนามไฟฟ้า

ลักษณะของสนามไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

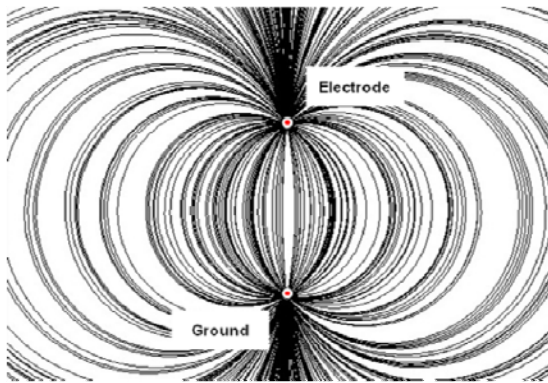
$$q = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2)$$

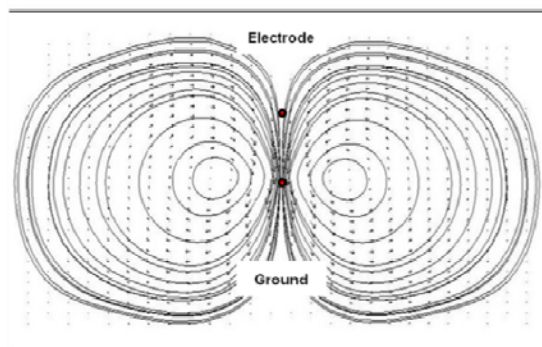
ซึ่ง q คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า \vec{E} คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) ของของไหล และ V คือ แรงดันไฟฟ้า

เพื่อหาค่าความเร็วของอากาศเนื่องจากแรงไฟฟ้าแรงสมมุติให้อากาศเป็นอนุภาคกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร และสมมุติอากาศเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง และแรงต้านการเคลื่อนที่บนอนุภาคพิจารณาเฉพาะแรงต้าน (drag force) ดังนั้นสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณความเร็วของอนุภาคอากาศเนื่องจากแรงไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$\vec{u}_p = \frac{\vec{F}_E}{3\pi\mu_f d_p} \quad (3)$$



รูปที่ 4 เส้นแรงของความเข้มของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศเนื่องจากสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางจากปลายขั้วอิเล็กโตรดไปสู่กราวด์ แต่จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง พบว่าลักษณะการหมุนวนของอากาศมีลักษณะแตกต่างจากรูปแบบของเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะผลักอากาศส่วนที่ถูกชาร์จให้เคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโตรดสู่กราวด์ และในขณะเดียวกันอากาศรอบๆ ที่ไม่ถูกชาร์จจะได้รับอิทธิพลของการไหลแบบเฉือน (shear flow) ทำให้อากาศส่วนนี้ถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เป็นลักษณะหมุนวน (circulating flow)

4.2 ภาพถ่ายการไหลภายใต้สนามไฟฟ้า

แรงดันสูง

เพื่อสังเกตการไหลของลมภายใต้สนามไฟฟ้างานวิจัยนี้ใช้ควันรูปแสดงเส้นทางการไหลของลม และติดตั้งหลอดไฟแสงสว่างขนาด 500 W จำนวน 2 ดวง ส่องในแนว 45 องศา กับอุโมงค์ลม และบันทึกภาพการไหลของลมโดยใช้กล้องดิจิทัลวิดีโอ (SONY DCR-PC 108/PC 109E) และความเร็วลมเฉลี่ยขณะถ่ายภาพประมาณ 0.1 m/s

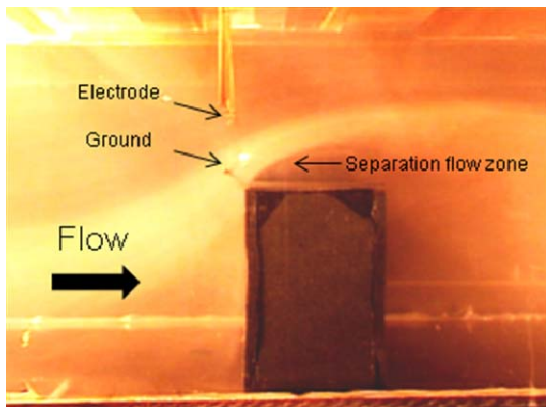
ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า L (cm) ที่เป็นตัววัดเป็นระยะที่แท่งอิเล็กโตรดติดตั้งอยู่ด้านหน้าของลวดกราวด์ และกำหนดให้ค่า H (cm) เป็นระยะที่อิเล็กโตรดติดตั้งอยู่สูงกว่าตำแหน่งลวดกราวด์

เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าลมเกิดการไหลแยก (flow separation) ที่ผิวหน้าของแพคเบด ซึ่งจะเป็เหตุให้การถ่ายความร้อนจากลมร้อนสู่ผิวแพคเบดไม่ดี

ในรูปที่ 5 แสดงผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการไหล เมื่อจำนวนอิเล็กโตรด $n = 4$ ซึ่งลมหมุนที่เกิดขึ้นทำให้การไหลแยกมีขนาดความหนาลดลง นอกจากนี้ตำแหน่งการหมุนของลมเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโตรด ลมหมุนเกิดที่ผิวหน้าของแพคเบดเมื่อติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหน้าของลวดกราวด์ ($L = 4, H = 2$) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) มีทิศทางการไหลและบริเวณที่เกิดลมหมุนคล้ายคลึงกับรูปที่ 7 (ข) ที่ติดตั้งในแนวเดียวกับลวดกราวด์ ($L = 0, H = 2$)

แต่เนื่องจากรูปที่ 7 (ข) ระยะห่างของแท่งอิเล็กโตรดกับลวดกราวด์มีค่าน้อยลงทำให้แรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยแรงคูลอมบ์แปรผันตามค่าสนามไฟฟ้า ($\vec{F}_E = q\vec{E}$ ที่ซึ่ง q คือ ความแน่นของประจุไฟฟ้า

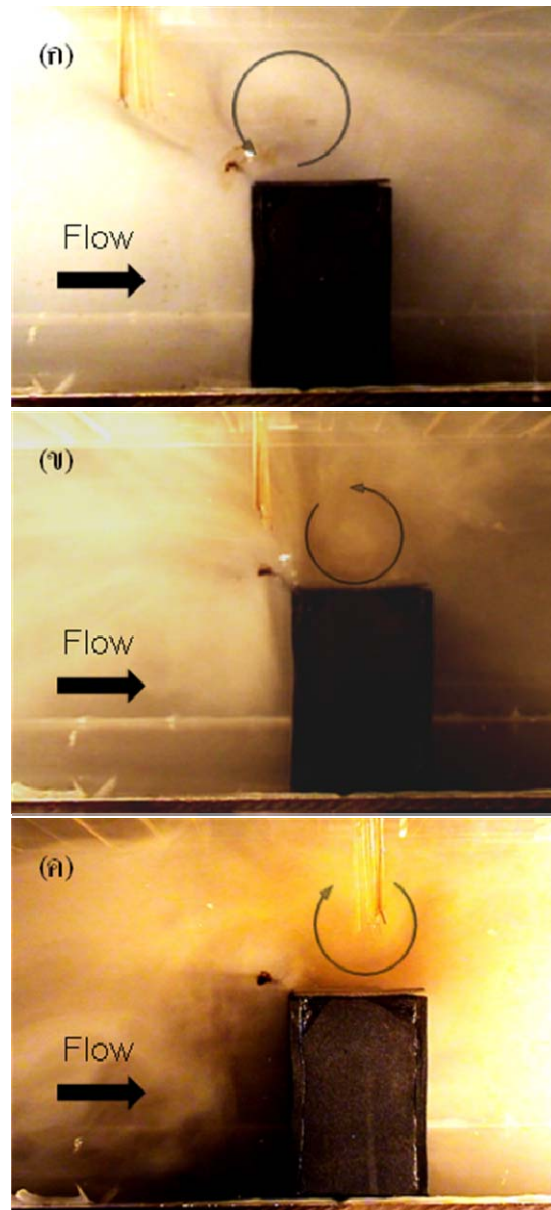
และขนาดของสนามไฟฟ้าผกผันกับระยะทางกำลังสอง ($\|E\| \propto R^{-2}$ ที่ซึ่ง R คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์) แรงคูลอมบ์ที่ลดลงส่งผลทำให้แรงที่เหนี่ยวนำอากาศที่ไม่ถูกไอโอไนซ์หรือแรงเนื่องจากการไหลแบบเฉือน (shear flow) เพื่อเกิดการหมุนวนมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นความแรงของการหมุนวนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะ L มีค่าลดลง แต่รัศมีความโค้งหรือขนาดของการหมุนวนจะลดลง และยังพบว่าในรูปที่ 7 (ก) ซึ่ง $L = 4$ มีทิศทางการหมุนที่ตรงข้ามกับการหมุนของลมในรูปที่ 7 (ค) ซึ่ง $L = -4$ รวมถึงขนาดและความแรงของการหมุนมากกว่ารูปที่ 7 (ค) ทั้งนี้เพราะในรูปที่ 7 (ก) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของอากาศ (flow direction) ส่วนรูปที่ 7 (ค) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่สวนทิศทางกับการไหลทำให้แรงเนื่องจากการไหลแบบเฉือนมีค่าน้อยลง



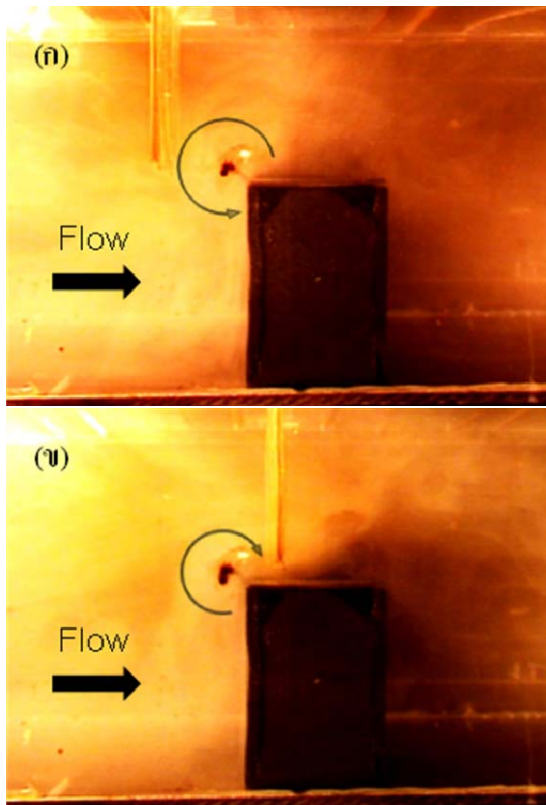
รูปที่ 6 ภาพถ่ายการไหลไม่ใช้สนามไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่ด้านหน้าของลวดกราวด์ ($L = 2, H = 0$) ลมหมุนวนเกิดที่ด้านหน้าของแพคเกจดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) แต่รูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดที่

ด้านหลังของกราวด์พื้นที่บางส่วนของผิวหน้าของแพคเกจไม่ได้รับอิทธิพลจากการลมหมุนวนและการไหลแยกสามารถถูกสังเกตได้อีกครั้ง



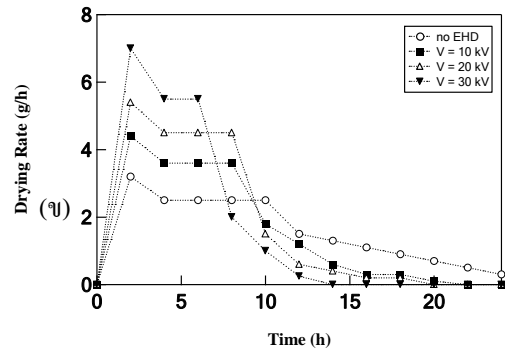
รูปที่ 7 ภาพถ่ายการไหล เมื่อ $V = 15$ kV, $H = 2$ cm
(ก) $L = 4$ (ข) $L = 0$ และ (ค) $L = -4$ cm



รูปที่ 8 ภาพถ่ายการไหลเมื่อ $V = 15 \text{ kV}$, $H = 0 \text{ cm}$
(ก) $L = 2 \text{ cm}$ และ (ข) $L = -2 \text{ cm}$

4.3 ผลของการอบแห้งเมื่อใช้สนามไฟฟ้าร่วม

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นสูงมากยิ่งขึ้น และเป็นผลทำให้เวลาในการอบแห้งน้อยลง (ตั้งแต่เริ่มต้นถึงเวลาที่อัตราการความชื้นระเหยออกจากแพคเกจตกลง) โดยการใช้สนามไฟฟ้าขนาด $V = 10, 20$ และ 30 kV ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 1.4, 1.8 และ 2.2 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าอัตราการอบแห้งแปรผันกับเอ็กซ์โปเนนเชียลของขนาดแรงดันไฟฟ้า [$DR \propto \exp(V)$]



รูปที่ 9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

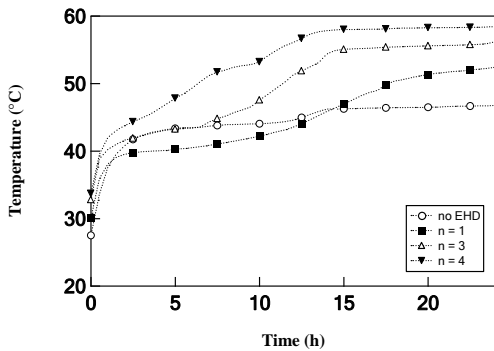
4.4 ผลของจำนวนอิเล็กโตรด

เมื่อจำนวนแท่งอิเล็กโตรด n มีค่ามากขึ้นมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่แพคเกจดีขึ้น ดังเห็นได้จากรูปที่ 10 อุณหภูมิที่ผิวของของแพคเกจมีค่าเพิ่มสูงเร็วขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนอิเล็กโตรดมากขึ้นมีผลทำให้อัตราความชื้นระเหยออกจากแพคเกจมีค่าสูงขึ้น แสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อจำนวนอิเล็กโตรดมีค่ามากขึ้นทำให้สนามไฟฟ้า (E) มีค่ามากขึ้นและกระจายตัวในบริเวณที่กว้างมากขึ้น ส่งผลทำให้แรงคูลอมบ์มีขนาดมากขึ้นและมีการกระจายตัวที่มากขึ้นตาม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้อากาศที่อยู่รอบๆ มีการหมุนวนที่รุนแรงขึ้น ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำออกจากบริเวณผิวหน้าของแพคเกจได้เร็วขึ้นและการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเกจดียิ่งขึ้น

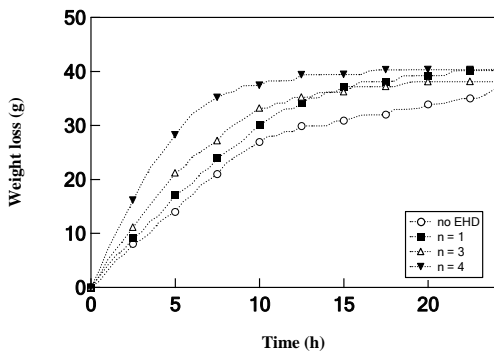
4.4 ผลของจำนวนอิเล็กโตรด

เมื่อจำนวนแท่งอิเล็กโตรด n มีค่ามากขึ้นมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่แพคเกจดีขึ้น ดังเห็นได้จากรูปที่ 10 อุณหภูมิที่ผิวของของแพคเกจมีค่าเพิ่มสูงเร็วขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนอิเล็กโตรดมากขึ้นมีผลทำให้อัตราความชื้นระเหยออกจากแพคเกจ

เบคมีค่าสูงขึ้น แสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อจำนวนอิเล็กโตรดมีค่ามากขึ้นทำให้สนามไฟฟ้า (E) มีค่ามากขึ้นและกระจายตัวในบริเวณที่กว้างมากขึ้น ส่งผลทำให้แรงคูลอมบ์มีขนาดมากขึ้นและมีการกระจายตัวที่มากขึ้นตาม ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้อากาศที่อยู่รอบๆ มีการหมุนวนที่รุนแรงขึ้น ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำออกจากบริเวณผิวหน้าของแพคเกจได้เร็วขึ้นและการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเกจดียิ่งขึ้น



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพูนที่ n ต่างๆ เมื่อ $L = 2$ cm, $H = 1$ cm, $V = 15$ kV

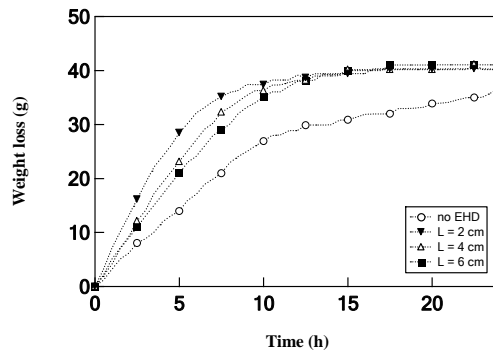


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุพูนที่ n ต่างๆ เมื่อ $L = 2$ cm, $H = 1$ cm, $V = 15$ kV

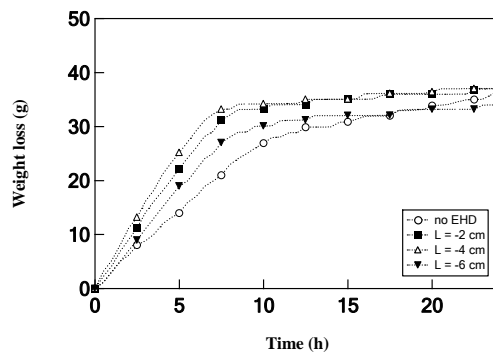
4.5 ผลของตำแหน่งอิเล็กโตรด

จากรูปที่ 12 และ 13 พบว่าตำแหน่งของอิเล็กโตรดมีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเกจ โดยตำแหน่งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนดีที่สุดคือตำแหน่งที่อิเล็กโตรดและกราวด์ใกล้กันมากที่สุด ดังนั้นแรงคูลอมบ์มีค่ามากที่สุด และทำให้ความรุนแรงของการหมุนมีค่ามากที่สุด

(ก)



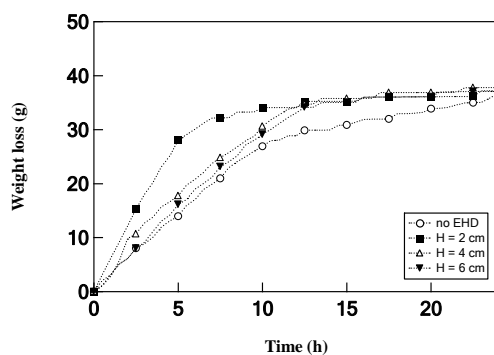
(ข)



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุพูน เมื่อ $H = 1$ cm, $V = 15$ kV (ก) $L = 2$ ถึง 6 และ (ข) $L = -2$ ถึง -6 cm

เมื่อเปรียบเทียบผลของการติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหน้าและที่ด้านหลังของลวดกราวด์พบว่า การติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหน้ามีผลทำให้อัตราการ

ระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตสูงกว่าการติดตั้งที่ด้านหลัง (พิจารณาในช่วงอัตราคงที่ของการอบแห้ง) ดังแสดงในรูปที่ 13 ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น การติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหลังของลวดกรวดมีผลทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับทิศของการไหลของลมร้อน ส่งผลทำให้แรงเนื่องจาก การไหลเหนือนมีค่าน้อยลง (การหมุนมีขนาดและความรุนแรงน้อยลง) และนอกจากนี้ในรูปที่ 7 (ค) แสดงให้เห็นว่าการหมุนวนสัมผัสเพียงบางส่วนของผิวหน้าของแพคเบต



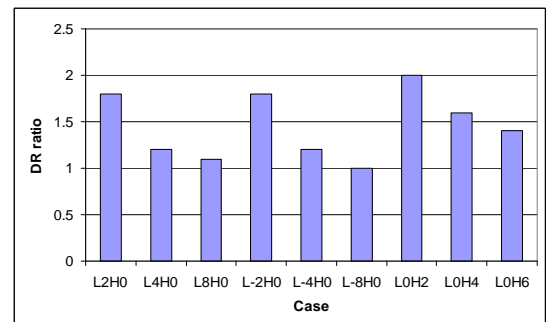
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุพรุณที่ H ต่างๆ เมื่อ $L = 0$ cm, $V = 15$ kV

4.6 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง

เพื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นโดยใช้สนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้พิจารณาอัตราการอบแห้งในช่วงที่อัตราการอบแห้งมีค่าคงที่ (constant rate of drying period) และประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างอัตราการอบแห้งในเมื่อใช้สนามไฟฟ้าต่ออัตราการอบแห้งเมื่อใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว นั่นคือ

$$DR \text{ ratio} = \frac{DR_{EHD}}{DR_{free \text{ air}}} \quad (4)$$

จากรูปที่ 14 พบว่าการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเมื่อระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกรวดมีค่าน้อยๆ และการติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหน้าของกรวดทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการติดตั้งอิเล็กโตรดที่ด้านหลังกรวดเล็กน้อย นอกจากนี้การติดตั้งอิเล็กโตรดในแนวเดียวกับกรวด (แนวตั้ง) จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ทั้งนี้เพราะลมหมุนวนที่มีความแรงเกิดทั่วผิวหน้าของแพคเบต



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงาน พบว่าการใช้ EHD ทำให้ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ~1% ของการใช้พลังงานในการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ แต่สามารถทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 1.25 - 2 เท่า ดังนั้นการใช้ EHD ช่วยในการอบแห้งจึงมีความคุ้มค่ามาก

5. สรุป

5.1 ผลของสนามไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิของแพคเบตเกิดการหมุนวน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนของวัสดุพรุณ

5.2 ขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งของวัสดุพรุณมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก

5.3 จำนวนขั้วอิเล็กโตรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ลมมีการหมุนวนที่รุนแรงขึ้น โดยทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นในวัสดุพรมมีค่าสูงขึ้นมาก

5.4 เมื่อระยะห่างระหว่างกรวดและอิเล็กโตรดมีค่าลดลงส่งผลทำให้ลมหมุนวนมีขนาดที่เล็กลงแต่มีความรุนแรงของการหมุนที่มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งของการจัดวางมีอิทธิพลต่อทิศทางการหมุนวน และตำแหน่งของการเกิดลมหมุนวนมีส่วนช่วยลดการไหลแบบแยก (separation flow)

5.5 ในงานวิจัยนี้ การอบแห้งวัสดุพรมโดยใช้ลมร้อนร่วมกับเทคนิคอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์มีอัตราการอบแห้งสูงขึ้นเป็น 1.25 - 2 เท่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Isobe, S., Barthakur, N., Yoshino, T., Okushima, L., and Sase, S., 1999, Electrohydrodynamic Drying Characteristics of Agar Gel, Food Sci. Technol. Res. 5 (2): 132-136.
- [2] Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S., and Lu, Z.H., 2004, Drying Enhancement of Rough Rice by an Electric Field, Biosys. Eng. 87 (4): 445-451.
- [3] Lai, F.C., and Sharma, R.K., 2005, EHD-enhanced Drying with Multiple Needle Electrode, J. Electrostat. 63: 223-237.
- [4] Chakranond, 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), Exp. Ther. Fluid Sci. 34 (8): 1049-1056.