

การวิเคราะห์อย่างสมบูรณ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลใน
แพคเบดวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้สนามไฟฟ้า (EHD)

Fully Analysis of Heat and Mass Transport in
the Unsaturated Porous Packed Bed under Electric Field (EHD)

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{1*}, กริช เจียมจิโรจน์¹, สันติ หวังนิพนานโต²

¹ศูนย์วิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์ จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 ถ.พหลโยธิน อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001 ต่อ 3151 โทรสาร 0-2564-3001 ต่อ 3049

²สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า 833 ถนนพหลโยธิน กรุงเทพมหานคร 10330

Phadungsak Ratanadecho^{1*}, Krit Jiamjiroch¹, Santi Wangnipanto²

Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.)

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rungsit Campus,

99 Pahon-Yotin RD. Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand Tel: 0-2564-3001-9,

²Phatumwan Institute of technology 833 Rama1 Bangkok 10330

Corresponding Author : *E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการถ่ายเทความร้อน และมวลสารในแพคเบดวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวในกระบวนการอบแห้งร่วมกับสนามไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่าหลักการ Electrohydrodynamic (EHD) โดยทำการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ การไหลของ ของไหลภายใต้อิทธิพลของสนามการไหลจากสนามไฟฟ้า (corona wind) เหนือแพคเบดอุดหนุนของลมร้อน ขนาดอนุภาค และอัตราการระเหยของมวลชื้นที่หายไปพบว่า ผลของการป้อนสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาค อุดหนุนของลมร้อน และผลของการป้อนสนามไฟฟ้ามีผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งโดยรวมอัตราการระเหยของมวลชื้นที่หายไป (Moisture evaporation) จะเพิ่มขึ้นประมาณ 150%-200% เทียบกับกรณีไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า ดอนท้ายของงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการอีกด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งวัสดุ

พรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยไมโครเวฟได้และสามารถใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

คำสำคัญ: จลนศาสตร์การอบแห้ง / สนามไฟฟ้า

Abstract An experimental study was carried out to investigate the heat and mass transport process in porous packed bed for convective drying with electrohydrodynamic (EHD). Initially, an experimental set-up was developed. An experimental program was then undertaken to study the convective drying with electrohydrodynamic at different condition. Most importantly, the main parameters for studies were focused on flow structure (corona wind), hot air temperature particle size and moisture evaporation rate. By applying an electric field on convective drying, the drying rate can be enhanced remarkable. The results show that the

drying kinetics strongly depend on the particle size, the hot air temperature, and the applied voltage. The moisture evaporation characteristics from the combination of the electric field and conventional hot air drying (CHP) techniques were compared with those conventional hot air drying methods. The results showed that the moisture evaporation in case of combining the electric field and conventional hot air drying was up to 150%-200% times higher than that case of CHP alone under the same final moisture content.. Finally, the economical analysis is also provided in this paper. The results presented here provide a basis for fundamental understanding of microwave drying of unsaturated porous materials and can be applied as useful tool for exploring practical problems.

keyword: drying kinetics / electric filed

1. บทนำ

หลักการของสนามไฟฟ้า (Electric field หรือ Corona wind) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานหลายรูปแบบเช่น งานเคลือบและพ่นสี ระบบถ่ายเอกสาร เครื่องดักฝุ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการวิจัยนำหลักการของสนามไฟฟ้ามาใช้ในการถ่ายเทความร้อน (Electrohydrodynamic, EHD) มีข้อดีคือ มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าปกติ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในระบบการเดือด (Boiling) การระเหย (Evaporator) การระบายความร้อน (Condenser) และเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศในเตาเผาเป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในสภาพสุญญากาศ และใช้กำลังไฟฟ้าในการทำงานต่ำมาก การอบแห้งด้วยลมร้อน (Conventional hot-air drying: CHD) ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปสู่วัสดุชิ้นที่จะกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่และระเหยของน้ำออกได้ช้า เนื่องจาก มีการระเหยน้ำจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าก่อน จากนั้นจึงเกิดการระเหยภายในเนื้อวัสดุภายหลัง จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มักจะใช้เวลานาน หากนำเอาหลักการของสนามไฟฟ้าซึ่งมีความสามารถในการเพิ่มถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าปกติมาช่วยในการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดาซึ่งหลักการนี้ จะมีประโยชน์อย่างมากในกระบวนการอุตสาหกรรม

จากประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธี EHD ทางกลุ่มวิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการทำควมรู้ความเข้าใจให้มากขึ้นกับวิธีการนี้ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาในกระบวนการที่อาศัยวิธี EHD ในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลนั้น มีการศึกษาในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการไหลของสารทำงานชนิดต่าง ๆ [1]

โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ีต่อการไหลวนและการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนของไหลหรือลักษณะการไหลในวัสดุพุนที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า

Yabe, A. and Maki, H. [2] ได้ทดลองหาความสามารถในการพาความร้อน (Convective) และการถ่ายเทความร้อนของการเดือดในสารประสม R-113(96wt.%) กับ Ethanol(4wt%) ด้วยวิธีการฉีดของไหลผ่านสารทำงาน EHD สารทำงานพบว่า การพาความร้อนบนแผ่นเพลท เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยวิธี EHD liquid jet จะมากกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ถึง 100 เท่า

Cooper, P. [3] ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเดือดในสนามไฟฟ้าซึ่งอธิบายได้ในเทอมของแรงไฟฟ้า (Electrical body force) ที่กระทำกับสารทำงาน เพื่อเสนอแนวการออกแบบ EHD ที่ใช้กับอุปกรณ์ที่ระเหย ในการศึกษาพิจารณาอิทธิพลตัวแปรด้าน Electrode และการถ่ายเทความร้อนภายใต้สนามไฟฟ้าความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิจัยที่ผ่านมา ถูกเสนอเปรียบเทียบกันด้วย สัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใต้สนามไฟฟ้าและสภาวะปกติ

Poulter.R. and Miller .A. [4] ได้สร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ผสมในท่อภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้ น้ำมันก๊าด (Kerosene), น้ำมันหม้อแปลง (Transformer oil) และ Hexane ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันเป็นสารทำงาน,การไหลของสารทำงานในท่อมี่ลักษณะแบบราบเรียบ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบบป้อนสนามไฟฟ้าและแบบธรรมดา พบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 20 เท่าของปกติ

F. Lai M. Huang, and D. Wong [5] ได้สร้างชุดแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้โมเดลของสนามไฟฟ้าตัวอย่างที่ศึกษาคือ ของไหลที่เป็นน้ำ เพื่อศึกษาการระเหยของน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า ลักษณะของแท่งอิเล็กโทรด ผลกระแสและขั้วของโคโรนาพบว่า อัตราการระเหยจะเพิ่มขึ้นตามความต่างศักย์ที่เพิ่มและขั้วบวกให้ช่วยให้อัตราการระเหยดีกว่าขั้วลบ ในกรณีที่มีการเป่าลมพร้อมกันไปด้วย อัตราการระเหยจะเป็นอิสระต่อความต่างศักย์ และขึ้นกับความเร็วมวลอย่างเดียว

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในประการสำคัญดังนี้

- 1.) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพุน (porous media) อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (electrohydrodynamic, EHD)
- 2.) ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้วิธีการของสนามไฟฟ้าช่วยในการถ่ายเทความร้อนและมวลเพิ่มขึ้นในวัสดุพุนเมื่อเปรียบเทียบกับจากวิธีเดิมอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง

2. ผลของสนามไฟฟ้าต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวล

2.1 แรงที่กระทำโดยสนามไฟฟ้า

อันตรกิริยาระหว่างของไหลและสนามไฟฟ้า (Corona wind) หรือ Electrohydrodynamic (EHD) คือ ผลของอันตรกิริยาดังกล่าวทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แรงที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า จะแสดงด้วยสมการ

$$\vec{F}_e = \rho_c \vec{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(E^2 \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right) \quad (1)$$

เมื่อ E เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้า

ρ คือ ความหนาแน่นของไหล

ϵ คือ Dielectric permittivity,

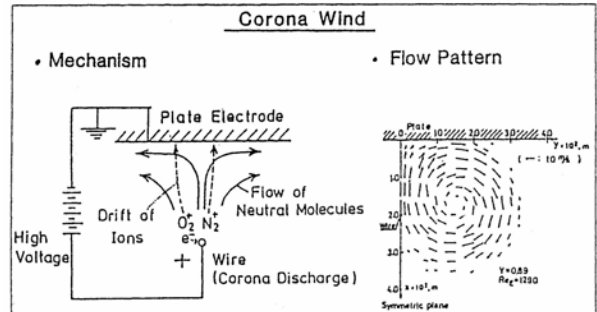
T คือ อุณหภูมิ

และ ρ_c คือ และความหนาแน่นของประจุ

พิจารณาทางขวามือของสมการ เทอมแรกเป็นแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb force) ซึ่งเป็น ผลจากอันตรกิริยาระหว่างประจุอิสระในของไหลกับสนามไฟฟ้า และมีผลอย่างมากในการเกิด Corona wind เทอมสองเป็นแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริก (ϵ) และเทอมสามเป็นแรงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.2 ปรากฏการณ์ของการเกิด Corona wind

เมื่อให้สนามไฟฟ้าระหว่างของเหลวและแก๊ส จากงานวิจัยของ Yabe, A. and Maki, H. [2] ได้อธิบายถึงกลไกการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแก๊สและการไหล ดังอธิบายรูปที่ 1 คือเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้อิเล็กโทรดปลายแหลมทำให้แก๊สบริเวณโดยรอบเกิดสภาวะไอออนไนซ์ขึ้น ไอออนอิสระเหล่านี้จะวิ่งไปยังเพลทอิเล็กโทรดที่เป็นกราวด์ด้วยแรง Coulomb force ขณะไอออนอิสระเคลื่อนที่ไปชนกับโมเลกุลแก๊สที่เป็นกลาง และเกิดการส่งผ่านโมเมนตัม ทำให้โมเลกุลแก๊สที่เป็นกลางเคลื่อนที่ไปมาและเกิดการไหลที่ปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งเรียกรวมการเคลื่อนที่ชนกันระหว่างกลุ่มของไอออนอิสระและโมเลกุลของอากาศว่ากระแสโคโรนา (Corona wind) การถ่ายเทความร้อนและมวลบริเวณใกล้เคียงเพิ่มขึ้น

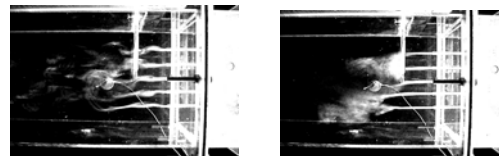


รูปที่ 1 กลไกการเกิด Corona wind [1]

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้น

ในงานวิจัยครั้งนี้

ได้ทำการทดลองเพื่อสังเกตปรากฏการณ์Coronawindในห้องปฏิบัติการในรูปที่2แสดงความแตกต่างของสนามการไหลกรณีไม่มี Corona wind ($V=0$) และ กรณีมี Corona wind ($V=24kV$) ที่สภาวะ $Re=3420$ และรูปที่3แสดงรายละเอียดของสนามการไหลกรณีที่มี Corona wind ที่สภาวะ $Re=3420, V=24kV$ ที่ช่วงเวลาต่าง

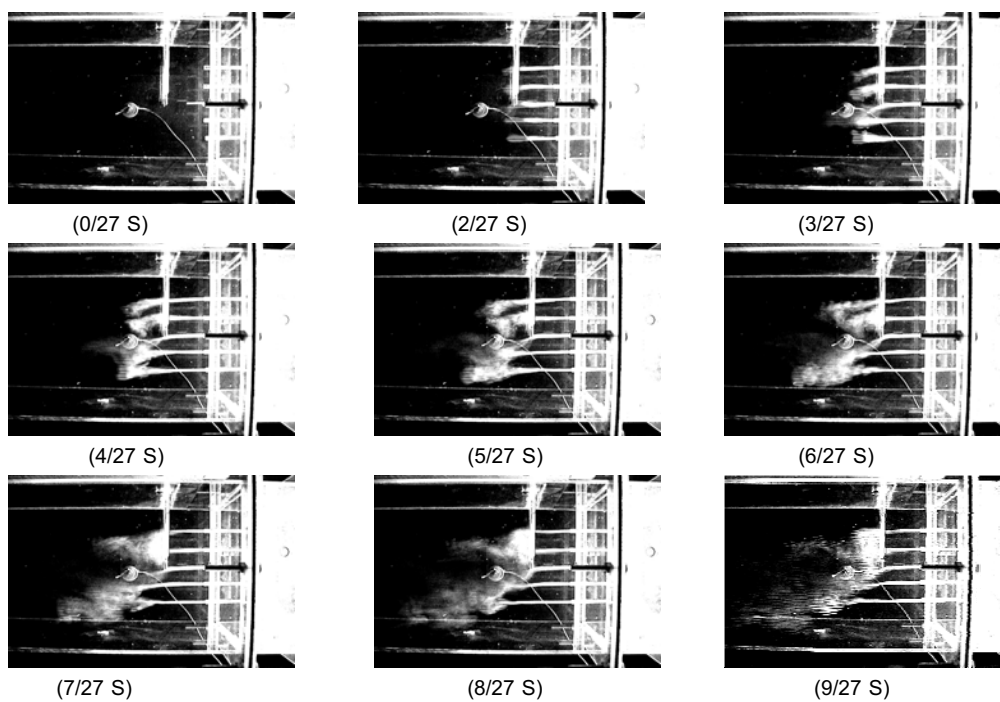


(a) ไม่มีสนามไฟฟ้า

(b) มีสนามไฟฟ้า

รูปที่ (2) เปรียบเทียบกรณีที่มีการไหลอิสระในกรณีที่มี $Re = 3240$

ผลจากการทดลองพบว่า การป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปที่อิเล็กโทรดปลายแหลม เกิดกระแสโคโรนา (Corona wind) อย่างชัดเจนต่อสนามการไหลของอากาศเหนือแพดเบต โดยสังเกตได้จากการปั่นป่วนอย่างรุนแรงของอากาศบริเวณดังกล่าวจึงเป็นการยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าหลักการที่นำเสนอนี้ สามารถทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้จริง



รูปที่ 3 การไหลกรณีที่มี การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาดด้วยลมร้อน 24 kV ในช่วงเวลาต่าง ๆ $Re = 3420$, $Re_{EHD} = 41802$

2.3 กลไกในการเคลื่อนย้ายความชื้นและการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวภายใต้การป้อนสนามไฟฟ้า

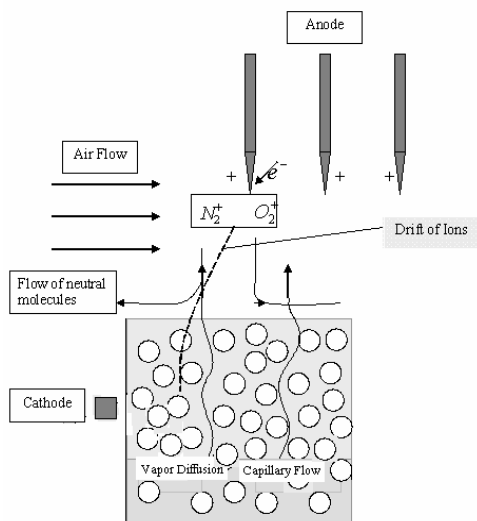
กลไกสำคัญในการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวคือ เกรเดียนความดันแคปิลลารี (Capillary pressure) และ แรงโน้มถ่วงโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ในขณะที่เกรเดียนของความดันบางส่วนของการระเหยจะเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของไอ (Vapordiffusion) ในงานวิจัยครั้งนี้ ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การส่งถ่ายมวลและความร้อนมีดังนี้

1. วัสดุพูนที่พิจารณาเป็นชนิดnonhygroscopicและเป็นวัสดุเกร็งไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน และไม่มียอนตรกิริยากับสนามไฟฟ้าที่ป้อน

2. แพคเกจของวัสดุพูนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

3. ผงของภาชนะบรรจุแพคเกจของวัสดุพูนยกเว้นที่ผิวหน้า ถูกหุ้มด้วยฉนวนไว้โดยรอบเพื่อไม่มีการระเหยในทิศทางอื่น

ในงานวิจัยนี้ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าจะเกิด Corona wind ในอากาศที่เหนือแพคเกจทำให้การถ่ายเทความร้อน และการระเหยตัวของความชื้นที่ผิวมากขึ้น สำหรับแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่ทำการศึกษารั้งนี้แสดงในรูปที่ 4

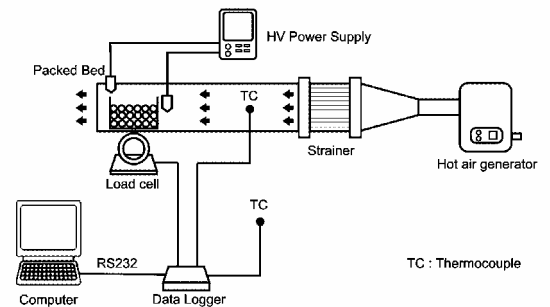


รูปที่ 4 การเกิดปรากฏการณ์ EHD เหนือแพคเกจวัสดุพูน

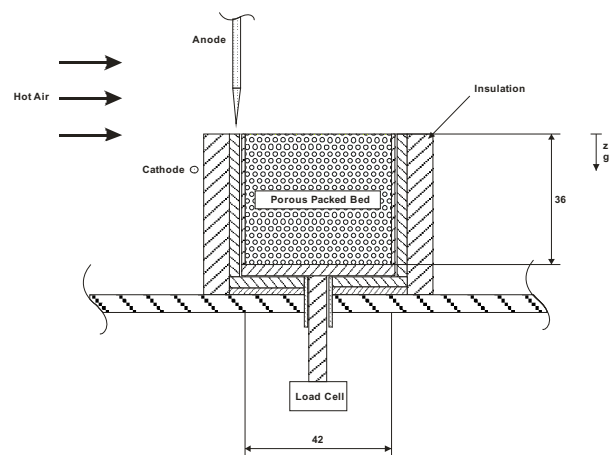
3. อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 5 แสดงองค์ประกอบของชุดทดลองหลัก ซึ่งประกอบด้วยอุโมงค์ลม, แหล่งกำเนิดลมร้อน, แหล่งจ่ายแรงดันสูง, ชุดวัดน้ำหนักและเครื่องบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วยหัวอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมจำนวน 5 ชุด วางบริเวณขอบบนของแพคเกจ วัสดุพูนมีองค์ประกอบเป็นเม็ดแก้ว (glass bead) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มม. และ 0.4 มม. น้ำ และโพรงอากาศ ซึ่งบรรจุในกล่องบรรจุแพคเกจขนาด 135 มม. X 40 มม. X 70 มม. สำหรับกราวด์อิเล็กโทรดจะวางด้านข้างของกล่อง

นอกจากนี้ยังมีระบบกำเนิดหมอกและระบบพ่นหมอกซึ่งต่อเชื่อมกับอุโมงค์ลมเพื่อสังเกตปรากฏการณ์ Corona wind ที่อยู่เหนือแพคเกจโดยทำการทดลองในห้องมืดที่ควบคุมสภาวะได้ ผลปรากฏการณ์ Corona wind จะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง เจ็อนไซโครบแห่งและคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูน ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ (Ratanadecho et al. [6])



รูปที่ 5 ชุดทดลองการอบแห้งร่วมกับสนามไฟฟ้า (EHD)



รูปที่ 6 ส่วนของการทดสอบ (test section)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการอบแห้ง

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	M_{in}	22%db
Drying temperature	T	50– 60°C
ambient temperature	T_M	25°C
air velocity	W_a	0m/s, 0.4m/s
Applied voltage	V	0kV, 12kV
drying time	t	8-10 hour
Glass beads	d	0.15, 0.4 mm

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูน

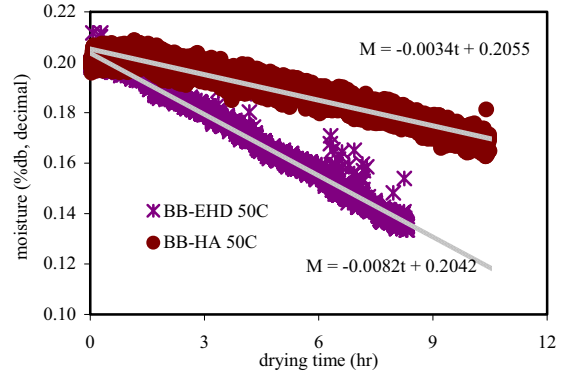
diameter d [mm]	porosity	Permeability K [m^2]
0.15	0.385	8.41×10^{-12}
0.40	0.371	3.52×10^{-11}

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

ผลของการอบแห้งวัสดุพูนแสดงเป็น กราฟเชิงเส้น สำหรับเงื่อนไขการทดลองแทนด้วยสัญลักษณ์เป็นอักษร 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นตัวแทนของขนาดเม็ดแก้ว อนุภาคเม็ดแก้วขนาดใหญ่แทนด้วย [BB] และเล็ก [SB] อักษรกลุ่มที่สองแทนเทคนิคการลดความชื้น การใช้ EHD ร่วมกับลมร้อนใช้อักษรย่อ [EHD] ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 12 kV และในกรณีที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวแทนด้วย [HA] สำหรับชุดอักษรกลุ่มสุดท้ายแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการลมร้อน โดย [50C] แทนการใช้อุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับ 50°C และ [60C] แทนการใช้ลมร้อนเท่ากับ 60°C สำหรับผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้ากับการอบแห้งวัสดุพูน

ในหัวข้อนี้จะหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลของน้ำระเหยกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าโดยปรับความต่างศักย์เท่ากับ 12 kV เทียบกับการอบแห้งตามปกติ (ความต่างศักย์เท่ากับ 0 kV) พบว่า เมื่อใช้แพคเกจที่เป็นวัสดุพูนอนุภาคเม็ดแก้วขนาดใหญ่ในการอบแห้งมีความเร็วและอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 0.4 m/s และ 50°C อัตราการระเหยมวลน้ำเทียบกับเวลา มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีกรป้อนสนามไฟฟ้า เมื่อค่าความชันของกราฟแสดง ค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยของน้ำ (g/hour) ในรูปที่ 7 พบว่า การใช้สนามไฟฟ้าช่วยเพิ่มค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยของน้ำมากกว่าสองเท่า

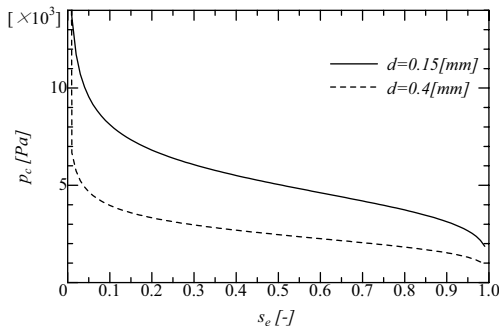


รูปที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา ในกรณีที่มิมีสนามไฟฟ้าความต่างศักย์ 12 kV และไม่มีสนามไฟฟ้า (ความต่างศักย์ 0 kV)

อัตราการระเหยของน้ำในช่วงแรกเป็นผลเนื่องจากแพคเกจมีความชื้นหรือค่าความอึดตัวมีค่าสูงแรงดันแคปปีลารีมีค่ามาก (ดังแสดงในรูปที่8)แรงดันแคปปีลารีทำให้สามารถเคลื่อนย้ายความชื้นจากภายในวัสดุพูนโดยผ่านทางช่องรูพูนออกไปยังผิวหน้าของแพคเกจที่อัตราเร็วเท่ากับอัตราการระเหยตัวของความชื้นที่ผิวหน้าแพคเกจเรียกช่วงคาบเวลานี้ว่าช่วงการอบแห้งคงที่ (constant drying period) ซึ่งพบว่า ผลการทดลองอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่อยู่

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของน้ำที่หายไปกับเวลา โดยเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ พบว่า ในช่วงแรกอัตราการระเหยของน้ำที่หายไปจากแพคเกจในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องมาจากผลของแรงดันแคปปีลารีมีอิทธิพลมากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

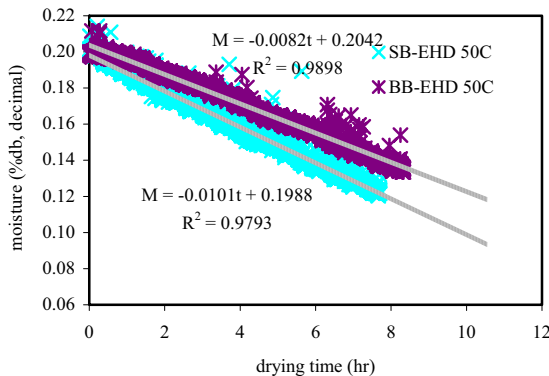
แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการระเหยของน้ำของแพคเกจในแต่ละกรณีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องมาจากอิทธิพลของความดันแคปปีลารีมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในคาบเวลานี้ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะมีอิทธิพลสูง แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะส่งผลต่อการเกิด Corona wind ที่รุนแรง (เนื่องจากแรง Coulomb force ในสมการที่ 1 สูงขึ้น) ทำให้การไหลของไหลปั่นป่วน และช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลบริเวณเหนือแพคเกจเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันในเวลา นี้ ซึ่งมีไอน้ำเป็นองค์ประกอบหลักอิทธิพลของการแพร่กระจายไอ (vapor diffusion) กลับมีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนย้ายความชื้น ออกสู่ผิวหน้าของแพคเกจ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันแคปิลารีกับค่าอิมิตวที่ขนาดอนุภาคต่างกัน (Ratanadecho et al. [6])

4.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคภายในแพคเกจวัสดุพูน

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของขนาดเม็ดแก้วภายในแพคเกจวัสดุพูนที่มีผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเกจ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มม. และ 0.40 มม.) เมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 12 kV และอุณหภูมิความร้อนคงที่เท่ากับ 50°C และความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน



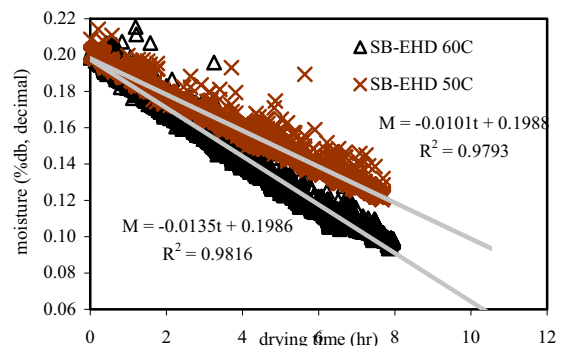
รูปที่ 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา ในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าความต่างศักย์ 12 kV และมีขนาดอนุภาคต่างกัน

พบว่า แพคเกจวัสดุพูนอนุภาคเม็ดแก้วขนาดเล็กมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นได้ดีกว่า เมื่อใช้วัสดุพูนที่ใช้เม็ดแก้วขนาดใหญ่ในทุกกรณี เพราะแพคเกจที่มีขนาดเม็ดแก้วเล็กมีความดันแคปิลารีสูงเมื่อเทียบกับขนาดเม็ดแก้วขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอิทธิพลของความดันแคปิลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเกจมีค่าสูง

แต่เมื่อคาบเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของค่าการแพร่กระจายไอน้ำเป็นหลัก และกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะสมดุลเหมือนกับกรณีที่อยู่ภายใต้ในหัวข้อที่ผ่านมา

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนกับการอบแห้งวัสดุพูน

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนที่มีผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อน เมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 12kV และขนาดอนุภาคของแพคเกจเท่ากับและความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน พบว่า อุณหภูมิความร้อนที่มีค่าสูงส่งผลต่อการอัตราการระเหยของน้ำในแพคเกจเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่มีค่าสูงย่อมส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของความชื้นไปที่ผิวหน้าแพคเกจได้ง่ายขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของความดันแคปิลารี และการแพร่กระจายของไอน้ำบนสนามไฟฟ้า (Corona wind) ที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงซึ่งเป็นตัวการทำให้การไหลของของไหลปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลบริเวณพื้นที่เหนือแพคเกจเพิ่มขึ้น เหมือนดังที่อยู่ภายใต้ในหัวข้อ 4.1



รูปที่ 10 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความร้อน

4.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ

ในการคำนวณหาด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อที่จะคำนวณค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ไปในการที่จะทำให้แห้งหายไป 1g โดยจะคำนวณจากจำนวนที่น้ำที่ระเหยเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปโดยที่สรุปผลได้ตามกรณีต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานจากการเปรียบเทียบทั้งดังแสดงผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 11

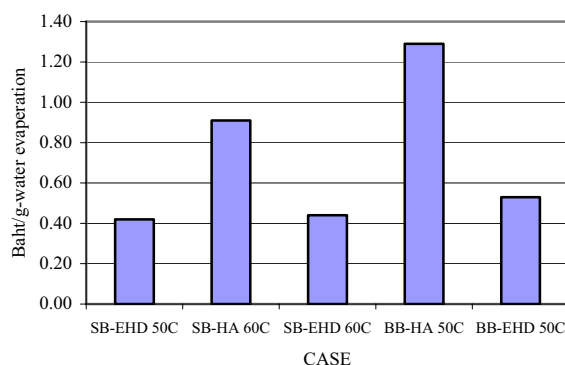
จากการทดลองพบว่า การใช้ EHD สามารถลดค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำในแพคเกจได้ดีกว่าการใช้ ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ได้อย่างชัดเจน ขนาดเม็ดแก้วที่เป็นแพคเกจขนาดเล็กจะช่วยให้การระเหยได้ดีกว่าขนาดใหญ่ สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิของลมร้อนจะส่งผลต่อการลดความชื้นโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ในกรณีที่ใช้ร่วมกับ EHD อุณหภูมิของลมร้อนมีผลน้อยมาก

ก. เมื่อใช้เม็ดแก้วขนาดเล็ก [SB] ที่อุณหภูมิ 60°C โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนและการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่า สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนช่วยลดอัตราค่าใช้จ่ายได้ 2.07 เท่า

ข. เมื่อใช้เม็ดแก้วขนาดใหญ่ [BB] ที่อุณหภูมิ 50°C โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนและการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่า การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนสามารถช่วยลดอัตราค่าใช้จ่าย 2.43 เท่า

ค. เมื่อใช้เม็ดแก้วขนาดเล็ก [SB] และใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนโดย เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ 50°C และ 60°C พบว่า การพาความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า การใช้การพาความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็น 1.07 เท่า

ง. เปรียบเทียบเมื่อใช้เม็ดแก้วขนาดเล็ก [SB] และเม็ดแก้วขนาดใหญ่ [BB] โดยใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อน โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 50°C เท่ากัน พบว่า การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการพาความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เม็ดแก้วขนาดเล็ก ช่วยลดค่าใช้จ่ายได้เป็น 1.26 เท่า



รูปที่ 11 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานในระเหยน้ำในวัสดุพูน

5. บทสรุป

จากการศึกษาพบว่า ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งร่วมกับสนามไฟฟ้า (EHD) ความดันแคปิลลารีมีอิทธิพลสูงในการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณความชื้นลดลง การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอน้ำเป็น อิทธิพลของความดันไอน้ำเป็นหลัก เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลต่อการเกิด Corona wind ที่รุนแรงขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้พบว่า การระเหยของความชื้น (Moisture evaporation) เพิ่มขึ้น 150-200% เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสนามไฟฟ้า และวัสดุพูนอนุภาคขนาดเล็กมีความดันแคปิลลารีที่สูงกว่า ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดีกว่าวัสดุพูนขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อึดตัวในกรณี อื่นๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Ohadi, M.M., 1991, Heat transfer enhancement in heat exchangers, ASHRAE Journal Dec, pp. 42-50.
2. Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K. (1996) Active Heat Transfer Enhancement by utilizing Electric Fields. *Annual Review of Heat Transfer*, pp. 193-244
3. Cooper, P., 1992, Practical design aspects of EHD heat transfer enhancement in evaporators, ASHRAE Transactions, pp. 445-454.
4. Poulter, R. and Miller, J.A., 1984, Heat transfer enhancement in shell/Tube heat exchangers employing electrostatic field, 1st National conference on heat transfer, No. 308, pp. 707-712.
5. Lai, C., Huang, M., and Wong, S., 2004, EHD-Enhanced Water Evaporation. *Drying Tech.*, Vol. 22, No. 3, pp. 597-608
6. Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials." ASME J. Heat Transfer, Vol. 124 (1), pp. 151-161