

การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนด้วยผลของลมหมุนวนในระนาบตั้งฉากกับการไหลซึ่งขับเคลื่อนด้วยสนามไฟฟ้า

Enhancement of Hot-air Drying Efficiency with Electrically-Driven Spiral Flow

ดวงฤดี ชูตระกูล^{1,2}, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{1*} และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ต. นาวิ่ง อ. เมือง จ. เพชรบุรี 76000

*ติดต่อ: cchainar@engr.tu.ac.th, 025643001 ต่อ 3151, Fax: 025643020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะลมหมุนวนแบบควงส่ววนที่ถูกสร้างโดยผลสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการจัดวางอิเล็กโทรดและกราวด์แบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน ตัวแปรที่ศึกษา คือ จำนวนเส้นลวดอิเล็กโทรด (n) ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดทั้งในแนวตั้งฉากและแนวการไหล ($L_{y,E}$ และ $L_{x,E}$) และตำแหน่งติดตั้งลวดกราวด์ ($L_{y,G}$) ในการทดลองลวดกราวด์จำนวน 2 เส้นถูกติดตั้งในแนวขนานกับทิศทางการไหลของอากาศ ส่วนลวดอิเล็กโทรดถูกแขวนจากผนังด้านบนของอุโมงค์ลมและติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหล แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 20 kV ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิของลมร้อนถูกควบคุมที่ 0.35 m/s และ 60°C ตามลำดับ วัสดุพรมมีค่าความอุ่มตัวเริ่มต้น $S_i = 0.5$ จากรูปถ่ายการไหลแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดลมหมุนวนในลักษณะระนาบตั้งฉากกับการไหลบริเวณเหนือผิวหน้าของวัสดุพรม การติดตั้งปลายลวดอิเล็กโทรดให้สูงกว่ากราวด์มีผลทำให้ลมหมุนวนมีทิศทางพุ่งลงสู่ผิวหน้าของแพคเบต ซึ่งยิ่งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นมาก และการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดในแนวการไหลส่งผลทำให้ความปั่นป่วนของลมหมุนวนเปลี่ยนตำแหน่ง นอกจากนี้พบว่าด้วยอิทธิพลของลมหมุนวนที่เกิดขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ให้อุณหภูมิที่ผิวและอัตราการระเหยของความชื้นของแพคเบตมีค่าสูงมาก อัตราการระเหยของความชื้นแปรผันตามการเพิ่มจำนวนลวดอิเล็กโทรดและเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ ในงานวิจัยนี้การใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2 – 1.8 เท่า

คำหลัก: อิเล็กโทรดไฮโดรไดนามิกส์, กระบวนการอบแห้ง, ลมหมุนวนตั้งฉาก

Abstract

This research aims to investigate the swirling flow driven by electric fields relying on electrode and ground arrangement for enhancing the hot-air drying efficiency. Parameters are the number of electrodes (n), electrode positions ($L_{y,E}$ and $L_{x,E}$), which are varied both in parallel and normal flow directions, and ground positions ($L_{y,G}$). In experiments, two ground wires are placed parallel to flow, while electrode wires are suspends from the upper wall of wind tunnel. High electrical voltage is applied

TSF-251

at 20 kV. Average bulk mean velocity and temperature of hot-air flow are controlled at 0.35 m/s and 60 °C, respectively. Initial saturation of porous material is $S_i = 0.5$. It is found from flow visualization when the electric fields exposes to flow, swirling occurs in the plane normal to flow and above the material. With placing the electrodes higher than grounds, the air stream to move towards the material surface. This causes the drying rate to be enhanced considerably. Position in flow direction of electrodes also affects the occurrence of swirling. Moreover, surface temperature and rate of moisture removal of material are increased substantially. The rate of moisture removal varies on increasing the number of electrode wires and on arranging electrode and ground wires. In this study, utilizing electric fields conducts the drying rate to enhance approximately 1.2-1.8 times.

Keywords: Electrohydrodynamics, Hot-air drying, Spiral flow

1.บทนำ

การอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญอันหนึ่งของการผลิตในหลายๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมด้านเวชกรรม อาหาร เฟอร์นิเจอร์ และด้วยวิกฤตการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบันการปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อการลดพลังงาน จึงถูกให้ความสนใจเป็นอย่างมาก การใช้สนามไฟฟ้าหรืออิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (electrohydrodynamics, EHD) เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนที่นำเสนอวิธีหนึ่ง ซึ่งมีข้อดี คือโครงสร้างไม่ซับซ้อนและไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ หลักการของ EHD คือ เมื่อสนามไฟฟ้าแรงดันสูงถูกปล่อยจากขั้วอิเล็กโตรด อากาศที่อยู่ใกล้ๆ จะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์และด้วยผลของการไหลแบบเฉือน (Shear flow) ทำให้อากาศที่ไม่ถูกชาร์จ (uncharged air) ถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่แบบหมุนวน และส่งผลทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่อยู่บริเวณผิวหน้าของวัสดุพอรูน [1]

Chakranond และ Rattanadecho [1] ใช้อิเล็กโตรดและกราวด์เป็นแบบเส้นลวดเพื่อสร้างลมหมุนวน และใช้แพคเบด (packed bed) แทนวัสดุพอรูนจากการทดลอง พบว่าผลของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดลมหมุนวนวางกันทิศทางการไหลของอากาศ การจัดเรียงชั้นของความพอรูนที่ต่างกันและขนาดของแรงดันไฟฟ้า มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของแพคเบด

Artana และคณะ [2] ศึกษาการควบคุมการไหลของอากาศโดยใช้หลักการ EHD พบว่า ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ต่ำอิทธิพลของลมโคโรนา (corona wind) มีผลต่อการไหลมาก และอิทธิพลนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะขั้วอิเล็กโตรด

Lai และคณะ [3] ติดตั้งลวดอิเล็กโตรดที่ด้านบนและแผ่นกราวด์ทองแดงที่ด้านล่างของแพคเบดเพื่อสร้างลมโคโรนา และพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันของสนามไฟฟ้า แต่อิทธิพลของลมโคโรนาจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศมีค่ามากขึ้น Lai และคณะ [4] พบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลอิเล็กโตรดขั้วเดียวกับหลายขั้วนั้น การเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโตรดไม่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น แต่อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตามความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ Lai และคณะ [5] พบว่าอิทธิพลของลมโคโรนามีผลกระทบผลน้อยต่อการอบแห้ง เมื่อปริมาณความชื้นภายในแพคเบดเหลือน้อย

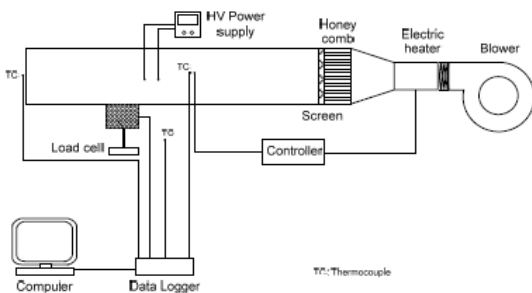
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสร้างลมหมุนวนให้เกิดขึ้นในระนาบตั้งฉากกับการไหลของลมร้อน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมด รวมถึงศึกษาผลของตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโตรดและกราวด์ และจำนวนขั้วอิเล็กโตรดที่มีต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุพอรูน

TSF-251

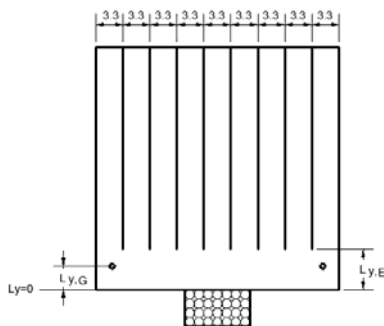
2. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 ลมร้อนซึ่งถูกสร้างจากขดลวดความร้อนแบบไฟฟ้าไหลผ่านท่อขนาดหน้าตัด 30 x 30 cm ความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบถูกควบคุมที่ 0.35 m/s และ 60°C แพคเกจซึ่งใช้แทนวัสดุพูนมีขนาด 7.5 cm (กว้าง) x 15 cm (ยาว) x 4 cm (สูง) และภายในประกอบด้วยน้ำ อากาศและเม็ดแก้ว (Glass bead) โดยมีค่าความพูน (Porosity ϕ) 0.385 อุณหภูมิภายในแพคเกจถูกวัดผ่านสายไฟเบอร์ออปติกจำนวน 4 เส้น ค่าน้ำหนักของแพคเกจถูกวัดโดยโหลดเซลล์ ส่วนอุณหภูมิของลมร้อนและอากาศภายในห้องทดสอบถูกวัดผ่านสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (Thermocouple type K)

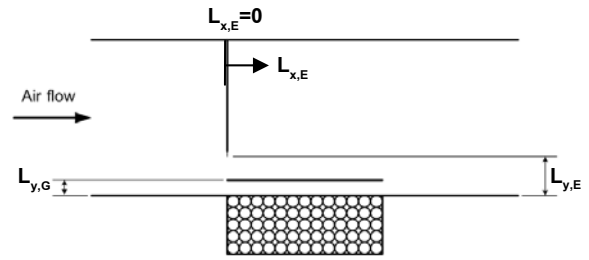
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตำแหน่งการติดตั้งกรณีต่างๆ ของอิเล็กโทรดซึ่งถูกปรับตำแหน่งติดตั้งทั้งในแนวการไหลและในระนาบหน้าตัด ($L_{x,E}$ และ $L_{y,E}$) และกราวด์ซึ่งถูกปรับตำแหน่งเฉพาะในระนาบหน้าตัด ($L_{y,G}$) ดังแสดงรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 1 แผนภาพของชุดทดสอบ



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ในระนาบหน้าตัด



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ในแนวการไหลของกระแสลม

ตารางที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์

case	n	$L_{y,G}$	$L_{x,E}$	$L_{y,E}$
1	0	0	0	0
2	8	1	0	1
3	8	3	0	1
4	8	1	0	3
5	8	3	0	3
6	1	1	0	3
7	2	1	0	3
8	4	1	0	3
9	8	1	3.75	3
10	8	1	7.50	3

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

การสังเกตลักษณะลมหมุนอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าทำโดยปล่อยควันรูปเข้าไปในกระแสการไหล โดยความเร็วเฉลี่ยของลมประมาณ 0.1 m/s เพื่อให้ถ่ายภาพการไหลได้

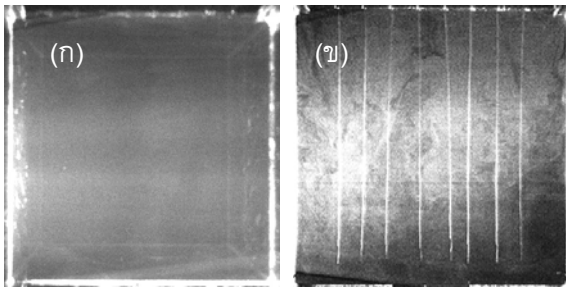
3.1 อิทธิพลของตำแหน่งติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ในระนาบตั้งฉากกับการไหล

รูปที่ 4 ใช้ควันรูปแสดงลักษณะการไหลของลมแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้ากระแสลมเกิดการหมุนวนบนระนาบหน้าตัดการไหลและอิทธิพลของลมหมุนนี้ยังส่งผลถึงต้นกระแสลม (upstream flow) เกิด

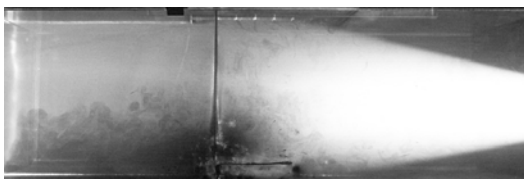
TSF-251

การปั่นป่วนก่อนถึงแพคเบต ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของลมหมุนที่สร้างขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าเพิ่มเร็วขึ้น โดยเฉพาะ กรณี 4 อุณหภูมิที่ผิวสูงกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งนี้เพราะความชื้นถูกระเหยออกจากแพคเบตดีกว่ากรณีอื่นๆ (ดังรูปที่ 7) และบริเวณที่ผิวหน้าของแพคเบตมีความแห้ง ส่งผลทำให้ความร้อนจากลมร้อนถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของเม็ดแก้ว ส่วนกรณีอื่นๆ เนื่องจากผิวหน้ายังเปียกอยู่ ดังนั้นความร้อนจากลมร้อนถูกใช้สำหรับการระเหยเป็นส่วนใหญ่ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวมีค่าคงที่

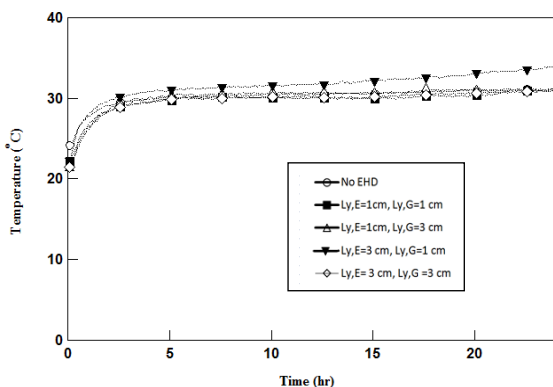
ในกรณีที่ 4 ทิศทางของลมหมุนวนมีลักษณะพุ่งลงสู่ผิวหน้าของแพคเบต (ดังรูปที่ 8) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการระเหยที่ผิวดีกว่ากรณีอื่นๆ



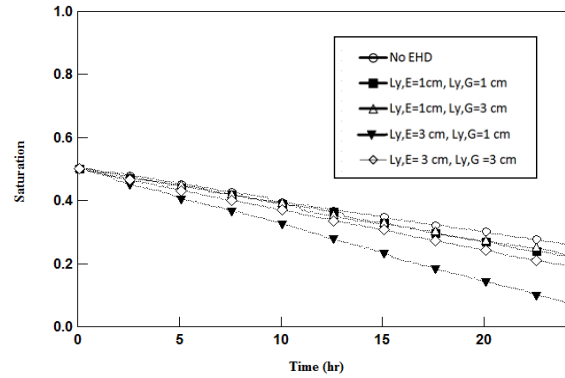
รูปที่ 4 รูปถ่ายในระนาบตั้งฉากกับการไหล
(ก) No EHD (ข) EHD



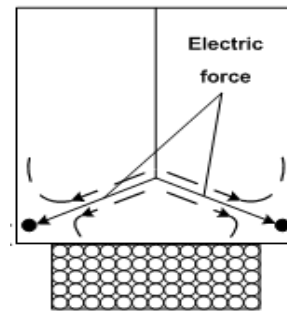
รูปที่ 5 รูปแสดงลักษณะการไหลของลมเมื่อถ่ายจากด้านข้างกรณีมีสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 6 อุณหภูมิที่ผิวแพคเบตกรณี 1 ถึง 5



รูปที่ 7 ค่าความอืดตัวของแพคเบตกรณี 1 ถึง 5



รูปที่ 8 การเกิดลมหมุนในระนาบตั้งฉากกับการไหล

3.2 อิทธิพลของจำนวนอิเล็กโทรด

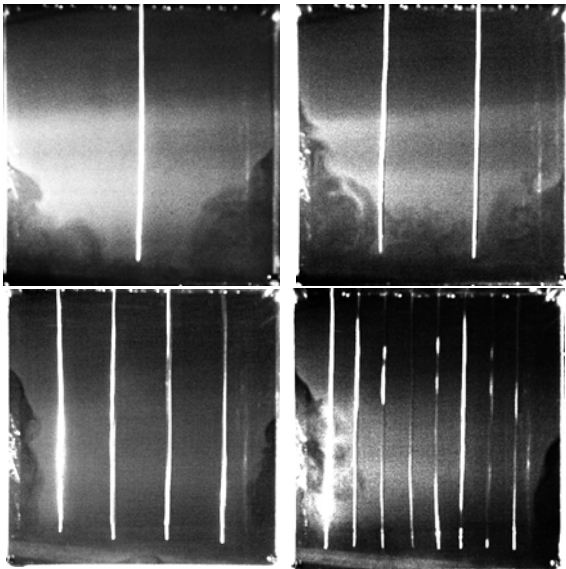
จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดและกราวด์ที่ $L_{y,E} = 3 \text{ cm}$ และ $L_{y,G} = 1 \text{ cm}$ จะให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีที่สุด ดังนั้นการสังเกตอิทธิพลของจำนวนลวดอิเล็กโทรดจึงใช้ที่ตำแหน่งนี้

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนเส้นลวดอิเล็กโทรดมีผลทำให้กระแสลมบนระนาบหน้าตัดมีความปั่นป่วนมากขึ้นโดยสังเกตได้จากความปั่นป่วนแผ่ขยายไปที่ผนังด้านบนมากขึ้น ซึ่งอิทธิพลของลมหมุนวนที่แข็งแกร่งขึ้นนี้มีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและอัตราการระเหยของความชื้นออกจากแพคเบตเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11

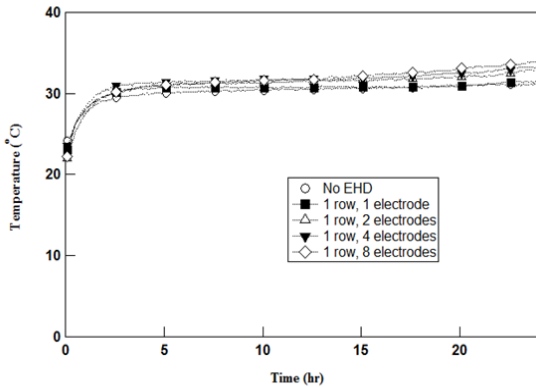
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าอัตราการระเหยเฉลี่ย (Average drying rate, DR)

TSF-251

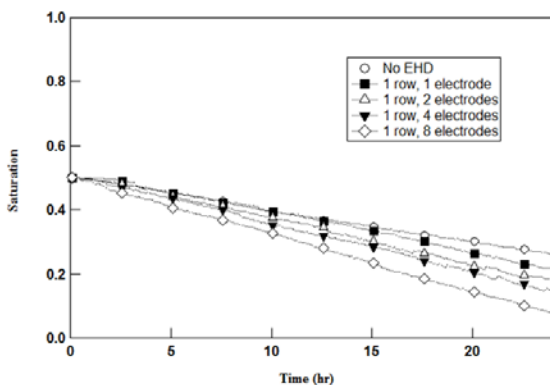
พบว่า กรณี 4, 6, 7 และ 8 มีค่า DR = 3.10, 2.11, 2.33 และ 2.58 g/h หรือประมาณ 1.77, 1.21, 1.33 และ 1.47 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้า ซึ่ง SEC (specific energy consumption) กรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และแบบใช้สนามไฟฟ้าร่วม มีค่า 943.63, 533.34, 782.65, 711.12, 642.08 kWh/kg ตามลำดับ



รูปที่ 9 ลักษณะของลมบนระนาบหน้าตัดเมื่อใช้อิเล็กโทรดจำนวนต่างๆ



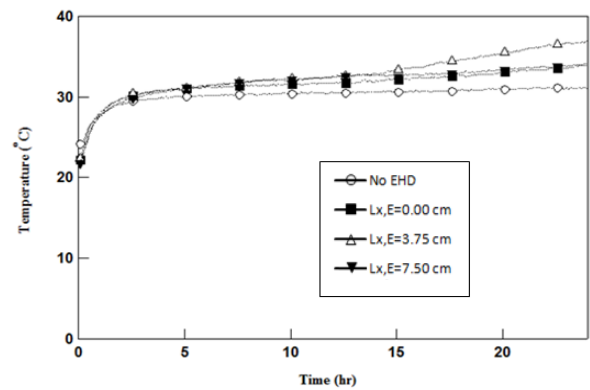
รูปที่ 10 ผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่ออุณหภูมิผิวของแพคเบต



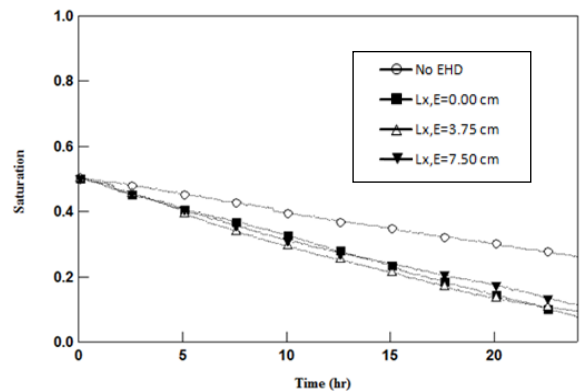
รูปที่ 11 ผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่อค่าความอืดตัวของแพคเบต

3.3 อิทธิพลของตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดในแนวการไหล

จากรูปที่ 12 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งในการติดตั้งอิเล็กโทรดในแนวการไหล (เทียบกับกราวด์และแพคเบต) มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง $L_{x,E} = 3.75$ cm จะให้อัตราการระเหยของความชื้นดีที่สุดในนี้ เพราะลมหมุนวนเกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณที่ผิวหน้าของแพคเบตเริ่มสัมผัสกับลมร้อน ดังนั้นอิทธิพลของลมหมุนจึงแผ่กระจายบนผิวหน้าของแพคเบตได้กว้างกว่ากรณีอื่นๆ และเนื่องจากแรงสนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ยกกำลังสอง [6] ทำให้ลมร้อนมีความปั่นป่วนมากตั้งแต่ก่อนระยะ $L_{x,E}=3.75$ cm



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตกรณี 1, 4, 9 และ 10



TSF-251

รูปที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ระเหยออก
จากแพคเบต กรณี 1, 4, 9 และ 10

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหา
ค่าอัตราการระเหยเฉลี่ย พบว่า กรณี 4, 9 และ 10 มี
ค่า DR = 3.10, 3.22 และ 2.84 g/h หรือประมาณ
1.77, 1.84 และ 1.62 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้าและ
ค่า SEC มีค่า 533.34, 513.33 และ 581.83 kWh/kg
ตามลำดับ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างลมหมุนวนอิทธิพล
ของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพิ่มอัตราการอบแห้งแบบใช้
ลมร้อน จากการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การจัดวางตำแหน่งอิเล็กโทรดและกราวด์มี
ผลต่อลักษณะการเกิดลมหมุนวน เมื่อ $L_{y,E} = 3$ cm
และ $L_{y,G} = 1$ cm ทำให้เกิดลมหมุนวนที่มีความแรง
และมีทิศพุ่งลงสู่ผิวของแพคเบต ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิว
และอัตราการระเหยของความชื้นมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ
กรณีอื่น ๆ

5.2 จำนวนขั้วอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตรา
การอบแห้งเพิ่มขึ้น เพราะระยะห่างระหว่างปลายขั้ว
อิเล็กโทรดและกราวด์น้อยลง และสนามไฟฟ้าถูก
ปล่อยออกจากแต่ละปลายขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลทำให้อากาศบริเวณนี้เกิดความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น

5.3 ตำแหน่งการติดตั้งลวดอิเล็กโทรดในแนว
การไหลของลมมีผลมากต่ออัตราการอบแห้ง เมื่อ
ติดตั้งอิเล็กโทรดที่ตำแหน่ง $L_{x,E} = 3.75$ cm เนื่องจาก
ลมหมุนวนมีความแข็งแรง ปั่นป่วนและครอบคลุม
เป็นวงกว้างที่ผิวหน้าของแพคเบตทำให้ได้อัตราการ
อบแห้งสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

5.4 อิทธิพลของลมหมุนวนในระนาบตั้งฉากช่วย
ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
เพิ่มขึ้นประมาณ 1.2 - 1.8 เท่าของการอบแห้งแบบใช้
ลมร้อนปกติ และพบว่าเมื่อการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตรา
การอบแห้งคงที่

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
(วช.) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ธรรมศาสตร์ที่ท่านสนับสนุนการวิจัย

6. 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 size and layered arrangement). *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34(8), pp. 1049-1056.
- [2] Artana, G., D'Adamo, J., Desimone, G., and DiPrimio, G. (2000) Air flow control with electrohydrodynamic actuators. *2nd Int. Workshop on conduction, convection and breakdown in Fluids*. pp.190-193.
- [3] Lai, F.C., and Lai, K.W. (2002) EHD-enhanced drying with wire electrode, *Drying Technology*, Vol. 20, No. 7, pp. 1389-1401.
- [4] Lai, F.C., and Sharma, R.K. (2005) EHD-enhanced drying with multiple needle electrode, *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, pp. 223-237.
- [5] 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.
- [6] Sanewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C., Rattanadecho, P., and Kreewatcharin, T. Effect of ground arrangements on swirling flow in a rectangular duct subjected to electrohydrodynamic effects, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.134, pp. 051211-1 - 051211-10