



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์พฤติกรรมการเพิ่มถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนโดยสนามไฟฟ้า
(เชิงทฤษฎีและการทดลอง)

โดย ผศ.ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ คณะ

กรกฎาคม พ.ศ. 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์พฤติกรรมการเพิ่มถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนโดย
สนามไฟฟ้า (เชิงทฤษฎีและการทดลอง)

ผู้วิจัย

1. ผศ.ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์

2. รศ.ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รูปแบบ Abstract (บทคัดย่อ)
(ภาษาไทย และภาษาอังกฤษ)

Project Code : MRG5080204

(รหัสโครงการ)

**Project Title : Analysis of Enhancement of Heat and Mass Transfer in Porous
Packed Bed with Electrohydrodynamics (EHD) (Theoretical and
experimental analysis)**

(ชื่อโครงการ) การวิเคราะห์พฤติกรรมการเพิ่มถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพรุน
โดยสนามไฟฟ้า (เชิงทฤษฎีและการทดลอง)

Investigator : Asst. Prof. Dr. Chainarong Chaktranond

(ชื่อนักวิจัย) ผศ.ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์

E-mail Address : cchainar@engr.tu.ac.th

Project Period : 2 year

(ระยะเวลาโครงการ) 2 ปี

Abstract:

The enhancement of mass and heat transfer by electric fields, so-called electrohydrodynamics (EHD), has been experimentally evaluated and analyzed in this study. Influences of hot-air flow with and without electric fields on the water moisture content and temperature in the unsaturated single- and double-layer packed bed are examined. Velocity of air flow is about 0.33 m/s. Electric fields are applied in the range of 0 – 15 kV. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed in packed beds. Enhancement of heat and mass transfer is revealed through measuring the variations in temperature and weight loss of moisture content of the packed beds. The results show that with influence of corona wind on flow above the packed bed, the drying rate is enhanced considerably. Porosity of packed bed influences on drying rate. Due to the effect of capillary pressure difference, increase of temperatures in double-layer packed bed appears unlikely that in single-layer packed bed. By comparing without electric field cases, the drying rate of double-layer packed bed cases are

increased by 1.5 – 1.97 times. In addition, the drying rate of fine-coarse packed-bed cases are 3.13 – 3.67 higher than that of coarse-fine pack-bed cases.

Keywords : Drying process, Heat and Mass Transfer, Electrohydrodynamics

(บทคัดย่อ)

ในงานวิจัยนี้ทำการประเมินและวิเคราะห์การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เรียกว่าวิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) อิทธิพลต่างๆ ของการอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้และไม่ใช้ความร้อนร่วมต่อความชื้นบรรจุและอุณหภูมิภายในของแพคเกจที่ไม่อิมตัว ทั้งแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้นได้ถูกทดสอบ ความเร็วของอากาศมีค่าประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที สนามไฟฟ้าที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 15 กิโลโวลต์ ลูกแก้วที่ใช้ในแพคเกจมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.125 และ 0.38 มิลลิเมตร การเพิ่มของการถ่ายเทมวลและความร้อนถูกทราบค่าผ่านการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักความชื้นและอุณหภูมิของแพคเกจ จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของโคโรนาวินด์ ณ ตำแหน่งเหนือแพคเกจทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมาก และความพรุนของวัสดุมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เนื่องด้วยผลของความดันแคปปิลารีที่แตกต่างกันทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแพคเกจแบบสองชั้นมีลักษณะพฤติกรรมที่แตกต่างจากในแพคเกจแบบชั้นเดียว โดยการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้าอัตราการอบแห้งของแพคเกจแบบสองชั้นมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 1.97 เท่า และอัตราการอบแห้งในกรณีที่ชั้นลูกแก้วขนาดเล็กวางอยู่เหนือชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่ (F-C case) จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ลูกแก้วขนาดใหญ่วางเหนือชั้นลูกแก้วขนาดเล็ก (C-F case) ประมาณ 3.13 – 3.67 เท่า

(คำหลัก) กระบวนการอบแห้ง, การถ่ายเทความร้อนและมวล, อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์

สารบัญ

หน้าที่

Exclusive summary

1

บทที่ 1 บทนำ

8

- 1.1 ที่มาและความสำคัญ
- 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3 วัตถุประสงค์
- 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย
- 1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎี

14

- 2.1 การอบแห้ง
- 2.2 สมการของการอบแห้ง
- 2.3 กราฟการอบแห้ง
- 2.4 หลักการสร้างโคโรนาวินด์
- 2.5 แนวคิดการใช้สนามไฟฟ้าเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง

บทที่ 3 อุปกรณ์และการทดลอง

24

- 3.1 ชุดทดสอบ
- 3.2 สภาวะทดสอบ
- 3.3 กรณีทดลอง

บทที่ 4 ผลการทดลองและบทวิจารณ์

30

- 4.1 ลักษณะของกระแสอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า
- 4.2 กรณีแพคเบตแบบชั้นเดียว
- 4.3 การเปรียบเทียบด้านพลังงาน
- 4.4 กรณีแพคเบตแบบสองชั้น

บทที่ 5 บทสรุป

43

- 5.1 สรุปจากงานวิจัย
- 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เอกสารอ้างอิง 46

ภาคผนวก :

บทความวิจัยที่นำเสนอและบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ 48

Exclusive summary

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องด้วยเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยเกี่ยวข้องกับผลิตผลทางด้านการเกษตร ดังนั้นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญและควรให้ความสนใจเป็นอย่างมาก โดยกรรมวิธีการอบแห้งที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันอยู่คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา (Conventional hot – air drying: CHD) ซึ่งใช้หลักของการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปสู่วัสดุซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่และการระเหยออกของน้ำ แต่อย่างไรก็ตามด้วยวิธีดังกล่าวการระเหยของน้ำก็เป็นอย่างค่อนข้างช้า ทั้งนี้เนื่องจากการระเหยน้ำจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกก่อน ต่อจากนั้นจึงเกิดการระเหยภายในเนื้อวัสดุภายหลัง จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การอบแห้งโดยวิธี CHD มักจะใช้เวลาค่อนข้างนาน อีกทั้งสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง งานวิจัยนี้ได้นำเอาหลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) มาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา ซึ่งจะทำให้ลดเวลาและประหยัดพลังงาน ข้อดีของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์คือ มีความสามารถในการเพิ่มถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าปกติ สามารถนำไปใช้งานในระบบการเดือด (Boiling) การระเหย (Evaporation) การระบายความร้อน (Condenser) และยังสามารถเพิ่มความคลุกเคล้าของอากาศภายในเตาเผาอันเนื่องมาจากอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในสภาวะสุญญากาศ และใช้กำลังไฟฟ้าในการทำงานต่ำมาก อีกทั้งการใช้อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้หลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีราคาถูก มีการติดตั้งและประกอบง่ายไม่ยุ่งยากเพราะเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่ต้องเคลื่อนที่ ไม่มีอันตรายต่อผู้ใช้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายสภาวะ และช่วยประหยัดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนในชั้นทดสอบที่เป็นวัสดุพูนจะศึกษาโดยวิธีการทำการทดลอง มีผลงานวิจัยน้อยมากที่ทำการศึกษาโดยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical simulation method) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ผ่านมาก็เป็นการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมาก นั่นคือ สมมติให้ของไหลภายในแพคเกจมีสถานะเดียว (Single phase) เท่านั้น

สำหรับงานวิจัยทั้งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและด้วยการทดลองที่คำนึงถึงของไหลภายในแพคเกจมีหลายสถานะ (Multiphase flow) นั้นยังไม่มีการทำมาก่อน ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร คุณสมบัติด้านความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal property) คุณสมบัติด้านพลศาสตร์ (Hydrodynamic property) ตลอดจนคุณลักษณะการเคลื่อนตัวของของไหลในวัสดุพูน

ดังนั้นในงานวิจัยที่กำลังเสนอนี้จะศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในวัสดุพูนที่ภายใต้อิทธิพลของลมร้อนควบคู่กับแรงสนามไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้น

การศึกษาโดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีในโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscopic level) ศึกษาผลของอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) อัตราการแห้ง (Drying rate) และศึกษาอิทธิพลของแรงไฟฟ้าและความเร็วของลมต่อปรากฏการณ์โคโรนาวินด์ ความสัมพันธ์ของอิทธิพลต่างๆ เหล่านี้จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร และเพื่อใช้ทำนายศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การกระจายตัวของอุณหภูมิ และลักษณะการเคลื่อนตัวของของไหลในช่องว่างของรูพรุนอื่นเนื่องจากแรงแคปิลลารี (Capillary force) และการแพร่กระจายไอ (Vapor diffusion) ภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงมวลและความร้อนที่ผิวหน้าของแพคเบต ผลงานวิจัยนี้จะเป็นผลงานชิ้นแรกในระดับนานาชาติที่ได้ศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุพรุนไปสู่อากาศภายใต้อิทธิพลของลมร้อนและสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการทำการทดลองที่คำนึงถึงสถานะของไหลเป็นแบบหลายสถานะ องค์ความรู้ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงต่ออุตสาหกรรมเกษตร รวมไปถึงกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเคมี ด้วยความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้โครงการวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญในการทำ ความรู้ความเข้าใจให้มากขึ้นกับวิธีการนี้เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้การกระบวนการอบแห้งในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดันและสนามความเร็ว (velocity field) ของของไหล และการถ่ายเทมวลของมวลที่ขึ้นในวัสดุพรุนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าโดยผ่านทางทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบกับวิธีการทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการศึกษาก่อให้เกิดความเข้าใจถึงองค์ความรู้พื้นฐานในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพรุนและผลกระทบจากสนามไฟฟ้า ทำให้สามารถใช้พัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร พัฒนาการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดลองจริงในทางปฏิบัติให้มีประสิทธิภาพสูง และจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาระบบการให้ความร้อนในงานอุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

3. ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีวิจัยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ

3.1 การสร้างชุดทดสอบและทำการทดสอบผลของการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน และทำการหาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสาร เช่น รูปแบบการเคลื่อนที่ของของไหลเหนือแพคเบตภายใต้สนามไฟฟ้า (Corona wind) ซึ่งแปรผันตาม

ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่โดยแรงไฟฟ้าและความเร็วของลมร้อน ขนาดอนุภาคในแพคเบต และอัตราการระเหยของมวลชั้นที่หายไป แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบและปรับปรุงคำตอบที่ได้จากผลเฉลยของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical simulation) ปรับปรุงแบบจำลองข้างต้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องต้นสำหรับการอบแห้งต่อไป

3.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยข้อมูลจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพื้นฐานทางทฤษฎี โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขขั้นสูงอาศัยเทคนิค FVM (Finite Volume Method) และ FDTD (Finite Difference Time Domain) เพื่อหาคำตอบของปัญหาที่สามารถอธิบายได้จากกลุ่มของสมการอนุพันธ์ซึ่งไม่เป็นอิสระต่อกัน (Coupled) และมีความไม่เชิงเส้นสูง (Highly non-linear) อันประกอบไปด้วยสมการอนุพันธ์ย่อยมวล โมเมนตัม ของอากาศ ไอน้ำ และของเหลว และ สมการพลังงาน ชุดสมการส่งถ่าย (Transport equations) สมการแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Electrical body force)

4. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้สนามไฟฟ้าร่วม รวมถึงศึกษาอิทธิพลของความพรุนของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบตแบบชั้นเดียว (Single-layer packed bed) ซึ่งมีค่าความพรุนค่าๆ หนึ่งและในแพคเบตแบบสองชั้น (Double-layer packed bed) ซึ่งมีค่าความพรุนสองค่า โดยผลของการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นถูกวัดผ่านการตรวจสอบอุณหภูมิที่มีความลึก ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแพคเบต และผลของอัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นถูกวัดผ่านการตรวจสอบปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ลูกแก้วที่ใช้ในแพคเบตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่าระหว่าง 0 – 15 kV และเวลาที่ใช้ในทดสอบอยู่ในช่วง 24 – 48 ชั่วโมง ผลการวิจัยได้มีดังนี้

จากการทดลองพบว่าขนาดของลูกแก้วที่บรรจุภายในแพคเบตมีผลต่อการถ่ายเทมวลหรือความชื้นในแพคเบต เนื่องด้วยแรงดันแคปิลลารีที่สูงกว่าของวัสดุที่มีความพรุนมากกว่าทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าไปในอากาศที่ซึ่งลวดฮีเลียมโทรดและกราวด์ฮีเลียมโทรดถูกติดตั้งในทิศตั้งฉากและทิศขวางกับทิศทางการไหลของกระแสอากาศตามลำดับ กระแสอากาศจะเกิดการหมุนวนระหว่างฮีเลียมโทรดและกราวด์ โดยกระแสอากาศจะมีความปั่นป่วนมากบริเวณระหว่างแท่งฮีเลียมโทรด อิทธิพลของสนามไฟฟ้าหรือโคโรนาวินด์จะมีผลทำให้อุณหภูมิภายในแพคเบตมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วขึ้นและอัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบตมีค่าสูงกว่าในกรณีที่มิใช่สนามไฟฟ้า และขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบตมีค่าสูงขึ้นด้วย

ในกรณีของแพคเบตแบบชั้นเดียวการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบตมีค่าเพิ่มขึ้น ประมาณ 1.66 เท่าของกรณีที่มิใช่สนามไฟฟ้า

เมื่อความอึดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 และพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างโคโรนาวินด์มีค่าประมาณ 3% ของพลังงานที่ใช้ในการสร้างลมร้อนอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2 – 3 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมสำหรับการอบแห้งแบบที่ใช้ลมร้อนจะช่วยประหยัดพลังงาน

ในกรณีของแพคเบดแบบสองชั้น แต่ละชั้นความหนาของแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างกันจะมีความหนาเท่ากัน โดยกรณีที่วางลูกแก้วขนาดใหญ่เหนือลูกแก้วขนาดเล็กจะเรียกว่ากรณี C-F และกรณีวางกลับกันจะเรียกว่ากรณี F-C

เนื่องด้วยผลของความแตกต่างของความดันแคปิลลารีในกรณี F-C อุณหภูมิของแพคเบดบริเวณที่อยู่ในชั้นด้านบนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่อยู่ชั้นด้านล่างเมื่อการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วงอุณหภูมิคงที่) ความดันแคปิลลารีในชั้นด้านบนสูงกว่าชั้นด้านล่างทำให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าของแพคเบดได้เร็วขึ้น และทำให้ชั้นด้านล่างมีความแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิชั้นด้านล่างในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่าชั้นด้านบนซึ่งมีความชื้นสะสมอยู่ก่อนที่จะระเหยไปในอากาศ ส่วนในกรณี C-F อุณหภูมิชั้นด้านบนมีค่าสูงกว่าชั้นด้านล่าง และเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิของชั้นด้านบนและชั้นด้านล่างจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงตลอดช่วงการอบแห้ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันแคปิลลารี แต่เนื่องจากชั้นด้านล่างมีความดันแคปิลลารีสูงกว่าชั้นด้านบน และการเคลื่อนที่ของความชื้นในชั้นด้านบนมีค่าต่ำกว่าชั้นด้านล่าง เป็นผลทำให้ความชื้นจากชั้นด้านล่างเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวของแพคเบดได้ช้าลงและสะสมอยู่บริเวณชั้นด้านล่าง ดังนั้นทำให้อุณหภูมิของชั้นด้านบนจึงมีค่าสูงกว่าชั้นด้านล่าง

สำหรับกรณีของแพคเบดแบบสองชั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 1.97 เท่า และอัตราการอบแห้งในกรณี F-C จะมีค่าสูงกว่ากรณี C-F ประมาณ 3.13 – 3.67 เท่า

5. สรุป

ผลการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- 5.1 เนื่องด้วยผลของแรงดันแคปิลลารีที่สูงกว่าของวัสดุที่มีความพรุนมากกว่าทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า
- 5.2 เมื่อใส่สนามไฟฟ้าไปในอากาศกระแสน้ำอากาศจะเกิดการหมุนวนระหว่างอิเล็กโตรดและกราวด์ โดยศูนย์กลางของการหมุนเกิดขึ้นบริเวณระหว่างแท่งอิเล็กโตรดและกราวด์ และอิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ต่อการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น
- 5.3 ในกรณีของแพคเบดแบบชั้นเดียว (Single-layer packed bed)

- การใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบตมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.66 เท่าของกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า
- การใช้สนามไฟฟ้าร่วมสำหรับการอบแห้งแบบที่ใช้ลมร้อนจะช่วยประหยัดพลังงาน ประมาณ 2 – 3 เท่า

5.4 ในกรณีของแพคเบตแบบสองชั้น

- ด้วยผลของความดันแคปปิลารีที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นความหนาทำให้ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วงอุณหภูมิคงที่) ของ กรณี F-C อุณหภูมิของแพคเบตบริเวณที่อยู่ในชั้นด้านบนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่อยู่ชั้นด้านล่างและความชื้นสามารถเคลื่อนที่จากภายในไปที่ผิวหน้าของแพคเบตได้เร็วขึ้นและทำให้ชั้นด้านล่างมีความแห้งเร็วขึ้น ส่วนในกรณี C-F อุณหภูมิชั้นด้านบนมีค่าสูงกว่าชั้นด้านล่าง การเคลื่อนตัวของความชื้นที่ชั้นด้านบนมีค่าต่ำกว่าความชื้นที่ชั้นล่างทำให้เกิดการหน่วงการเคลื่อนที่ของความชื้นจากชั้นด้านล่างไปสู่ผิวหน้าของแพคเบตและเกิดการสะสมความชื้นอยู่ที่ชั้นด้านล่างดังนั้นทำให้อุณหภูมิบริเวณชั้นด้านล่างมีค่าต่ำกว่าชั้นด้านบน
- การใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 1.97 เท่า และอัตราการอบแห้งในกรณี F-C จะมีค่าสูงกว่ากรณี C-F ประมาณ 3.13 – 3.67 เท่า

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

- ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 - ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ : Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to Electric Fields (Effects of Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement) (Submitted for review)
ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์ : Experimental Thermal and Fluid Science
 - ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ : Theoretical Study of Heat and Mass Transfer Mechanism During Convective Drying of Multi-layer Packed Bed: Effects of Particle Sizes.
ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์ : Drying Technology
- การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
 - ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐาน (Basic research) ซึ่งทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง ผลการวิจัยและศึกษาก่อให้เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์

การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลในวัสดุพูนและอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้สามารถใช้พัฒนาการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเพื่อการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดลองจริงในทางปฏิบัติให้มีประสิทธิภาพสูง และจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาระบบการให้ความร้อนในงานวิศวกรรมการเกษตรและวิศวกรรมเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยองค์ความรู้ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงต่ออุตสาหกรรมการเกษตร เช่น การอบแห้ง (Drying processes) ผลิตผลทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือก เมล็ดกาแฟ เป็นต้น และอุตสาหกรรมเคมี นอกจากนี้ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปใช้ต่อยอดเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมการเกษตรต่อไปในอนาคต

2.2 เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)

- งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจนผลศาสตร์การอบแห้งในวัสดุพูนและศึกษากลไกการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบแห้งวัสดุทางด้านเกษตรกรรม ดังนั้นผลที่ได้รับจากงานวิจัยสามารถนำไปต่อยอดในการสร้างเครื่องต้นแบบอบแห้งวัสดุทางการเกษตรประสิทธิภาพสูง และสามารถนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดยุทธศาสตร์และนโยบาย หรือมาตรฐานของวิธีการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและประหยัดพลังงานที่ใช้การอบแห้งต่อไป

2.3 เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)

- ปัจจุบันผู้วิจัยมีความร่วมมือในการทำวิจัยกับนักวิจัยที่เป็นผู้เชี่ยวชาญทั้งในประเทศและในต่างประเทศ หลายท่านในหลายสาขาวิชา เช่น ร่วมมือกับรองศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งสำหรับอุตสาหกรรมการเกษตร ร่วมมือกับ Prof. Nobuhide Kasagi, The University of Tokyo ซึ่งอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้วิจัยในขณะที่ผู้วิจัยศึกษาในระดับปริญญาเอก ในการร่วมทำวิจัยด้านการวิเคราะห์และควบคุมการไหล (Flow control) สำหรับการลดแรงต้านการเคลื่อนของวัสดุ (Drag reduction) เพื่อการประหยัดพลังงาน

2.4 เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

- โครงการนี้ จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการเรียนการสอนทั้งในระดับปริญญาตรี โท และเอกต่อไปในอนาคต ให้นักศึกษาระดับปริญญาตรีได้เรียนรู้เทคนิคการ

อบแห้งและการปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า อีกทั้งเป็น
หัวข้อวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโทและเอกเพื่อนำไปใช้ต่อยอด
งานวิจัยในอนาคต ทั้งยังสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ด้วย

3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุม
วิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 - 3.1 Chaktranond, C., Jiamjiroch, K., and Ratanadecho, P., Influence of
Electrohydrodynamics (EHD) on Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous
Media, 21st National Mechanical Engineering Conference 17-19 October 2007,
Pattaya, Chonburi, Thailand.
 - 3.2 ไชยณรงค์ จักรธรรณนท์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ภาณุเกียรติ สมานวิวัฒน์, ทิศกร ประที
ปะเสน, และ ปฐวี อมรรวารีสมาน การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุน
แบบไม้อัดด้วยสนามไฟฟ้า, การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและ
มวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 7) 13 - 14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเชีย
เชียงใหม่ หน้า 12 – 17
 - 3.3 Chaktranond, C., Ratanadecho, P., Smathiwat, P., Amornvareesaman, P., and
Pradipasena, T., Enhancement of Mass and Heat Transfer in the Unsaturated
Double-layer Packed-bed with Electric fields, 22nd National Mechanical
Engineering Conference 15-17 October 2008, Thammasat University,
Pathumtani, Thailand, (CD-ROM), Paper No. TSF-044, pp. 424 – 429.
 - 3.4 ไชยณรงค์ จักรธรรณนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการเพิ่ม
อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุน, การประชุมวิชาการ การถ่ายเท
พลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8) 12 - 13 มีนาคม 2552
โรงแรมโพธิ์วิลล รีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดเชียงราย หน้า 18 - 24
 - 3.5 Chaktranond, C., and Ratanadecho, P. Heat and Mass Transfer Enhancement
in Unsaturated Porous Packed beds subjected to Electrohydrodynamics (EHD),
The 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC2009) October 19-21, 2009,
Bangkok, Thailand (Submitted for review)
 - 3.6 Manuscript submitted to Experimental Thermal and Fluid Science (Impact
factor 1.037)
Chaktranond, C., and Ratanadecho, P. Analysis of Heat and Mass Transfer
Enhancement in Porous Material Subjected to Electric Fields (Effects of
Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement) (Submitted for review)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยเกี่ยวข้องกับผลิตผลทางด้านการเกษตร ดังนั้นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญและควรให้ความสนใจอย่างมาก โดยกรรมวิธีการอบแห้งที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันอยู่ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา (Conventional hot-air drying: CHD) ซึ่งใช้หลักของการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปสู่วัสดุซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่และการระเหยออกของน้ำ แต่อย่างไรก็ตามด้วยวิธีดังกล่าวการระเหยของน้ำก็เป็นอย่างค่อนข้างช้า ทั้งนี้เนื่องจากการระเหยน้ำจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกก่อน ต่อจากนั้นจึงเกิดการระเหยภายในเนื้อวัสดุภายหลัง จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การอบแห้งโดยวิธี CHD มักจะใช้เวลาค่อนข้างนาน อีกทั้งสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้อุณหภูมิให้ร้อนค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง งานวิจัยนี้ได้นำเอาหลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) มาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา ซึ่งจะทำให้ลดเวลาและประหยัดพลังงาน ข้อดีของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์คือ มีความสามารถในการเพิ่มถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าปกติ สามารถนำไปใช้งานในระบบการเดือด (Boiling) การระเหย (Evaporation) การระบายความร้อน (Condenser) และยังสามารถเพิ่มความคลุกเคล้าของอากาศภายในเตาเผาอันเนื่องจากอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในสภาวะสุญญากาศและใช้กำลังไฟฟ้าในการทำงานต่ำมาก อีกทั้งการใช้อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้หลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีราคาถูก มีการติดตั้งและประกอบง่ายไม่ยุ่งยากเพราะเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่ต้องเคลื่อนที่ ไม่มีอันตรายต่อผู้ใช้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายสภาวะ และช่วยประหยัดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนในชั้นทดสอบที่เป็นวัสดุพูนจะศึกษาโดยวิธีการทำการทดลอง มีผลงานวิจัยน้อยมากที่ทำการศึกษาโดยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical simulation method) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ผ่านมาก็เป็นการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากนัก นั่นคือ สมมติให้ของไหลภายในแพคเกจมีสถานะเดียว (Single phase) เท่านั้น

สำหรับงานวิจัยทั้งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและการทดลองที่คำนึงถึงของไหลภายในแพคเกจมีหลายสถานะ (Multiphase flow) นั้นยังไม่มีการทำมาก่อน ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร คุณสมบัติด้านความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal property) คุณสมบัติด้านพลศาสตร์ (Hydrodynamic property) ตลอดจนคุณลักษณะการเคลื่อนตัวของของไหลในวัสดุพูน

ดังนั้นในงานวิจัยที่กำลังเสนอนี้จะศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในวัสดุพูนที่ภายใต้อิทธิพลของลมร้อนควบคู่กับแรงสนามไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการ

ศึกษาโดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีในโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscopic level) ศึกษาผลของอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) อัตราการแห้ง (Drying rate) และศึกษาอิทธิพลของแรงไฟฟ้าและความเร็วของลมต่อปรากฏการณ์โคโรนาวินด์ ความสัมพันธ์ของอิทธิพลต่างๆ เหล่านี้จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร และเพื่อใช้ทำนายศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การกระจายตัวของอุณหภูมิและลักษณะการเคลื่อนตัวของของไหลในช่องว่างของรูพรุนอื่นเนื่องจากแรงแคปิลลารี (Capillary force) และการแพร่กระจายไอ (Vapor diffusion) ภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงมวลและความร้อนที่ผิวหน้าของแพคเกจ ผลงานวิจัยนี้จะเป็นผลงานชิ้นแรกในระดับนานาชาติที่ได้ศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุรูพรุนไปสู่อากาศ ภายใต้อิทธิพลของลมร้อนและสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและด้วยการทำการทดลองที่คำนึงถึงสถานะของไหลเป็นแบบหลายสถานะ องค์ความรู้ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงต่ออุตสาหกรรมเกษตร รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมเคมี

ด้วยความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทำให้โครงการวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญในการทำ ความรู้ความเข้าใจให้มากขึ้นกับวิธีการนี้เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้การกระบวนการอบแห้งในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมลักษณะรูปแบบการไหลของของไหล (Active flow control) โดยใช้สนามไฟฟ้าถูกศึกษาในงานวิจัยต่างๆ เช่น การลดการแยกตัวของของไหล (Flow separation) ที่ไหลผ่านแอร์ฟอยล์ (เช่น Roth และคณะ, 2004) การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอากาศในท่อหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในทั้งของไหลแบบที่มีสถานะเดียว (Single phase flow) และแบบที่มีสองสถานะ (Two phase flow) (เช่น Velkoff, 1964; Moss และ Grey, 1966; Holmes และ Basham, 1971; Yabe และ Maki, 1988) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 อิเล็กโทรดขั้วแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ถูกติดตั้งใกล้กันบริเวณด้านในของแอร์ฟอยล์ เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า (ดังรูป 1.1 ก) จะสังเกตการเกิดการแยกของกระแสอากาศบริเวณปลายด้านหนึ่งของแอร์ฟอยล์อย่างชัดเจน แต่เมื่อใช้สนามไฟฟ้า (ดังรูป 1.1 ข) จะเห็นได้ว่ากระแสอากาศถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวด้านหลังของแอร์ฟอยล์ ซึ่งทำให้อิทธิพลของการแยกของไหลบริเวณพื้นผิวแอร์ฟอยล์ (Flow separation) มีค่าลดลง

Yabe และ Maki (1988) ศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในสารผสม (R-113 ผสมกับ Ethanol) โดยการฉีดของไหลผ่านบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่ซึ่งอิเล็กโทรดและกราวด์มีลักษณะเป็นวงแหวนและแผ่นราบตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การพาความร้อนจากแผ่นราบเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดย

ใช้ EHD liquid jet จะมากกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ถึง 100 เท่า

(ก)



(ข)



รูปที่ 1.1 ภาพวินแสดงการไหลสัมผัสกับพื้นผิว (Reattachment) บนแผ่นแอร์ฟอยล์ (NACA 0015 air foil) ที่มุม 12 องศาของการปะทะกับชุดแอคชูเอเตอร์ (EFC actuators) ด้วยความเร็วของกระแสอิสระ 2.6 เมตรต่อวินาที (ก) เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า (ข) กรณีใช้สนามไฟฟ้า (Roth และคณะ, 2004)

กระบวนการอบแห้ง (Drying process) ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมส่งออกสินค้าด้านการเกษตร การรักษาคูณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน (Hot air drying) หรือการแผ่ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (Thermal radiant heater) เป็นที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลาย เพราะสามารถควบคุมระดับความร้อนที่

ต้องการให้แก่ผลิตภัณฑ์และยังสามารถควบคุมช่วงเวลาการใช้งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งวิธีนี้ต้องการเวลาที่ใช้ในการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก แต่อย่างไรก็ตามอัตราการอบแห้งสามารถถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการใช้หลักการอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสหมุนวน (Circulating flow) ซึ่งจะช่วยให้อัตราการถ่ายเทมวลจากผิวของผลิตภัณฑ์ไปยังลมร้อน อีกทั้งความร้อนจะไหลจากลมร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นด้วย ดังนั้นด้วยการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งสามารถช่วยเพิ่มทั้งอัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยหลายกลุ่ม (เช่น Chen และ Barthakur, 1991; Alem-Rjabi และ Lai, 1995; Hashinaga และคณะ, 1999; Rattanadecho และคณะ, 2001; Lai และ Lai, 2002) ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า Lai และ Lai (1995) ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการอบแห้งในแพคเบด (Packed bed) ในการทดลองลดและแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดง ถูกวาง ณ ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเร็วของอากาศซึ่งไหลในทิศทางขวางกับทิศของสนามไฟฟ้า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ใช้และอิทธิพลของโคโรนาวิ้นต์จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น

Alem-Rajabai และ Lai (1995) ทำการทดลองศึกษาอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า แพคเบดที่ลูกแก้วที่มีความเปียกบางส่วน (Partially wetted glass bead) ในการทดลองลดอิเล็กโทรดและแผ่นทองแดงถูกวางที่ด้านบนและใต้แพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วย EHD มีประสิทธิภาพอย่างมากบริเวณผิวของแพคเบด และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในทิศของโคโรนาวิ้นต์ที่เป็นบวกมากกว่าในทิศที่เป็นลบ

Rattanadecho และคณะ (2001) ทำการทดลองและใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยวัสดุที่ทำการศึกษาเป็นวัสดุที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated material) และความพรุน (Porosity) ของวัสดุมีค่าที่แตกต่างกันภายใต้คลื่นไมโครเวฟ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของความชื้น (Moisture content) ที่มีผลต่อกลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และการไหลแบบแคปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพคเบดเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ Rattanadecho และคณะ (2001 และ 2002) พบว่าลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงแคปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า

เพื่อที่จะเพิ่มการส่งผ่านความชื้นภายในวัสดุพูนนักวิจัยต่างๆ (เช่น Gori และคณะ, 1987; Nikawa และคณะ, 1986; Rattanadecho และคณะ, 2002) ทำการวิจัยการให้ความร้อนภายในวัสดุพูนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ Gori และคณะ (1987) ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อนำความชื้นออกจากวัสดุพูน โดยทางทฤษฎีแล้วการแผ่รังสีความร้อนของคลื่นไมโครเวฟจะกระทำต่อภายในวัสดุและทำให้เกิดแหล่งความร้อนที่ระยะหนึ่งภายในวัสดุ หลักการนี้ทำให้ความชื้น

ภายในวัสดุถูกทำให้ร้อนและเป็นผลทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ไปสู่ผิวของวัสดุ

เพื่อเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุพูนแบบชั้นเดียว (Single-layer porous media) ที่ได้รับลมร้อน Chaktranond และคณะ (2007) นำหลักการของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์มาช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง (0 – 15 kV) ไปที่เส้นลวดอิเล็กโตรดที่ซึ่งลวดอิเล็กโตรดและกราวด์ทำจากเส้นลวดทองแดงและถูกติดตั้งที่ด้านหน้าของแพคเบต แล้วทำการสังเกตอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิภายในแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จากการทดลองพบว่าโคโรनावินด์ (Corona wind) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ด้านหน้าของแพคเบตและศูนย์กลางของอากาศหมุนอยู่ระหว่างลวดอิเล็กโตรดและเส้นลวดกราวด์ ผลของโคโรनावินด์สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนไปสู่ผิวด้านในของแพคเบตและเพิ่มอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุพูนได้สูงชันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่ผิวหน้าของวัสดุพูนในช่วงของการระเหย (Evaporation period) จะมีน้ำมาออกกันอยู่มากเหมือนหนึ่งเป็นฟิล์มน้ำ ซึ่งฟิล์มนี้จะเป็นตัวหน่วงการถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุ ด้วยผลของโคโรनावินด์ซึ่งเป็นกระแสหมุนวน (Circulating flow) จะทำให้อิทธิพลของชั้นฟิล์มน้ำนี้ลดลงและทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ผิวหน้าวัสดุพูนมากขึ้น และนอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าผลของความดันแคปิลลารี (Capillary pressure) ทำให้อัตราการอบแห้งในแพคเบต (Packed bed) ที่ใช้ลูกแก้ว (Glass bead) ขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าในแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาดใหญ่

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น มี Ratanadecho และคณะ (2001 และ 2002) เท่านั้นที่ได้ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบต แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ซึ่งความร้อนจะไหลจากภายในแพคเบตออกสู่สิ่งแวดล้อมจะแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่ซึ่งความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนไปสู่ผิวหน้าของแพคเบต

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดันและสนามความเร็ว (Velocity field) ของของไหล และการถ่ายเทมวลของความร้อนในวัสดุพูนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าโดยผ่านทางทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบกับวิธีทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการศึกษาก่อให้เกิดความเข้าใจถึงองค์ความรู้พื้นฐานในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนและผลกระทบจากสนามไฟฟ้า ทำให้สามารถใช้พัฒนาการให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร พัฒนาการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดลองจริงในทางปฏิบัติให้มีประสิทธิภาพสูง และจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาระบบการให้ความร้อนในงานอุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการแทรกซึมของของเหลว (การถ่ายเทมวลสาร) ในวัสดุพอร์นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ทั้งในภาคทฤษฎี และ ภาคทดลอง โดยมีตัวแปรที่สำคัญที่จะศึกษาและวิเคราะห์ อย่างละเอียด ได้แก่ รูปแบบของสนามไฟฟ้า ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ความเร็วของลมร้อน ขนาดของอนุภาคในแพคเกจและปริมาณของความชื้นในวัสดุพอร์น การคำนวณที่ได้จากทางทฤษฎีจะถูกตรวจสอบและวิเคราะห์ร่วมกับผลที่ได้จากการทดลองคำนวณการรูปแบบการไหลของอากาศที่ผ่านสนามไฟฟ้าภายในท่อสี่เหลี่ยม

- สร้างชุดทดสอบและบันทึกผลของการกระจายตัวของความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิภายในหน้าต่างทดสอบ พร้อมทั้งถ่ายภาพลักษณะการไหลของอากาศที่สภาวะต่างๆ
- ช่วงความเร็วของอากาศส่งที่ไหลผ่านท่อทดสอบอยู่ในช่วงที่มีความเร็วประมาณ 0.33 เมตร/วินาที (หรือเป็นช่วงสภาวะการไหลแบบราบเรียบ)
- อุณหภูมิของอากาศส่งอยู่ในช่วง 30 ถึง 65 องศาเซลเซียส
- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่เกินค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคของอากาศเกิดการแตกตัว (Breakdown voltage) หรือเกิดการสปาร์ค (Ion spark)
- สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการออกแบบระบบอบแห้งแพคเกจวัสดุพอร์นด้วยสนามไฟฟ้า

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีวิจัยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ

1.5.1 การสร้างชุดทดสอบและทำการทดสอบผลของการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน และทำการหาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสาร เช่น รูปแบบการเคลื่อนที่ของของไหลเหนือแพคเกจภายใต้สนามไฟฟ้า (Corona wind) ซึ่งแปรผันตามความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่โดยแรงไฟฟ้าและความเร็วของลมร้อน ขนาดอนุภาคในแพคเกจและอัตราการระเหยของมวลชื้นที่หายไป แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบและปรับปรุงคำตอบที่ได้จากผลเฉลยของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical simulation) ปรับปรุงแบบจำลองข้างต้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องต้นสำหรับการอบแห้งต่อไป

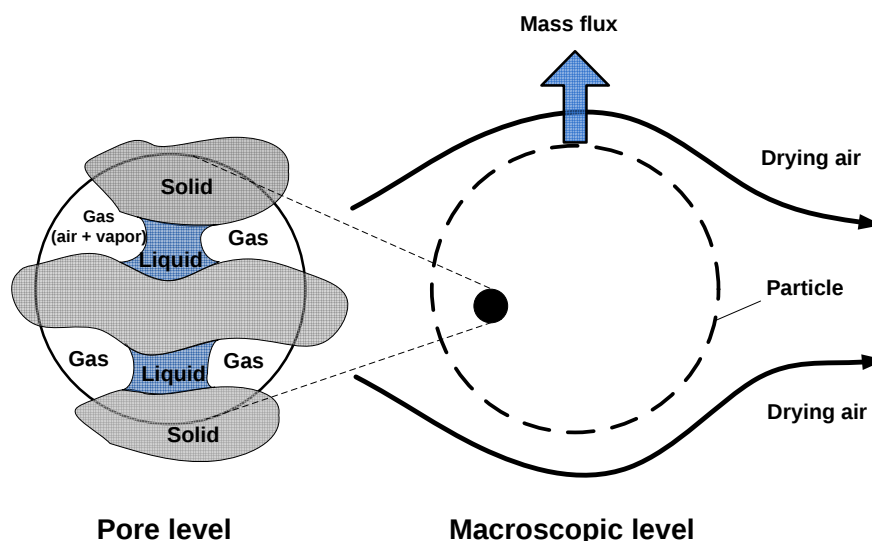
1.5.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยข้อมูลจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพื้นฐานทางทฤษฎี โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขขั้นสูงอาศัยเทคนิค FVM (Finite Volume Method) และ FDTD (Finite Difference Time Domain) เพื่อหาคำตอบของปัญหาที่สามารถอธิบายได้จากกลุ่มของสมการอนุพันธ์ซึ่งไม่เป็นอิสระต่อกัน (Coupled) และมีความไม่เชิงเส้นสูง (Highly non-linear) อันประกอบไปด้วยสมการอนุพันธ์ย่อยมวล โมเมนตัม ของอากาศ ไอน้ำ และของเหลว และ สมการพลังงาน ชุดสมการส่งถ่าย (Transport equations) สมการแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Electrical body force)

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุพูนเป็นกระบวนการแยกกระบวนการหนึ่งในระบบที่มีของแข็งและของเหลวปนอยู่ร่วมกัน จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบภายในวัสดุพูนที่มีความชื้นประกอบด้วย ส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid phase) ของเหลว (Liquid phase) และก๊าซ (Gas phase) ซึ่งอาจจะเป็นอากาศหรือไอน้ำ (Vapor) หรือเป็นของผสมระหว่างอากาศกับไอน้ำ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งองค์ประกอบที่เป็นของไหล (Fluid phase) อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ตลอดเวลาและปรากฏการณ์ต่างๆ จะเกิดขึ้นพร้อมกัน เช่น การถ่ายเทมวลและความร้อน ในการอบแห้งการถ่ายเทมวลสามารถเกิดจากอิทธิพลต่างๆ เช่น การแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นถ้าผิวเปียก (Wet solid) มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของของเหลว การแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นถ้าของเหลวกลายเป็นไอน้ำภายในวัสดุ การแพร่ชนิดเซน (Knudsen diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นถ้าการอบแห้งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันต่ำมากๆ เช่น ในกรณีของการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) ความแตกต่างของความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure difference) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออัตราการกลายเป็นไอน้ำภายในมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอน้ำผ่านโครงสร้างของแข็งไปสู่สิ่งแวดล้อมหรืออาจจะเกิดจากกลไกต่างๆรวมกันดังที่กล่าวมาแล้ว ผลจากปรากฏการณ์ต่างๆ นี้ทำให้การวิเคราะห์กลไกการอบแห้งมีความซับซ้อนและกลไกของการอบแห้งยังไม่เป็นที่เข้าใจได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของสารในกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot-air drying) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับวัสดุที่มี

ความชื้นเพื่อระเหยน้ำออกไปจนเหลือผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและมีบทบาทที่สำคัญสำหรับงานวิจัยสาขาต่างๆ เช่น กระบวนการเคมิก กระบวนการผลิตยา กระบวนการผลิตเครื่องเซรามิกส์ และกระบวนการทางการเกษตร เป็นต้น เนื่องด้วยรูปแบบที่ง่ายทำให้กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายเพื่อนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แต่อย่างไรก็ตามวิธีอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวต้องการระยะเวลาของการอบแห้งที่นาน ในบางกรณีอาจจะป็นวันเป็นผลทำให้ต้องใช้พลังงานสูงเพื่อทำความร้อน

โดยพื้นฐานแล้วการอบแห้งเกี่ยวข้องกับ 2 กระบวนการ (Mujumdar, 2007) คือ การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุพอร์นและการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุพอร์น การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุขึ้นกับสภาวะอากาศภายนอกที่ไหลผ่านวัสดุพอร์น ดังนั้นในการวิเคราะห์กลไกของการอบแห้งวัสดุพอร์นด้วยวิธีต่างๆ จะมีกับตัวแปรต่างๆ ที่ต้องทำการศึกษา คือ ความพรุนของวัสดุ (Porosity) ความชื้นบรรจุภายในวัสดุ (Moisture content) ความอิ่มตัว (Saturation) ความดันของก๊าซภายในวัสดุ ความดันแคปิลลารี (Capillary pressure) อุณหภูมิ และอัตราการอบแห้ง

นอกจากนี้กลไกที่สำคัญเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated porous media) คือ เกรเดียนต์ของความดันแคปิลลารี (Capillary pressure gradient) และแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ในขณะที่เกรเดียนต์ของความดันบางส่วน (Partial pressure gradient) ของการระเหยจะเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของก๊าซ (Vapor diffusion)

2.2 สมการของการอบแห้ง

ความพรุน

ความพรุน (Porosity) ค่าความพรุนของวัสดุนิยามโดยอัตราส่วนของส่วนที่เป็นช่องว่างทั้งหมดหรือปริมาตรของรู (Pore) ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ

$$\phi = \frac{V_{void}}{V_{total}} \quad (2.1)$$

ที่ซึ่ง V_{void} คือ ปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่าง และ V_{total} คือ ปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ โดยปกติแล้วค่าความพรุนของวัสดุสามารถหาค่าได้จากการทดลอง

ค่าความอิ่มตัวและค่าความชื้นบรรจุ

ค่าความอิ่มตัว คือ สัดส่วนปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่างที่ถูกเติมด้วยของเหลว คำนวณได้จาก

$$S = \frac{V_{water}}{V_{void}} \quad (2.2)$$

ที่ซึ่ง V_{water} คือ ปริมาตรของส่วนที่เป็นน้ำ ค่าความอึดตัวเป็นตัวแปรไร้หน่วยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (0 เมื่อวัสดุไม่มีส่วนที่เป็นน้ำอยู่เลย และ 1 เมื่อช่องว่างในวัสดุพรุนถูกเติมเต็มด้วยน้ำทั้งหมด) ส่วนค่าความชื้นบรรจุ (Moisture content) เป็น อัตราส่วนระหว่างมวลทั้งหมดของน้ำต่อด้วยมวลของส่วนที่เป็นของแข็ง (Dry solid)

$$X = \frac{M_{water}}{M_{solid}} \quad (2.3)$$

ที่ซึ่ง M_{water} คือ มวลของน้ำ และ M_{solid} คือ มวลของแข็ง จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถเขียนค่าความชื้นบรรจุในรูปของค่าความอึดตัวคือ

$$X = \frac{\phi \rho_{water}}{(1-\phi) \rho_{solid}} S \quad (2.4)$$

ที่ซึ่ง ρ_{water} และ ρ_{solid} คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำและของของแข็งตามลำดับ และสมการความอึดตัวสามารถเห็นได้เป็น

$$S = \frac{(1-\phi) \rho_{solid}}{\phi \rho_{water}} \frac{M_{water}}{M_{solid}} \quad (2.5)$$

ในการวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในวัสดุพรุนมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากในระหว่างการอบแห้งของไหลภายในวัสดุพรุนของไหลมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลา เช่น ความชื้นเคลื่อนตัวไปที่ผิวหน้าที่สัมผัสกับอากาศร้อน การไหลของของเหลวถูกขับเคลื่อนด้วยเกรเดียนท์ของความดันแคปิลลารี (Capillary pressure gradient) และแรงโน้มถ่วง ขณะที่ส่วนที่ของไหลที่เป็นไอ (Vapor) ถูกขับเคลื่อนโดยเกรเดียนท์ของความดันย่อยของส่วนที่ระเหย (Partial pressure of evaporating species) ดังนั้นของไหลภายในวัสดุจึงอาจมีการเปลี่ยนสถานะ (Phase change) ตลอดช่วงการอบแห้งด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ในการวิเคราะห์กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งมีการตั้งสมมติฐานเพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้น เช่น

1. วัสดุพรุนมีสภาพแข็งเกร็ง (Grid) หรือไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อความชื้นระเหยออกไป และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction)
2. ตำแหน่งต่างๆในวัสดุสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Local thermodynamic equilibrium)
3. การส่งผ่านความร้อนและมวลเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันที่ความดันคงที่ค่าๆ หนึ่ง ที่ซึ่งกลไกที่มีอิทธิพล คือ การส่งผ่านของแคปิลลารี (Capillary transport) การแพร่ของไอ (Vapor diffusion) และแรงโน้มถ่วง
4. ก๊าซผสมระหว่างอากาศและไอน้ำมีพฤติกรรมแบบก๊าซอุดมคติ

โดยการพิจารณาแบบวิธีปริมาตรเฉลี่ย (Volume average approach) และพิจารณาระบบใน 2 มิติ (ระนาบ $x-z$) สมการที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านมวลและความร้อนภายในวัสดุพรุนประกอบ

สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass equation)

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} [\rho_l S + \rho_v S] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho_l u_l + \rho_v u_v] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_l w_l + \rho_v w_v] = 0 \quad (2.6)$$

ที่ซึ่ง ตัวห้อย l และ v แทน สถานะของเหลวและไอน้ำตามลำดับ u และ w แทนความเร็ว

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho c_p)_T T] + \nabla \cdot [\{\rho_l c_{p,l} \vec{u}_l\} + \{(\rho_a c_{p,a} + \rho_v c_{p,v}) \vec{u}_g\} T] + h_v \dot{n} = -\nabla q \quad (2.7)$$

ที่ซึ่ง c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) $\vec{u}_g$ คือ เวกเตอร์ความเร็วอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วง T คือ อุณหภูมิ h_v คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ $\dot{n}$ คือ อัตราการระเหยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และ q คือ ฟลักซ์ของความร้อน

ค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลในสถานะของเหลวและก๊าซหาได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) นั่นคือ

$$\vec{u}_l = -\frac{KK_{r,l}}{\mu_l} [\nabla p_g - \nabla p_c - \rho_l \vec{g}] \quad (2.8)$$

และ
$$\vec{u}_g = -\frac{KK_{r,g}}{\mu_g} [\nabla p_g - \rho_g \vec{g}] \quad (2.9)$$

โดยที่
$$p_c = p_g - p_l \quad (2.10)$$

ที่ซึ่ง K และ K_r คือ ค่า เพอมีเอบิลิตีและเพอมีเอบิลิตีสัมพัทธ์ (Permeability and relative permeability) และ p_c คือ ค่าความดันแคปิลารี

ในส่วนความเร็วของของไหลในสถานะไอน้ำ (Water vapor) และสถานะอากาศหาได้จากกฎของฟิคส์ (Fick's law) และเขียนได้เป็น

$$\rho_v \vec{u}_v = \rho_v \vec{u}_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \quad (2.11)$$

และ
$$\rho_a \vec{u}_a = \rho_a \vec{u}_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \quad (2.12)$$

ที่ซึ่ง D_m คือ การแพร่ของมวลโมเลกุลประสิทธิผล (Effective molecular mass diffusion) และจาก Kaviany (1991) ค่าการแพร่นี้คำนวณได้จาก

$$D_m = \frac{2\phi}{3-\phi} (1-S) D_0 \quad (2.13)$$

ที่ซึ่ง D_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสองสถานะ (Binary mass diffusion

coefficient) ในตัวกลางที่มีความต่อเนื่อง (Continuous media)

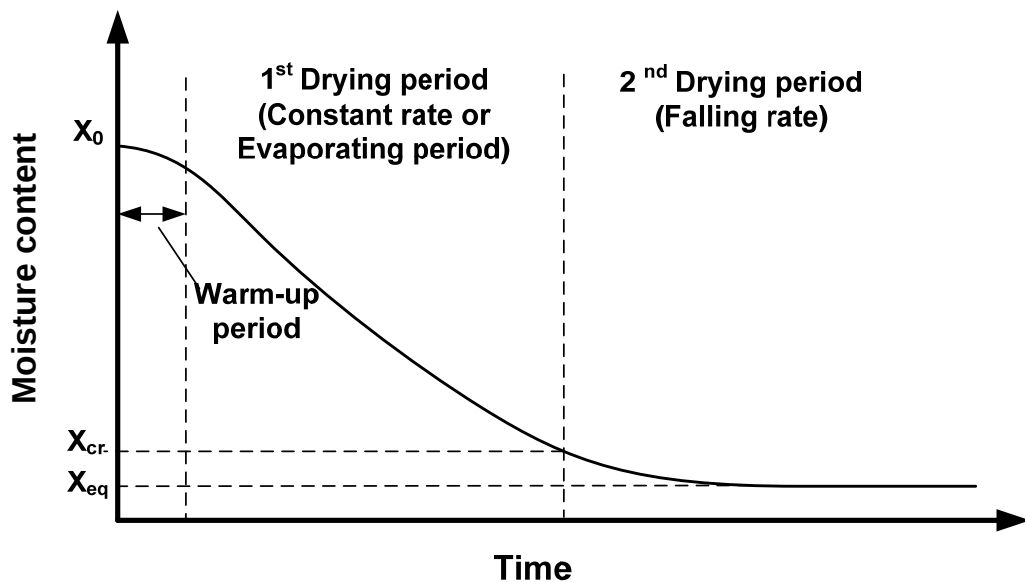
และจากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ฟลักซ์ของความร้อนผ่านวัสดุพูนคำนวณได้จาก

$$q = -\lambda_{eff} \nabla T \quad (2.14)$$

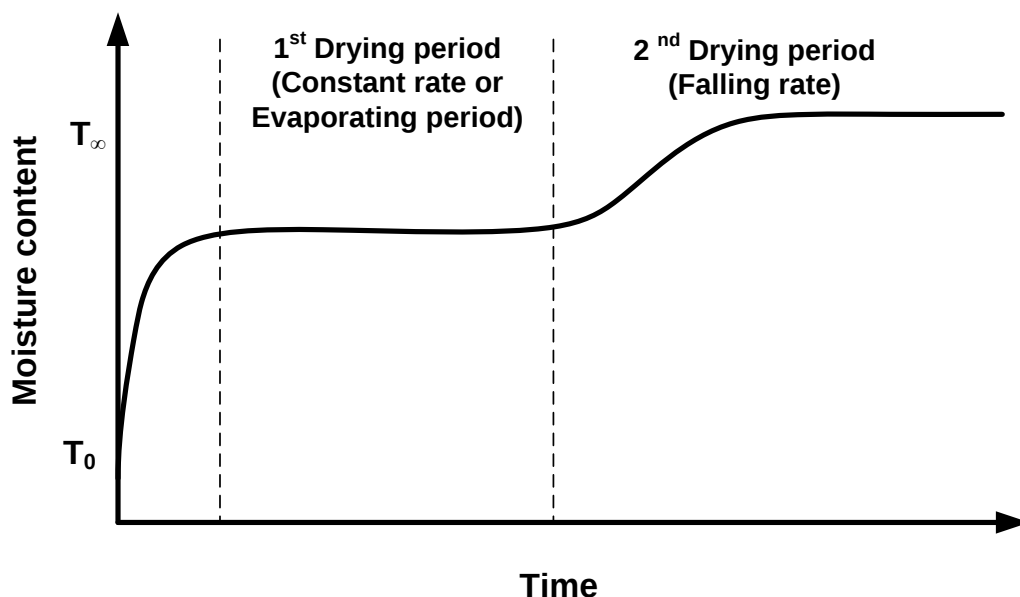
ที่ซึ่ง λ_{eff} คือ ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal conductivity)

2.3 กราฟการอบแห้ง

ในการวิเคราะห์การอบแห้งลักษณะของกระบวนการสามารถแสดงได้ด้วยกราฟการอบแห้ง (Drying curve) ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 กราฟอบแห้งแสดงความชื้นบรรจุที่เปลี่ยนไปตามเวลา



รูปที่ 2.3 กราฟออบแห้งแสดงอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพูนที่เปลี่ยนไปตามเวลา

จากรูปที่ 2.2 ช่วงการอบแห้งช่วงแรกหรือช่วงอัตราคงที่ (Constant period) เกิดขึ้นหลังจากช่วงที่วัสดุพูนได้รับความร้อนเริ่มต้น (Warm-up period) ระหว่างช่วงนี้ความชื้นหรือน้ำ (Free water) ถูกทำให้เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องไปที่ผิวโดยแรงแคปิลลารี (Capillary force) และความชื้นบรรจุ (Moisture content) ถูกทำให้ลดลงด้วยอัตราคงที่ ในระหว่างช่วงนี้บริเวณพื้นผิวภายนอกของวัสดุมีความเปียกเพียงพอหรือมีลักษณะเหมือนผิวเปียกและอัตราการอบแห้งเท่ากับอัตราการระเหย (Evaporation rate) จากผิวเปียกนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชั้นบาวดาร์เรเยอร์ (Boundary layer) ในช่วงนี้อุณหภูมิของส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะขณะที่การอบแห้งกำลังดำเนินต่อไปและความชื้นบรรจุมาถึงค่าความชื้นบรรจุวิกฤต (Critical moisture content, X_{cr}) การอบแห้งในช่วงแรกก็สิ้นสุดลงและการอบแห้งในช่วงที่สองหรือช่วงอัตราตกลง (Falling rate period) ก็เกิดขึ้น ในช่วงการอบแห้งช่วงที่สองแรงจากการแพร่ (Diffusion force) จะมีอิทธิพลทำให้เกิดแรงแคปิลลารี (Capillary force) และการเคลื่อนย้ายของเหลวจะถูกกระทำโดยอิทธิพลของการแพร่เป็นหลัก ในระหว่างช่วงนี้ความชื้นบรรจุจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งมันมาถึงค่าสมดุล (Equilibrium value, X_{eq}) ซึ่งเป็นค่าความชื้นบรรจุต่ำสุดที่ไม่สามารถทำให้แห้งได้อีกสำหรับวัสดุที่เป็นไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic material วัสดุที่น้ำเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง) แต่ค่า X_{eq} มีค่าประมาณ 0 สำหรับวัสดุที่เป็นนอนไฮโกรสโคปิก (Non-hygroscopic material วัสดุพูนที่น้ำอยู่ล้อมรอบผิวส่วนที่เป็นของแข็ง) อุณหภูมิของของแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของลมร้อน

จากรูปที่ 2.2 เราสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งหรือฟลักซ์ของมวลที่กลายเป็นไอน้ำ (Vapor mass flux) ได้โดย

$$\dot{m}_{vapor} = -\frac{M_{solid}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2.15)$$

ที่ซึ่ง A คือ พื้นที่ผิวของวัสดุพูนที่กำลังถูกทำให้แห้ง (ส่วนที่สัมผัสกับกับลมร้อน)
จากที่กล่าวมาข้างต้นในช่วงการอบแห้งช่วงแรกอัตราการอบแห้งมีค่าคงที่และขึ้นกับ
สภาวะของอากาศที่ใช้ออบแห้ง (อุณหภูมิ T_{∞} และความชื้นสัมพัทธ์ ω) ในช่วงการอบแห้งที่สอง
อัตราการอบแห้งจะมีค่าลดลงและขึ้นกับอิทธิพลของการแพร่ ที่ปลายของกระบวนการอบแห้ง
อัตราการอบแห้งจะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งหาได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.15) ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\tau_{drying} = \frac{M_{solid}}{A} \int_{X_0}^{X_t} \frac{dX}{\dot{m}_{vapor}(X)} \quad (2.16)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate drying) อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุพูน
(โดยการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว) จะถูกเรียกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb
temperature) ฟลักซ์ของความร้อนมีสภาวะคงตัว (Steady-state heat flux) คำนวณได้จาก

$$q = h(T_{air} - T_{wb}) \quad (2.17)$$

ที่ซึ่ง T_{air} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก
(อุณหภูมิผิวเปียกของวัสดุพูน) และ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สมการที่ (2.17) ยังสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying
rate)

$$q = \dot{m}_{vapor, const} \Delta h \quad (2.18)$$

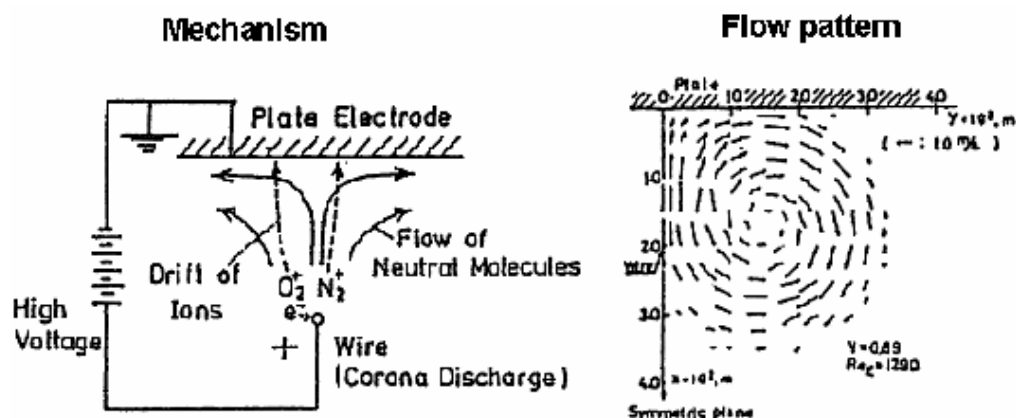
ที่ซึ่ง Δh คือ ค่าความร้อนแฝงต่อหนึ่งมวลของการกลายเป็นไอของน้ำ (Latent heat)
ดังนั้นในการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคำนวณได้จาก

$$h = \dot{m}_{vapor, const} \left(\frac{\Delta h}{T_{air} - T_{wb}} \right) \quad (2.19)$$

2.4 หลักการสร้างโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 2.4 กระแสไฟฟ้าถูก
จ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง แล้วไหลไปยังอิเล็กโทรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆ กับผิว
ของอิเล็กโทรดนี้ถูกชาร์จ (Ionized) และผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground
electrode) ขณะที่อากาศนี้เคลื่อนที่มันจะชนกับโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลาง (Neutral
molecules) และทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum exchange) ผลของการเคลื่อนที่

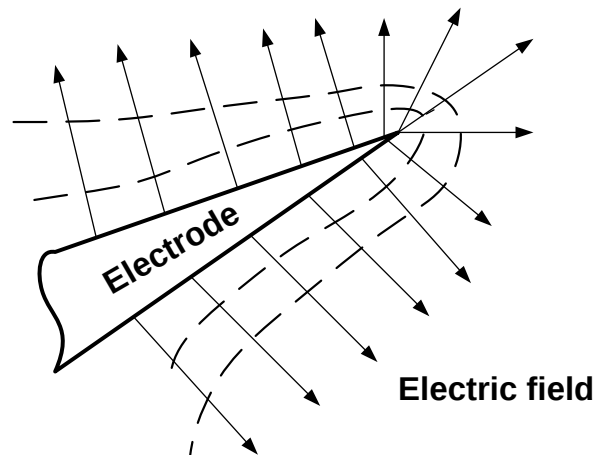
ดังกล่าวทำให้เกิดซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โคโรนาวินด์ (Corona wind) จากการศึกษาของ Yabe และคณะ (1978) ในสภาวะที่ปราศจากการไหลทิศทางแนวขวาง (Cross flow) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Body force) เหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวน (Vortices) ที่สมมาตรกันสอง ลูกที่มีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกันระหว่างลวด และแผ่นอิเล็กโทรด (Wire and plate electrode) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดโคโรนาวินด์ (Yabe และคณะ, 1978)

การเกิดประจุแบบโคโรนา

สนามไฟฟ้าที่เกิดในบริเวณขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีหรือปลายแหลมจะมีความเข้มสูงมากในบริเวณช่วงแคบๆ ดังรูป 2.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงจะก่อให้เกิดการคายประจุ (Discharge) ที่เรียกว่า การคายประจุแบบโคโรนา (Corona discharge) ซึ่งจะพบบริเวณอิเล็กโทรด ที่มีปลายแหลมหรือเส้นลวดเล็กๆ ถ้าหากปลายแหลมของขั้วไฟฟ้านี้ถูกทำให้มีศักย์ไฟฟ้าบวกสูงมากอิเล็กตรอนบริเวณใกล้ๆ ปลายแหลมจะถูกเร่งให้ไปอยู่ที่ปลายแหลม และหากมีพลังงานมากพออันเนื่องจากการชนกับอะตอมข้างเคียงก็จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของอากาศรอบข้างเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ได้ การรวมตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบวกในบริเวณที่การจ่ายประจุแบบโคโรนา จะทำให้เกิดโฟตอน (Photon) พลังงานสูงและก่อให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในบริเวณรอบๆ ที่มีการคายประจุในกรณีศักย์ไฟฟ้าสูงมีสถานะเป็นลบก็จะเกิดการคายประจุแบบโคโรนาได้เช่นกัน



รูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าที่ปลายอิเล็กโทรด

แรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ที่กระทำบนของไหล

สมการควบคุมสำหรับแรงอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ถูกทำให้เกิดโดยสนามไฟฟ้าขนาด $\vec{E}$ กระทำบนของไหลที่มีค่าไดอิเล็กตริกเพอร์มิติวิตี (Dielectric permittivity) ϵ ความหนาแน่น ρ และอุณหภูมิ T สามารถเขียนได้เป็น (Landau and Lifshitz, 1963)

$$\vec{F}_E = q\vec{E} - \frac{1}{2}\vec{E}^2\nabla\epsilon + \frac{1}{2}\left(\vec{E}^2\left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right]_T\rho\right) \quad (2.20)$$

ที่ซึ่ง q คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (Electric charge density) ในของไหล เทอมสุดท้ายทางด้านขวามือของสมการ (2.20) ยังสามารถแยกออกได้เป็น

$$\frac{1}{2}\left(\vec{E}^2\left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right]_T\rho\right) = \frac{1}{2}\rho\left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right]_T\nabla\vec{E}^2 + \frac{1}{2}\vec{E}^2\left(\rho\left[\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho}\right]_T\right) \quad (2.21)$$

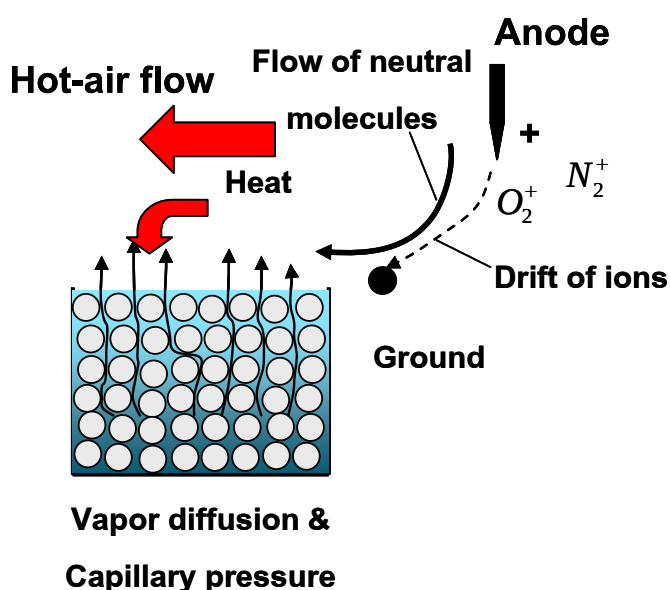
เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ (2.20) คือ แรงคูลอมบ์ (Coulomb force) เป็นแรงที่กระทำบนประจุอิสระ (Free charge) ที่อยู่ในสนามไฟฟ้า โดยปกติแล้วแรงนี้จะมีอิทธิพลต่อการไหลที่มีสถานะเดียว (Single-phase flow) ที่อยู่ภายใต้การใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เทอมที่สองเป็นแรงไดอิเล็กโตรโพรติก (Dielectrophoretic force) ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) ของค่าเพอร์มิติวิตีของของไหลไดอิเล็กตริก (Permittivity of dielectric fluid) ซึ่งผลอันเนื่องมาจากเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) และ/หรือ ความแตกต่างของสถานะของของไหล และแรงไดอิเล็กโตรโพรติกจะมีค่าอ่อนกว่าแรงคูลอมบ์สำหรับการไหลที่มีสถานะเดียว ถ้าของไหลมีสองสถานะ เช่น ในการเดือดและการควบแน่นแบบพาความร้อน (Convective boiling and condensation) ซึ่งของไหลจะมีสองสถานะคือ ไอและของเหลว แรงไดอิเล็กโตรโพรติกจะมีอิทธิพลมาก ($\nabla\epsilon$ มีค่าสูง) และส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหลและการ

ถ่ายเทความร้อนของของไหลนั้นๆ ทิศทางของแรงนี้หาจาก ค่าเกรเดียนท์ (Gradient) ของ ϵ ส่วนเทอมที่สามเป็นแรงอิเล็กโตรสแตติกทีฟ (Electrostatic force) ซึ่งเกิดเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเข้มสนามไฟฟ้าและจะแปรเปลี่ยนตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริก อุณหภูมิและความหนาแน่น (Sadek และคณะ, 2006) จากสมการ (2.20) ผลของแรงคูลอมบ์จะมีอิทธิพลต่อการเกิดโคโรनावินด์

2.5 แนวคิดการใช้สนามไฟฟ้าเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง

กลไกของอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเกิดจากแรงไฟฟ้า (Electric body force) การควบคุมกระแสน้ำสนามไฟฟ้าแรงดันสูงกับสนามการไหลของของไหลทำให้เกิดการไหลทุติยภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า (Electrically induced secondary flow) ซึ่งเรียกว่า ไอออนิกวินด์ (Ionic wind) หรือโคโรनावินด์ (Corona wind) การไหลทุติยภูมินี้เปรียบเสมือนลำเจ็ต (Jet) ของของไหลที่ออกจากแท่งอิเล็กโตรดที่ถูกชาร์จ (Charged electrode) ไปยังกราวด์ (Ground) ผลของการไหลทุติยภูมินี้ทำให้เพิ่มการผสมหรือคลุกเคล้าของการไหลและยังช่วยลดผลของชั้นบาวด์ลารีความร้อน (Thermal boundary layer) ด้วย ดังนั้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก

แนวคิดของวิธีการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพูนโดยใช้สนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.6 เมื่อลมร้อนไหลผ่านบริเวณที่สนามไฟฟ้า ลมร้อนจะถูกทำให้เกิดการหมุนวน (Circulation) เหนือแพคเบตและอากาศหมุนวนนี้จะผลทำให้อิทธิพลของชั้นบาวด์ลารีเรเยอร์ที่ผิวหน้าของแพคเบตมีค่าลดลง ทำให้ความชื้นที่ผิวเปียกของแพคเบตถูกระเหยไปสู่อากาศร้อนได้เร็วขึ้น และยังทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทจากลมร้อนไปสู่แพคเบตได้ดีขึ้น อันเป็นผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.6 แนวคิดของการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนโดยใช้สนามไฟฟ้า

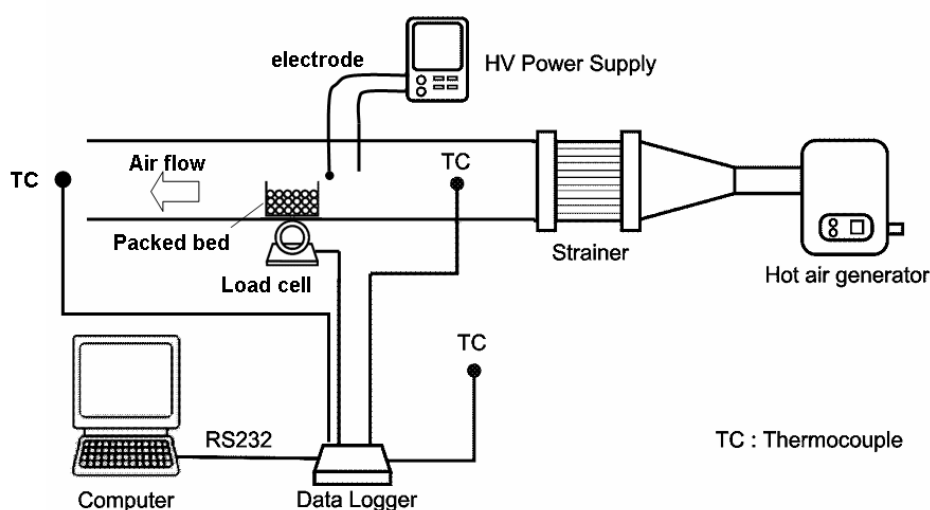
บทที่ 3

อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 ชุดทดสอบ

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพชุดทดสอบของงานวิจัยนี้ กระแสลมจากพัดลมไหลผ่านอุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel) ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15×15 ตร.ซม. และมีความยาวประมาณ 4 เมตร ถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเครื่องสร้างลมร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนของลมร้อน อุโมงค์ลมซึ่งทำจากอะครีลิกความหนา 6 มม. ถูกหุ้มด้วยแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนา 1 นิ้วตลอดความยาวของอุโมงค์จนถึงบริเวณส่วนที่เป็นหน้าตัดทดสอบ สนามไฟฟ้าสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินต์ถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Regulated High Voltage power supply) กระแสไฟฟ้าไหลจากจากขั้วอิเล็กโทรดผ่านอากาศไปยังกราวด์อิเล็กโทรดซึ่งอยู่ห่างออกไปเป็นระยะ 4 ซม. ขั้วอิเล็กโทรดทำจากหลอดทองแดง 4 เส้นที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม โดยหลอดอิเล็กโทรดแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 มม. ส่วนกราวด์อิเล็กโทรดถูกติดตั้งในทิศทางที่ขวางกับทิศการไหลของกระแสลมและมีขนาด 0.25 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.2 อุณหภูมิของกระแสลมถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Thermocouple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ประมาณ 60°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) น้ำหนักของแพคเกจที่เปลี่ยนไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซลล์ (Load cell)

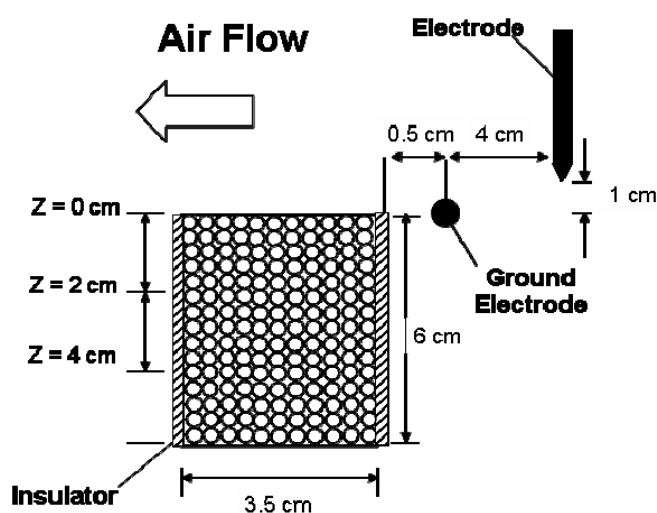
(ก)



(ข)



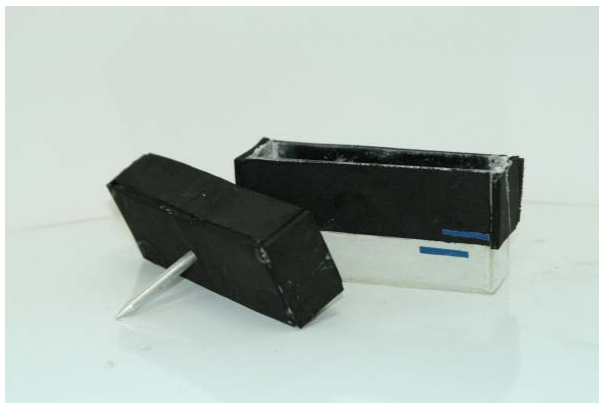
รูปที่ 2 ชุดทดสอบ (ก) แผนภาพชุดทดสอบ (ข) ภาพถ่ายชุดทดสอบ



รูปที่ 3.2 ขนาดของแพคเบตและตำแหน่งของอิเล็กโทรด

กล่องแพคเบตที่ใช้แทนลักษณะวัสดุพูนในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะครีค (Acrylic plate) ความหนา 0.5 มม. เพื่อควบคุมให้ความร้อนถ่ายเทเฉพาะบริเวณที่ผิวด้านบนของแพคเบต ด้านข้างทั้ง 4 ด้านของแพคเบตที่สัมผัสกับลมร้อนถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนที่ทำการยางหนา 5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ลูกแก้ว (Glass bead) และน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเบต ซึ่งมีขนาด 3.5 ซม. กว้าง $\times$ 12 ซม. ยาว $\times$ 6 ซม. สูง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบตภายใต้สนามไฟฟ้า เส้นลวดไฟเบอร์ออปติก (LUXTRON Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) จำนวน 3 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 2 และ 4 ซม. โดยวัดจากผิวด้านบนลงไปภายในแพคเบต ดังแสดงในรูปที่ 3.2 อุณหภูมิของกระแสลมร้อน อุณหภูมิภายในแพคเบตและน้ำหนักของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Dataaker DT505)

(ก)



(ข)



รูปที่ 3.3 แพคเกจที่ใช้ทดสอบ (ก) ลักษณะของแพคเกจ (ข) แพคเกจที่บรรจุถูกแก้วเพื่อใช้ทดลอง

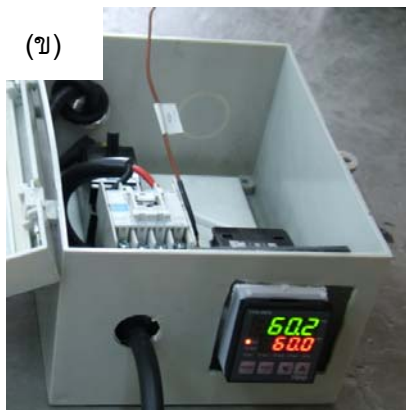
อุปกรณ์ทดลอง

ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ชุดสร้างลมร้อนด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย ขดลวดความร้อนซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 30 วัตต์ ชุดควบคุมการตัดต่ออุณหภูมิ ขดลวดความร้อนถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง ถัดจากท่อยืดหยุ่น (Flexible duct)

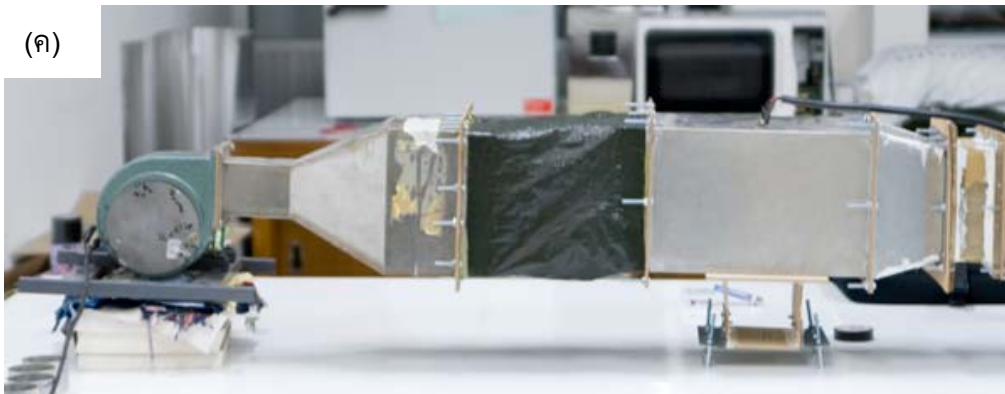
(ก)



(ข)



(ค)

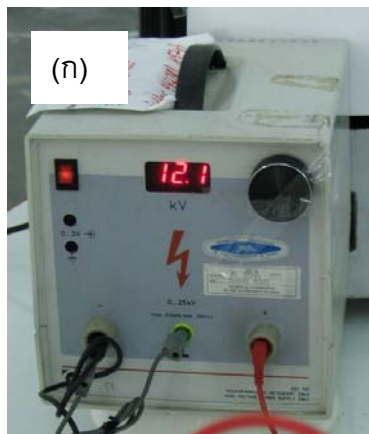


รูปที่ 3.4 ชุดสร้างลมร้อน (ก) ขดลวดความร้อน (ข) ชุดควบคุมการตัดต่อ และ (ค) ตำแหน่งติดตั้งขดลวดความร้อน

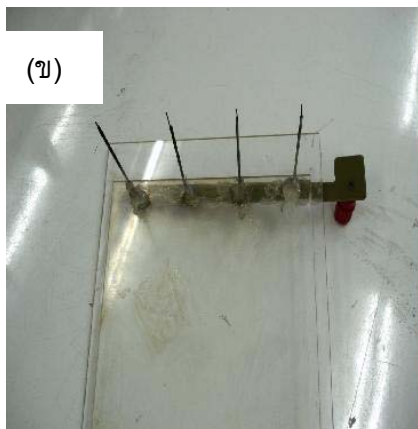
ชุดสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูง

รูปที่ 3.5 แสดงชุดสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูงประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Regulated high voltage DC power supply, Output 0 – 25 kV, 0 – 0.4 mA) และขดลวดอีเล็กโทรดจำนวน 4 ซึ่งระห่างระหว่างขดลวดประมาณ 4 ซม. โดยรูปที่ 3.5 (ค) แสดงตำแหน่งติดตั้งขดลวดอีเล็กโทรดและกราวด์

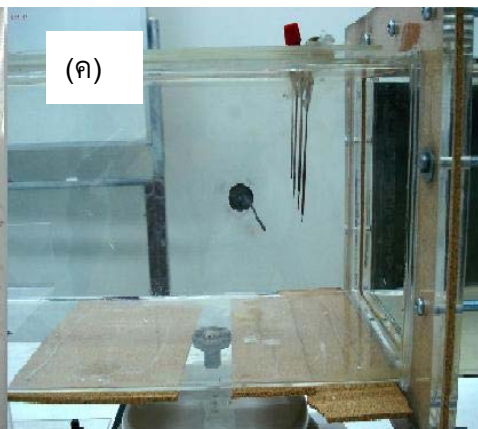
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 3.5 ชุดสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูง (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (ข) ขดลวดอีเล็กโทรด และ (ค) ตำแหน่งติดตั้งอีเล็กโทรด

3.2 สภาวะทดสอบ

ในการทดลองความเร็วเฉลี่ยของกระแสลม (Bulk mean velocity, U_b) มีค่าประมาณ 0.35 เมตรต่อวินาที และสำหรับในการทดลองนี้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 15 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดต่างๆ ของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 1. สภาวะทดสอบ

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	X_{in}	$\sim 12 - 22\%$ db
Drying temperature	T	$50 - 60^{\circ}\text{C}$
Ambient temperature	T_M	25°C
Mean air velocity	U_b	0.33 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	24 - 48 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของ ความพรุน (Porosity) ในแพค เบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่าง ๆ

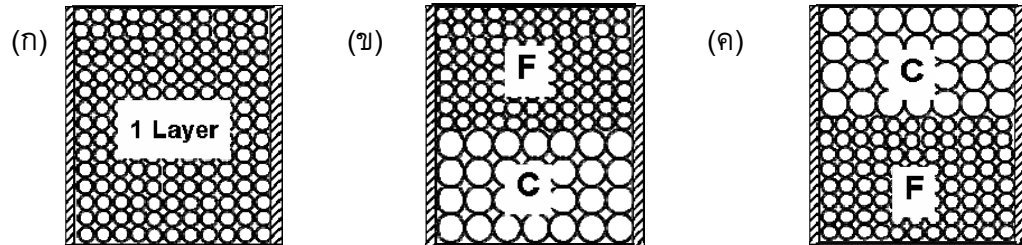
Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m^2)
0.125	~ 0.385	$\sim 8.41 \times 10^{-12}$
0.38	~ 0.371	$\sim 3.52 \times 10^{-11}$

3.3 กรณีทดลอง

เพื่อทดสอบอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและขนาดของลูกแก้ว (Bead) ต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพรุน (Packed bed) ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีหลักคือ

1. ทดสอบวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนค่าหนึ่ง (Single-layer packed bed) ซึ่งใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.125$ หรือ $d = 0.38$ มม. ขนาดใดขนาดหนึ่ง (ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ก)
2. ทดสอบวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนสองค่า (Double-layer packed bed) ซึ่งใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 0.125$ และ $d = 0.38$ มม. ร่วมกัน โดยลูกแก้วแต่ละขนาดจะถูกวางแยกชั้นกันและมีความหนาของชั้นเท่ากัน ในกรณีที่ลูกแก้วขนาดเล็ก (Fine bead) วางอยู่บนลูกแก้วขนาดใหญ่ (Coarse bead) จะเรียกว่า F-C case ส่วน

กรณีที่ลูกแก้วขนาดใหญ่ถูกวางอยู่บนลูกแก้วขนาดเล็กจะเรียกว่า C-F case (ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ข และ ค) และอนุกรมมิถูกวัด ณ ตำแหน่ง 0, 2, 3 และ 4 ซม. ลึกจากผิวของแพคเบด



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแพคเบดที่ใช้ในการทดลอง (ก) Single layer, (ข) Double layer แบบ F-C (Fine-coarse packed bed) และ (ค) Double layer แบบ C-F (Coarse-Fine packed bed)

บทที่ 4

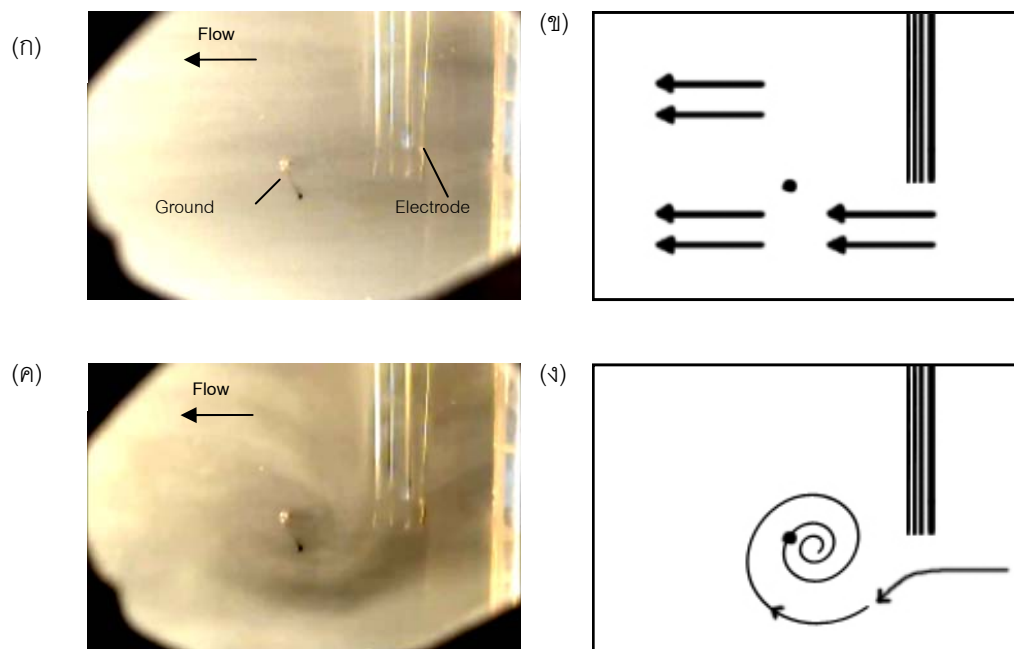
ผลการทดลองและบทวิจารณ์

ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองอุณหภูมิภายในแพคเกจถูกสมมติให้อยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic equilibrium) ดังนั้นอุณหภูมิขององค์ประกอบต่างๆ (ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) มีค่าเดียวกัน จากการตรวจวัดอุณหภูมิของลมร้อน ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของหน้าตัดทดสอบ พบว่าอุณหภูมิมีค่าประมาณ 60°C และ 55°C ตามลำดับ และรูปร่างโปรไฟล์ของความเร็วของลม (Velocity profile) ณ ตำแหน่งทางเข้าหน้าตัดทดสอบมีลักษณะเป็นแบบพาลาบอลิก (Parabolic shape) โดยลมเร็วที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.33 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าเทียบกับกับตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) เท่ากับ 2,610.58 ($Re_D = \rho U_b D_h / \mu$ ที่ซึ่ง ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ, μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ และ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของอุโมงค์ลม)

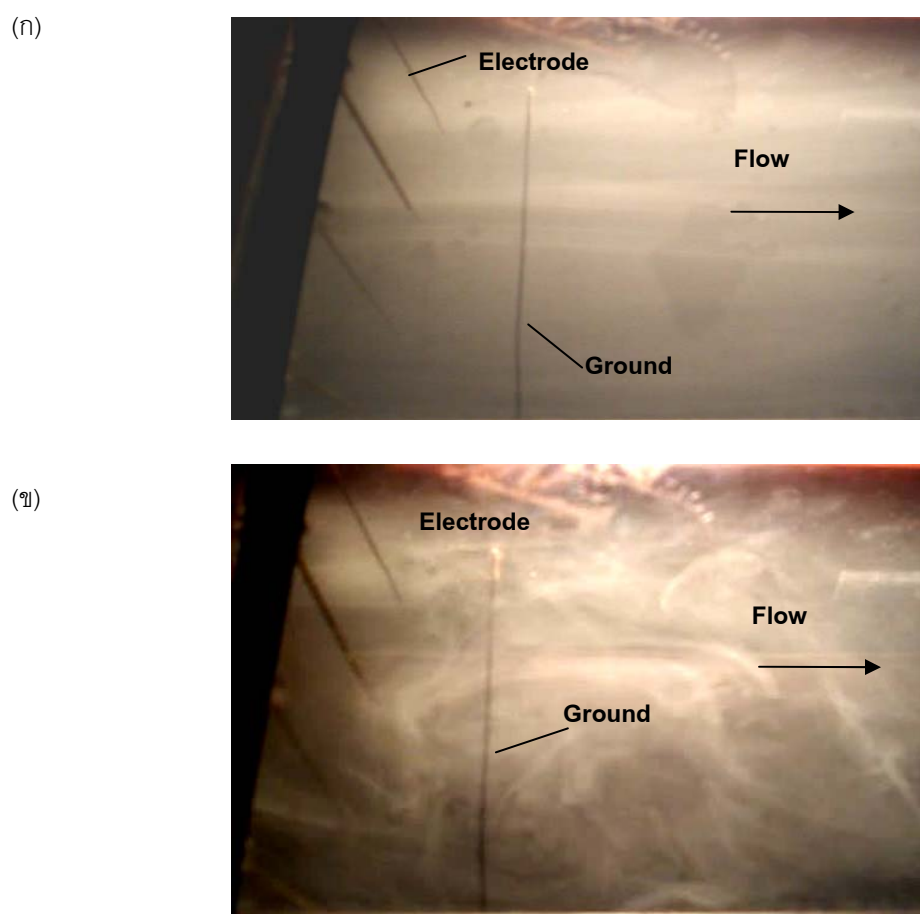
4.1 ลักษณะของกระแสอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า

เพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าการทดลองนี้ใช้เทคนิคของการใช้ควันรูป (Incense smoke technique) โดยควันรูปถูกปล่อย ณ ตำแหน่งหลังจากอากาศผ่านเครื่องทำความร้อนและตำแหน่งดังกล่าวห่างจากหน้าตัดทดสอบประมาณ 4 เมตร หลอดไฟแสงสว่าง (Halogen lamp) ขนาด 500 วัตต์จำนวน 2 ชุดถูกวาง ณ ตำแหน่งปลายทางออกและตำแหน่งหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม เนื่องจากความเร็วของลม (0.33 เมตรต่อวินาที) มีค่าสูงเกินไปจนทำให้ควันรูปล่องลอยออกจากอุโมงค์ก่อนที่จะถ่ายภาพลักษณะของอากาศได้ทัน ดังนั้นความร้อนลมที่ใช้ในการถ่ายภาพมีค่าประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้การบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอากาศใช้กล้องวิดีโอแบบดิจิทัล (SONY DCR-PC108/ PC109E)

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของกระแสอากาศซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาทีและค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่า (V) 10 กิโลโวลต์ จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) (แสดงภาพด้านข้าง) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าลักษณะการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบ และจากรูปที่ 4.1 (ค) และ (ง) พบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสอากาศเกิดกระแสลมหมุนวน (Vortex) ระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ โดยศูนย์กลางของการหมุนวนเกิดใกล้กับกราวด์อิเล็กโทรด และขนาดของกระแสลมหมุนวนมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดของแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น (ไม่ได้แสดงรูป) และจากรูปที่ 4.2 (ข) กระแสลมหลังลวดอิเล็กโทรดมีความปั่นป่วนมากด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากลวดอิเล็กโทรดแต่ละเส้นที่วางเรียงกันในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของกระแสลม



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านข้างของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสวงรูป (ก) $V = 0$ kV และ (ข) $V = 10$ kV



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านบนของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสวงรูป (ก) $V = 0$ kV และ (ข) $V = 10$ kV

4.2 กรณีแพคเบตแบบชั้นเดียว

4.2.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่ออุณหภูมิภายในแพคเบต

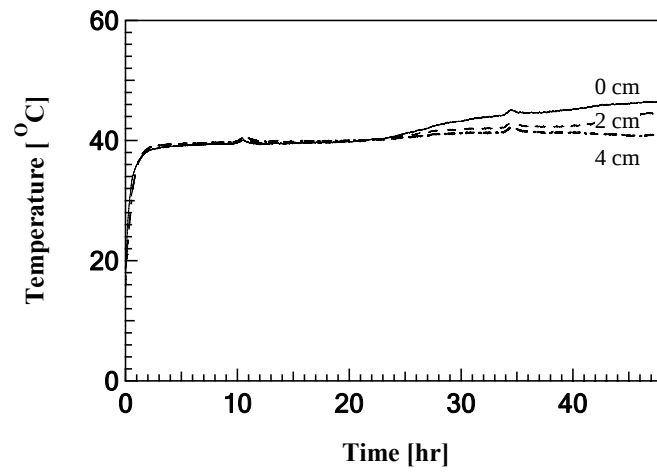
เพื่อสังเกตอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแส ไฟฟ้าไหลในเส้นลวดฮีเลียมที่ มีผลต่ออุณหภูมิของกระแสมและต่ออุณหภูมิภายในของแพคเบต งานวิจัยนี้ได้ทดสอบกรณีที่ ไม่เปิดเครื่องสร้างลมร้อน แล้วทำการวัดค่าอุณหภูมิของกระแสมที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลัง ของแพคเบตซึ่งพบว่าอุณหภูมิของกระแสมก่อนและหลังแพคเบตมีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ลวดฮีเลียมที่ลวดฮีเลียมยังถูกตรวจสอบโดยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermo-meter) และพบว่าอุณหภูมิที่ลวดฮีเลียมมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของกระแสมมาก จากการทดสอบข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของความร้อนจากลวดฮีเลียม (Joule heating) มีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบต

รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองกรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวและกำหนดให้ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นของแพคเบต (Initial saturation, $S_{int} = V_{water,int} / V_{glass}$) มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากกราฟ ในช่วง 3 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิภายในแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคงที่ที่ประมาณ 40 °C หลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมงอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละชั้นเริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างช้าๆ และที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าประมาณ 55 °C และอุณหภูมิที่ระดับต่ำสุด (4 ซม.จากผิวแพคเบต) มีค่าประมาณ 41 °C จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการทดลองปริมาณความชื้นในแพคเบตยังมีค่ามาก เมื่อความร้อนจากลมร้อนไหลเข้าสู่แพคเบต น้ำภายในแพคเบตจะดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพคเบตทั้ง 3 ตำแหน่งมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่น้ำได้รับความร้อน น้ำก็ยังมีการเคลื่อนที่จากภายในไปยังผิวของแพคเบตแล้วเกิดการระเหย (Evaporation) ไปสู่ลมร้อน ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการระเหยนี้เรียกว่า ช่วงของการทำให้แห้ง (Constant rate drying period) เมื่อน้ำส่วนใหญ่ระเหยออกจากแพคเบตจะทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทให้แก่ลูกแก้ว ดังนั้นอุณหภูมิภายในแพคเบตในแต่ละตำแหน่งเริ่มมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งและมีค่าแตกต่างกัน หรือกล่าวได้ว่าหลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมง กลไกการถ่ายเทความร้อนหลักเป็นแบบการนำความร้อน (Conduction heat transfer) นั่นเอง และเรียกช่วงของกระบวนการนี้ว่าช่วงของอัตราการตกลง (Falling rate period)

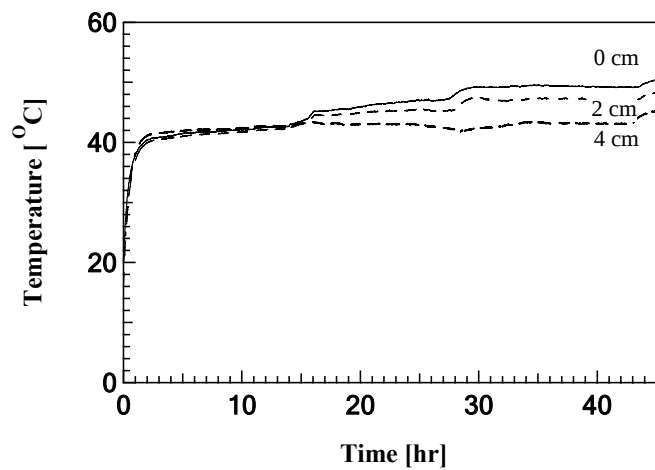
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงอุณหภูมิภายในแพคเบตเมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 และ 15 กิโลโวลต์ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดสนามไฟฟ้าทำให้ช่วงการระเหยของน้ำหรือช่วงของการทำให้แห้งมีค่าลดลง นั่นหมายถึงอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงอิทธิพลของความชื้นของสนามไฟฟ้าที่มีต่ออุณหภูมิที่ผิวและที่ความลึก 4 ซม.ของแพคเบตตามลำดับ จากรูปพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการถ่ายเท

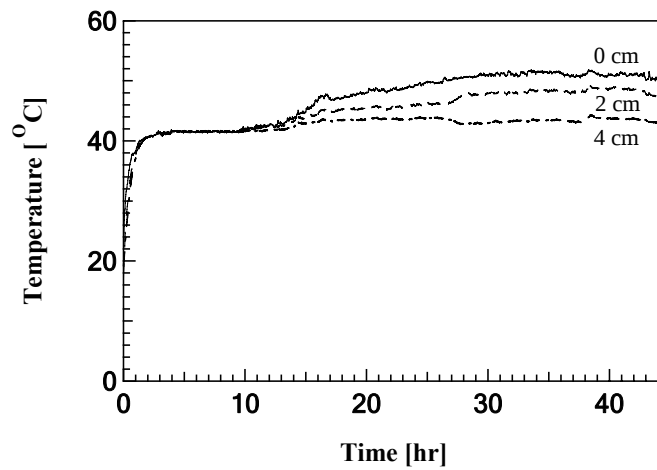
ความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบต โดยเฉพาะที่ผิวของแพคเบตอุณหภูมิมีค่าแตกต่างกันเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.7



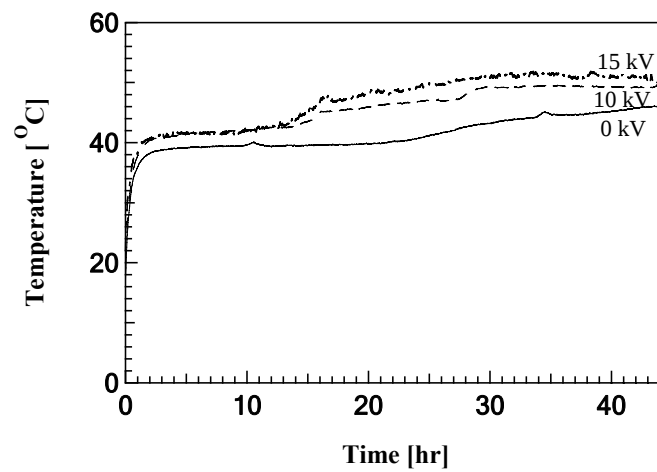
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และแรงดันไฟฟ้า $V = 0$ kV



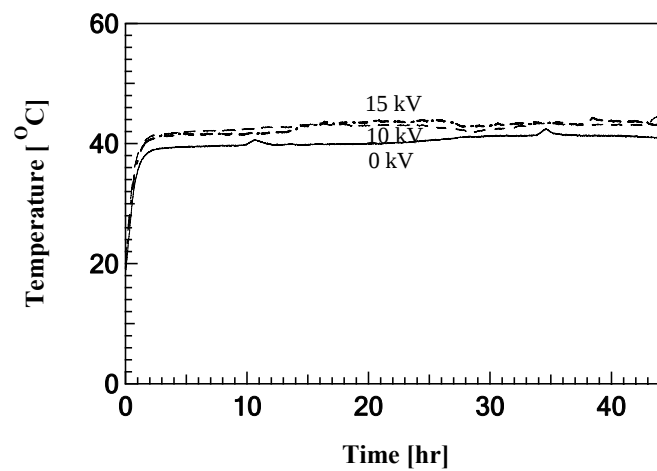
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และแรงดันไฟฟ้า $V = 10$ kV



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลู่กั่วขนาด 0.38 มม. และแรงดันไฟฟ้า $V = 15$ kV



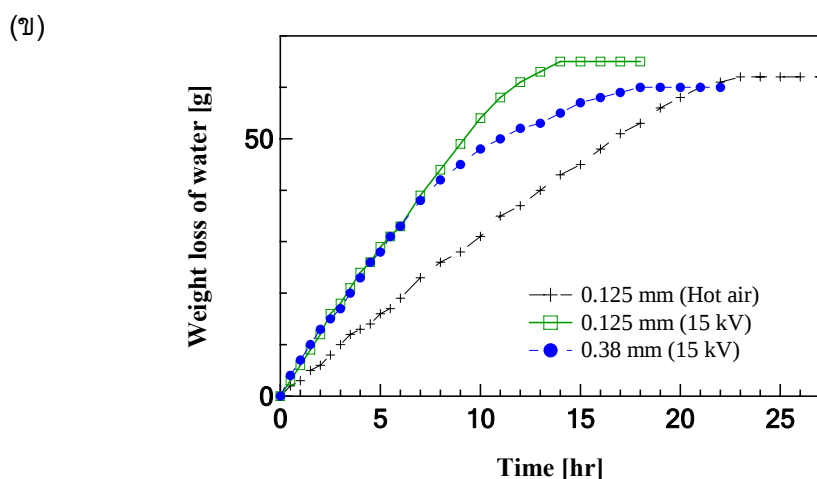
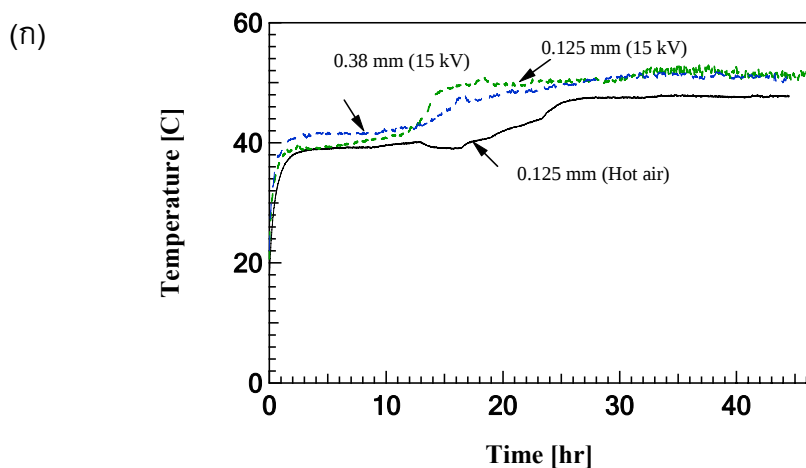
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลู่กั่วขนาด 0.38 มม.



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับความลึก 4 ซม. ของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลู่กั่วขนาด 0.38 มม.

4.2.2 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อความชื้นของแพคเบต

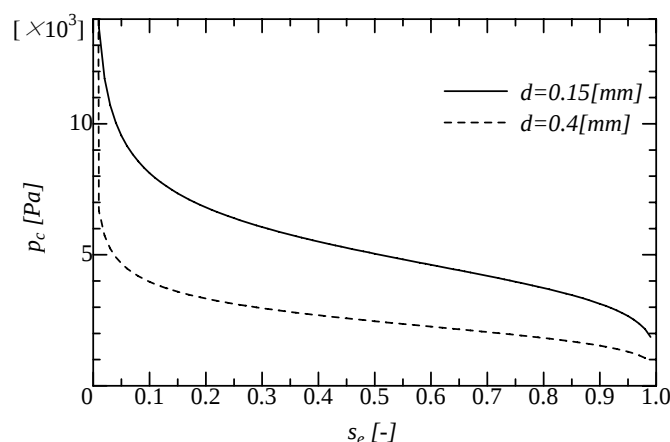
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วม ($V = 15 \text{ kV}$) ที่ $S_{\text{int}} = 1$ จากรูปจะเห็นได้ว่าผลของสนามไฟฟ้านอกจากจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าสูงเร็วขึ้นแล้วยังช่วยทำให้อัตราการระเหยความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งอัตราการระเหยมีค่าสูงขึ้นประมาณ 1.66 เท่า



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วมที่เวลาต่างๆ (ก) อุณหภูมิที่ผิว (ข) ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากแพคเบต

นอกจากนี้รูปที่ 4.9 ยังแสดงการเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำในแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดหนึ่งๆ เมื่อการอบแห้งผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าหรือแพคเบตที่มีความพรุนมากกว่าจะมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ดีกว่าลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากในขณะนี้น้ำระเหยตัวมากขึ้นความดันไอในวัสดุพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลของแรงดันแคปิลลารี (Capillary pressure, p_c) มีผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำให้เคลื่อนที่ไปที่ผิวของวัสดุพรุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 (Rattanadecho และคณะ 2001) ดังนั้นถ้าหากวัสดุที่มีความพรุนมาก อัตราน้ำที่ระเหยหรืออัตราน้ำหนักน้ำที่สูญเสียจาก

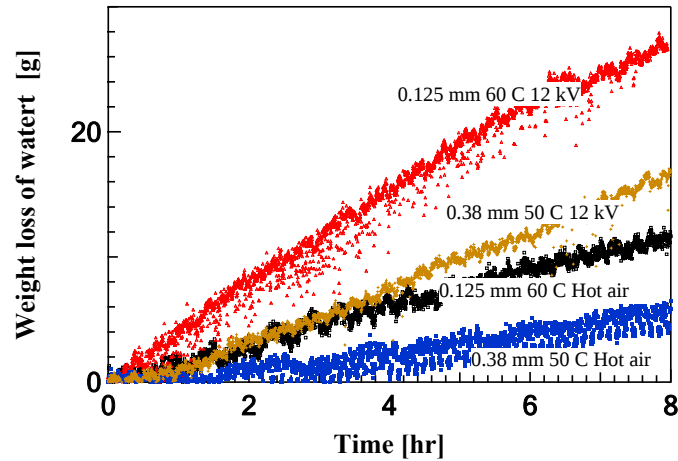
แพคเบตจะมีค่ามาก กว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า และอิทธิพลของแรงดันแคปปิลารีจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความอึดตัวในวัสดุพรุนมีค่าน้อยลง



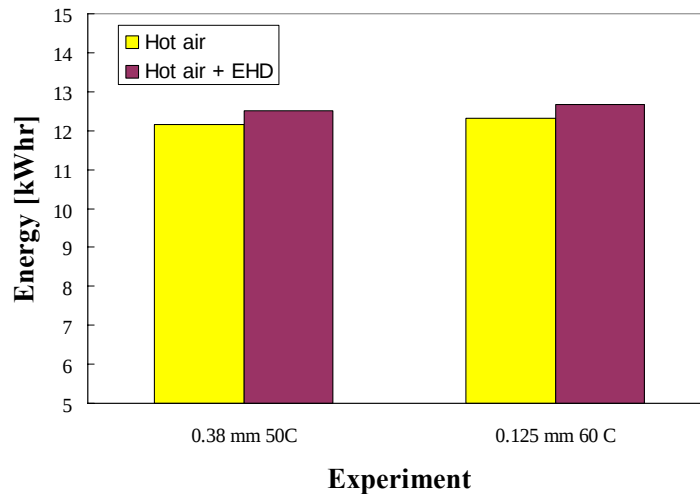
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแคปปิลารี (p_c) และความอึดตัวประสิทธิภาพของน้ำ (Effective water saturation, S_e) ในแพคเบต (Rattanadecho และคณะ 2001)

4.4 การเปรียบเทียบด้านพลังงาน

รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากแพคเบตที่ใส่ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. ที่ $S_{int} = 0.8$ ระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว (50 และ 60 °C) และโดยใช้สนามไฟฟ้าร่วม ($V = 12$ kV) จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า สำหรับแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. การใช้สนามไฟฟ้าร่วมทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นประมาณ 2.3 และ 2.9 เท่า ตามลำดับ ในแง่ของพลังงานพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการระเหยของน้ำออกจากแพคเบตมีค่าหรือประมาณ 3 % ของพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างลมร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 4.11) จากการพิจารณาค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) พบว่ากรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่า 1.2 – 3 kWh/g และกรณีใช้สนามไฟฟ้ามีค่า 0.4 – 0.8 kWh/g ดังนั้นการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้งประมาณ 3 เท่า



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำในแพคเบดที่ระเหยไปในแต่ละเวลาระหว่างกรณีไม่ใช้สนามไฟฟ้าและกรณีใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

4.3 กรณีแพคเบดแบบสองชั้น (Double-layer packed bed)

ในกรณีแพคเบดแบบสองชั้นอุณหภูมิของแพคเบดถูกตรวจสอบ ณ ตำแหน่ง (z) 0, 2, 3 และ 4 ซม. ลึกลงจากผิว ซึ่งที่ $z=3$ ซม. เป็นตำแหน่งรอยต่อของชั้นที่มีความพรุนแตกต่างกัน และกำหนดให้ค่าความอึดตัวเริ่มต้น (S_{int}) ในแต่ละชั้นความหนาของวัสดุพรุน (ชั้นของลูกแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน) มีค่าเท่ากับ 1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 24 ชั่วโมง

4.3.1 กรณี F-C (Fine-coarse case)

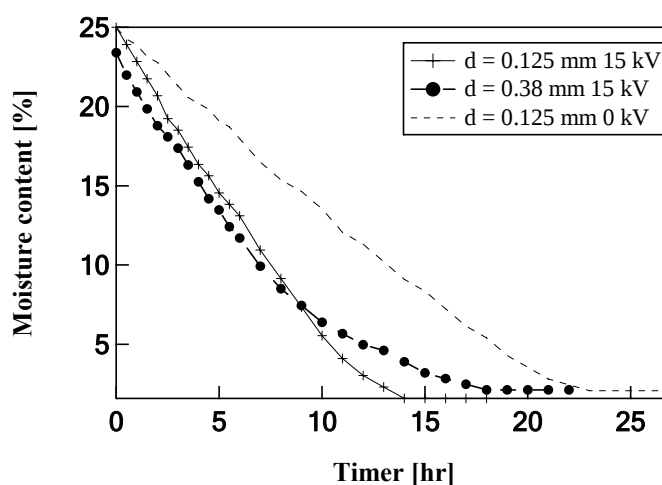
รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอัตราความชื้นที่ลดลงหรืออัตราการอบแห้งมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า ประมาณ 1.8 เท่า ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุพรุน และ แพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแพคเบดที่บรรจุลูกแก้ว

ขนาดใหญ่ประมาณ 1.4 เท่า ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันแคปิลลารี โดยทางทฤษฎีแล้วแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าความพรุนมากกว่าแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ ซึ่งความดันแคปิลลารีเป็นฟังก์ชันของค่าความพรุน (Rattanadecho และ คณะ 2001 และ 2002)

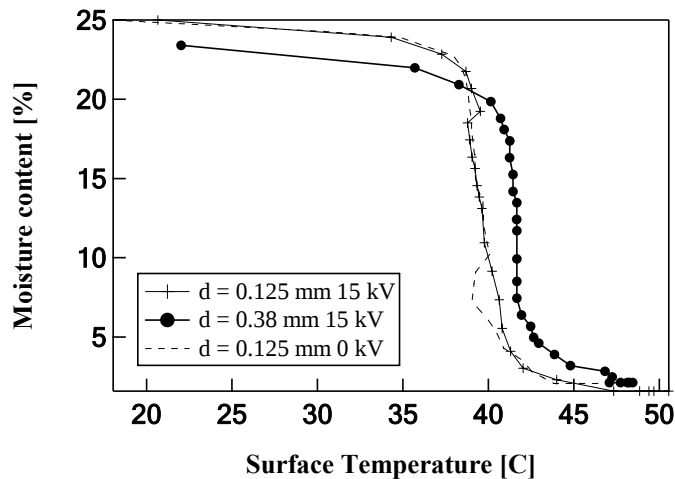
$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{(K/\phi)} J(s_e) \quad (4.1)$$

ที่ซึ่ง p_g และ p_l คือ ค่าความดันของก๊าซและของเหลวในแพคเบด σ คือ ค่าความตึงผิว และ $J(s_e)$ คือ ฟังก์ชันรีเวอร์ท (Leverett function) ซึ่งขึ้นกับค่าความอึดตัวของวัสดุพรุน จากสมการที่ (4.1) ถ้าหาก $(\sigma J(s_e))_{small\ bead} \approx (\sigma J(s_e))_{small\ bid}$ แล้ว $p_{c,small\ bead} > p_{c,big\ bead}$ ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่มีความพรุนสูงจะมีค่าแรงดันแคปิลลารีสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนต่ำกว่า ซึ่งส่งผลทำให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 4.12 พบว่าที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะค่าอัตราส่วนความชื้นของแพคเบดมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งเกิดเนื่องจากปริมาณความชื้นเกิดการระเหย (Evaporation) อย่างมากที่ผิวของแพคเบด และเรียกช่วงของปรากฏการณ์นี้ว่า ช่วงการทำให้แห้ง (Drying period or evaporating period) เมื่ออุณหภูมิภายในของแพคเบดมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนจะถูกใช้ไปกับความร้อนแฝงเพื่อทำให้น้ำที่ผิวหน้าของแพคเบดกลายเป็นไอ และเมื่อน้ำส่วนใหญ่ที่ผิวหน้าของแพคเบดระเหยไปจะเกิดความแห้งขึ้นบางส่วนที่ผิวหน้าของแพคเบด ช่วงการอบแห้งนี้เรียกว่าช่วงของการตก (Falling period) นอกจากนี้ในช่วงดังกล่าวนี้ อิทธิพลของแรงดันแคปิลลารีจะมีค่ามากขึ้นทำให้ความชื้นที่ยังคงอยู่ภายในแพคเบดสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้อีก ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจึงมีอัตราส่วนความชื้นเหลือน้อยกว่าแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการอบแห้งเท่ากัน



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ

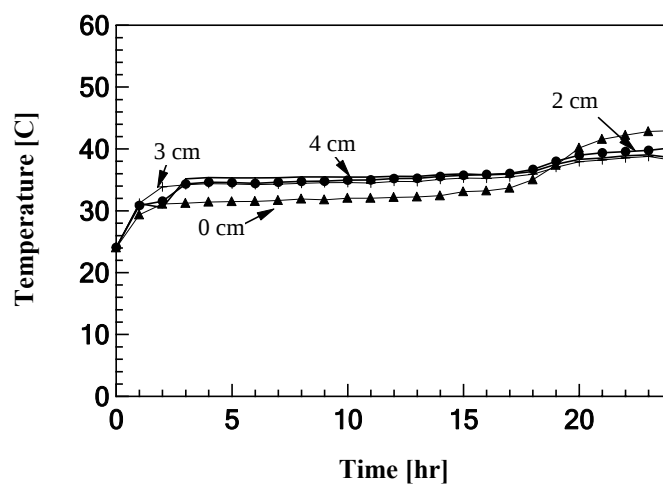


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ

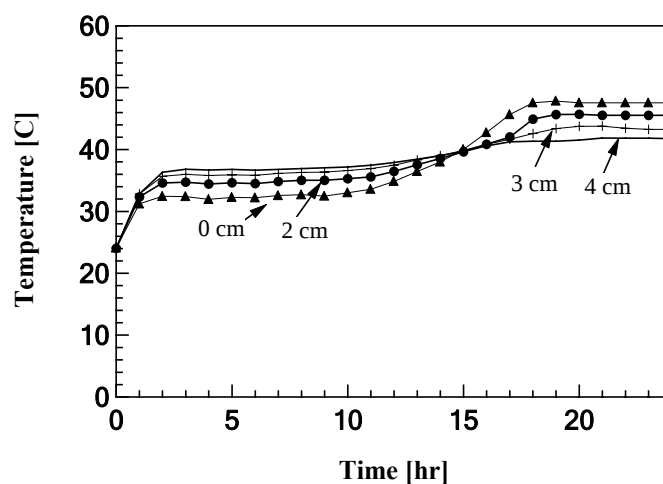
จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบดแบบ 2 ชั้น มีลักษณะแตกต่างจากในแพคเบดแบบ 1 ชั้น (Single-layer packed bed) อย่างเห็นได้ชัด ในช่วงที่มีการระเหย (อุณหภูมิประมาณคงที่) อุณหภูมิที่ผิวบนแพคเบดมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิส่วนอื่นๆ และกลับมามีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่นๆ ในแพคเบดหลังจากผ่านช่วงการระเหยไปแล้ว ส่วนรูปที่ 4.13 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบดกลับมีลักษณะคล้ายกับในแพคเบดแบบ 1 ชั้น ทั้งนี้เป็นเพราะผลของแรงดันแคปิลลารี จากที่อธิบายมาข้างต้นวัสดุที่มีความพรุนมากโดยทั่วไปจะมีแรงดันแคปิลลารีมากกว่าวัสดุพรุนที่มีความพรุนน้อย ดังนั้นเมื่อลูกแก้วขนาดเล็กถูกวางอยู่บนลูกแก้วขนาดใหญ่อิทธิพลของแรงดันแคปิลลารีจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นบนไหลไปสู่ที่ผิวมากซึ่งเป็นผลทำให้ความชื้นที่อยู่ในส่วนชั้นด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้ง่ายขึ้น ดังนั้นทำให้ปริมาณความชื้นส่วนใหญ่มาออกกันอยู่ที่ส่วนชั้นด้านบน ซึ่งทำให้ความร้อนจากลมร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปสำหรับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ สำหรับในกรณี C-F เนื่องจากความดันแคปิลลารีมีค่าน้อย ความชื้นในส่วนชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่ไม่สามารถไหลไปสู่ที่ผิวหน้าเพื่อทำให้เกิดการระเหยได้เร็ว และถึงแม้ว่าค่าความดันแคปิลลารีของชั้นลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่า แต่ความชื้นไม่สามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวด้านบนได้เร็วทำให้ความชื้นถูกสะสมอยู่ในส่วนของชั้นด้านบนซึ่งมีลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่ ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพคเบดจะมีค่าพอๆ กัน

รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและแพคเบดดีขึ้น โดยรูปที่ 4.17 ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบด ($z = 0$ ซม.) ซึ่งพบว่า ในกรณี C-F แพคเบดการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบดสูงขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นส่วนใหญ่ออกกันอยู่ในส่วนของชั้นด้านบน ส่วนในกรณี F-C แพคเบดการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ความชื้นที่ผิวสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนไปเร็วขึ้น ซึ่งเป็นทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากช่วงการระเหย

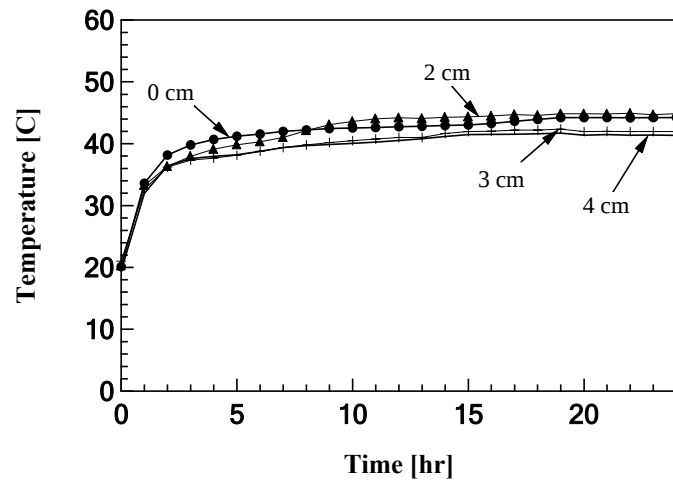
อัตราการอบแห้งของวัสดุพูนแบบ 2 ชั้นถูกแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.18 ซึ่งพบว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับไม่ใช้สนามไฟฟ้า ประมาณ 3.5 และ 3.2 เท่า สำหรับกรณี F-C และ C-F ตามลำดับ โดยในกรณีที่ใช้ไฟฟ้า $V = 10$ kV อัตราการอบแห้งของกรณี F-C มีค่ามากกว่า C-F ประมาณ 1.7 เท่า ส่วนในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าประมาณ 1.5 เท่า ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงดันแคปิลลารีที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



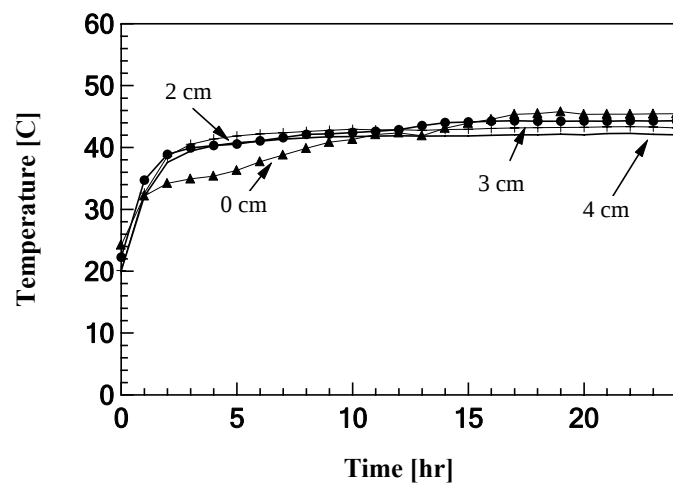
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ $V = 0$ kV



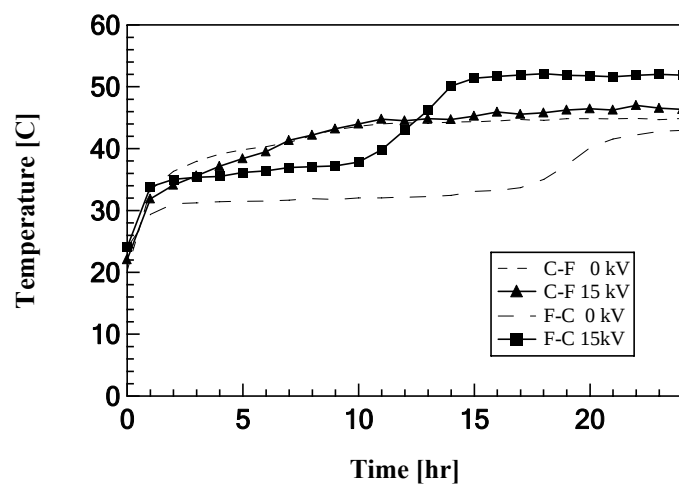
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ $V = 10$ kV



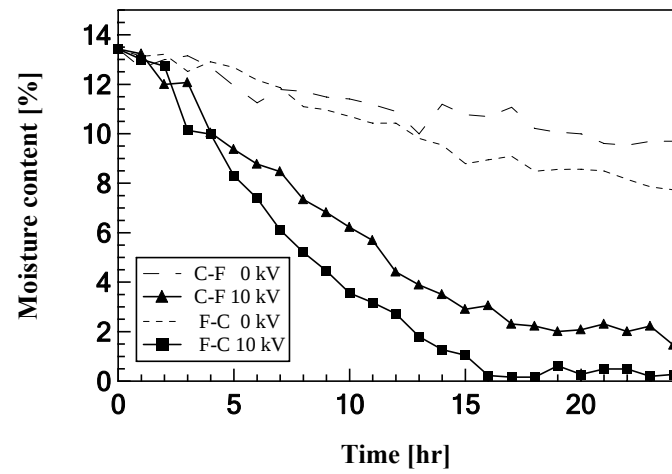
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบตแบบ C-F เมื่อ $V = 0$ kV



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบตแบบ C-F เมื่อ $V = 10$ kV



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตระหว่างกรณี F-C และกรณี C-F



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นภายในแพคเกจระหว่างกรณี F-C และ กรณี C-F

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้สนามไฟฟ้าร่วม รวมถึงศึกษาอิทธิพลของความพรุนของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบดแบบชั้นเดียว (Single-layer packed bed) ซึ่งมีค่าความพรุนค่าๆ หนึ่ง และในแพคเบดแบบสองชั้น (Double-layer packed bed) ซึ่งมีค่าความพรุนสองค่า โดยผลของการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นถูกวัดผ่านการตรวจสอบอุณหภูมิที่ความลึก ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแพคเบดและผลของอัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นถูกวัดผ่านการตรวจสอบปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ลูกแก้วที่ใช้ในแพคเบดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีค่าระหว่าง 0 – 15 kV และเวลาที่ใช้ในทดสอบอยู่ในช่วง 24 – 48 ชั่วโมง ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการทดลองพบว่าขนาดของลูกแก้วที่บรรจุภายในแพคเบดมีผลต่อการถ่ายเทมวลหรือความชื้นในแพคเบด เนื่องด้วยแรงดันแคปิลลารีที่สูงกว่าของวัสดุที่มีความพรุนมากกว่าทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าไปในอากาศที่ซึ่งลวดฮีตเตอร์และกราวด์ฮีตเตอร์ถูกติดตั้งในทิศตั้งฉากและทิศขวางกับทิศทางการไหลของกระแสอากาศตามลำดับ กระแสอากาศจะเกิดการหมุนวนระหว่างฮีตเตอร์และกราวด์ โดยกระแสอากาศจะมีความปั่นป่วนมากบริเวณระหว่างแท่งฮีตเตอร์ อิทธิพลของสนามไฟฟ้าหรือโคโรนาวินด์จะมีผลทำให้อุณหภูมิภายในแพคเบดมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วขึ้นและอัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบดมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีใส่สนามไฟฟ้า และขนาดของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบดมีค่าสูงขึ้นด้วย

ในกรณีของแพคเบดแบบชั้นเดียวการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบดมีค่าเพิ่มขึ้น ประมาณ 1.66 เท่าของกรณีที่ไม่มีใส่สนามไฟฟ้า

เมื่อความอึดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 และพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างโคโรนาวินด์มีค่าประมาณ 3% ของพลังงานที่ใช้ในการสร้างลมร้อนอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2 – 3 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมสำหรับการอบแห้งแบบที่ใช้ลมร้อนจะช่วยประหยัดพลังงาน

ในกรณีของแพคเบดแบบสองชั้น แต่ละชั้นความหนาของแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างกันจะมีความหนาเท่ากัน โดยกรณีที่วางลูกแก้วขนาดใหญ่เหนือลูกแก้วขนาดเล็กจะเรียกว่ากรณี C-F และกรณีวางกลับกันจะเรียกว่ากรณี F-C

เนื่องด้วยผลของความแตกต่างของความดันแคปิลารีในกรณี F-C อุณหภูมิของแพคเบตบริเวณที่อยู่ในชั้นด้านบนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่อยู่ชั้นด้านล่างเมื่อการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วงอุณหภูมิคงที่) ความดันแคปิลารีในชั้นด้านบนสูงกว่าชั้นด้านล่างทำให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าของแพคเบตได้เร็วขึ้น และทำให้ชั้นด้านล่างมีความแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิชั้นด้านล่างในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่าชั้นด้านบนซึ่งมีความชื้นสะสมอยู่ก่อนจะระเหยไปสู่อากาศ ส่วนในกรณี C-F อุณหภูมิชั้นด้านบนมีค่าสูงกว่าชั้นด้านล่าง และเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิของชั้นด้านบนและชั้นด้านล่างจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงตลอดช่วงการอบแห้ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันแคปิลารี แต่เนื่องจากชั้นด้านล่างซึ่งมีความดันแคปิลารีสูงกว่าชั้นด้านบนและการเคลื่อนที่ของความชื้นในชั้นด้านบนมีค่าต่ำกว่าชั้นด้านล่าง เป็นผลทำให้ความชื้นจากชั้นด้านล่างเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวของแพคเบตได้ช้าลงและสะสมอยู่บริเวณชั้นด้านล่าง ดังนั้นทำให้อุณหภูมิของชั้นด้านบนจึงมีค่าสูงกว่าชั้นด้านล่าง

สำหรับกรณีของแพคเบตแบบสองชั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 1.97 เท่า และอัตราการอบแห้งในกรณี F-C จะมีค่าสูงกว่ากรณี C-F ประมาณ 3.13 – 3.67 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยนี้ตัวแปรคงที่ที่ใช้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนของการอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า คือ ค่าความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อน ความหนาของชั้นแพคเบต ระยะการวางตำแหน่งและจำนวนของลวดอิเล็กโทรดและกราวด์ รวมถึงตำแหน่งของแพคเบตและขนาดของหน้าตัดต่อโมเมนต์ที่ใช้ทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการวางตำแหน่งและจำนวนของลวดอิเล็กโทรดและกราวด์จะมีผลต่อการควบคุมลักษณะการไหลของอากาศหมุนวนเหนือแพคเบตเป็นอย่างมาก ซึ่งข้อมูลที่ได้จากตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพที่สูง

นอกจากนี้เพื่อให้ทราบพฤติกรรมและกลไกของการอบแห้งที่แม่นยำขึ้น ควรทำการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในแพคเบตจำนวนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ทราบค่าการกระจายตัวของความร้อนในงานวิจัยนี้เนื่องจากงบประมาณในการทำวิจัยมีจำกัด ทำให้การสังเกตและถ่ายภาพลักษณะของการไหลของอากาศที่ผ่านสนามไฟฟ้าถูกทำโดยใช้เทคนิควันรูปและใช้แสงจากหลอดไฟแสงสว่างที่มีความเข้มต่ำ อีกทั้งความเร็วของอากาศที่ใช้ในการถ่ายภาพมีค่าต่ำกว่าความเร็วจริงที่ใช้ทดสอบมาก ทำให้โครงสร้างของการไหล (Flow structure) ภายใต้สนามไฟฟ้าในแต่ละสถานะไม่สามารถถูกสังเกตได้อย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการไหลบริเวณหัวอิเล็กโทรดซึ่งมีความปั่นป่วนสูง การทราบข้อมูลดังกล่าวนี้จะทำให้สามารถควบคุมลักษณะการไหลของอากาศได้อย่างแม่นยำอีกทั้งยังจะทำให้กำหนดขนาดของสนามไฟฟ้าและจำนวนลวดอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งได้ เพื่อให้ทราบค่าดังกล่าวควรใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงและ

แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงเช่น เลเซอร์ (Laser) หรือชุดอุปกรณ์วัดความเร็วโดยการถ่ายภาพอนุภาค (Particle Image Velocity, PIV) เป็นต้น

เนื่องจากจลนพลศาสตร์การอบแห้งภายในวัสดุพูนเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับ การถ่ายเทความร้อนและมวลในเวลาเดียวกัน ดังนั้นนอกเหนือจากการพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบและเครื่องวัดให้มีประสิทธิภาพสูงแล้ว การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ก็เป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะช่วยลดเวลาและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองชุดต้นแบบหลายชุด แต่ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Alem-Rajabi, A., and Lai, F.C., 1995, EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads, *Drying Technology*, Vol. 23, pp. 597-609.
- Chaktranond, C., Jiamjiroch, K., and Ratanadecho, P., 2007, Influence of Electrohydrodynamics (EHD) on heat and mass transfer in unsaturated Porous media, The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 21) Oct 17-19, Choburi, Thailand.
- Chen, Y.H., and Barthakur, N.N., 1991, Potato slab dehydration by air ions from corona discharge, *Int. J. Biometeorology*, Vol 35, pp. 67-70.
- Gori, F., Gentili, G., and Matini, L., 1987, Microwave heating of porous media. *ASME J. Heat Transfer*, 109, pp. 522-525.
- Hashinaga, F., Bajgai, T.R., Isobe, S., and Barthakur, N.N., 1999, EHD drying of apple slices, *Drying Technology*, Vol. 17(3), pp. 479-495.
- Holmes, R.E., and Basham, S.J., 1971, A drying cooling system for steam power plants, *Proc. 6th Intersociety Energy Conversion Eng. Conf.*, Boston, MA, pp. 1218-1228.
- Kaviany, M., 1991, *Principle of heat transfer in porous media*, Springer, New York.
- Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002, EHD-Enhanced drying with wire electrode, *Drying Technology* Vol 20(7), pp. 1393-1405.
- Landau, L.D., and Lifshitz, E.M. 1963, *Electrohydrodynamics of continuous media*, Pergamon, New York.
- Moss, R.A., and Grey, J., 1966, Heat transfer augmentation by steady and alternating electric fields, *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, University of Santa Clara, (Edited by Saad, M.A., and Miller, J.A.) pp.210-235.
- Mujumdar, A. S. 2007, *Hand book of industrial drying*, 3rd ed., CRC Press.
- Nikawa, Y., Katsumata, T., Kikuchi, M., and Mori, S. 1986, An electric field converging applicator with heating pattern controller for microwave hyperthermia, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 34 (5), pp. 631-635.
- Ratanadecho, P., Aoki, K, and Akahori, M., 2001, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28(5), pp. 605-616
- Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M. 2002, Influence of irradiation time, particle sizes, and initial moisture content during microwave drying of multi-layer capillary porous materials, *J. of Heat Transfer*, Vol.124, pp. 151-161.
- Ratanadecho, P. 2004, Experimental and numerical study of solidification process in

- unsaturated granular packed bed, J. of Thermophysics and heat transfer, Vol 18 (1), pp. 87-93.
- Roth, J.R., Madhan, R.C.M., Yadav, M., Rahel, J., and Wilkinson, S.P., 2004, Flow field measurement of paraelectric, AIAA Paper 2004-845.
- Sadek, H., Robinson, A.J., Cotton, J.S., Ching, C.Y., and Shoukri, M., 2006, Electrohydrodynamic enhancement of in-tube convective condensation heat transfer, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp.1674-1657.
- Velkoff, H.R., 1964, The effects of ionization on the flow and heat transfer of a dense gas in a transverse electric field, Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, University of California, Berkley (Edited by Giedt, W.H., and Levy, S.) pp. 260-275, Standford University Press.
- Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K. 1978, EHD Study of the corona wind between wire and plates electrodes, AIAA J., Vol. 16, pp. 340 – 345.
- Yabe, A. and Maki, H., 1988, Augmentation of convective and boiling heat transfer by applying an electro-hydrodynamical liquid jet, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 407-417.
- Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K. 1996, Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. Annual Reviews of Heat Transfer, Vol. 7, pp. 193-244.

ภาคผนวก
บทความวิจัยที่นำเสนอ

- Chaktranond, C., Jiamjiroch, K., and Ratanadecho, P., Influence of Electrohydrodynamics (EHD) on Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media, 21st National Mechanical Engineering Conference 17-19 October 2007, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- ไชยณรงค์ จักรธรานนท์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ภาณุเกียรติ สมาริวัฒน์, ทิศกร ประทีปะเสน, และ ปฐวี อมรรวารีสมาน การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัวด้วยสนามไฟฟ้า, การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 7) 13 - 14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเชีย เชียงใหม่ หน้า 12 – 17
- Chaktranond, C., Ratanadecho, P., Smathiwat, P., Amornvareesaman, P., and Pradipasena, T., Enhancement of Mass and Heat Transfer in the Unsaturated Double-layer Packed-bed with Electric fields, 22nd National Mechanical Engineering Conference 15-17 October 2008, Thammasat University, Pathumtani, Thailand, (CD-ROM), Paper No. TSF-044, pp. 424 – 429.
- ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน, การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8) 12 - 13 มีนาคม 2552 โรงแรมโพธิ์ดล รีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดเชียงราย หน้า 18 – 24
- Chaktranond, C., and Ratanadecho, P. Heat and Mass Transfer Enhancement in Unsaturated Porous Packed beds subjected to Electrohydrodynamics (EHD), The 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC2009) October 19-21, 2009, Bangkok, Thailand (Submitted for review)

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์

- Manuscript submitted to Experimental Thermal and Fluid Science (Impact factor 1.037)
Chaktranond, C., and Ratanadecho, P. Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to Electric Fields (Effects of Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement) (Submitted for review)

Influence of Electrohydrodynamics (EHD) on Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media

Chainarong Chaktranond, Krit Jiamjiroch, and Phadungsak Ratanadecho*

Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rangsit Campus, Pathumthani 12121, Thailand,
Tel: 02-5643001-9, *Email: ratphadu@engr.tu.ac.th

Abstract

This study is to experimentally investigate the heat and mass transfer mechanisms in packed bed which composed of glass beads, water and air, for convective drying with electrohydrodynamics (EHD). Influences of a hot air temperature ($\sim 60^{\circ}\text{C}$) associated with various electric fields (0, 10, and 15 kV) on the temperature of packed bed at the different depths (0, 2, and 4 cm from the surface of packed bed) are investigated. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are used. The results show that with influence of corona wind on flow, drying rate is enhanced considerably. In addition, increasing the electrohydrodynamics dramatically reduces the moisture content in packed bed. Moreover, the electric field affects the temperature of packed bed layers nearby the surface. With higher the capillary pressure, the 0.125 mm glass bead provides moisture evaporation rate larger than the 0.38 mm glass bead.

Keywords: Electrohydrodynamics (EHD), Drying process, Porous media

1. Introduction

The drying process of porous media is a rather complicated process as coupled heat and mass transport phenomena are involved simultaneously. Conventional drying techniques usually use a hot airflow or thermal radiation from radiant heaters. As only a fraction of the input energy is absorbed by the material to be dried, these techniques usually have high energy consumption with a low efficiency. Particular in the food sector drying processes consume up to 10% of the total energy. Therefore, new techniques have to be investigated to make the drying processes more efficient. One way to improve the overall drying kinetics is to apply an electric field.

Electrohydrodynamic (EHD) drying uses a secondary bulk flow which is known as corona wind or ionic wind. By applying high voltage to an electrode, ions are produced by the ionization of gas in a high electric field. As shown in Fig. 1, these ions migrate to the electrode plate along electric field lines and collide with air molecules which then form the secondary bulk flow. As a result, the momentum transfer of gas is enhanced.

In the last decades, many researches, e.g., [2, 3, 4, 5, 6, 7], have been much paid attention on the enhancement of heat and mass transfer in drying processes. Lai and Lai [4] examined the influence of electric field parameters on the drying rate in a packed

bed. A copper wire and a plate were located above and under the packed bed. It was

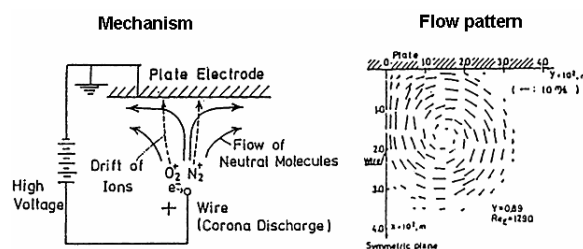


Fig. 1 Mechanism of Corona wind [1].

found that drying rate depended on the strength of the electric field and the velocity of the cross flow. With absence of cross-flow, the enhancement in drying rate increased linearly with the applied voltage. In addition, the influence of corona wind was suppressed by the increase of cross-flow velocity.

Alem-Rajabai and Lai [5] experimentally investigated the drying rate from partially wetted glass bead by electric field. In their experiments, a wire electrode and a copper plate were put above and under a packed bed, respectively. The results showed that EHD drying was most effective at the surface of the packed bed. In addition, the rate of increase in the drying

enhancement for positive corona was generally greater than that of negative corona.

Ratanadecho et al. [6] experimentally and numerically studied the microwave drying in unsaturated material with different porosities. This research was focused on the influence of moisture content on the mechanisms of vapour diffusion and capillary flow during microwave drying process in the packed bed. They found that small bead size led to much higher capillary forces and provided faster a drying time than a big bead size.

From above literatures, only the research done by Ratanadecho et al. [6] have studied the mechanisms of enhancement of the heat and mass transfer in the packed bed. However, due to behaviour of microwave heating, the heat is generated from the inside of packed bed. The objectives of this study are to investigate the influence of EHD on heat and mass transfer in a packed bed. In addition, the temperatures at three different positions from surface of the packed bed are examined.

2. Experimental setup and procedure

Schematic diagram of experimental setup is shown in Fig. 2. The rig is an open system. The wind tunnel is open on one side and hot air is blown into the ambient. Air is supplied from a blower and temperature of air is increased by a hot air generator which is connected to the rig. In order to control the air temperature, thermocouple sensor (TC) is put in front of the test section, which has the dimensions of $15 \times 15 \text{ cm}^2$. The high voltage power supply is used to induce an electrical field in the test section. As shown in Fig.2, electrode wires are composed discharge and ground electrodes. The discharge electrodes are composed of 4 copper wires suspended from the top wall and placed in front of packed bed. Size of copper wires is 0.25 mm in diameter and the distance between the wires is 26 mm. Ground electrode is also made of copper wire, but suspended horizontally across the test section as shown in Fig. 3.

The porous packed bed used in this study is composed of glass beads, water and air. The container of glass beads is made from acrylic plate with a thickness of 0.5 mm. In addition, the dimensions are 4 cm wide, 12 cm long and 6 cm high. In order to investigate the heat transfer from hot air to the packed bed, three fiberoptic wires (LUXTRON Fluroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^\circ\text{C}$) are placed in the middle point of the planes of 0, 2, and 4 cm, which are measured from the surface of the packed bed, as shown in Fig. 3.

In experiments, the maximum electric voltage is tested that breakdown voltage does not occur. The diameters of glass beads are 0.125 and 0.38 mm. The details of testing conditions and characteristics of water

transport in porous media are shown in Table 1 and 2, respectively.

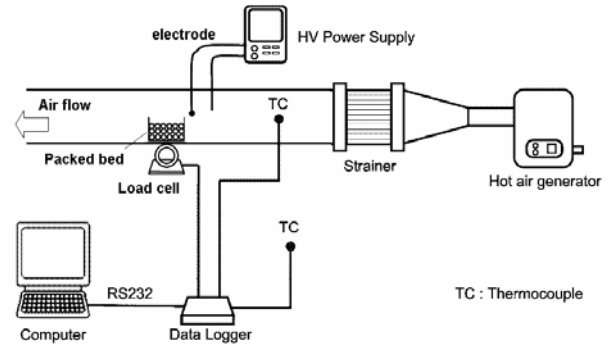


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

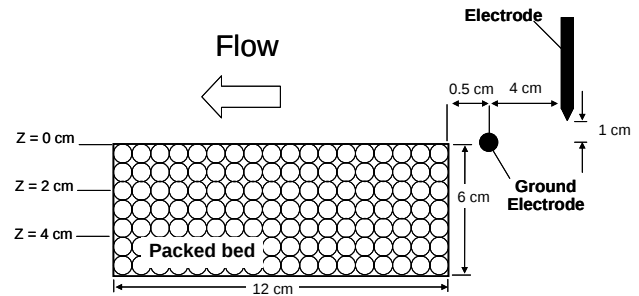


Fig. 3 Dimensions of packed bed and positions of electrode wires.

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	M_{in}	22 %db
Drying temperature	T	$50 - 60^\circ\text{C}$
Ambient temperature	T_M	25°C
Mean air velocity	U_b	0.35 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	$\sim 48 \text{ hr}$
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

Table 1. Drying conditions.

Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m^2)
0.125	~ 0.385	$\sim 8.41 \times 10^{-12}$
0.38	~ 0.371	$\sim 3.52 \times 10^{-11}$

Table 2. Characteristics of water transport in porous media.

3. Results and discussions

In measuring the temperature in the packed bed, it is assumed that temperature is in state of thermodynamic equilibrium, thus temperatures of all phases, i.e., solid, liquid, and gas, are same. The average temperature of hot

air, which is measured behind packed bed, approximately is 55°C. Reynolds number, ($Re = \rho U_b D_h / \mu$, where ρ is density of air, μ is viscosity of air, and D_h is hydraulic diameter) of air flow is 3049.

Influence of drying with hot air on temperatures in packed bed

When electric current is not applied, drying process in the packed beds is controlled by the heat convection from hot air. Figure 4 shows that during first two hours, temperatures at all positions rapidly increase and are not much different. Then they still have same temperature until at 25 hr. This is because influences of capillary pressure on water saturation and heat from hot air transfer mainly subject to the moisture. Thus during first two hours, the moisture at the packed bed surface is evaporated with a constant drying rate. Afterwards, the capillary pressure, which is the function of pressure of liquid and pressure of gas in packed bed (i.e., $p_c = p_g - p_l$ [6]), becomes smaller but with influence of vapor diffusion, moisture within the packed bed is removed to the surface.

After 24 hours, temperature at each position gradually increases and tends to reach a constant temperature. In addition, the temperature at the surface ($z = 0$ cm) is the highest. This is natural because the amounts of moisture within packed bed content much decrease and glass beads near surface of packed bed become fully dry. Therefore, conduction heat transfer occurs near the surface and most of heat transfer is absorbed by glass beads. Moreover, the packed bed surface reaches thermal equilibrium.

From Fig. 4 – 6, temperature on the surface is not higher than the hot air temperature, which is measured behind the packed bed. It may be implied that for our case, the effect of joule-heating from electrode wire does not much influence on the temperature within packed bed.

Influence of drying with hot air and EHD on temperatures in packed bed

Clearly, when electric voltages are applied, as shown in Fig. 5 and 6, the constant-rate drying becomes much shorter, i.e., higher drying rate. This is because influence of corona wind, which is conducted by electric field, enhances the heat and mass transfer between hot air and surface on packed bed [7]. Then this causes the thermal boundary on surface of packed bed to be instability. Consequently, convective heat transfer coefficient is enhanced and then the temperature at the surface with EHD is higher than that of without EHD, as shown in Figs. 7 and 8.

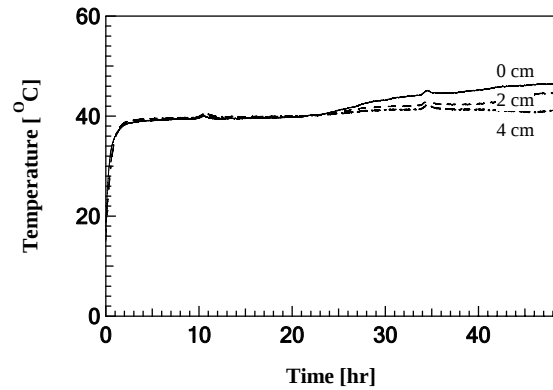


Fig. 4 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various depths when $V = 0$ kV.

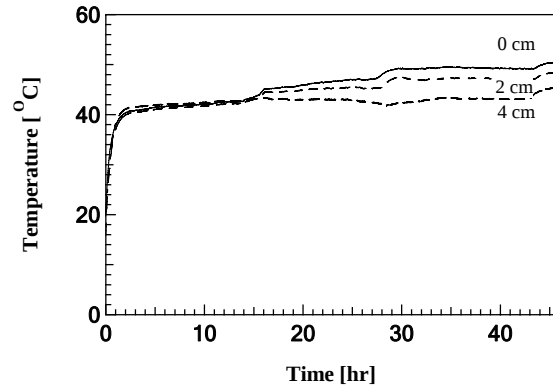


Fig. 5 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various depths when $V = 10$ kV.

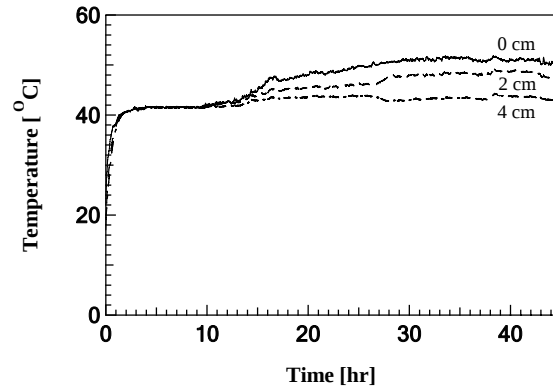


Fig. 6 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various depths when $V = 15$ kV.

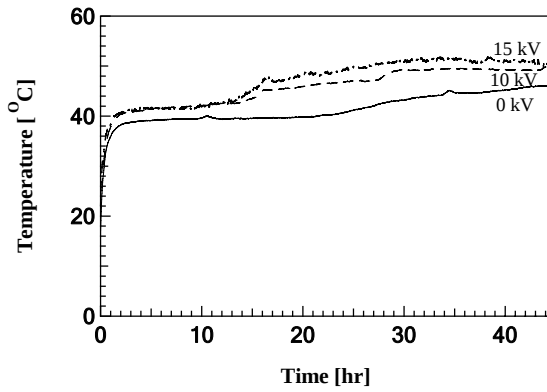


Fig. 7 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various voltages at $z = 0$ cm.

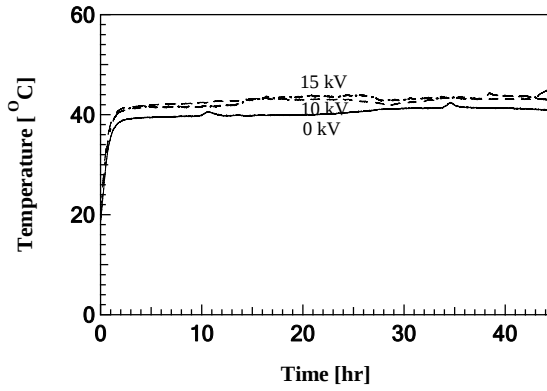


Fig. 8 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various voltages at $z = 4$ cm.

Influence of bead sizes on temperatures

Figure 9 and 10 show the comparison on temperature at the surface ($z = 0$ cm) of packed bed between glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameter. When the electric voltage is not applied, smaller bead reaches a dry bulb temperature faster than bigger one. This is because influence of capillary pressure in smaller bead (with higher porosity) is higher than that in bigger bead (with smaller porosity), as shown in Fig. 10.

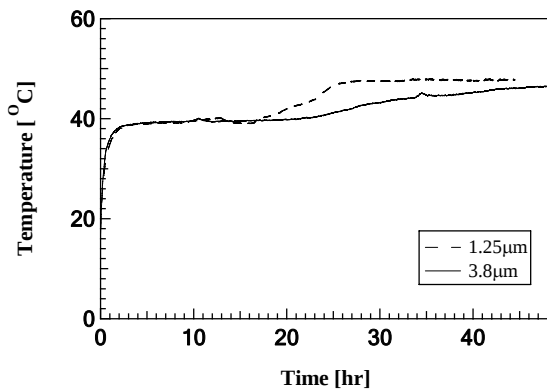


Fig. 9 Comparison on temperature at $z = 0$ cm between beads of 0.125 and 0.38 mm when $V = 0$ kV.

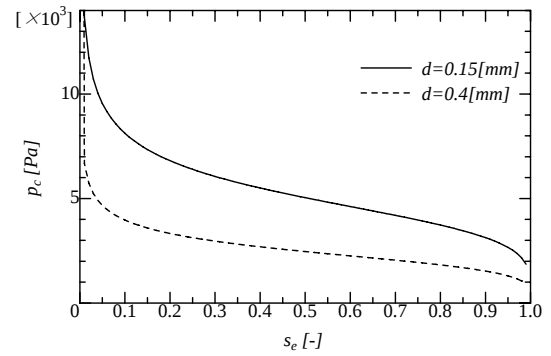


Fig. 10 Typical relationship between capillary pressures, p_c , and effective water saturation, s_e [6].

Influence of bead sizes on moisture content

Figure 11 shows the comparison on weight loss of water in packed bed with different bead sizes when electric voltage is 15 kV. During first seven hours, the rates of weight losses of water of two beads seem not much different. This is because moisture content within both packed beds is still high. However, due to the influence of capillary pressure, moisture removed to the surface of packed bed of 0.125-mm bead is higher than that of 0.38-mm bead. After a certain time, a large amount of moisture on the surface of packed bed of 0.125 mm evaporated to hot air. Thus the constant-rate drying period of smaller bead size is longer than that of bigger one. In the other words, drying time of smaller beads is shorter than that of bigger beads.

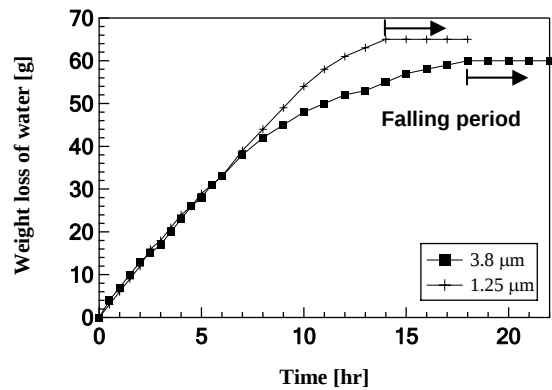


Fig. 11 Comparison on weight loss of water in packed bed between beads of 0.125 and 0.38 mm when $V = 15$ kV.

Moreover, by comparing Fig. 6 and Fig. 11, it is shown that for the case of beads of 0.38 mm, the constant-rate drying period is influenced by two mechanisms, i.e., capillary pressure effect in the first two

hours, and water evaporation during 2 – 18 hours later. After 18 hours, the influence of capillary pressure much decreases, and the weight loss of water tends to be constant. As mentioned before, this falling period is under the influence of vapor diffusion.

4. Conclusions

Influence of hot air with/without electric field on the heat and mass transfer in a porous packed bed is experimentally investigated through measurement of temperature at three different positions and of weight loss of water in packed bed. In addition, results of two different bead sizes (i.e., 0.125 and 0.38 mm in diameter) are compared.

With influence of corona wind, which is generated from four electrode needles, the heat transfer coefficient above packed bed is increased. Thus temperatures in packed bed are increased. In addition, each temperature tends to reach a constant value faster than when electric field is not applied. Moreover, with higher voltage applied heat from hot air much transfers into packed bed.

By comparing the sizes of glass beads in packed beads, due to higher capillary pressure, the smaller beads tend to give a constant weight loss of water faster than that of bigger beads. In the other word, time drying of smaller beads is shorter.

To more understand the phenomena of drying process, we will numerically study the relationships among various parameters in porous packed bed.

5. Acknowledgement

This work was supported through the research fund by Thailand Research Fund (TRF).

6. References

- [1] Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K., 1996, Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. *Annual Reviews of Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 193-244.
- [2] Chen, Y.H., and Barthakur, N.N., 1991, Potato slab dehydration by air ions from corona discharge. *Int. J. Biometeorology*, Vol 35, pp. 67-70.
- [3] Hashinaga, F., Bajgai, T.R., Isobe, S., and Barthakur, N.N., 1999, EHD drying of apple slices. *Drying Technology*, Vol. 17(3), pp. 479-495.
- [4] Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002, EHD-Enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology* Vol 20(7), pp. 1393-1405.
- [5] Alem-Rajabi, A., and Lai, F.C., 1995, EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads. *Drying Technology*, Vol. 23, pp. 597-609.
- [6] Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., 2001, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28(5), pp. 605-616.
- [7] Ratanadecho, P., Jiamjirach, K., and Wangnippanto, S., Fully analysis of heat and mass transport in the unsaturated porous packed bed under electric field (EHD). The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME – NETT 20th), in CD-ROM TSF028.

การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัวด้วยสนามไฟฟ้า ENHANCEMENT OF MASS AND HEAT TRANSFER IN THE UNSATURATED PACKED-BED WITH ELECTRIC FIELDS

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาณุเกียรติ สมาริวัฒน์

ทิศกร ประทีปะเสน

ปฐวี อมรรวารีสมาน

ศูนย์วิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟใน
งานวิศวกรรม (R.C.M.E)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต

ปทุมธานี 12121 ประเทศไทย โทร 02-

5643001-9 *อีเมลล์ cchainar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) เพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อน ในการทดลองอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความชื้นและอุณหภูมิของชุดแพคเบดที่มีความพูนค่าหนึ่งๆได้ถูกตรวจสอบ สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลมถูกใช้อยู่ในช่วง 0 – 15 กิโลโวลท์ ลูกแก้วที่บรรจุในแพคเบดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของโคโรนาวินด์ที่เกิดในกระแสลมร้อนเหนือแพคเบดทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแพคเบดมีค่าเร็วขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกรณีที่ใช้สนามไฟฟ้าและไม่ใช้สนามไฟฟ้า

คำสำคัญ: อิเลคโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD), กระบวนการอบแห้ง, วัสดุพูน

Abstract

The enhancement of mass and heat transfer by electrohydrodynamics (EHD) has been experimentally evaluated in this study. Influences of electric fields, which are associated with and without hot gas, on the water moisture content and temperature in the unsaturated packed bed are examined. Electric fields are applied in the range of 0 – 15 kV. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed. The results show that with influence of corona wind on flow above the packed bed, the drying rate is enhanced considerably. In addition, increasing EHD dramatically reduces the moisture content in packed bed. Moreover, the temperature measured at different levels in the packed bed increases with higher applied voltage. Comparison on the energy consumption between utilizing hot air with and without EHD is reported.

Keywords: Electrohydrodynamics (EHD), Drying process, Porous media

1. คำนำ

การรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีกระบวนการอบแห้ง (Drying process) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมเกษตร การอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อน (Hot air drying) หรือการแผ่ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (Thermal radiant heater) เป็นที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีนี้เราสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ต้องการให้แก่ผลิตภัณฑ์และยังสามารถควบคุมช่วงเวลาการใช้งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนต้องการเวลาสำหรับการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยหลายกลุ่ม [เช่น 2, 3, 4, 5, 6] ได้ศึกษาวิธีการที่จะเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้ง Lai และ Lai [4] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เรียกว่าอิเลคโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) และทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในแพคเบด (Packed bed) ในการทดลองลวดและแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเบดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเร็วของอากาศซึ่งไหลในทิศทางขวาง (Cross flow) กับทิศของสนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความต่าง

ศักยภาพไฟฟ้าที่ใช้ นอกจากนี้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น

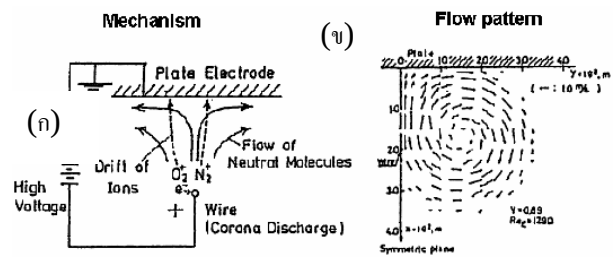
Alem-Rajabai และ Lai [5] ทำการทดลองศึกษาอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้า แพลกเบตที่ใช้บรรจุลูก แก้วที่มีความเปียกบางส่วน (Partially wetted glass bead) ในการทดลองลวดอิเล็กโตรด และแผ่นทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพลกเบตตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วย EHD มีประสิทธิภาพอย่าง มากบริเวณผิวด้านบนของแพลกเบต และอัตราการของการอบแห้ง เพิ่มขึ้นในทิศของโคโรนาวินด์ที่เป็นบวกมากกว่าในทิศที่เป็นลบ

Ratanadecho และคณะ [6] ทำการศึกษาการอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยวิธีทดลองและโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วัสดุที่ทำการศึกษาคือเป็นวัสดุที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated material) และความพรุน (Porosity) ของวัสดุมีค่าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของความชื้น (Moisture content) ในวัสดุพรุนต่อ กลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และอิทธิพลของการไหลแบบคาปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพลกเบตเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ Ratanadecho และคณะ [6] พบว่า แพลกเบตที่บรรจุลูกแก้ว ที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงคาปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่ สั้นกว่าแพลกเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นมี Ratanadecho และคณะ [6] เท่านั้นที่ได้ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเบต แต่อย่างไรก็ตามตามพฤติกรรมทำให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน กล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนเกิดขึ้นจากภายในแพคเบตและความร้อนจะ ไหลจากภายในแพคเบตออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน ความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพคเบต วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเบตโดยทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่งในแพคเบต และทำการตรวจสอบการสูญเสีย ความชื้นของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบด้านพลังงานระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า

2. หลักการสร้างโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง แล้วไหลไปยังอิเล็กโตรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้กับผิวของอิเล็กโตรดนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionized) และผลทำให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโตรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศนี้เคลื่อนที่มันจะชนกับโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ดังรูปที่ 1 ก และทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum exchange) ผลของการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ของกระแสหมุนวนหรือที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (Corona wind) จากการศึกษาของ Yabe และคณะ [1] ในสภาวะที่ปราศจากการไหลทิศทางแนวขวาง (Cross flow) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Body force) เหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวน (Vortices) ที่สมมาตรกันสองลูกที่มีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกันระหว่างลวด และแผ่นอิเล็กโตรด (Wire and plate electrode) ดังแสดงในรูปที่ 1 ข



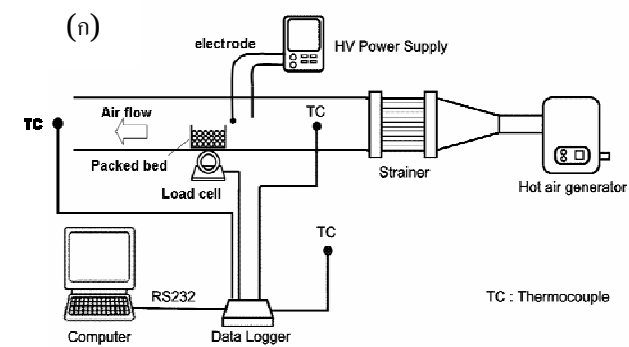
รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรนาวินด์ [1]

3. ชุดทดสอบและการทดลอง

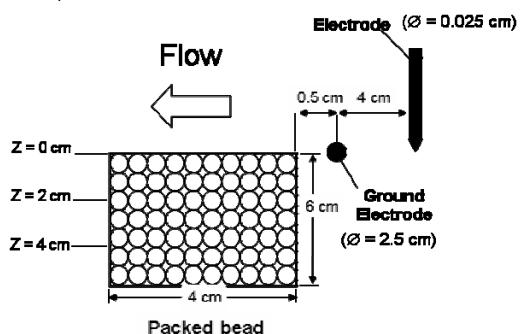
รูปที่ 2 แสดงชุดทดสอบของงานวิจัยนี้ กระแสลมจากพัดลมไหลผ่านอุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel) ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 15 × 15 ตร.ซม. แล้วถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเครื่องสร้างลมร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโตรดผ่านอากาศไปยังกราวด์อิเล็กโตรด ขั้วอิเล็กโตรดทำจากลวดทองแดง 4 เส้นที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม และลวดอิเล็กโตรดแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 มม. ส่วนกราวด์อิเล็กโตรดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้ๆกับแพคเบตและในทิศทางที่ขวางกับทิศการไหลของกระแสลมดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิของกระแสลมถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ประมาณ 60°C น้ำหนักของความชื้นภายในแพคเบตที่เปลี่ยนไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซลล์ (Load cell)

กล่องแพคเบตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ความหนา 0.5 มม. ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเบต ซึ่งมีขนาด 4 ซม. กว้าง × 12 ซม. ยาว × 6 ซม. สูง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเบต ลวดไฟเบอร์ออปติก (LUXTRON Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) จำนวน 3 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 2 และ 4 ซม. (วัดจากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเบต) ดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของกระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเบต และน้ำหนักของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Datataker DT505)

ในการทดลองความเร็วเฉลี่ยของกระแสลม (U_b) มีค่า 0.35 เมตรต่อวินาที และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้มีค่า 15 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบ (ก) แผนภูมิรูปภาพชุดทดสอบ (ข) ภาพถ่ายชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ขนาดของแพคเบดและตำแหน่งของอิเล็กโตรด

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	M_{in}	22 %db
Drying temperature	T	50 – 60 °C
Ambient temperature	T_M	25 °C
Mean air velocity	U_b	0.35 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	~ 48 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

ตารางที่ 1. สภาวะทดสอบ

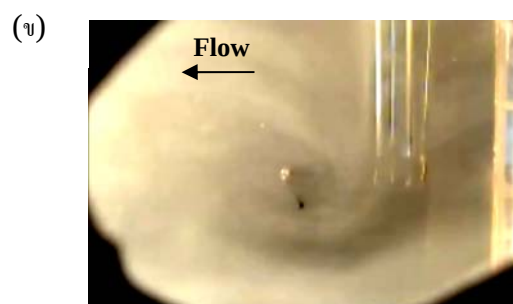
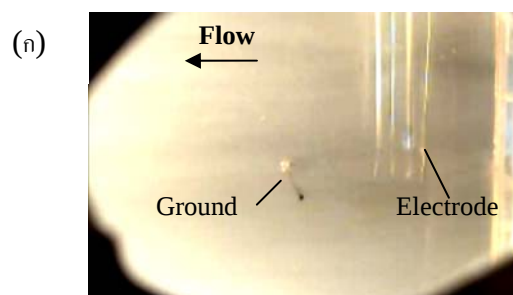
Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m^2)
0.125	~ 0.385	~ 8.41×10^{-12}
0.38	~ 0.371	~ 3.52×10^{-11}

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของความพรุน (Porosity) ในแพค เบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างๆ

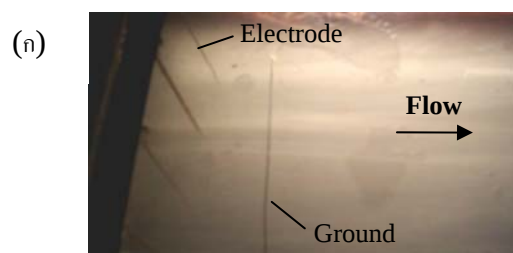
4. ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการไหลเหนือแพคเบด

เพื่อแสดงลักษณะของโคโรนาวินด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า (EHD) ควันทรงถูกปล่อยจากกระแสต้านทาง (Upstream flow) ของชุดทดสอบ และแสงจากหลอดไฟ (Halogen lamp) ขนาด 500 วัตต์ถูกส่องจากที่ปลายทางออกของชุดทดสอบในทิศทางตรงข้ามกับทิศการไหลของกระแสลม รูปที่ 4 และ 5 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงของกระแสลมซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาที และค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่า (V) 10 กิโลโวลต์ จากรูปที่ 4 ข (แสดงภาพด้านข้าง) จะเห็นได้ว่าผลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสลมเกิดกระแสลมหมุนวน (Vortex) ระหว่างอิเล็กโตรดและกราวด์ โดยศูนย์กลางของการหมุนวนเกิดใกล้กับกราวด์อิเล็กโตรด และจากรูปที่ 5 ข กระแสลมหลังลวดอิเล็กโตรดมีความปั่นป่วนมากด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากลวดอิเล็กโตรดแต่ละเส้นที่วางเรียงกันในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของกระแสลม



รูปที่ 4 ภาพถ่ายด้านข้างของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสควันทรง (ก) V = 0 kV และ (ข) V = 10 kV



รูปที่ 5 ภาพถ่ายด้านบนของชุดทดสอบแสดงลักษณะของกระแสควัน
รูป (ก) $V = 0$ kV และ (ข) $V = 10$ kV

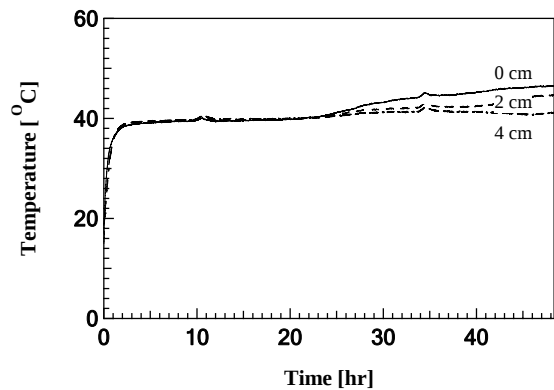
4.2 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่ออุณหภูมิภายในแพคเบต

เพื่อสังเกตอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดอิเล็กโตรดที่มีผลต่ออุณหภูมิของกระแสลมและต่ออุณหภูมิภายในของแพคเบต งานวิจัยนี้ได้ทดสอบกรณีที่ไม้เปิดเครื่องสร้างลมร้อน แล้ววัดค่าอุณหภูมิของกระแสลมที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแพคเบต และพบว่าอุณหภูมิของกระแสลมก่อนและหลังแพคเบตมีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้อุณหภูมิที่ลวดอิเล็กโตรดยังถูกตรวจ สอบโดยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) และพบว่าอุณหภูมิที่ลวดอิเล็กโตรดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของกระแสลมมาก จากการทดสอบข้างต้นทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของความร้อนจากลวดอิเล็กโตรดมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบต

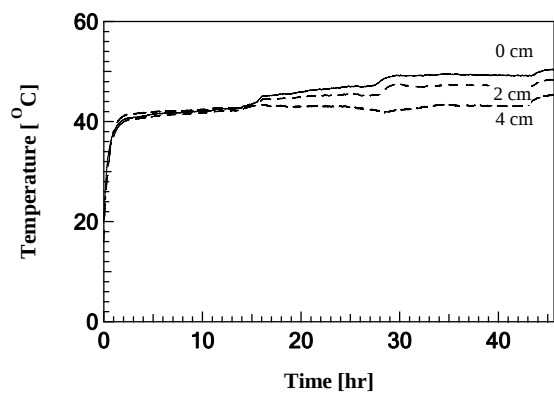
รูปที่ 6 แสดงผลการทดลองกรณีใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวและกำหนดให้ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นของแพคเบต (Initial saturation, $S_{int} = V_{water,int} / V_{glass}$) มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากกราฟในช่วง 3 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิภายในแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งที่ประมาณ 40°C หลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมงอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละชั้นเริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างช้าๆ และที่เวลาผ่านไป 48 ชั่วโมงอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าประมาณ 55°C และอุณหภูมิที่ระดับต่ำสุด (4 ซม.จากผิวแพคเบต) มีค่าประมาณ 41°C จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการทดลองปริมาณความชื้นในแพคเบตยังมีค่ามาก เมื่อความร้อนจากลมร้อนไหลเข้าสู่แพคเบต น้ำภายในแพคเบตจะดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพคเบตทั้ง 3 ตำแหน่งมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่น้ำได้รับความร้อน น้ำก็มีการเคลื่อนที่จากภายในไปยังผิวของแพคเบตแล้วเกิดการระเหย (Evaporating) ไปสู่ลมร้อน ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการระเหยนี้เรียกว่า ช่วงของการทำให้แห้ง (Drying period) เมื่อน้ำส่วนใหญ่ระเหยออกจากแพคเบตจะทำให้ความร้อนจากลมร้อนถ่ายเทให้แก่ลูกแก้ว ดังนั้นอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละตำแหน่งเริ่มมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งและมีค่าแตกต่างกัน หรือกล่าวได้ว่าหลังจากเวลาผ่านไป 25 ชั่วโมง กลไกการถ่ายเทความร้อนหลักเป็นแบบการนำความร้อน (Conduction heat transfer) นั่นเอง และเรียกช่วงของกระบวนการนี้ว่าช่วงของการตกลง (Falling period)

รูปที่ 7 และ 8 แสดงอุณหภูมิภายในแพคเบตเมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 10 และ 15 กิโลโวลต์ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มสนามไฟฟ้าทำให้ช่วงการระเหยของน้ำหรือช่วงของการทำให้แห้งมีค่าลดลง นั่นหมายถึงอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

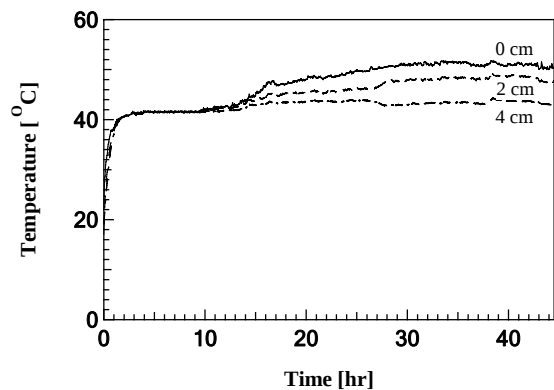
รูปที่ 9 และ 10 แสดงอิทธิพลของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีต่ออุณหภูมิที่ผิวและที่ความลึก 4 ซม.ของแพคเบตตามลำดับ จากรูปพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบต โดยเฉพาะที่ผิวของแพคเบตอุณหภูมิมีค่าแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 9



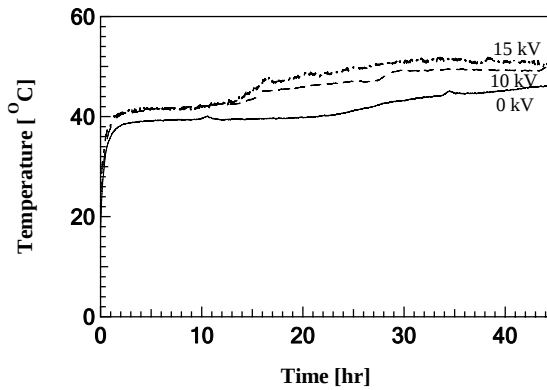
รูปที่ 6 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า $V = 0$ kV



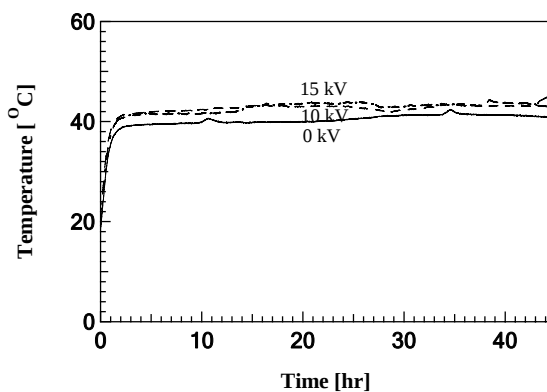
รูปที่ 7 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า $V = 10$ kV



รูปที่ 8 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า $V = 15$ kV



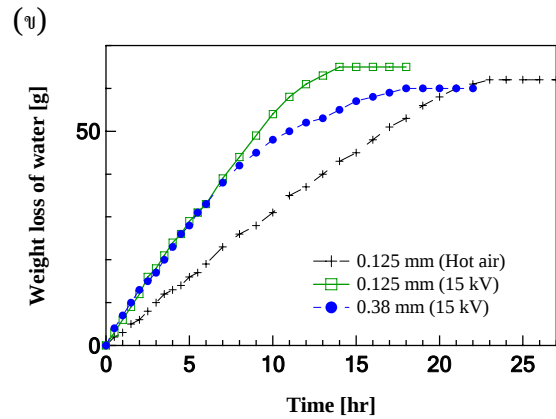
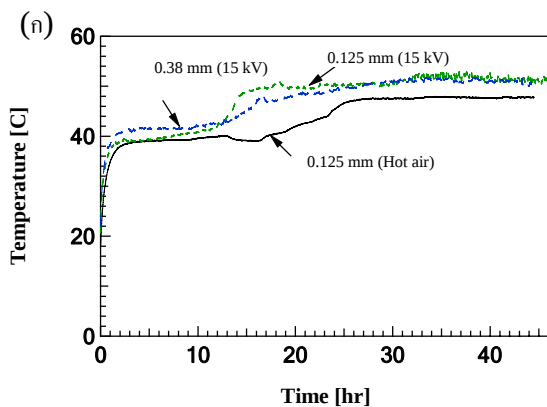
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับความลึก 4 ซม. ของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.

4.3 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อความชื้นของแพคเบต

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วม ($V = 15$ kV) ที่ $s_{int} = 1$ จากรูปจะเห็นว่าผลของสนามไฟฟ้านอกจากจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าสูงขึ้นแล้วยังช่วยให้อัตราการระเหยความชื้นออกจากแพคเบตมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งอัตราการระเหยมีค่าสูงขึ้นประมาณ 1.66 เท่า

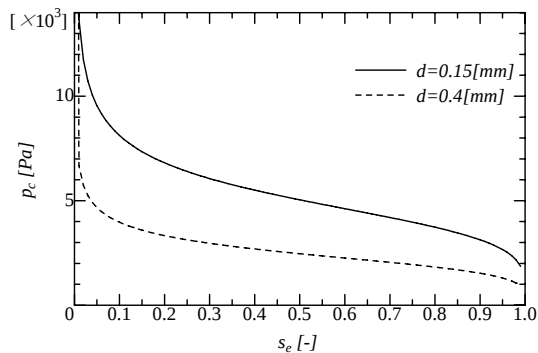


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการใช้สนามไฟฟ้าร่วมที่เวลาต่างๆ (ก) อุณหภูมิที่ผิว (ข) ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากแพคเบต

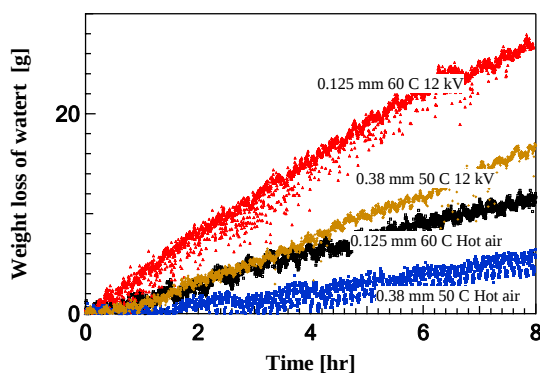
นอกจากนี้รูปที่ 11 ยังเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำในแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดหนึ่งๆ เมื่อการอบแห้งผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง แพคเบตที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าหรือแพคเบตที่มีความพรุนมากกว่าจะมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำกว่าลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากในขณะนั้นระเหยตัวมากขึ้น ความดันไอน้ำในวัสดุพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลของแรงดันแคปิลลารี (Capillary pressure, $p_c = p_g - p_l$ [6]), มีผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำให้เคลื่อนที่ไปที่ผิวของวัสดุพรุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 12 [6] ดังนั้นถ้าหากวัสดุที่มีความพรุนมาก อัตราน้ำที่ระเหยหรืออัตราน้ำหนักน้ำที่สูญเสียจากแพคเบตจะมีค่ามากกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า และอิทธิพลของแรงดันคาปิลลารีจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความอึดตัวของวัสดุพรุนมีค่าน้อยลง

4.4 การเปรียบเทียบด้านพลังงาน

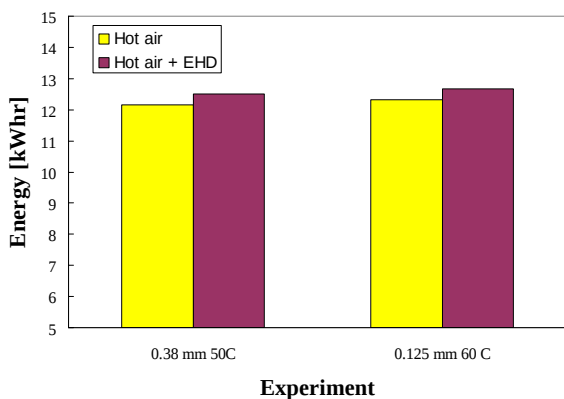
รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ระเหยจากแพคเบตที่ใส่ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. ที่ $s_{int} = 0.8$ ระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว (50 และ 60 °ซ) และโดยใช้สนามไฟฟ้าร่วม ($V = 12$ kV) จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่า สำหรับแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. การใช้สนามไฟฟ้าร่วมทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นประมาณ 2.3 และ 2.9 เท่า ตามลำดับ ในแง่ของพลังงานพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการระเหยของน้ำออกจากแพคเบตที่ใช้ลูกแก้วขนาด 0.125 และ 0.38 มม. มีค่า 0.024 และ 0.032 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกรัม ตามลำดับ หรือประมาณ 3% ของพลังงานที่ใช้สำหรับสร้างลมร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 14) ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าเป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแคปิลารี (p_c) และความค่าอิมิตัวประสิทธิผลของน้ำ (Effective water saturation, s_e) ในแพคเบต [6]



รูปที่ 13 เปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำในแพคเบตที่ระเหยไปในแต่ละเวลาระหว่างใช้ไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 14 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากิทธิพลของลมร้อนทั้งแบบที่ร่วมและไม่ร่วมกับสนามไฟฟ้า รวมถึงอิทธิพลของความพรุนของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในแพคเบตได้ถูกศึกษาโดยการทดลองผ่านการวัดอุณหภูมิที่ระดับต่างกัน 3 ตำแหน่งภายในแพคเบตและผ่าน

การวัดปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ลูกแก้วที่ใส่ในแพคเบตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม.

จากการทดลองพบว่าด้วยอิทธิพลของโคโรนาเวินต์ซึ่งถูกสร้างผ่านจากเส้นลวดที่วางในตำแหน่งตั้งฉากและขวางกับทิศทางการไหลของลม สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแพคเบตมีค่าสูงขึ้นและอัตราการสูญเสียน้ำจากแพคเบตเร็วกว่าในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าประมาณ 1.66 เท่า จากการทดลองยังพบว่าความชื้นของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนภายในแพคเบตมีค่าสูงขึ้นด้วย

โดยการเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดของลูกแก้วที่บรรจุภายในแพคเบตพบว่า เนื่องด้วยแรงดันแคปิลารีที่สูงกว่าของวัสดุที่มีความพรุนมากกว่าทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า

จากการทดลองที่ความอิมิตัวเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 การใช้พลังงานสำหรับสร้างโคโรนาเวินต์เพิ่มขึ้นประมาณ 3% ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นประมาณ 2 – 3 เท่าของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้สนามไฟฟ้าร่วมสำหรับการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนจะช่วยประหยัดพลังงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ กองทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ (ส.ก.ว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K., 1996, Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. Annual Reviews of Heat Transfer, Vol. 7, pp. 193-244.
- [2] Chen, Y.H., and Barthakur, N.N., 1991, Potato slab dehydration by air ions from corona discharge. Int. J. Biometeorology, Vol 35, pp. 67-70.
- [3] Hashinaga, F., Bajgai, T.R., Isobe, S., and Barthakur, N.N., 1999, EHD drying of apple slices. Drying Technology, Vol. 17(3), pp. 479-495.
- [4] Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002, EHD-Enhanced drying with wire electrode. Drying Technology Vol 20(7), pp. 1393-1405.
- [5] Alem-Rajabi, A., and Lai, F.C., 1995, EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads. Drying Technology, Vol. 23, pp. 597-609.
- [6] Ratanadecho, P., Aoki, K, and Akahori, M., 2001, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material. Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 28(5), pp. 605-61

Fig. 1 Mechanism of corona wind [6].

Theoretically, electrohydrodynamic forces (EHD) generates the secondary bulk flow, which is known as corona wind or ionic wind. By applying high voltage to an electrode, ions are produced by the ionization of gas in a high electric field. As shown in Fig. 1, these ions migrate to the electrode plate along electric field lines and collide with air molecules, which then form the secondary bulk flow. As a result, the momentum transfer of gas is enhanced.

Idea of heat-and-mass transfer enhancement with utilizing EHD is shown in Fig. 2. When hot-air flow exposed to electric fields, the flow is circulated, and then this circulating wind will reduce the influence of boundary layer on the packed-bed surface. This causes moisture on surface to move much into the air flow, and heat to transfer much into the packed bed. Consequently, the rate of moisture removal is enhanced.

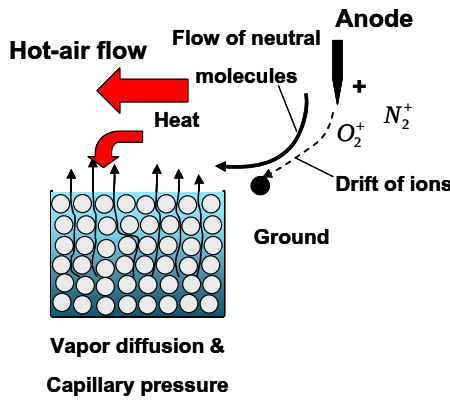


Figure 2. Idea of enhancement of heat and mass transfer with corona wind [5].

3. Experimental setup and procedure

Schematic diagram of experimental setup is shown in Fig. 3. The rig is an open system. The wind tunnel is open on one side and hot air is blown into the ambient. Air is supplied from a blower and temperature of air is increased by a hot-air generator, which is connected to the rig. In order to control the air temperature, thermocouple sensor (TC) is put in front of the test section, which has the dimensions of $15 \times 15 \text{ cm}^2$. The high voltage power supply is used to induce an electrical field in the test section.

As shown in Fig. 4, electrode wires are composed of discharge and ground electrodes. The discharge electrodes are composed of 4 copper wires suspended from the top wall and placed in front of packed bed. Diameter of each copper electrode is 0.25 mm and the spacing between each wire is 26 mm. Ground electrode is also made of copper wire, but suspended horizontally across the test section. The porous packed bed used in this study is composed of glass beads, water and air. The container of glass beads is made of acrylic plate with a thickness of 0.5 mm. In addition, the dimensions are 3.5 cm wide, 12 cm long and 6 cm high. Moreover, to control heat transfer from hot air towards only the upper surface of packed bed, other sides are insulated by rubber sheet. In order to investigate the heat transfer within the packed

bed, three fiberoptic wires (LUXTRON Fluroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^\circ\text{C}$) are placed in the middle point of the planes of 0, 2, 3 (interface plane), and 4 cm, which are measured from the surface of the packed bed.

Figure 5 shows the configuration of the double-layered packed beds, where fine bead layer overlaid coarse bead layer is of the F – C case, and the inverse is of the C – F case. Additionally, both layers have a same thickness.

In experiments, the maximum electrical voltage is tested that breakdown voltage does not occur. The diameters of glass beads are 0.125 mm for fine beads and 0.38 mm for coarse beads. The details of testing conditions and characteristics of water transport in porous media are shown in Table 1 and 2, respectively.

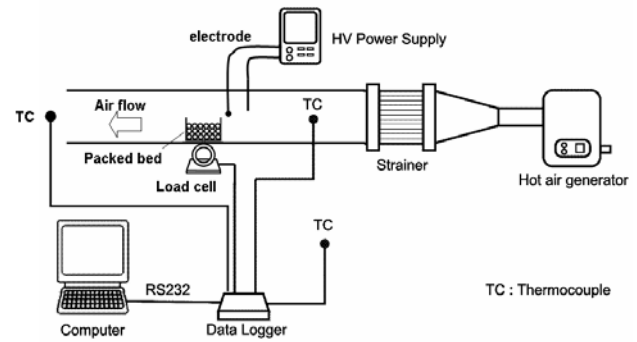


Figure 3. Schematic diagram of experimental setup.

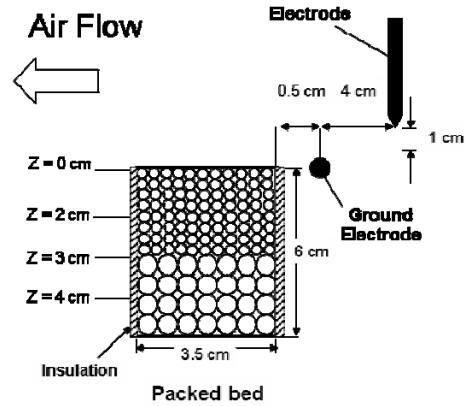


Figure 4. Dimensions of packed bed, locations of electrodes, and positions of temperature measurement.

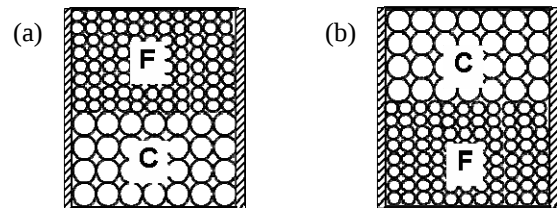


Figure 5. Configuration of double-layered packed bed: (a) F – C case, and (b) C – F case.

Table 1. Testing conditions

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	$\chi_{db,i}$	22 %db
Drying temperature	T	50 – 60 °C
Ambient temperature	T_a	25 °C
Mean air velocity	U_b	0.33 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	~ 24 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

Table 2. Characteristics of water transport in porous media.

Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m ²)
0.125	~ 0.385	~ 8.41×10^{-12}
0.38	~ 0.371	~ 3.52×10^{-11}

4. Results and discussions

In the experiment, it is assumed that the temperature in the packed bed is in state of thermodynamic equilibrium, thus temperatures of all phases, i.e., solid, liquid, and gas, are same. The average temperature of hot air, which is measured behind packed bed, approximately is 55°C. Bulk mean velocity of air flow is 0.33 m/s, which is equivalent to Reynolds number of 2,610.58 ($Re = \rho U_b D_h / \mu$, where ρ is density of air, μ is viscosity of air, and D_h is hydraulic diameter).

4.1 Flow visualization

In order to observe the motion of flow subjected to the electric fields, this study utilizes incense smoke technique. A spot light of 500 W is placed at the outlet of channel, and the light direction is opposite on the flow direction. Due to high speed of flow, the bulk mean velocity is reduced to 0.1 m/s. In addition, the motion of flow is continuously captured by a digital video camera recorder (SONY DCR-PC108/ PC109E).

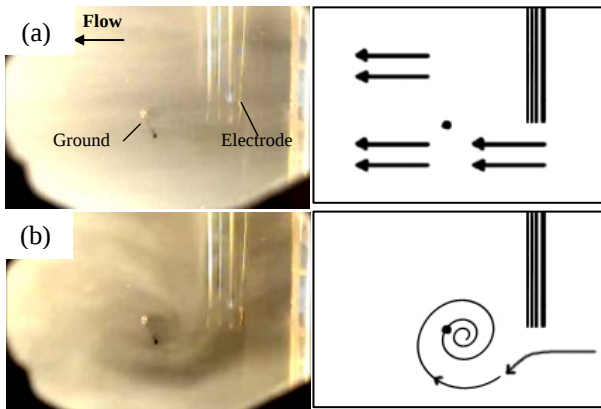


Figure 6. Motion of air flow: (a) without electric fields, and (b) with electric fields at V = 10 kV.

As shown in Fig. 6, under the influence of EHD, air flow neighboring electrodes is induced by electric fields, and is circulated around ground electrode. In addition,

strength of vortex is proportional to the magnitude of electrical voltage applied.

4.2 Fine-coarse case

As shown in Fig. 7, when fine beads overlay coarse beads, in the early period (~ 1 hr), all temperatures in this packed bed rise up steadily. Later, they become constant, and temperature on surface of this packed bed is lowest. Until a certain time, the temperature on surface rapidly, and is higher than the other layers. This is because of the effect of capillary pressure difference. From experimental results of Chakranonod et al. [5], small bead packed bed provides the capillary pressure (p_c) higher than bigger bead packed bed. In addition, the relationship between the capillary pressure and the water saturation is defined by using Leverett functions $J(s_e)$ [4, 7],

$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{\sqrt{K/\phi}} J(s_e) \quad (1),$$

where p_g and p_l are pressure of gas and liquid phases, respectively, S_e is the effective water saturation associated with the irreducible water saturation, and σ is surface tension.

From Eq. (1), if $(\sigma J(S_e))_{\text{fine}} \sim (\sigma J(S_e))_{\text{coarse}}$ then $p_{c,\text{fine}} > p_{c,\text{coarse}}$. It means that in the case of same water saturation, a smaller particle size corresponds to a higher capillary pressure.

In the initial period, if both layers have same amount of saturation, then difference of capillary pressure will be happened. Therefore, effect of capillary action in the fine bead layer (upper layer) will induce the moisture from the coarse bead layer (lower layer) to its layer. This causes void in the lower layer to fill with more the vapor phase. Therefore, with a same heat flux, temperature of lower layer becomes high. As moisture evaporating process proceeds, temperatures of porous packed are constant, where heat is used for changing phase. Until a certain time, the surface becomes dry; heat will mainly transfer with conduction. Consequently, temperature in the upper layer rises up again when drying zone starts happening, and the temperature of surface layer is higher than the other layers.

It is evident in Fig. 8 that when electrical voltage supplied more increases, corona wind more influences on the boundary layer on the upper layer surface, and this causes heat and mass transfer between layers to be increased, resulting in higher temperature in each layer.

4.3 Coarse-fine case

Figure 9 shows temperatures results when coarse beads overlay fine beads. Unlike F-C case, without electric fields applied, the temperature on the surface layer is highest. While with electric fields applied, temperature on the surface becomes lowest in during early period. In addition, temperature is higher when electrical voltage higher increases. Even though when electrical voltages are applied, the C-F results exhibit likely F-C cases, temperatures in C-F cases still are low. This is because moisture in the coarse layer (upper layer) slowly transfers to the surface, and this effect retards the

moisture transfer from the lower layer to the upper.

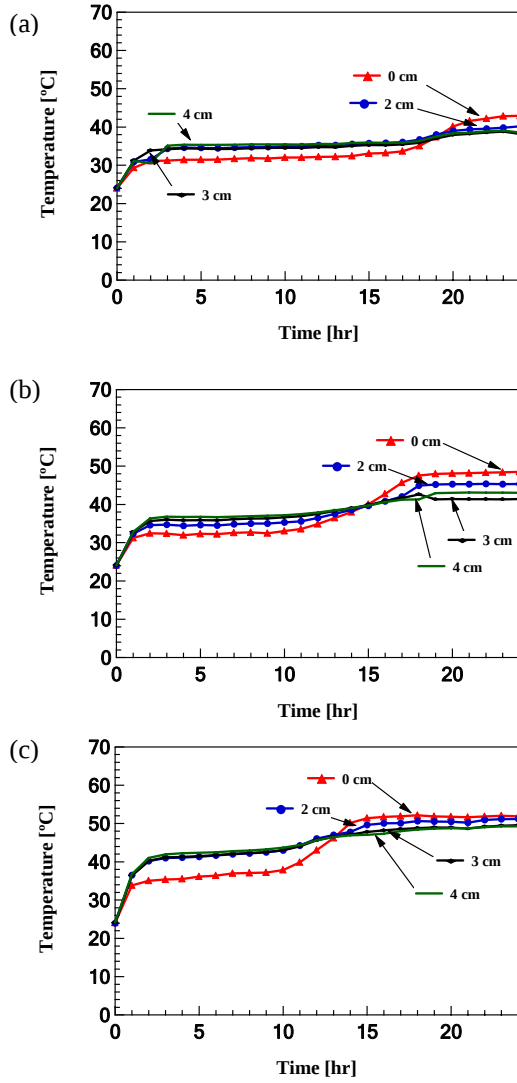


Figure 7. Temperature in F-C packed bed in various positions: (a) $V = 0$ kV, (b) $V = 10$ kV, and (c) $V = 15$ kV.

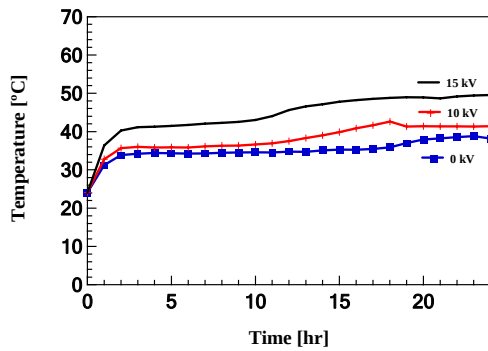


Figure 8. Temperature at $z = 3$ cm in F-C packed bed under various electric voltages.

Moisture in the fine layer (lower layer) congregates on the interface layer. Therefore, temperatures in both layers are low in this case.

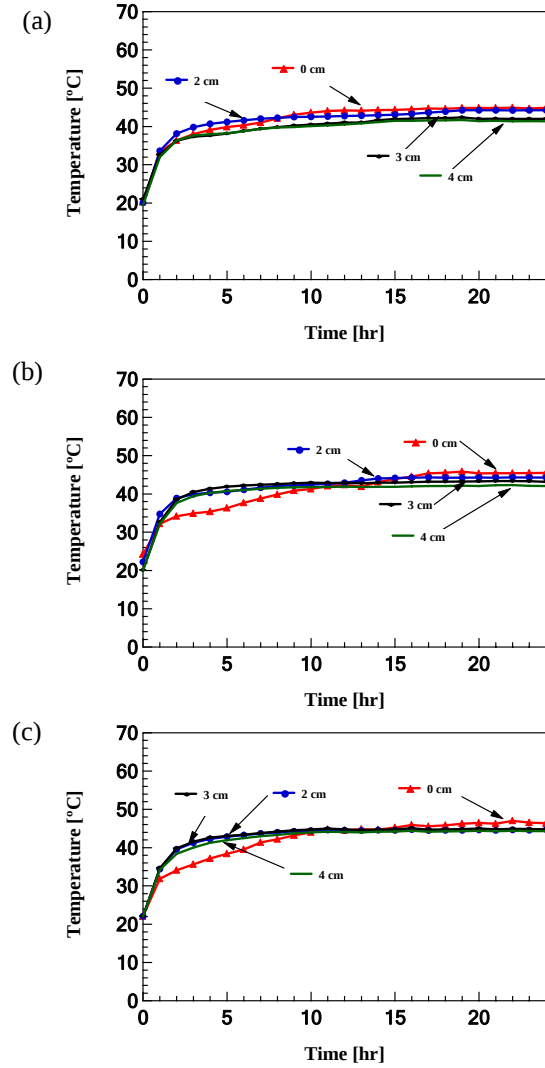


Figure 9. Temperature in C-F packed bed in various positions: (a) $V = 0$ kV, (b) $V = 10$ kV, and (c) $V = 15$ kV.

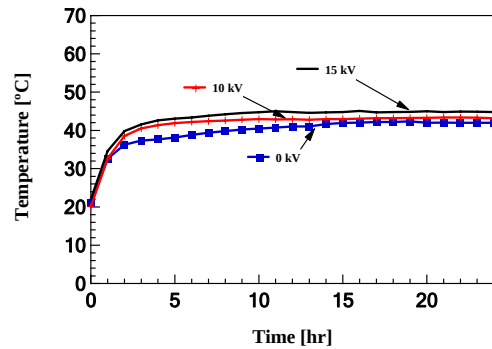


Figure 10. Temperature at $z = 3$ cm in C-F packed bed under various electric voltages.

4.4 Comparisons between F-C and C-F cases

Figure 11 shows the comparison on temperatures between F-C and C-F cases at different elevations, i.e., at the surface ($z = 0$ cm), and at the interface layer ($z = 3$ cm), when electrical voltage of $V = 15$ kV is applied. In the early period, heat transfers from hot air into both cases and increases their temperatures. Afterwards, heat is used for moisture evaporating process with constant temperature, i.e., latent heat. After the drying period, heat rises up temperatures of packed bed again, and this heat is a sensible heat form. Until thermal equilibrium, the temperature becomes constant again.

Due to effect of capillary pressure difference in F-C cases, moisture from the lower layer transfers to the upper layer faster. This causes, in the drying period, the temperatures on both elevations of F-C cases to be lower than that of C-F cases. After occurrence of drying on the surface, heat from hot-air flow is transferred to the structure of porous material. Therefore, temperature in F-C cases rapidly increases. In C-F cases, due to effect of low capillary pressure in the upper layer and high capillary pressure in lower layer, moisture transfer from the lower layers is retarded, resulting in low temperature.

It is clearly seen in Fig. 12 that the moisture removal in C-F case is much lower than that in F-C case. With influence of EHD, the drying rate can be increased. By comparing the rate of drying, F-C packed bed has 3.13 – 3.67 times higher than C-F packed bed. In addition, with electrical voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times.

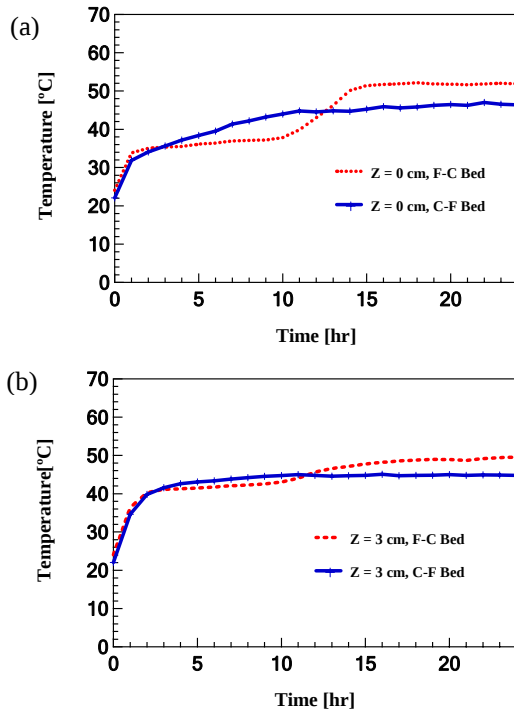


Figure 11. Comparison on temperature between F-C and C-F cases when $V = 15$ kV: (a) at $z = 0$ cm, and (b) at $z = 3$ cm.

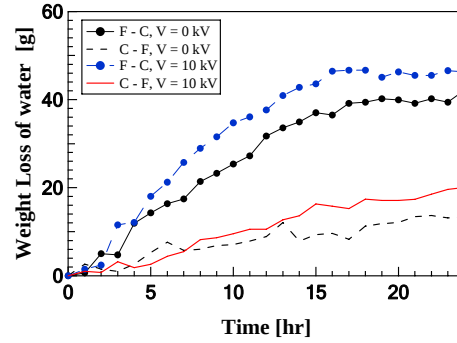


Figure 12. Comparison on weight loss of water in packed bed between F-C and C-F cases when $V = 0$ and 10 kV.

5. Conclusion

Influence of hot air with/without electric field on the heat and mass transfer in the double-layered porous packed beds is experimentally investigated through measurement of temperature at three different positions and of weight loss of water in packed bed. In addition, experimental results of fine beads overlay coarse beads (F-C cases) and of coarse beads overlay fine beads (C-F cases) are compared.

With influence of corona wind, which is generated from four electrode needles, the boundary layer on packed bed surface is reduced. Thus temperatures and drying rate of the packed beds are enhanced, and their increases depend on the magnitude of electrical voltage supplied.

Due to effect of capillary pressure difference, the lower layers of both cases have low temperature in the drying period with constant temperature. In addition, with retarding of moisture motions in the upper layer of C-F cases, moisture in the lower layer do not much move towards the upper layers, resulting in low temperature. While effects of capillary pressure difference in F-C cases conduct moisture in the lower layers towards the upper layers better.

With electrical voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times. In addition, the drying rate of Fine-Coarse packed-bed case is 3.13 – 3.67 higher than that of Coarse-Fine pack-bed case.

Acknowledgment

This work was supported through the research fund by Thailand Research Fund (TRF).

References

1. Mujumdar, A. S. 2007. Hand book of industrial drying. 3rd ed., CRC Press.
2. Gori, F., Gentili, G., and Matini, L., 1987. Microwave heating of porous media. ASME J. Heat Transfer, 109, pp. 522-525.
3. Nikawa, Y., Katsumata, T., Kikuchi, M., and Mori, S. 1986. An electric field converging applicator with heating pattern controller for microwave hyperthermia. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 34 (5), pp. 631-635.
4. 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. J. of Heat Transfer, Vol.124, pp. 151-161.

5. Chaktranond, C., Jiamjiroch, K., and Ratanadecho, P. 2007. Influence of Electrohydrodynamics (EHD) on heat and mass transfer in unsaturated Porous media. The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 21) Oct 17-19, Choburi, Thailand.
6. Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K. 1996. Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. Annual Reviews of Heat Transfer, Vol. 7, pp. 193-244.
7. Ratanadecho, P. 2004. Experimental and numerical study of solidification process in unsaturated granular packed bed. J. of Thermophysics and heat transfer, Vol 18 (1), pp. 87-93.

อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพรุน

Influence of Electric Fields on Heat and Mass Transfer Enhancement

in Porous Packed beds

ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

cchainar@engr.tu.ac.th

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) เพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อน ในการทดลองวัสดุที่ถูกอบแห้งถูกจำลองด้วยแพ็คเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. ซึ่งเป็นแพ็คเกจแบบ 1 ชั้น (One-layered packed bed) และแพ็คเกจ 2 ชั้น (Double-layered packed bed) ซึ่งแบ่งเป็นกรณีแพ็คเกจแบบ F-C และ แพ็คเกจแบบ C-F และจะศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความชื้นและต่ออุณหภูมิภายในชุดแพ็คเกจ สนามไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบจะถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังหลอดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งจากและแนวขวางการไหลของกระแสลม ค่าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 15 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) เหนือแพ็คเกจ และตำแหน่งการวางชั้นของลูกแก้วในแพ็คเกจ ด้วยการวางลูกแก้วขนาดเล็กเหนือชั้นของลูกแก้วขนาดใหญ่ (F-C layer) จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการวางชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่เหนือชั้นลูกแก้วขนาดเล็ก (C-F layer) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันคาปิลลารี (Capillary pressure) ที่แตกต่างกันของชั้นแพ็คเกจ

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับหลายๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเครื่องสุญญากาศ อุตสาหกรรมวัสดุจากไม้ และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร เป็นต้น กระบวนการอบแห้งที่นิยมใช้กันแพร่หลาย คือ กระบวนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot-air drying processes) หรือ การแผ่ความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (Thermal radiant heater) เพราะวิธีนี้เราสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ต้องการให้แก่ผลิตภัณฑ์และยังสามารถควบคุมช่วงเวลาการใช้งานเครื่องอบแห้งได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนต้องการเวลาสำหรับการอบแห้งค่อนข้างนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมานักวิจัยหลายกลุ่ม [เช่น 1 – 4] ได้ศึกษาวิธีการที่จะเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้ง Lai และ Lai [3] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มอัตราการอบแห้งโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เรียกว่าอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamics, EHD) และทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในแพ็คเกจ (Packed bed) ในการทดลองหลอดและแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพ็คเกจตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการการอบแห้งขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเร็วของอากาศซึ่งไหลในทิศทางขวาง (Cross flow) กับทิศของสนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ใช้ นอกจากนี้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น

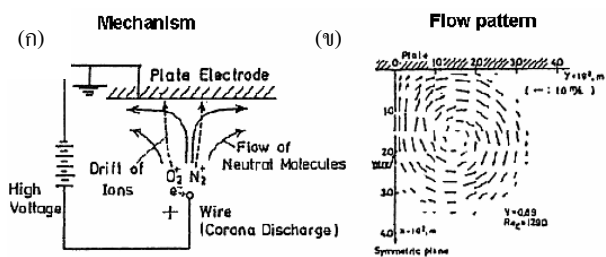
Ratanadecho และคณะ [6] ทำการศึกษการอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยวิธีทดลองและโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วัสดุที่ทำการศึกษาเป็นวัสดุที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated material) และความพรุน (Porosity) ของวัสดุมีค่าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของความชื้น (Moisture content) ในวัสดุพรุนต่อการไหลของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และอิทธิพลของการไหลแบบแคปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพ็คเกจเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ Ratanadecho และคณะ [5] พบว่า แพ็คเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงคาปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าแพ็คเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นมี Ratanadecho และคณะ [5] เท่านั้นที่ได้ทำการศึกษการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพ็คเกจ แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน กล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟทำให้ความร้อนเกิดขึ้นจากภายในแพ็คเกจและความร้อนจะไหลจากภายในแพ็คเกจออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพ็คเกจ

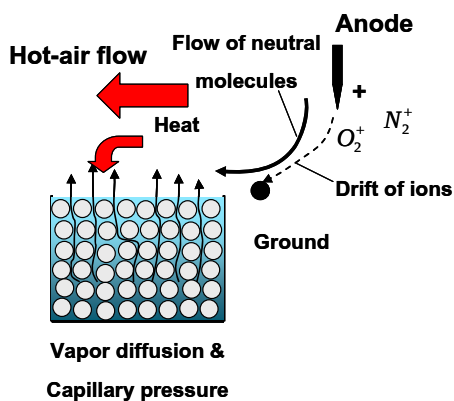
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพ็คเกจที่เป็นแบบมีความพรุนต่างๆ หนึ่ง (One-layered packed bed) และแพ็คเกจที่มีความพรุน 2 ค่าที่แตกต่างกัน (Double-layered packed bed) โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่งในแพ็คเกจ และทำการตรวจสอบค่าอัตราส่วนความชื้นของแพ็คเกจ ณ เวลาต่างๆ

2. หลักการเพิ่มการถ่ายเทมวลด้วยโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง แล้วไหลไปยังอิเล็กโทรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆกับผิวของอิเล็กโทรดนี้ถูกไอออไนซ์ (Ionized) และผลักให้เคลื่อนที่ไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศนี้เคลื่อนที่มันจะชนกับโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ดังรูปที่ 1 ก และทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum exchange) ผลของการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ของกระแสหมุนวนหรือที่เรียกว่าโคโรนาวินด์ (Corona wind) จากการศึกษาของ Yabe และคณะ [6] ในสถานะที่ปราศจากการไหลทิศทางแนวขวาง (Cross flow) แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Body force) เหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวน (Vortices) ที่สมมาตรกันสองลูกที่มีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกันระหว่างลวด และแผ่นอิเล็กโทรด (Wire and plate electrode) ดังแสดงในรูปที่ 1 ข



รูปที่ 1 กลไกการเกิดโคโรนาวินด์ [6]



รูปที่ 2 กลไกการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกรอบแห้งโดยใช้โคโรนาวินด์

รูปที่ 2 แสดงแนวคิดของการนำปรากฏการณ์โคโรนาวินด์มาใช้เพื่ออัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูน เมื่อลมร้อนไหลผ่านสนามไฟฟ้า อากาศร้อนบางส่วนจะถูกไอออไนซ์แล้วอากาศส่วนที่อยู่รอบๆ จะถูกทำให้หมุนวน และอากาศที่หมุนวนนี้มีผลทำให้ชั้นของบาวดาร์เลเยอร์ (Boundary layer) ที่อยู่ผิวด้านบนของแพคเกจ

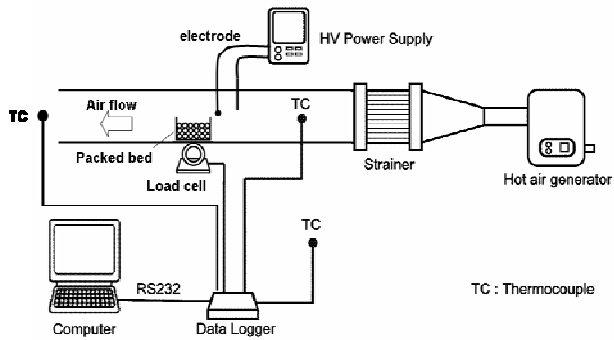
มีอิทธิพลน้อยลงซึ่งทำให้ความชื้นที่ผิวของแพคเกจเกิดการถ่ายเทไปยังอากาศร้อนเร็วขึ้นและยังทำให้ความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายเทเข้ามายังแพคเกจได้เร็วขึ้น

3. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

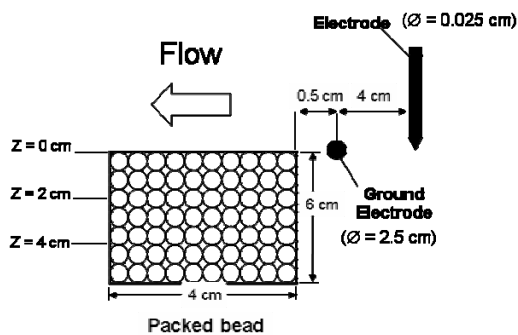
รูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบของงานวิจัยนี้ กระแสลมจากพัดลมไหลผ่านอุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel) ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 15×15 ตร.ซม. แล้วถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเครื่องสร้างลมร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดผ่านอากาศไปยังกราวด์อิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดทำจากลวดทองแดง 4 เส้นที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม และลวดอิเล็กโทรดแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 มม. ส่วนกราวด์อิเล็กโทรดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้ๆกับแพคเกจและในทิศทางที่ขวางกับทิศการไหลของกระแสลม ดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิของกระแสลมถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ประมาณ 60°C น้ำหนักของความชื้นภายในแพคเกจที่เปลี่ยนไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซล (Load cell)

กล่องแพคเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ความหนา 0.5 มม. ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเกจ ซึ่งมีขนาด 4 ซม. กว้าง $\times$ 12 ซม. ยาว $\times$ 6 ซม. สูง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเกจ ลวดไฟเบอร์ออปติก (LUX-TRON Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) จำนวน 3 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 2 และ 4 ซม. (วัดจากผิวด้านบนลงไปในแพคเกจ) ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของกระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเกจ และน้ำหนักของแพคเกจ ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Dataaker DT505)

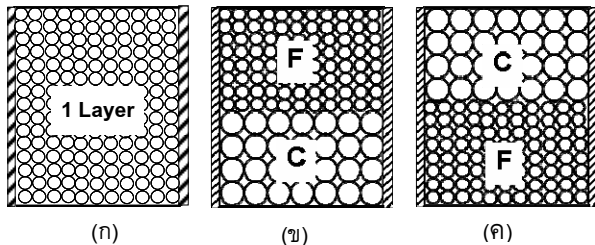
ในการทดลองความเร็วเฉลี่ยของกระแสลม (U_b) มีค่า 0.35 เมตรต่อวินาที และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้มีค่า 15 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) และลักษณะของแพคเกจที่ใช้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ 1. หนึ่งเลเยอร์แพคเกจ (แพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียว) 2. สองเลเยอร์แพคเกจ (แพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 2 ขนาดแต่มีชั้นความหนาเท่ากัน) โดยในกรณีที่ลูกแก้วขนาดเล็กอยู่เหนือลูกแก้วขนาดใหญ่ ในที่นี้จะเรียกว่ากรณี F-C ส่วนกรณีที่ลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่เหนือลูกแก้วขนาดเล็กจะเรียกว่า กรณี C-F ดังแสดงในรูปที่ 5 รายละเอียดของสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 4 ขนาดของแพคเบตและตำแหน่งของอิเล็กโทรด



รูปที่ 5 แผนภาพแพคเบตแบบต่างๆ (ก) 1 Layer (ข) 2 Layer แบบ F-C และ (ค) 2 Layer C-F

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	m_{in}	15 - 25 %db
Drying temperature	T	50 – 60 °C
Ambient temperature	T_a	25 °C
Mean air velocity	U_b	0.35 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	24 ~ 48 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

ตารางที่ 1. สภาวะทดสอบ

Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m^2)
0.125	~ 0.385	~ 8.41×10^{-12}
0.38	~ 0.371	~ 3.52×10^{-11}

ตารางที่ 2. คุณลักษณะของความพรุน (Porosity) ในแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างๆ

4. สมการ

ค่าอัตราส่วนความชื้นโดยฐานแห้ง (Moisture content with dry based) ของแพคเบตหาได้จาก

$$x_{db} = \frac{m_{water}}{m_{bead}} \times 100 \quad (1)$$

ที่ซึ่ง m_{water} คือ มวลของน้ำในแพคเบต และ m_{bead} คือ มวลของลูกแก้วที่บรรจุในแพคเบต

ค่าความอิ่มตัว (Saturation) ของแพคเบตหาได้จาก

$$s = \frac{m_{water}}{\phi \rho_l V_B} \quad (2)$$

ที่ซึ่ง ρ_l คือความหนาแน่นของน้ำ และ V_B คือปริมาตรของแพคเบต

5. ผลการทดลองและวิจารณ์

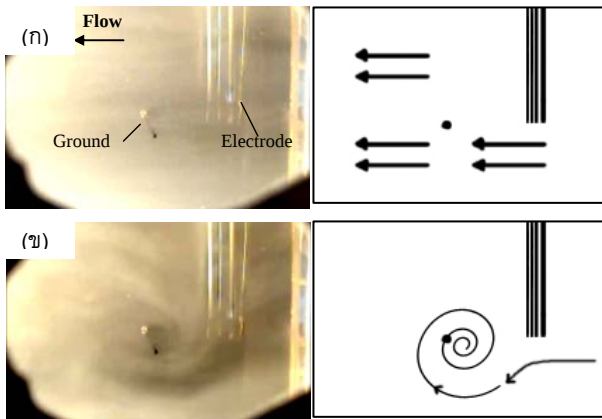
ในการทดลองอุณหภูมิภายในแพคเบตอยู่ในสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิของ ของแข็ง ก๊าซ และของเหลว ถือว่ามีค่าเท่ากัน และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ใช้ทดสอบมีค่าประมาณ 2,600 ($Re = \rho_a U_b D_h / \mu_a$ ซึ่ง ρ_a คือ ความหนาแน่น D_h เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ และ μ_a คือ ค่าความหนืด)

5.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ

เพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายในสนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคควันรูป โดยแสงจากสโตน์ไลท์ขนาด 500 วัตต์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ทางออกของชุดทดสอบถูกส่องเข้ามาในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของอากาศ แต่เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงเกินกว่าที่จะถ่ายภาพของควันรูปได้ชัดเจน ดังนั้นเราจึงทำการลดความเร็วของอากาศลงมาที่ 0.1 เมตรต่อวินาที แล้วใช้กล้องวิดีโอ ดิจิตอล (SONY DCR-PC108/PC109E) จับภาพต่อเนื่องการเคลื่อนที่ของควันรูป

จากรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศกรณีที่ไม่มีความดันไฟฟ้าและกรณีที่มีความดันไฟฟ้า โดยในกรณีที่ไม่มีความดันไฟฟ้าอากาศมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบตามแนวทางท่อทดสอบ ส่วนกรณีที่มีความดันไฟฟ้าสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าอากาศเกิดการหมุนวนในทิศตามเข็มนาฬิกา และศูนย์กลางของการหมุนเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์ แต่อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีแล้วควรเกิดวอร์เทค 2 ลูกที่สมมาตรกัน แต่ในการทดลองนี้ไม่พบการเกิดการหมุนของวอร์เทค (Vortex) อีกหนึ่งลูกซึ่ง

ควรเกิดขึ้นและหมุนในทิศทางตรงข้ามกับวอร์เทคลูกแรก ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าตำแหน่งของกราวด์ก่อนมาทางด้านล่างของท่อทดสอบและมีระยะเยื้องในแนวตั้งระหว่างกราวด์และอิเล็กโทรด ซึ่งอาจทำให้ประจุจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่เยื้องลงมาที่กราวด์ อีกทั้งการหมุนวนของวอร์เทคลูกแรกที่สังเกตได้มีทิศทางตรงข้ามกับการไหลของอากาศ



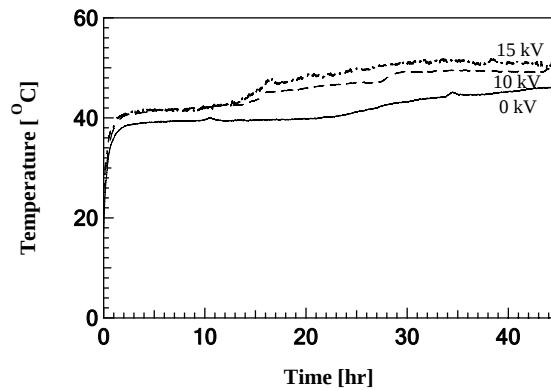
รูปที่ 6 รูปการเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณอิเล็กโทรด (ก) ไม่สนามไฟฟ้า และ (ข) เมื่อใช้สนามไฟฟ้าขนาด 10 kV

5.2 การอบแห้งโดยใช้แพคเบต 1 ชั้น

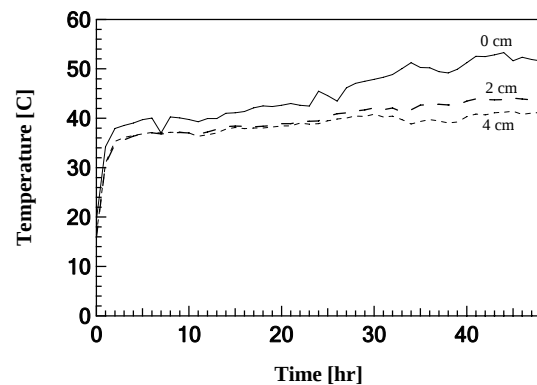
ในการตรวจสอบการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความชื้นในแพคเบตแบบ 1 ชั้น กำหนดให้ค่าความอิ่มตัว (Saturation, s) ของวัสดุพรมมีค่าเท่ากับ 1 และเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 48 ชั่วโมง และเพื่อทดสอบว่าผลของความร้อนที่เกิดจากลวดอิเล็กโทรด (Joule heating effect) ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของแพคเบต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิของลวดอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิของลวดอิเล็กโทรดมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิของอากาศมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแพคเบตจะเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่ากรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ขนาดสนามไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะขนาดความแรงโคโรนาวินด์ตามแปรผันตามขนาดของสนามไฟฟ้า

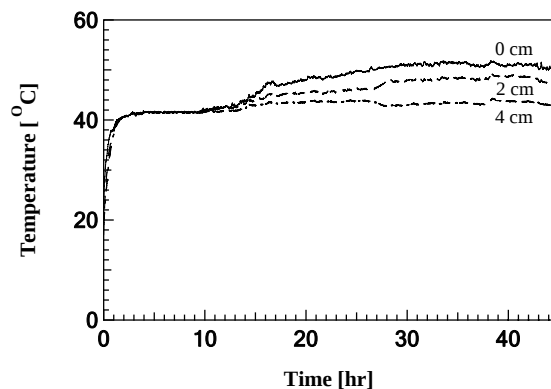
จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่า อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตจะสูงขึ้นเร็วกว่าส่วนที่อยู่ด้านในแพคเบต และแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วกว่าที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ ซึ่งทั้งนี้ เป็นผลอันเนื่องมาจากผลของแรงดันคาปิลารี (Capillary pressure) ซึ่งจะอธิบายกลไกนี้ต่อไป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบตที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.



รูปที่ 8 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.125 มม. และ แรงดันไฟฟ้า $V = 15$ kV



รูปที่ 9 อุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวเมื่อใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม. และ แรงดันไฟฟ้า $V = 15$ kV

การเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลจากความชื้นในแพคเบตไปสู่อากาศร้อนโดยโคโรนาวินด์ถูกตรวจสอบผ่านการวัดปริมาณน้ำหนักของแพคเบตที่ลดลง หรืออัตราส่วนความชื้นของ แพคเบต (Moisture content in packed bed) ที่ ระยะเวลาต่างๆ

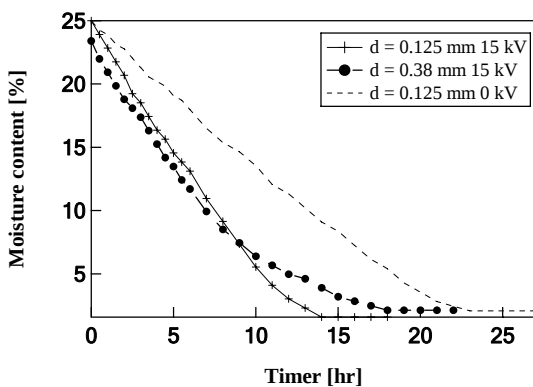
รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอัตราความชื้นที่ลดลงหรืออัตราการอบแห้งมีค่าสูงเร็วกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า

ประมาณ 1.8 เทวา ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุพูน และ แพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กมีอัตราการอบแห้งสูงกว่า แพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ประมาณ 1.4 เทวา ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันคาปิลารี โดยทางทฤษฎีแล้วแพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าความพูน (ดังตารางที่ 2) มากกว่าแพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ ซึ่งความดันคาปิลารีเป็นฟังก์ชันของค่าความพูน [5, 7]

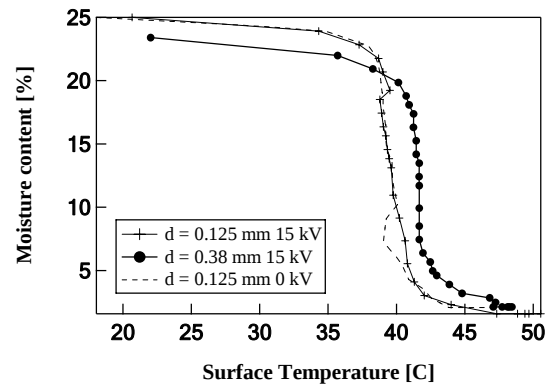
$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{(K/\phi)} J(s_e) \quad (3)$$

ที่ซึ่ง p_g และ p_l คือ ค่าความดันของก๊าซและของเหลวในแพลเบต σ คือ ค่าความตึงผิว และ $J(s_e)$ คือ ฟังก์ชันรีเวอร์ (Levertt function) ซึ่งขึ้นกับค่าความอิ่มตัวของวัสดุพูน จากสมการที่ (3) ถ้าหาก $(\sigma J(s_e))_{small\ bead} > (\sigma J(s_e))_{small\ bid}$ แล้ว $p_{c,small\ bead} > p_{c,big\ bead}$ ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่มีความพูนสูงจะมีค่าแรงดันคาปิลารีสูงกว่าวัสดุที่มีความพูนต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 11 พบว่าที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะค่าอัตราส่วนความชื้นของแพลเบตมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งเกิดเนื่องจากปริมาณความชื้นเกิดการระเหย (Evaporation) อย่างมากที่ผิวของแพลเบต และเรียกช่วงของปรากฏการณ์นี้ว่า ช่วงการทำให้แห้ง (Drying period or evaporating period) เมื่ออุณหภูมิภายในของแพลเบตมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนจะถูกใช้ไปกับความร้อนแฝงเพื่อทำให้น้ำที่ผิวหน้าของแพลเบตกลายเป็นไอ และเมื่อน้ำส่วนใหญ่ที่ผิวหน้าของแพลเบตระเหยไปจะเกิดความแห้งขึ้นบางส่วนที่ผิวหน้าของแพลเบต ช่วงการอบแห้งนี้เรียกว่าช่วงของการตก (Falling period) นอกจากนี้ในช่วงดังกล่าวอิทธิพลของแรงดันคาปิลารีจะมีค่ามากขึ้นทำให้ความชื้นที่ยังคงอยู่ในแพลเบตสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้อีก ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมแพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจึงมีอัตราส่วนความชื้นเหลือน้อยกว่าแพลเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการอบแห้งเท่ากัน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ

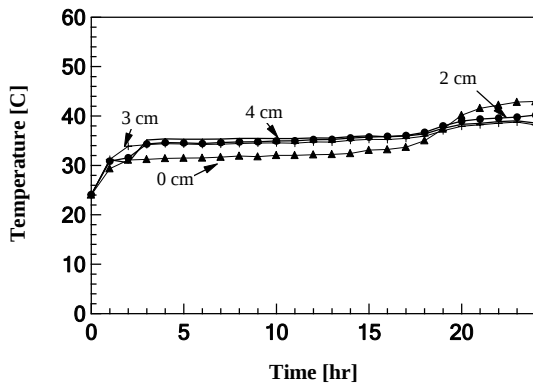
5.2 การอบแห้งโดยใช้แพลเบต 2 ชั้น

ในการทดสอบแพลเบตแบบ 2 ชั้น เวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง และกำหนดให้ค่าความอิ่มตัวแต่ละชั้นความหนาของวัสดุพูน (ชั้นของลูกแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน) มีค่าเท่ากับ 1

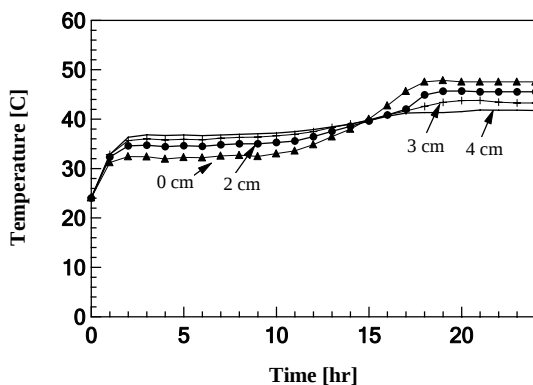
จากรูปที่ 12 13 และ 15 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพลเบตแบบ 2 ชั้น มีลักษณะแตกต่างจากในแพลเบตแบบ 1 ชั้น อย่างเห็นได้ชัด ในช่วงที่มีการระเหย (อุณหภูมิประมาณคงที่) อุณหภูมิที่ผิวบนแพลเบตมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิส่วนอื่นๆ และกลับมามีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่นๆ ในแพลเบตหลังจากผ่านช่วงการระเหยไปแล้ว ส่วนรูปที่ 14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพลเบตกลับมีลักษณะคล้ายกับในแพลเบตแบบ 1 ชั้น ทั้งนี้เป็นเพราะผลของแรงดันคาปิลารี จากที่อธิบายมาข้างต้นวัสดุที่มีความพูนมากโดยทั่วไปจะมีแรงดันคาปิลารีมากกว่าวัสดุพูนที่มีความพูนน้อย ดังนั้นเมื่อลูกแก้วขนาดเล็กถูกวางอยู่บนลูกแก้วขนาดใหญ่อิทธิพลของแรงดันคาปิลารีจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นบนไหลไปสู่ที่ผิวมากขึ้นเป็นผลทำให้ความชื้นที่อยู่ในส่วนชั้นด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้ง่ายขึ้น ดังนั้นทำให้ปริมาณความชื้นส่วนใหญ่ถูกขับออกอยู่ที่ส่วนชั้นด้านบน ซึ่งทำให้ความร้อนจากลมร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปสำหรับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ สำหรับในกรณี C-F เนื่องจากความดันคาปิลารีมีค่าน้อย ความชื้นในส่วนชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่ไม่สามารถไหลไปสู่ที่ผิวหน้าเพื่อให้เกิดการระเหยได้เร็ว และถึงแม้ว่าค่าความดันคาปิลารีของชั้นลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่า แต่ความชื้นไม่สามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้ทำให้ความชื้นถูกสะสมอยู่ในส่วนของชั้นด้านบนซึ่งมีลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่ ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพลเบตจะมีค่าพอๆ กัน

รูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของโครโนวาร์ดทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและแพลเบตดีขึ้น โดยรูปที่ 16 ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของแพลเบต ($z = 0$ cm) ซึ่งพบว่า ในกรณี C-F แพลเบตการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพลเบตสูงขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นส่วนใหญ่ถูก

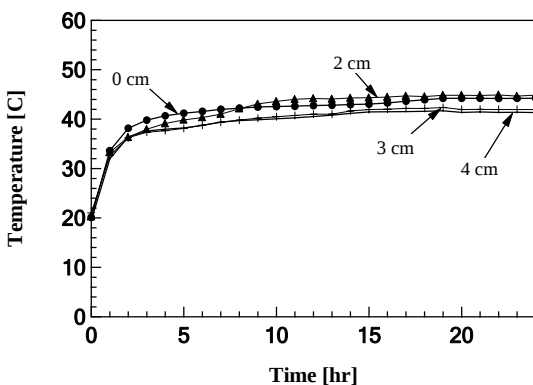
กันอยู่ในส่วนของชั้นดำนบน ส่วนในกรณี F-C แพคเกจการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ความชื้นที่ผิวสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนไปเร็วขึ้น ซึ่งเป็นทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากช่วงการระเหย



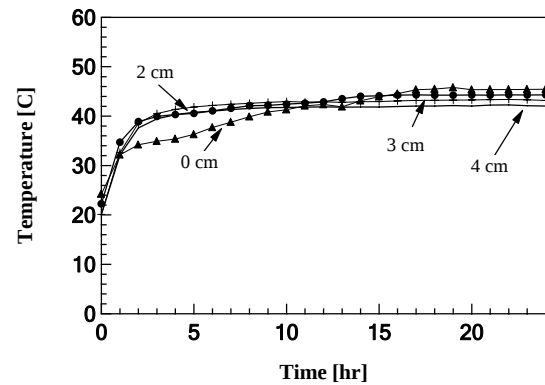
รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ $V = 0$ kV



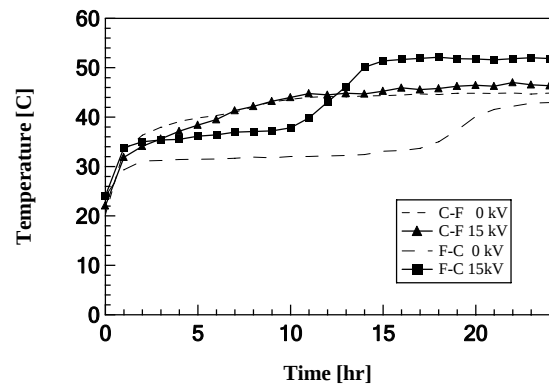
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ $V = 10$ kV



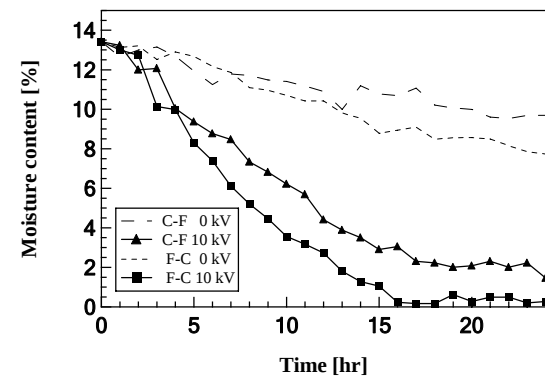
รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ C-F เมื่อ $V = 0$ kV



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ C-F เมื่อ $V = 10$ kV



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของแพคเกจระหว่างกรณี F-C และ กรณี C-F



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นภายในแพคเกจระหว่างกรณี F-C และ กรณี C-F

อัตราการอบแห้งของวัสดุพูนแบบ 2 ชั้นถูกแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 17 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้สนามไฟฟ้าอัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับไม่ใช้สนามไฟฟ้า ประมาณ 3.5 และ 3.2 เท่า สำหรับกรณี F-C และ C-F ตามลำดับ โดยในกรณีที่ใช้ไฟฟ้า $V = 10$ kV อัตราการอบแห้งของกรณี F-C มีค่ามากกว่า C-F ประมาณ 1.7 เท่า ส่วนในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าประมาณ 1.5 เท่า

6. สรุป

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบ 1 และ 2 ชั้น โดยใช้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

ด้วยอิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าของแพคเกจขนมระเหยไปสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิภายในของแพคเกจมีค่าสูงเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดสนามไฟฟ้าที่ใช้

ในกรณีของแพคเกจแบบ 1 ชั้น วัสดุที่มีความพรุนมากกว่าจะเกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนได้ดีกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อยกว่า ซึ่งเป็นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงดันคาปิลารีที่ไม่เท่ากัน และในการทดลองพบว่าสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้ง 1.4 และ 1.8 เท่าสำหรับการอบแห้งของแพคเกจบรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่และบรรจุลูกแก้วขนาดเล็กตามลำดับ

ในกรณีของแพคเกจแบบ 2 ชั้น ด้วยผลของแรงดันคาปิลารีที่ไม่เท่ากันทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นไปสู่ผิวมีปริมาณต่างกัน โดยกรณีแพคเกจแบบ F-C จะให้ผลอัตราการอบแห้งเร็วกว่าแพคเกจแบบ C-F ประมาณ 1.5 เท่าและ 1.7 เท่าสำหรับกรณีที่มิใช่สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้าตามลำดับ และการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งของแพคเกจ 2 ชั้นค่าสูงขึ้นมากกว่า 3 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้าช่วยในการอบแห้ง

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ กองทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ (ส.ก.ว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen, Y.H., and Barthakur, N.N., 1991. Potato slab dehydration by air ions from corona discharge. *Int. J. Biometeorology*, Vol. 35, pp. 67-70.
- [2] Hashinaga, F., Bajgai, T.R., Isobe, S., and Barthakur, N.N., 1999. EHD drying of apple slices. *Drying Technology*, Vol. 17(3), pp. 479-495.
- [3] Lai, F.C., and Lai, K.-W., 2002. EHD-Enhanced drying with wire electrode. *Drying Technology*, Vol. 20(7), pp. 1393-1405.
- [4] Alem-Rajabi, A., and Lai, F.C., 1995. EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads. *Drying Technology*, Vol. 23, pp. 597-609.
- [5] 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. *J. of Heat transfer*, Vol. 124, pp. 151-161.
- [6] Yabe, A., Mori, Y., and Hijikata, K., 1996. Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. *Annual Reviews of Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 193-244.
- [7] Ratanadecho, P., Aoki, K, and Akahori, M., 2001. Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28(5), pp. 605-61.

Heat and Mass Transfer Enhancement in Unsaturated Porous Packed beds subjected to Electrohydrodynamics (EHD)

*Chainarong CHAKTRANOND¹, Phadungsak RATANADECHO¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathumthani 12121, Thailand

Corresponding author: Chainarong CHAKTRANOND E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th

Keywords: Drying, Heat and mass transfer, Electrohydrodynamics

ABSTRACT

Enhancement of heat and mass transfer in a convective drying of single- and double-layer porous packed bed subjected to electric fields is experimentally investigated and analyzed in this paper. In addition, effect of electrical voltage, porosity, and layer structure on drying behaviors in the packed beds composed of glass beads, water and air are examined. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed in the packed beds. Velocity of hot air is about 0.33 m/s and temperature is controlled at 60°C. Electric fields are applied in the range of 0 - 15 kV. Enhancement of heat and mass transfer is revealed through measuring the temperature and weight loss of moisture content of the packed beds. The results show that with influence of Corona wind on flow above the packed beds, the convective heat transfer coefficient and drying rate are enhanced considerably. In addition, arrangement of the glass-bead-layered structure much influence on the temperature distribution and rate of moisture content in packed bed. Due to the effect of capillary pressure difference, increase of temperatures in double-layered packed bed appears unlikely that in the single layer. Moreover, in the double-layered cases, the drying rate of fine-coarse packed bed is much higher than that of coarse-fine packed bed.

INTRODUCTION

The application of drying techniques for many processes, such as chemical, pharmaceuticals, and agriculture, have been considered from many years. Due to the simultaneous heat and mass transfer taking place during the process, drying is one of most complicated phenomena. In addition, it is not clearly understood.

A conventional drying method with hot-air flow is widely used in agricultural industries for removing the moisture content from products. However, its drying period is long, resulting in large energy consumption. In order to improve drying rate, many researchers have paid much attention in development of hot-air drying cooperating with the other methods, e.g., microwave [1-3], infrared [4, 5], and electric fields [6]. In order to increase removing the moisture within material, microwave irradiation penetrates in the bulk of the material, and creates a heat source at a certain location. To heat the surface region, infrared radiation is transmitted through water at a short wavelength, while long wavelength, it is absorbed on the surface [7]. This drying is suitable to dry thin layers of material with large surface exposed to radiation. In order to enhance the removal of water from the porous material surface, Chaktranond et al. [6] applied the electric fields on the hot-air flow. They report that the

effect of the corona wind conducted by electric fields enhances the temperature and drying rate of porous packed bed considerably.

To get more understanding in the mechanisms of drying in porous materials, this study aim to experimentally investigate and analyze the transfer of heat and mass within single- and double layer porous packed bed subjects to the influence of hot-air flow and electric fields. In addition, effects of porosity and layer structure are reported.

CONCEPT AND EQUATIONS

Corona wind

Idea of heat-and-mass transfer enhancement with utilizing electrohydrodynamics (EHD) is shown in Fig. 1. When hot-air flow exposed to electric fields, it gives rise to an electrically induced secondary flow, so-called Corona wind. With EHD, flow above packed bed is circulated and is mingled together. This reduces the influence of boundary layer on the packed-bed surface. In addition, it causes moisture on surface to much remove into the air flow, and heat to much transfer into the packed bed. Consequently, the rate of moisture removal is enhanced.

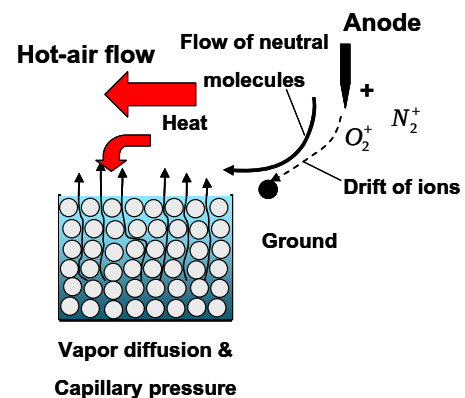


Fig. 1 Idea of enhancement of heat and mass transfer with corona wind [6].

Drying equations

Water saturation of a porous medium with respect to a particular fluid is defined as

$$S = \frac{\text{Volume of fluid}}{\text{Total volume of voids}} = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{void}}} \quad (1).$$

Moisture content in porous material is the ratio of total mass of water to total mass of dry solid, i.e.

$$X = \frac{M_{water}}{M_{solid}} \quad (2)$$

Eq. (2) can be written in term of water saturation (S), and it is

$$X = \frac{\phi \rho_{water}}{(1-\phi) \rho_{solid}} S \quad (3)$$

where ϕ is porosity and ρ is density.

From Fourier's law, heat flux through porous material is computed by

$$q = -\lambda_{eff} \nabla T \quad (4)$$

where λ_{eff} is the effective thermal conductivity, and ∇T is temperature gradient in packed bed. In addition, it is assumed to be a function of water saturation. It is defined as [3]

$$\lambda_{eff} = \frac{0.8}{1 + 3.7e^{-5.95S}} \quad (5)$$

Exchange of energy at surface of packed bed exposed to air flow can be calculated by

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T_s - T_{air}) + \dot{m}_{water} h_v \quad (6)$$

where h_c is convective heat transfer coefficient, $\dot{m}_{water}$ is volumetric evaporation rate, h_v is latent heat of vaporization, T_s and T_{air} are temperature at surface and of air, respectively.

The relationship between the capillary pressure and the water saturation is defines by using Leverett functions $J(S_e)$ [2, 3],

$$p_c = p_{gas} - p_{liquid} = \frac{\sigma}{\sqrt{K/\phi}} J(S_e) \quad (7)$$

where p_{gas} and p_{liquid} are pressure of gas and liquid phases, respectively, S_e is the effective water saturation associated with the irreducible water saturation, and σ is surface tension.

EXPERIMENTAL SETUP

Figure 2 shows the schematic diagram of experimental setup. The tested rig is an open system. The wind tunnel opens on one side and hot air is blown into the ambient. Air is supplied from a blower and temperature of air is increased by a hot-air generator, which is connected to the rig. In order to control temperature of hot air, a thermocouple sensor (TC) is placed in front of the test section, which has the dimensions of $15 \times 15 \text{ cm}^2$. The high voltage power supply (LEYBOLD 521721) is used to generate an electrical field in the test section.

Positions of electrodes are shown in Fig. 3. Electrode wires comprise of four positive discharge and one ground electrodes. The discharge electrodes made of copper wires are suspended from the top wall and placed in the front of packed bed. Diameter of each copper electrode is 0.025 mm and the spacing between each wire is 26 mm. Ground

electrode is also made of copper wire, but suspended horizontally across the test section. The porous packed bed used in this study is composed of glass beads, water and air. The container of glass beads is made of acrylic plate with a thickness of 0.5 mm. In addition, the dimensions are 3.5 cm wide, 12 cm long and 6 cm high. Moreover, to control heat transfer from hot air towards only the upper surface of packed bed, other sides are insulated by rubber sheet. In order to investigate the heat transfer within the packed bed, three fiber optic wires (LUXTRON Fluoroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^\circ\text{C}$) are placed in the middle point of the planes of $z = 0, 2$, and 4 cm , which are measured from the surface of the packed bed.

Figure 4 shows the configuration of the double-layer packed beds. For the single layer, packed bed is filled with a size of glass bead. While in the double layer, packed bed is filled with two different sizes of glass bead. To define the double-layer cases, fine bead layer overlaid coarse bead layer is of the F-C case, and the inverse is of the C-F case. Additionally, both layers have a same thickness.

In experiments, the maximum electrical voltage is tested that breakdown voltage will not occur. The diameters of glass beads are 0.125 mm for fine beads and 0.38 mm for coarse beads. The details of testing conditions and characteristics of water transport in porous media are shown in Table 1 and 2, respectively.

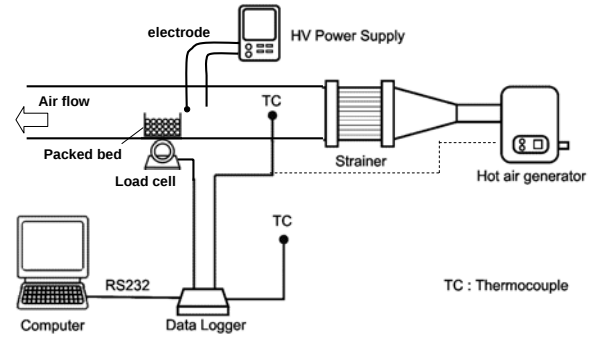


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

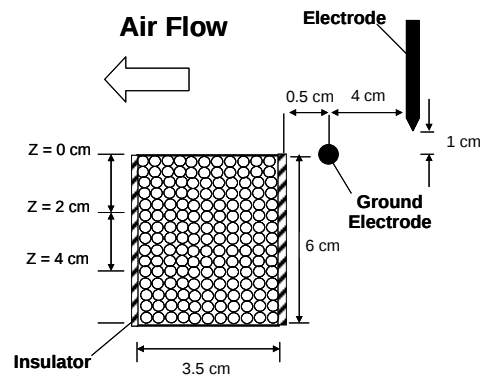


Fig. 3 Dimensions of packed bed, locations of electrodes and temperature measurement.

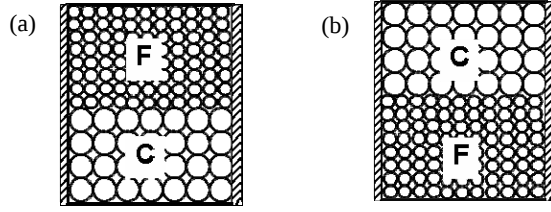


Fig. 4 Configuration of double-layer packed bed: (a) F – C case, and (b) C – F case.

Table 1 Testing conditions

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	$X_{db,i}$	22 – 38% db
Drying temperature	T	50 – 60°C
Ambient temperature	T_a	25°C
Mean air velocity	U_b	0.33 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	24 – 48 hr
Glass bead	d	0.125, 0.38 mm

Table 2 Characteristics of water transport in porous media.

Diameter, d (mm)	Porosity, ϕ	Permeability, K (m^2)
0.125	~ 0.385	$\sim 8.41 \times 10^{-12}$
0.38	~ 0.371	$\sim 3.52 \times 10^{-11}$

RESULTS AND DISCUSSIONS

Flow visualization

In order to observe the motion of flow subjected to the electric fields, this study utilizes incense smoke technique. A spot light of 500 W is placed at the outlet of channel, and the light direction is opposite on the flow direction. Due to high speed of flow, the bulk mean velocity is reduced to 0.1 m/s. In addition, the motion of flow is continuously captured by a digital video camera recorder (SONY DCR-PC108/ PC109E).

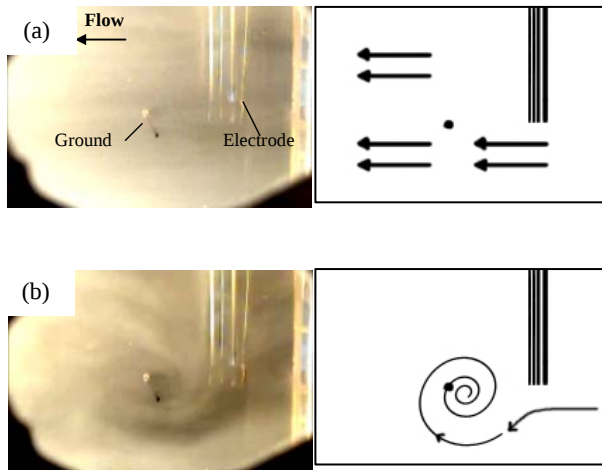


Fig. 5 Motion of air flow at 0.1 m/s: (a) without electric fields, and (b) with electric fields at $V = 10$ kV.

As shown in Fig. 5, under the influence of EHD, air flow neighboring electrodes is induced by electric fields, and is circulated around ground electrode. In addition, strength of vortex varies with the magnitude of electrical voltage applied.

In measuring the temperature in the packed bed, it is assumed that temperature is in state of thermodynamic equilibrium, thus temperatures of all phases, i.e. solid, liquid, and gas, are same. The average temperature of hot air, which is measured behind packed bed, approximately is 60°C. Reynolds number, ($Re = \rho U_b D_h / \mu$, where ρ is density of air, μ is viscosity of air, and D_h is hydraulic diameter) of air flow is 3049.

Single-layer packed bed

Figure 6 and 7 show the influence of EHD on temperature in packed bed with 0.125-mm bead at $z = 0$ and 4 cm, respectively. Clearly, when electric fields are applied, the temperature in packed bed increases. In addition, higher voltage applied conducts higher temperature. Moreover, EHD influences on the surface temperature more than the inside. This is because EHD induces secondary flow, so-called Corona wind. The effect of this Corona wind circulating above packed bed enhances the mass transfer, and destabilizes the boundary layer on the surface. Consequently, convective heat transfer coefficient is enhanced, and then heat from hot-air flow can much transfers into packed bed. Therefore, the temperature of the cases with EHD is higher than that of without EHD.

In this study, the augmentation of convective heat transfer due to EHD is defined as the ratio convective heat transfer coefficient with EHD to convective heat transfer coefficient with free air, i.e. $h_{c,EHD} / h_{c,free}$, and the results are shown in Fig. 8. In warm-up period, this ratio increases rapidly. In addition, in constant rate of drying period (constant surface temperature), the ratios are about 2 and 3 for cases with $V = 10$ and 15 kV, respectively.

As shown in Fig. 9, with voltage applied, water saturation in packed bed is much more reduced, resulting in enhancement of mass transfer. In constant rate of drying period, the drying rate with EHD is approximately 2 times higher than that with hot-air flow only, as shown in Fig. 10.

Heat transfer behavior in packed bed with big bead (0.38 mm) is shown in Fig. 11. Without EHD, temperature difference between at surface and inside is not much different. While with voltage apply, temperature difference is clearly observed. In addition, they are higher than without voltage applied.

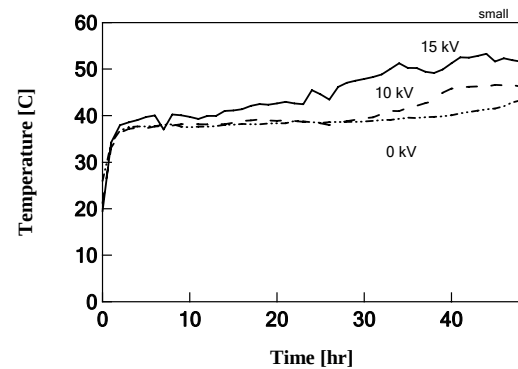


Fig. 6 Surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

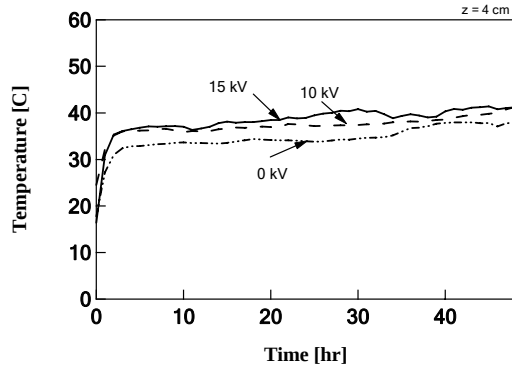


Fig. 7 Temperature of packed bed with 0.125-mm bead at $z = 4$ cm.

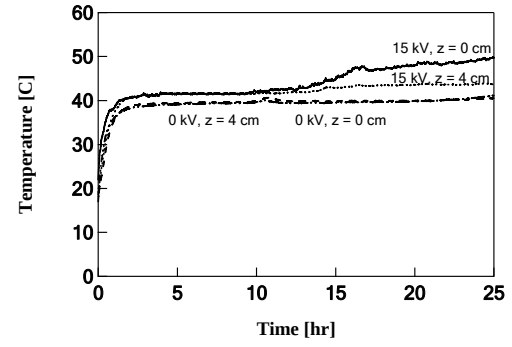


Fig. 11 Temperature of packed bed with 0.38-mm bead in various voltages at $z = 0$ and 4 cm.

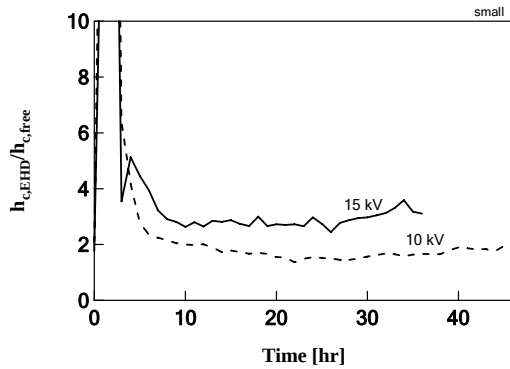


Fig. 8 Enhancement of heat transfer coefficient in case of packed bed with 0.125-mm bead.

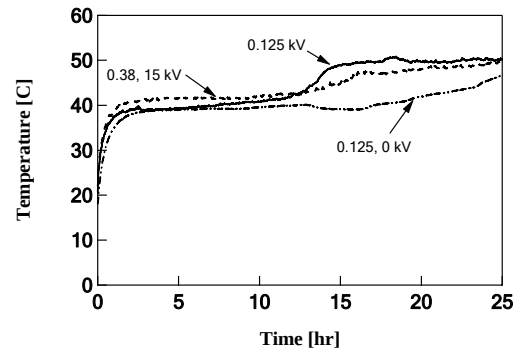


Fig. 12 Comparison on surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bed with 0.38-mm and 0.125-mm beads.

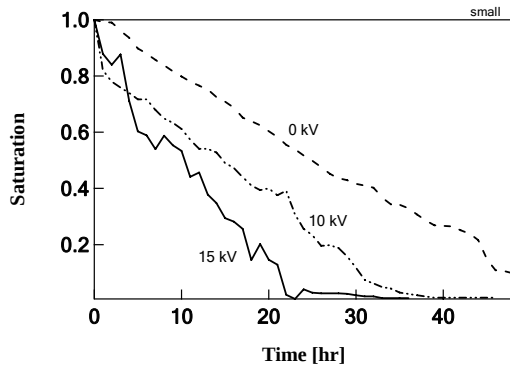


Fig. 9 Comparison on water saturation of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

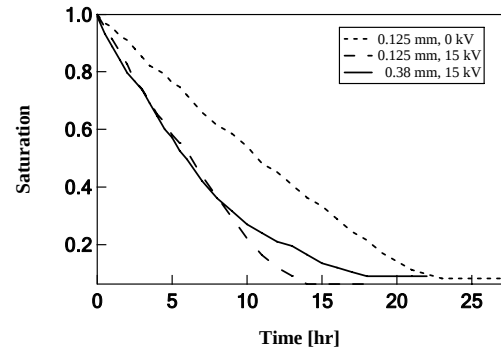


Fig. 13 Comparison on saturation in packed bed with different glass bead sizes.

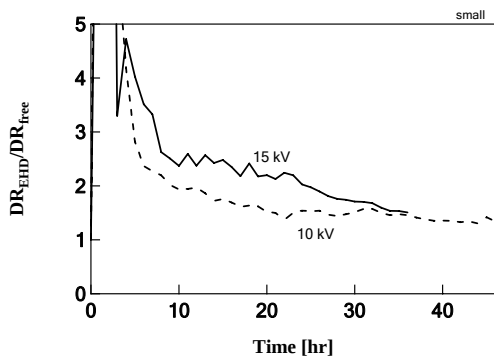


Fig. 10 Enhancement of rate of mass transfer in case of packed bed with 0.125-mm bead.

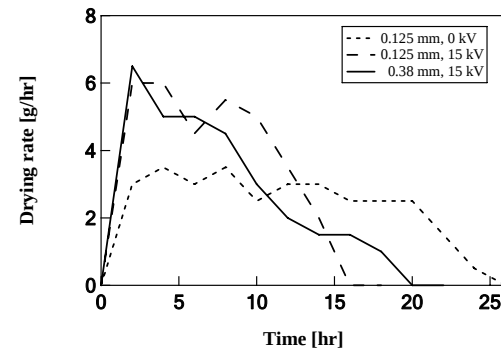


Fig. 14 Comparison on drying rate in packed bed with different glass bead sizes.

Influence of porosity or glass bead size on heat and mass transfer are shown in Fig. 12 - 14. After a constant rate of drying period, surface temperature in packed bed with small bead (0.125 mm) rapidly increases, while the case in packed bed with big bead (0.38 mm) gradually increases. It is shown in Fig. 13 that high rate of drying in case with small bead remains longer than that in case with big bead. This is because effect of capillary pressure in packed bed with small bead is higher than that with big bead. From Eq. (7), if $(\sigma J(S_e))_{\text{fine}} \sim (\sigma J(S_e))_{\text{coarse}}$ then $p_{c,\text{fine}} > p_{c,\text{coarse}}$. It means that in the case of same saturation, a smaller particle size corresponds to a higher capillary pressure. Therefore, moisture is more transferred from inside packed bed to the surface.

Double-layer packed bed

In case of double-layer packed, in order to investigate the temperature on the interface layer, one more fiber optic wire is placed at $z = 3$ cm.

Figure 15 and 16 show temperature in packed bed of F-C case. It is observed that in the warm-up period, all temperatures in this packed bed rise up steadily. Later, they remain constant, and surface temperature of packed bed is lowest. Until a certain time, the temperature on surface rapidly, and is higher than the other layers. This is because of the effect of capillary pressure difference. As above addressed, packed bed with small bead provides the capillary pressure (p_c) higher than that with big bead. In the initial period, if both layers have same amount of saturation, then difference of capillary pressure will be happened. Therefore, effect of capillary action in the fine bead layer (upper layer) will induce the moisture from the coarse bead layer (lower layer) to its layer. This causes void in the lower layer to be filled with more the vapor phase. Therefore, with a same heat flux, temperature in lower layer becomes higher. As moisture evaporating process proceeds, temperatures of porous packed are constant, where heat is used for changing phase. Until a certain time, the surface becomes dry; heat will mainly transfer with conduction. Consequently, temperature in the upper layer rises up again when drying zone starts happening, and the temperature of surface layer is higher than the other layers.

Figure 17 and 18 show temperatures results when coarse beads overlay fine beads. Unlike F-C case, without electric fields applied, the temperature on the surface layer is highest. While with electric fields applied, temperature on the surface becomes lowest in during early period. In addition, temperature is higher when electrical voltage higher increases. Even though when electrical voltages are applied, the C-F results exhibit likely F-C cases, temperatures in C-F cases still are low. This is because moisture in the coarse layer (upper layer) slowly transfers to the surface, and this effect retards the moisture transfer from the lower layer to the upper.

It is evidenced in Fig. 19 that the moisture removal in C-F cases are much lower than that in F-C cases. With influence of EHD, the drying rate can be increased. In addition, rate of drying of F-C cases is about 3.13 – 3.67 times higher than that of C-F case. Moreover, with voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times.

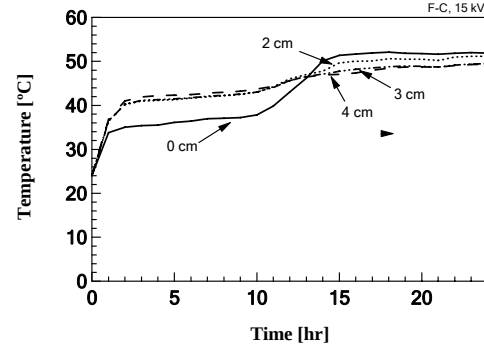


Fig. 15 Temperature in F-C packed bed when $V = 15$ kV.

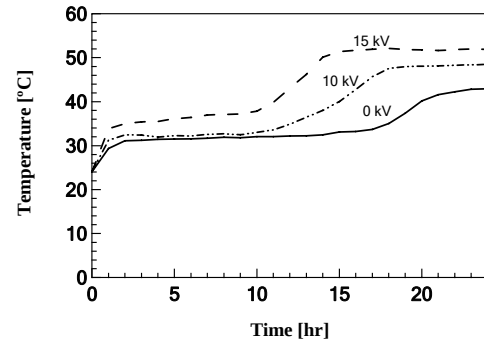


Fig. 16 Temperature at $z = 0$ cm in F-C packed bed in various voltages.

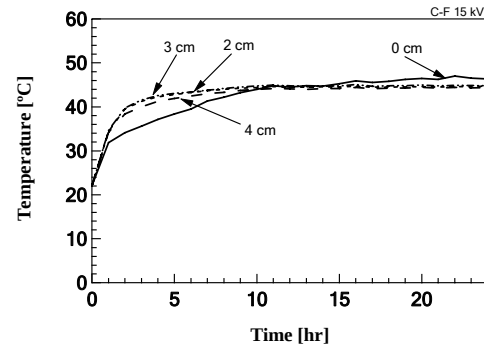


Fig. 17 Temperature in C-F packed bed when $V = 15$ kV.

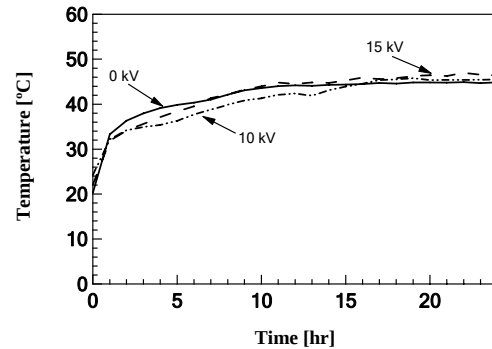


Fig. 18 Temperature at $z = 0$ cm in C-F packed bed in various voltages.

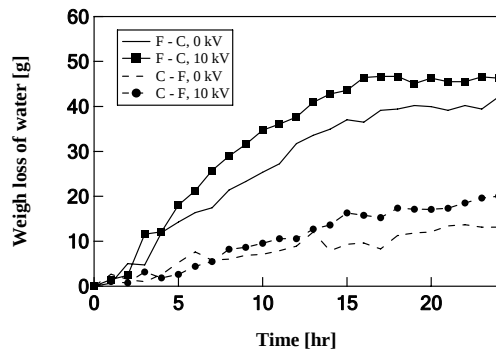


Fig. 19 Comparison on weight loss of water from packed bed in various cases.

CONCLUSIONS

Effect of electrical voltage, porosity, and porous structure on heat and mass transfer in the porous packed beds subjected to hot-air flow and electric field are analyzed through experimental results.

Corona wind circulating above packed bed augments the convective heat transfer coefficient and evaporation rate on the packed bed surface exposed to hot-air flow, resulting enhancement of in heat and mass transfer in packed bed. In addition, the augmentation depends on the magnitude of voltage applied, and porosity of packed bed. Larger porosity provides higher the capillary pressure.

Due to effect of capillary pressure difference, heat and mass transfer in double-layer packed bed exhibit unlike that in single one. With retarding of moisture motions in the upper layer of C-F cases, moisture in the lower layer do not much move towards the upper layers, resulting in low temperature. While F-C cases conduct moisture in the lower layers towards the upper layers better. With voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times. In addition, the drying rate of F-C cases is about 3.13 – 3.67 times higher than that of C-F cases.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported through the research fund by Thailand Research Fund (TRF).

REFERENCES

1. Gori, F., Gentili, G., and Matini, L. (1987). Microwave heating of porous media. *ASME J. Heat Transfer*, 109, pp. 522-525.
2. Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M. (2001). Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 28 (5), pp. 605-616.
3. 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, *J. Heat Transfer*, Vol. 124, February 2002, pp.151-161.
4. Sandua, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis, *Biotechnology Progress*, 2(3), pp. 109-119.
5. Nowak, D. and Lewicki, P.P. (2004). Infrared drying of apple slices, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 5, pp. 353-360.

6. Chaktranond, C., Jiamjiroch, K. and Ratanadecho, P. (2007). Influence of Electrohydrodynamics (EHD) on heat and mass transfer in unsaturated Porous media, paper presented in the 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 2007 (ME-NETT 21), Chonburi, Thailand.
7. Sakai, N. and Hanzawa, T. (1994). Application and advances in infrared heating in Japan, *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 5(11). pp. 357-362.

Manuscript Number:

Title: Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to Electric fields (Effects of Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement)

Article Type: Research Paper

Keywords: Electrohydrodynamics, Drying process, Heat and mass transfer.

Corresponding Author: Dr. CHAINARONG CHAKTRANOND, Ph.D

Corresponding Author's Institution: Thammasat University, Rangsit Campus

First Author: Chainarong Chaktranond, Ph.D

Order of Authors: Chainarong Chaktranond, Ph.D; Phadungsak Rattanadecho, Ph.D

Abstract: This research aims to experimentally investigate the effects of electrical voltage, porosity, and porous structure on the heat and mass transfer in a convective drying of single- and double-layer packed beds composed of glass beads, water and air. The effects of drying time, electric field, particles size and the layered structure are examined. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed in the packed beds. Electric fields are applied in the range of 0-15 kV. Velocity of airflow is about 0.33 m/s and temperature of air is controlled at 60OC. The results show that with influence of Corona wind, the convective heat transfer and drying rate are enhanced considerably. Due to effects of porosity, the small bead size leads to much higher capillary pressure, resulting in a faster drying time. In addition, arrangement of the glass-bead-layered structure much influences on the temperature distribution and rate of moisture content in packed bed. Due to the effect of capillary pressure difference, increase of temperatures in double-layered packed bed appears unlikely that in the single layer. Moreover, in the double-layer cases, the fine-coarse packed bed gives drying rate higher than the coarse-fine packed bed.

Suggested Reviewers: Arun S Mujumdar Ph.D

Professor, Mechanical Engineering, National University of Singapore

mpeasm@nus.edu.sg

He is an expert in drying technology and is an editor in Drying Technology Journal

Masahiro Shoji Ph.D

Professor, Mechanical Engineering,, Kanagawa University

shoji@kanagawa-u.ac.jp

He is an expert in heat and mass transfer, and is an editor in Int. J. Heat and mass transfer.

Opposed Reviewers:

Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to Electric Fields (Effects of Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement)

Chainarong Chaktranond^{*} (Corresponding author)

^{*}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Thammasat University, (Rangsit Campus), Pathumthani, Thailand 12121.

Tel +66 02 564-3001 ext 3144 Fax +66 02 564-3010 Email: cchainar@engr.tu.ac.th^{*}

Phadungsak Rattanadecho^{}**

^{**}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Thammasat University, (Rangsit Campus), Pathumthani, Thailand 12121.

There has been continuous in an effort from many research fields, such as chemical, pharmaceuticals, and agriculture, to achieve better technological performance in drying processes, which can provide a high quality in products and minimizes the energy cost. Conventional drying technique with hot-air flow commonly used for removing the moisture content from agriculture products; however, drying period is long, resulting in a large amount of energy consumption.

This research aims to experimentally investigate and analyze the enhancement of heat and mass transfer in porous media with combining hot-air flow and electric fields. The effects of electrical voltage, porosity, and porous structure on the heat and mass transfer in a convective drying of single- and double-layer packed beds composed of glass beads, water and air, are examined. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed in the packed beds. Electric fields are applied in the range of 0-15 kV. Velocity of airflow is about 0.33 m/s and temperature of air is controlled at 60⁰C.

**Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to
Electric Fields (Effects of Particle Sizes, Porosity, and Layered Arrangement)**

Chainarong Chaktranond* (Corresponding author)

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, (Rangsit Campus), Pathumthani, Thailand 12121.

Tel +66 02 564-3001 ext 3144 Fax +66 02 564-3010 Email: cchainar@engr.tu.ac.th*

Phadungsak Rattanadecho**

**Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, (Rangsit Campus), Pathumthani, Thailand 12121.

Abstract

This research aims to experimentally investigate the effects of electrical voltage, porosity, and porous structure on the heat and mass transfer in a convective drying of single- and double-layer packed beds composed of glass beads, water and air. The effects of drying time, electric field, particles size and the layered structure are examined. Glass beads of 0.125 and 0.38 mm in diameters are employed in the packed beds. Electric fields are applied in the range of 0-15 kV. Velocity of airflow is about 0.33 m/s and temperature of air is controlled at 60⁰C. The results show that with influence of Corona wind, the convective heat transfer and drying rate are enhanced considerably. Due to effects of porosity, the small bead size leads to much higher capillary pressure, resulting in a faster drying time. In addition, arrangement of the glass-bead-layered structure much influences on the temperature distribution and rate of moisture content in packed bed. Due to the effect of capillary pressure difference, increase of temperatures in double-layered packed bed appears unlikely that in the single layer. Moreover,

in the double-layer cases, the fine-coarse packed bed gives drying rate higher than the coarse-fine packed bed.

Keywords: Electrohydrodynamics, Drying process, Heat and mass transfer.

Notation

C = coarse bead

d = diameter of particle [mm]

D_h = hydraulic diameter [m]

F = fine bead

h_c = convective heat transfer coefficient [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]

h_v = latent heat of vaporization [J/kg]

K = permeability [m^2]

M = mass [kg]

$\dot{m}$ = volumetric evaporation rate [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$]

p = pressure [Pa]

Re = Reynolds number

S = saturation

S_e = the effective water saturation associated with the irreducible water saturation

T = temperature [$^{\circ}\text{C}$]

∇T = temperature gradient in packed bed [$^{\circ}\text{C}$]

V = volume [m^3]

X = moisture content

z = distance from surface of packed bed

Greek letters

δ = depth of packed bed [mm]

1 ϕ = porosity [m^3/m^3]

2 ρ = density [kg/m^3]

3 λ_{eff} = the effective thermal conductivity [$\text{W}/\text{m.K}$]

4 σ = surface tension [Pa.m]

5 μ = viscosity [Pa.s]

Subscripts

6 a = air

7 EHD = air with electric fields

8 $free$ = free air

9 l = liquid water

10 c = capillary

11 eff = effective

12 w = water

13 s = solid

14 sur = surface

15 g = gas

Introduction

There has been continuous in an effort from many research fields, such as chemical, pharmaceuticals, and agriculture, to achieve better technological performance in drying processes, which provides a high quality in products and minimizes the energy cost. Conventional drying technique with hot-air flow commonly used for removing the moisture content from agriculture products; however, drying period is long, resulting in a large amount of energy consumption. In order to enhance drying rate, combining hot-air flow with other energy sources, such as microwave [1-6], infrared [7-10], and electric fields (Electrohydrodynamics, EHD) [11-13], is an attractive method. Unlike the conventional drying, microwave irradiation penetrates and heats the bulk of the material. This leads heat to be created from the inside, and substantially removes the moisture content in porous materials towards the surface. However, microwave drying is known to result in poor quality produce if not properly applied [2,3]. In infrared drying, heat radiation is transmitted through water at a short wavelength, while long wavelength, it is absorbed on the surface [8]. Usually, infrared radiation is suitable to dry thin layers of material with large surface exposed to radiation. Moreover, its penetrating power is limited [10]. In both techniques, an external energy penetrates and produces heating inside the material being dried. Instead of adding an external energy, electrohydrodynamics manipulates flow above porous material in order to enhance rate of water removal from material surface. With introducing high voltage electric field into air flow, ionized air induces neutral air, and this conducts to the occurrence of circulating wind, so-called Corona wind [14]. With effects of Corona wind, the effect of boundary layer on material surface is depressed, resulting in enhancement of heat and mass transfer.

Due to simultaneous heat and mass transfer taking place during process, mechanisms of drying in porous materials is complicated, and still have been investigated by many researchers. Schröder et al. [15] measured heat transfer between particles and nitrogen gas

1 flow in packed bed. They reported that increasing gas flow led to larger values of the heat
2 transport coefficient. Alem-Rajabai and Lai [11] experimentally investigated the drying rate
3 from partially wetted glass bead by electric field. In their experiments, a wire electrode and a
4 copper plate were located above and under a packed bed, respectively. The results showed
5 that EHD drying was most effective at the surface of the packed bed. In addition, the rate of
6 increase in the drying enhancement for positive corona was generally greater than that of
7 negative corona. As same as experimental setup by Alem-Rajabai and Lai [11], Lai and Lai
8 [12] examined the influence of electric field parameters on the drying rate in a packed bed.
9 They reported that drying rate depended on the strength of the electric field and the velocity
10 of the cross flow. With absence of cross-flow, the enhancement in drying rate increased
11 linearly with the applied voltage. In addition, the influence of corona wind was suppressed by
12 the increase of cross-flow velocity.

13 To explain drying mechanisms, Ratanadecho et al. [2,3] experimentally and numerically
14 studied the microwave drying in unsaturated material with different porosities. They found
15 that small bead size led to much higher capillary forces and provided faster a drying time than
16 a big bead size. From above literatures, only the researches by Ratanadecho et al. [2,3] had
17 studied the mechanisms of heat and mass transfer within the packed bed. Nevertheless,
18 behaviour of heating porous materials with the microwave heating is different from that with
19 the hot-air drying. To get more understanding in the mechanisms of drying in porous media,
20 where heat externally transfers to the material surface, and augment drying rate, this study
21 aims to experimentally investigate and analyze the transfer of heat and mass within single-
22 and double-layer porous packed bed subjects to the influence of hot-air flow and electric
23 fields, including effects of porosity and layer structure.

2. Theory

2.1 Drying enhancement with Corona wind

For drying with hot-air flow, the idea of heat-and-mass transfer enhancement with utilizing EHD is shown in Fig. 1. When hot-air flow exposed to high voltage electric fields, the flow is circulated. Then this secondary flow enhances the convective heat transfer and leads to depress the influence of boundary layer on the packed-bed surface. This causes moisture on surface to much vaporize into the air flow and heat to much transfer into the packed bed. Consequently, the rate of moisture removal is enhanced.

2.2 Related equations

Water saturation (S) of a porous medium with respect to a particular fluid is defined as

$$S = \frac{\text{Volume of fluid}}{\text{Total volume of voids}} = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{void}}} \quad (1).$$

Moisture content (X) in porous material is the ratio of total mass of water (M_w) to total mass of dry solid (M_s), i.e.

$$X = \frac{M_w}{M_s} \quad (2).$$

Eq. (2) can be written in term of water saturation, and it is

$$X = \frac{\phi \rho_w}{(1-\phi) \rho_s} S \quad (3),$$

where ϕ is porosity of material [m^3/m^3], ρ_w and ρ_s are density of water and solid [kg/m^3], respectively.

From Fourier's law, heat flux through porous material is computed by

$$q = -\lambda_{\text{eff}} \nabla T \quad (4),$$

where λ_{eff} is effective thermal conductivity [$\text{W}/\text{m.K}$], and ∇T is temperature gradient in packed bed [$^{\circ}\text{C}$].

Based on the experimental results of Aoki et al. [16] using a glass bead unsaturated with water, the effective thermal conductivity is further assumed to be a function of water saturation and defined by

$$\lambda_{eff} = \frac{0.8}{1 + 3.7e^{-5.95S}} \quad (5).$$

Exchange of energy at surface of packed bed exposed to air flow can be calculated by

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T_{sur} - T_a) + \dot{m}_w h_v \quad (6),$$

where h_c is convective heat transfer coefficient [$W/m^2.K$], $\dot{m}_w$ is volumetric evaporation rate [$kg/m^3.s$] or rate of weight loss of water from porous media, h_v is latent heat of vaporization [J/kg], T_{sur} is temperature on material surface [$^{\circ}C$], and T_a is air-flow temperature [$^{\circ}C$].

The relationship between the capillary pressure (p_c) and the water saturation is defines by using Leverett functions $J(S_e)$ [2,3], i.e.

$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{\sqrt{K/\phi}} J(S_e) \quad (7),$$

where S_e is effective water saturation associated with the irreducible water saturation, K is permeability [m^2], and σ is surface tension [$Pa.m$]. Subscripts of g and l are denoted as gas and liquid phases, respectively.

3. Experimental setup and apparatus

Schematic diagram of experimental setup is shown in Fig. 2. The rig is an open system. Air is supplied from a blower and temperature of air is increased by an electric heater. In order to control temperature of hot air, a thermocouple sensor (TC) is put in the front of test section, where the cross-sectional area is $15 \times 15 \text{ cm}^2$. The high voltage power supply (LEYBOLD 521721) is used to create electrical fields in the test section.

As shown in Fig. 3, electrode wires are comprised of four copper positive discharge electrodes and a copper ground electrode. The discharge electrode wires are suspended from the top wall and placed in the front of packed bed. Diameter of each discharge electrode is 0.025 mm and the spacing between each wire is 26 mm. Ground electrode is suspended horizontally across the test section, and its diameter is 0.25 mm.

Figure 4 shows the configuration of the packed beds, which compose of glass bead, water and air. The samples are prepared in the two configurations: a single-layer packed bed (uniform packed bed) with bed depth $\delta = 60$ mm ($d = 0.125$ mm for fine bed and $d = 0.38$ for coarse bed), as shown in Fig. 4 (a) and (b), and a double-layer packed bed, respectively. The double-layer packed bed are arranged in different configurations in the F-C bed where fine particles ($d = 0.125$ mm, $\delta = 30$ mm) overlay the coarse particles ($d = 0.385$ mm, $\delta = 30$ mm), and C-F bed where coarse particles ($d = 0.38$ mm, $\delta = 30$ mm) overlay the fine particles ($d = 0.125$, $\delta = 30$ mm), respectively. The width and total length of all samples used in the experiments are 35 mm and 120 mm, respectively. The container of glass beads is made of acrylic plate with a thickness of 0.5 mm. Moreover, to control heat transfer from hot air towards only the upper surface of packed bed, other sides are insulated by rubber sheet.

Temperature distribution within the sample are measured using fiber optic sensors (LUXTRON Fluroptic Thermometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), which are placed in the center of the sample at depth $z = 0, 2$, and 4 cm, which are measured from the surface of the packed bed. In each test run, the weight loss of the sample is measured using a load cell.

In experiments, the maximum electrical voltage is tested so that breakdown voltage will not occur. The details of testing conditions and characteristics of water transport in porous media are shown in Table 1 and 2, respectively.

4. Results and discussions

In measuring the temperature in the packed bed, it is assumed that temperature is in state of thermodynamic equilibrium, thus temperatures of all phases, i.e. solid, liquid, and gas, are same. The average temperature of hot air, which is measured behind packed bed, approximately is 60°C. Reynolds number, ($Re = \rho U_b D_h / \mu$) of air flow is 3049.

4.1 Effects of EHD on air flow

In order to observe the motion of air flow subjected to the electric fields, this study utilizes the incense smoke technique. A spot light of 500 W is placed at the outlet of channel, and the light direction is opposite on the flow direction. Due to high speed of flow, the bulk mean velocity is reduced to 0.1 m/s. In addition, the motion of flow is continuously captured by a digital video camera recorder (SONY DCR-PC108/ PC109E). As shown in Fig. 5, under the influence of EHD, air flow neighboring electrodes is induced by electric fields, and is circulated near ground electrode. Moreover, it is observed that strength of vortex is proportional to the magnitude of electrical voltage applied.

4.2 Effects of heat and mass transfer on packed bed

Figure 6 and 7 shows influence of EHD on temperature in packed bed with 0.125-mm bead at $z = 0$ and 4 cm, respectively. Clearly, when electric fields are applied, the temperature in packed bed increases. In addition, higher voltage applied gives rise to higher temperature. Moreover, EHD influences on the surface temperature more than the inside. This is because EHD induces secondary flow, so-called Corona wind. The effect of this Corona wind circulating above packed bed enhances the mass transfer, and destabilizes the boundary

layer on the surface. Consequently, convective heat transfer coefficient is enhanced, and then heat from hot-air flow can much transfers into packed bed. Therefore, the temperature of the cases with EHD is higher than that of without EHD.

In this study, the augmentation of heat transfer due to EHD is defined as the ratio convective heat transfer coefficient with EHD to convective heat transfer coefficient with free air, i.e. $(h_{c,EHD} / h_{c,free})$. As shown in Fig. 8, in warm-up period, this ratio increases rapidly. In addition, in constant drying period (constant surface temperature), the augmentations are about 2 and 3 for cases with $V = 10$ and 15 kV, respectively.

As shown in Fig. 9, with voltage applied, water saturation in packed bed is much more reduced, resulting in enhancement of mass transfer. In constant rate of drying period, the drying rate with EHD is approximately 2 – 2.5 higher than that with hot-air flow only, as shown in Fig. 10.

Heat transfer in packed bed with big bead (0.38 mm) is shown in Fig. 11. Without EHD, difference of temperature between surface and inside is very small. Due influence of EHD, temperature difference is clearly observed. In addition, increase of their temperatures is much higher than the case without voltage applied.

4.3 Effects of glass bead size and porosity

In the case of a single-layer packed bed, the moisture content continuously decreased towards the surface. The decrease in surface saturation, this sets up a saturation gradient, which draws liquid water towards the surface through capillary action while water vapor moves towards the surface due to a gradient in the vapor partial pressure.

The following results are concerned with the effect of particle size on moisture migration mechanism and heat transfer under the same conditions for the single-layer packed bed. As shown in Fig. 12, after a constant rate of drying period, surface temperature in packed bed

with small bead (0.125 mm) rapidly increases, while the case in packed bed with big bead (0.38 mm) gradually increases. Clearly seen in Fig. 13, saturation in small bead case decreases faster than that in big bead case. In addition, high rate of drying in small bead case is longer than that in big bead case, as shown in Fig 14. This is because effect of capillary pressure in small bead case is higher than that big bead case. As shown in Table 2, porosity of packed bed with small bead is larger than that of packed bed with big bead. In addition, from Eq. (7), if $(\sigma J(S_e))_{\text{fine}} \sim (\sigma J(S_e))_{\text{coarse}}$ then $p_{c,\text{fine}} > p_{c,\text{coarse}}$. It means that in the case of same saturation, a smaller particle size corresponds to a higher capillary pressure. With higher capillary pressure, it can cause moisture to reach the surface at a higher rate. Therefore, moisture is more transferred from inside packed bed towards the surface.

In fact, in drying period, heat flux from hot-air flow transfers to water in packed bed for evaporation. If packed bed contains a high saturation level, then increase of its temperature will be slow. This causes temperature in big bead case to be lower than that in small bead case.

4.4 Effects of layer arrangement

In case of double-layer packed bed, in order to measure the temperature on the interface layer, one more fiber optic wire is placed at $z = 3$ cm.

In the case of double-layer packed bed (F-C bed and C-F bed), their temperature distributions is quite different from the results in single-layer cases. Figure 15 and 16 show temperature in packed bead of F-C case. As shown in Fig. 15, in the warm-up period, all temperatures in this packed bed rise up steadily. Later, they remain constant, and surface temperature of packed bed is lowest. Until a certain time, the temperature on surface rapidly, and is higher than the other layers. This is because of the effect of capillary pressure difference. From the above discussion, capillary pressure in small bead case is higher than that in big bead case. In the initial period, if both layers have same amount of saturation, then

1 difference of capillary pressure will be happened. Therefore, effect of capillary action in the
2 fine bead layer (upper layer) will induce the moisture from the coarse bead layer (lower layer)
3 to its layer. This causes void in the lower layer to be filled with more the vapor phase.
4 Therefore, with a same heat flux, temperature in lower layer becomes higher. As moisture
5 evaporating process proceeds, temperatures of porous packed are constant, where heat is used
6 for changing phase. Until a certain time, the surface becomes dry; heat will mainly transfer
7 with conduction. Consequently, temperature in the upper layer rises up again when drying
8 zone starts happening, and the temperature of surface layer is higher than the other layers.
9 Effect of voltage applied on heat transfer in F-C packed bed is shown in Fig. 16. With higher
10 voltage, surface temperature of packed bed reaches a certain temperature faster.

11
12 Figure 17 and 18 show the results when coarse beads overlay fine beads. Unlike F-C case,
13 without and with electric fields applied, the temperature in each depth is not much different.
14 In addition, the surface temperature is highest. This is because moisture in the coarse layer
15 (upper layer) slowly transfers to the surface, and this effect retards the moisture transfer from
16 the lower layer to the upper.

17
18 It is evidenced in Fig. 19 that when the drying process reaches a certain time, moisture
19 content in F-C packed bed is in low level, while that in C-F packed bed is still high. In other
20 words, the moisture removal from C-F cases is much lower than that from F-C cases. As
21 above-mentioned, effect of capillary pressure difference causes moisture in C-F cases not to
22 much transfer toward the surface. With influence of EHD, the drying rate can be increased. In
23 addition, rate of drying of F-C cases is about 3.13 – 3.67 times higher than that of C-F case.
24 Moreover, with voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times.

5. Conclusions

Effect of electrical voltage, porosity, and porous structure on heat and mass transfer in the porous packed beds are experimentally investigated and analyzed in this paper. The following paragraph summarizes the conclusions of this study:

1. Effects of Corona wind circulating above packed bed augments the convective heat transfer coefficient and evaporation rate on the packed bed surface exposed to hot-air flow, resulting enhancement of in heat and mass transfer in packed bed. In addition, enhancement of heat and mass transfer varies on the magnitude of voltage applied.
2. The effects of particle size and porosity are clarified. The drying rate in the small bead case is higher than that in the big bead case. This is because the higher capillary pressure for the packed bed with small bead: moisture in packed bed can much remove towards the material surface.
3. The effects of layered arrangement in packed beds conduct to the capillary pressure difference. This causes heat and mass transfer in double-layer cases to exhibit unlike that in the single-layer cases. With retarding of moisture motion in the upper layer of C-F cases, moisture in the lower layer does not much move towards the upper layers, resulting in low temperature. While in F-C cases, effect of capillary pressure difference enhances moisture in the lower layers to moves towards the upper layers better. With voltage applied, the drying rate is improved about 1.5 – 1.97 times. In addition, the drying rate of F-C cases is about 3.13 – 3.67 higher than that of C-F cases.

Acknowledgements

This work was supported through the research fund by Thailand Research Fund (TRF).

References

- [1] F. Gori, G. Gentili, L. Matini, Microwave heating of porous media, ASME J. Heat Transfer, 109 (1987), 522-525.
- [2] A.E. Drouzasam, H. Dchubert, Microwave application in vaccum drying of fruits, J. Food Eng., 28 (1996), 203-209.
- [3] J. Yongsawatdigul, S. Gunasekaran, Microwave-vacuum drying of cranberries: part I. Energy use and efficiency, J. Food Process. Preserv., 20 (1996), 121-143.
- [4] P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 28 (5) (2001), 605-616.
- [5] P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori, Influence of irradiation time, particle sizes, and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials, J. Heat Transfer, 124 (2002), 151-161.
- [6] W. Cha-um, P. Rattanadecho, W. Pakdee, Experimental analysis of microwave heating of dielectric materials using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀) (Case study: Water layer and saturated porous medium), Exp. Therm Fluid Sci. 33 (2009), 472-481.
- [7] C. Sandua, Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis, Biotechnology Progress, 2(3) (1986), 109-119.
- [8] N. Sakai, T. Hanzawa, Application and advances in infrared heating in Japan, Trends in Food Science and Technology, 5(11) (1994), 357-362.
- [9] D. Nowak, P.P. Lewicki, Infrared drying of apple slices, Innovative Food Science & Emerging Techonologies, 5 (2004), 353-360.
- [10] J. Wang, K.C. Sheng, Modeling of multi-layer far-infrared dryer, Drying Technology, 22 (2004), 809-820.

- [11] A. Alem-Rajabi, F.C. Lai, EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads, *Drying Technology*, 23 (1995), 597-609.
- [12] F.C. Lai, K.W. Lai, EHD-Enhanced drying with wire electrode, *Drying Technology*, 20(7) (2002), 1393-1405.
- [13] T.I.J. Goodenough, P.W. Goodenough, S.M. Goodenough, The efficiency of corona wind drying and its application to the food industry, *J. Food Eng.*, 80 (2007), 1233-1238.
- [14] A. Yabe, Y. Mori, K. Hijikata, Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields, *Annual Reviews of Heat Transfer*, 7 (1996), 193-244.
- [15] E. Schöder, A. Class, L. Krebs, Measurements of heat transfer between particles and gas in packed bed at low to medium Reynolds numbers, *Exp. Therm Fluid Sci.* 30 (2006), 545-558.
- [16] K. Aoki, M. Hattori, M. Kitamura, N. Shiraishi, Characteristics of heat transport in porous media with water infiltration, *ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings*, 4 (1991), 303-308.

Caption figures

Fig. 1 Idea of enhancement of heat and mass transfer with corona wind.

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

Fig. 3 Dimensions of packed bed and locations of electrodes.

Fig. 4 Configuration of packed bed: (a) and (b) Single layer, (c) F–C layer, and
(d) C–F layer.

Fig. 5 Motion of air flow: (a) without electric fields, and (b) with electric fields at $V = 10$ kV.

Fig. 6 Surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

Fig. 7 Temperature of packed bed with 0.125-mm bead at $z = 4$ cm.

Fig. 8 Enhancement of heat transfer coefficient in case of packed bed with 0.125-mm bead.

Fig. 9 Comparison on water saturation of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

Fig. 10 Enhancement of rate of mass transfer in case of packed bed with 0.125-mm bead.

Fig. 11 Temperature of packed bead with 0.38-mm bead in various voltages at $z = 0$ and 4 cm.

Fig. 12 Comparison on surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bead with 0.38-mm and 0.125-mm beads.

Fig. 13 Comparison on saturation in packed bead with different glass bead sizes.

Fig. 14 Comparison on drying rate in packed bead with different glass bead sizes.

Fig. 15 Temperature in F-C packed bed when $V = 15$ kV.

Fig. 16 Temperature at $z = 0$ cm in F-C packed bed in various voltages.

Fig. 17 Temperature in C-F packed bed when $V = 15$ kV.

Fig. 18 Temperature at $z = 0$ cm in C-F packed bed in various voltages.

Fig. 19 Comparison on moisture content in double-layer packed bed in various cases.

Table

Table 1 Testing conditions

Table 2 Characteristics of water transport in porous media.

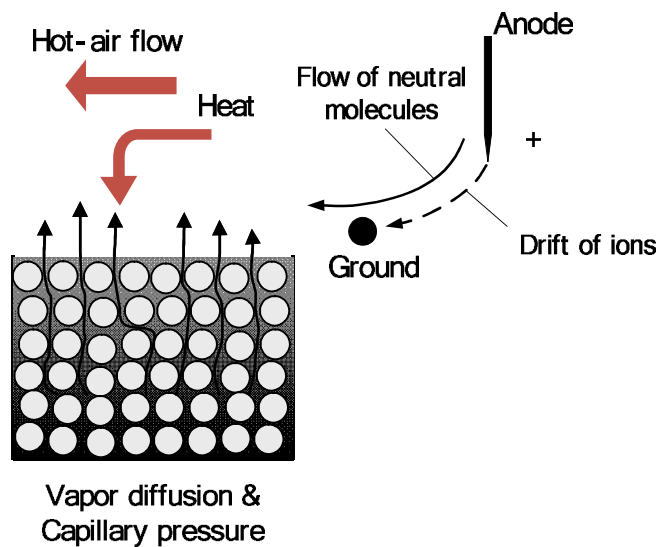


Fig. 1 Idea of enhancement of heat and mass transfer with corona wind.

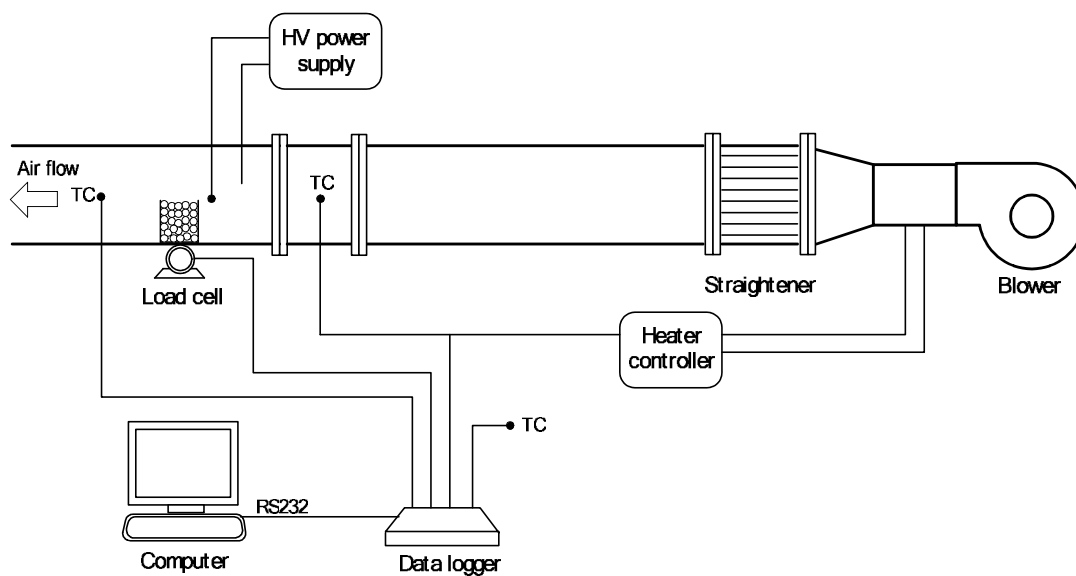


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

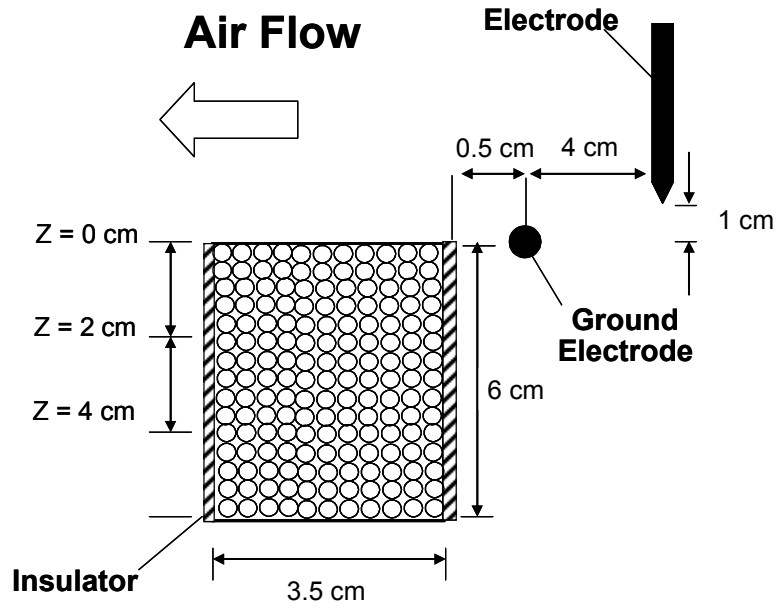


Fig. 3 Dimensions of packed bed and locations of electrodes.

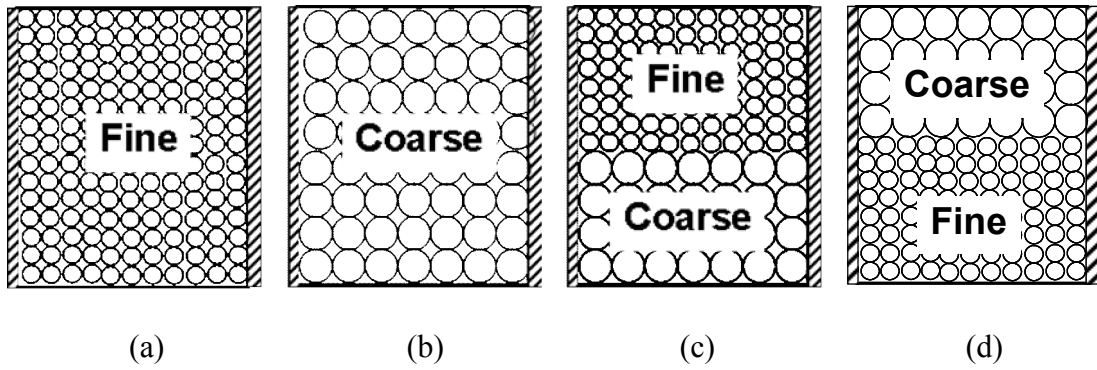


Fig. 4 Configuration of packed bed: (a) and (b) Single layer, (c) F-C layer, and (d) C-F layer.

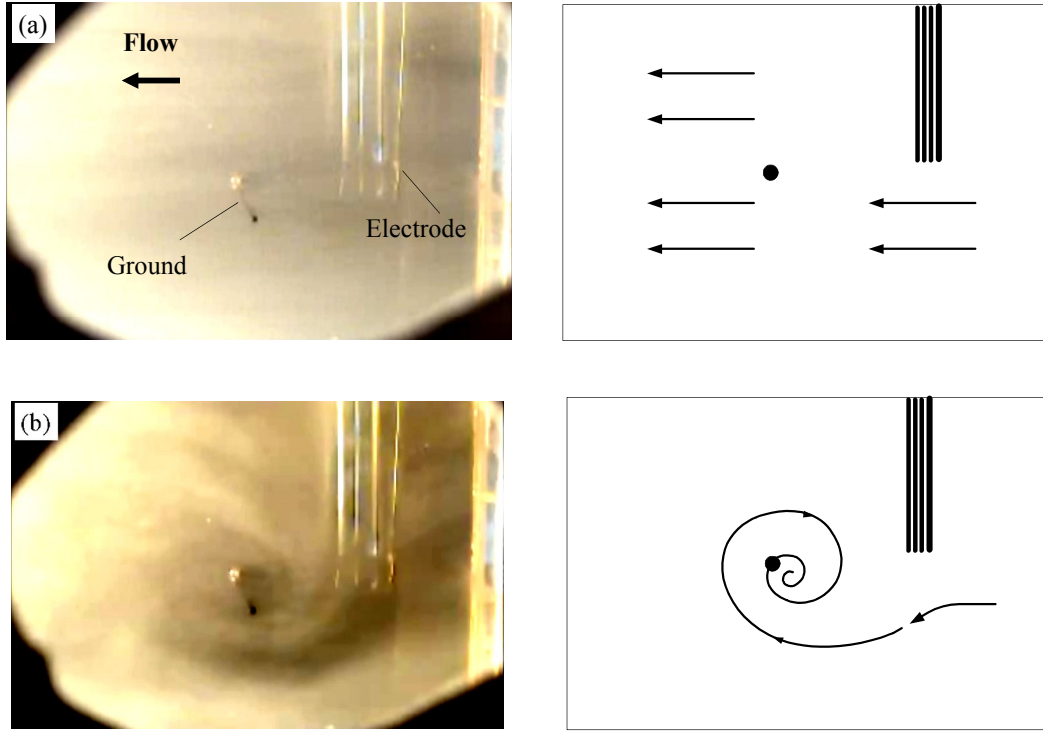


Fig. 5 Motion of air flow: (a) without electric fields, and (b) with electric fields at $V = 10$ kV.

Table 1 Testing conditions

Condition	Symbol	Value
Initial moisture	$X_{db,i}$	22 – 38 %db
Drying temperature	T	50 – 60 °C
Ambient temperature	T_a	25 °C
Mean air velocity	U_b	0.33 m/s
Applied voltage	V	0, 10, 15 kV
Drying time	t	24 - 48 hr
Glass beads	d	0.125, 0.38 mm

Table 2 Characteristics of water transport in porous media.

Diameter, d	Porosity, ϕ	Permeability, K
(mm)		(m^2)
0.125	~ 0.385	~ 8.41×10^{-12}
0.38	~ 0.371	~ 3.52×10^{-11}

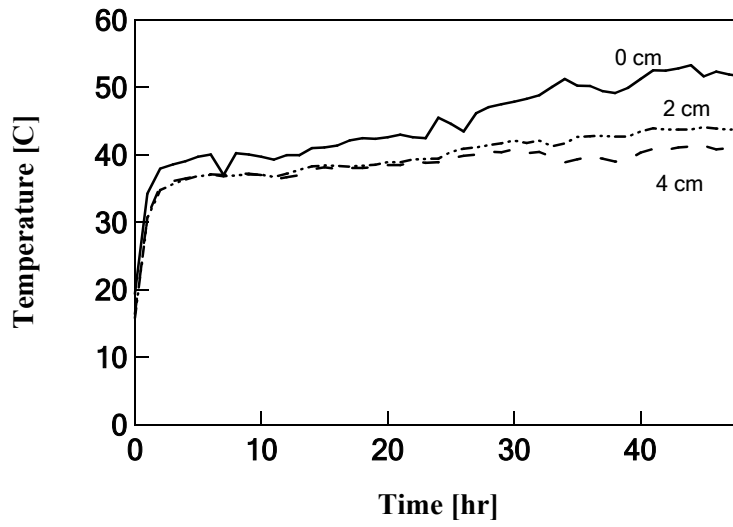


Fig. 6 Surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

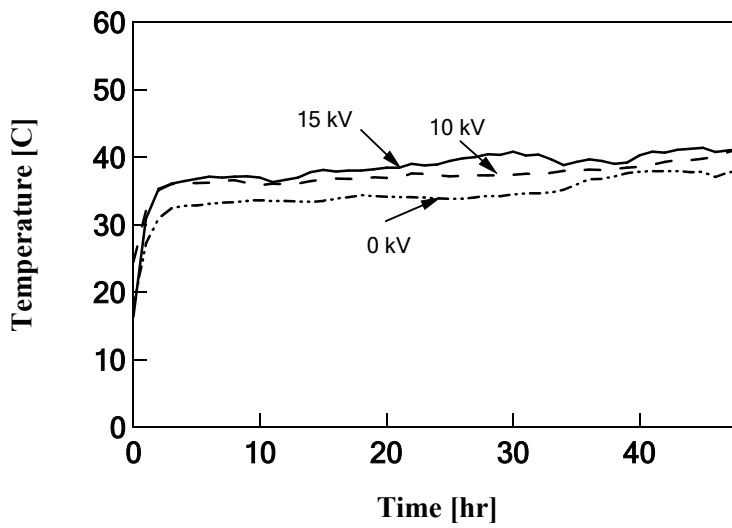


Fig. 7 Temperature of packed bed with 0.125-mm bead at $z = 4$ cm.

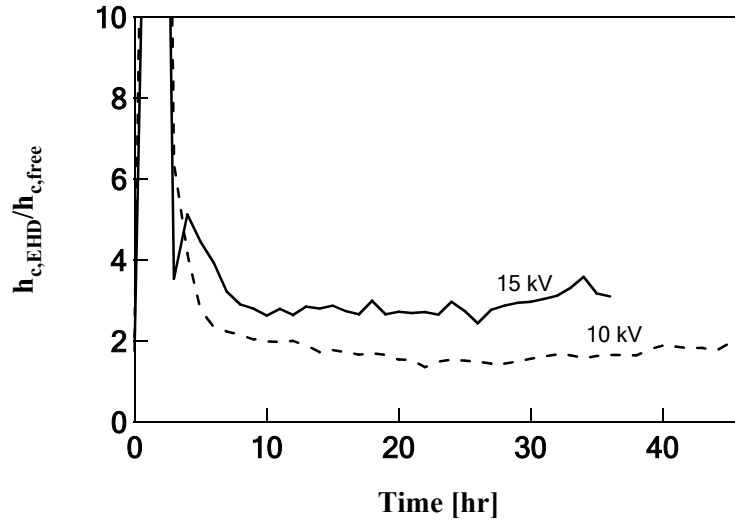


Fig. 8 Enhancement of heat transfer coefficient in case of packed bed with 0.125-mm bead.

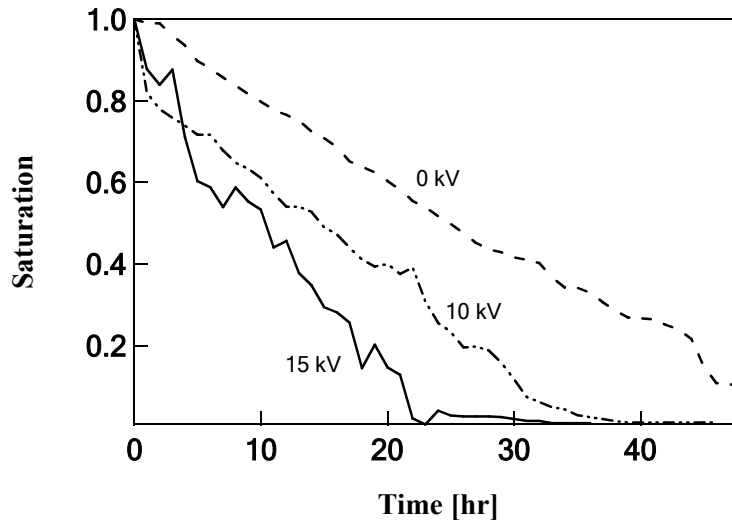


Fig. 9 Comparison on water saturation of packed bed with 0.125-mm bead in various voltages.

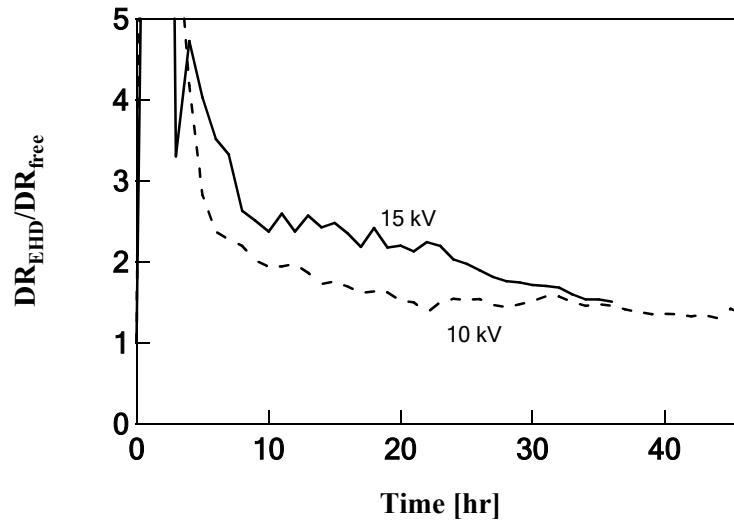


Fig. 10 Enhancement of rate of mass transfer in case of packed bed with 0.125-mm bead.

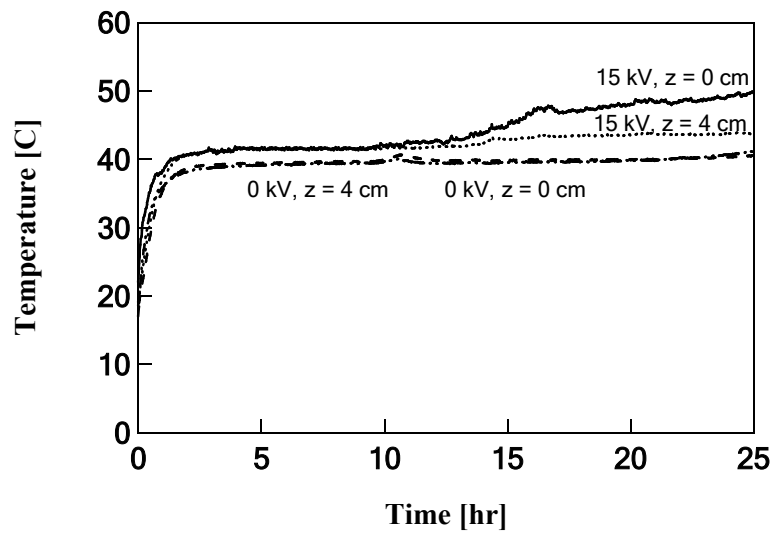


Fig. 11 Temperature of packed bead with 0.38-mm bead in various voltages at $z = 0$ and 4 cm.

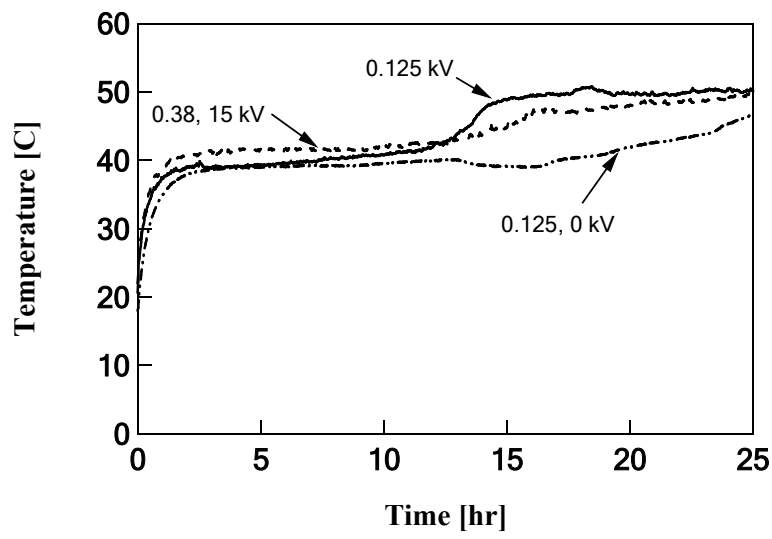


Fig. 12 Comparison on surface temperature ($z = 0$ cm) of packed bead with 0.38-mm and 0.125-mm beads.

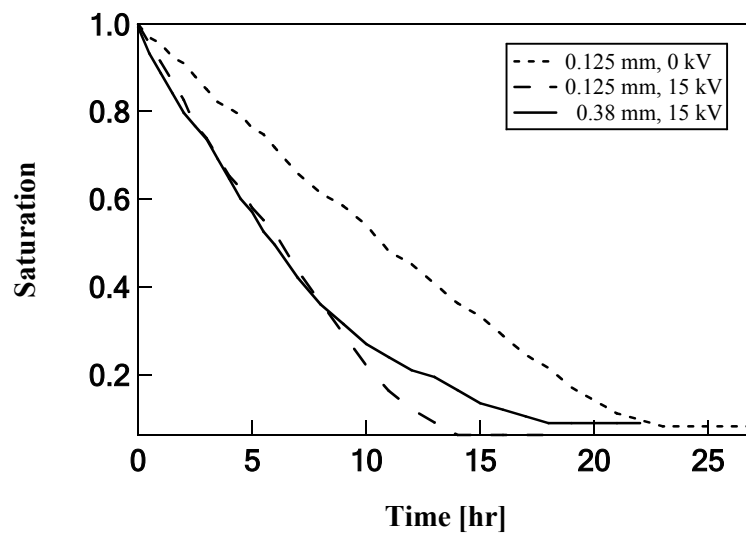


Fig. 13 Comparison on saturation in packed bead with different glass bead sizes.

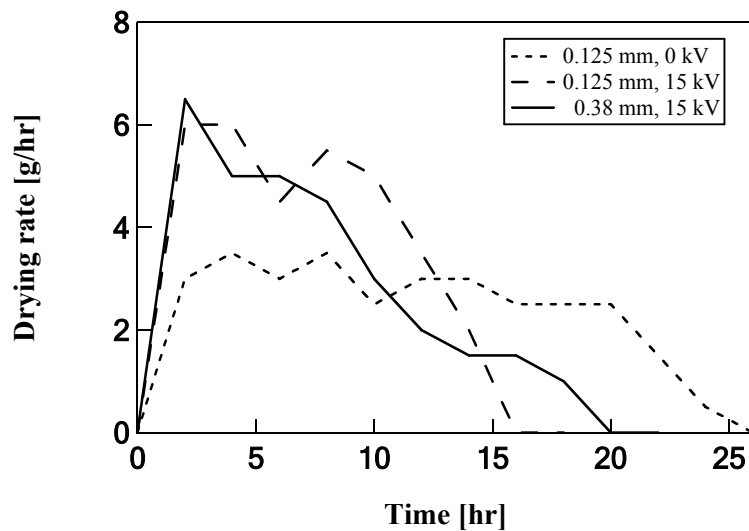


Fig. 14 Comparison on drying rate in packed bead with different glass bead sizes.

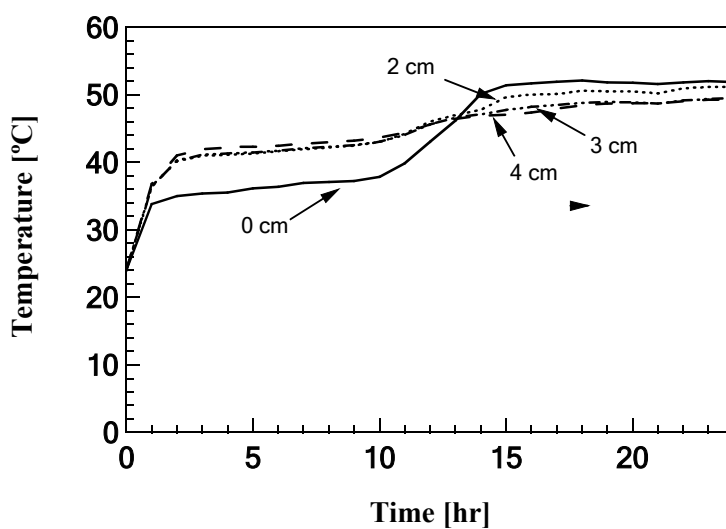


Fig. 15 Temperature in F-C packed bed when $V = 15$ kV.

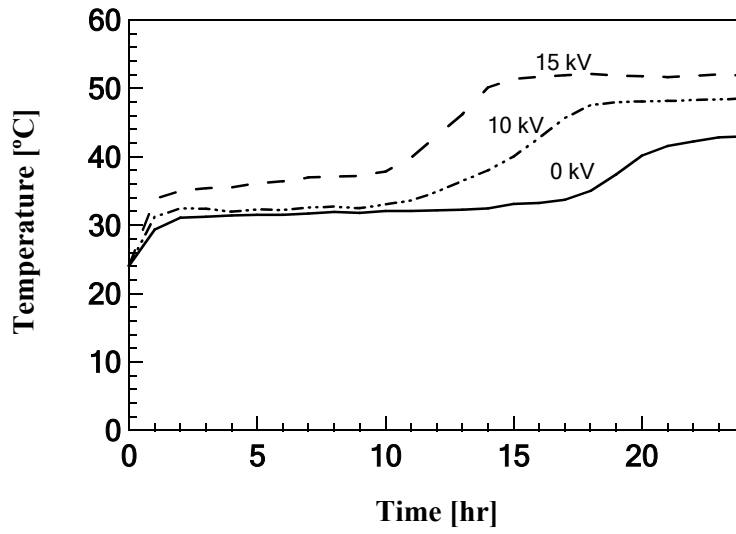


Fig. 16 Temperature at $z = 0$ cm in F-C packed bed in various voltages.

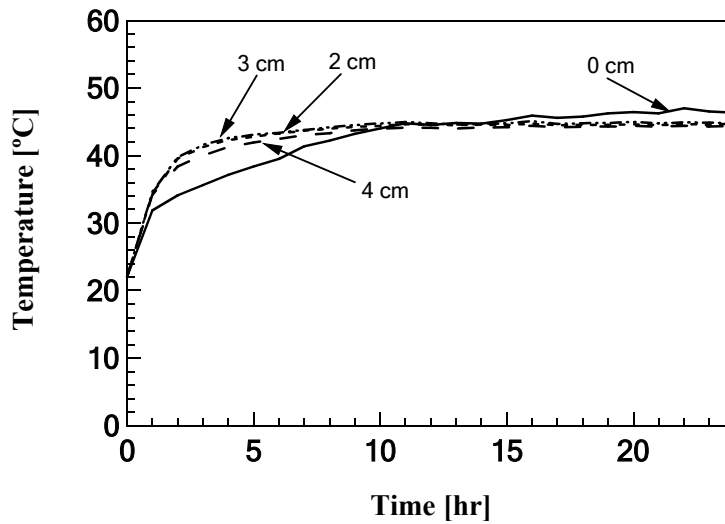


Fig. 17 Temperature in C-F packed bed when $V = 15$ kV.

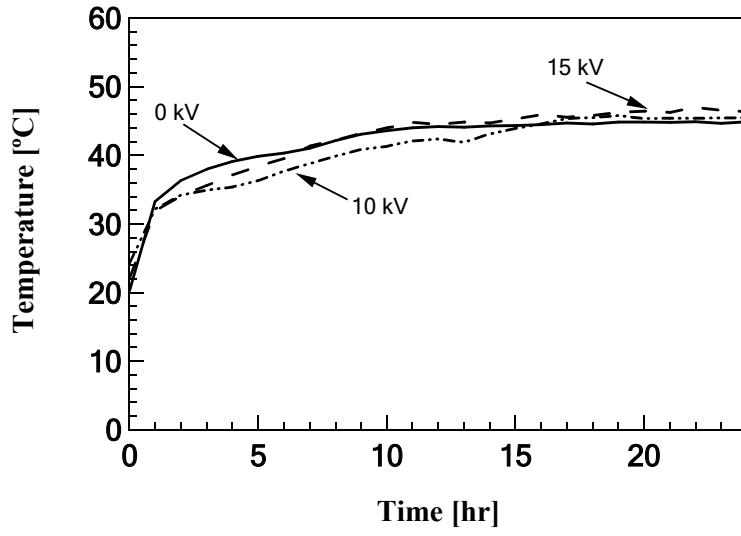


Fig. 18 Temperature at $z = 0$ cm in C-F packed bed in various voltages.

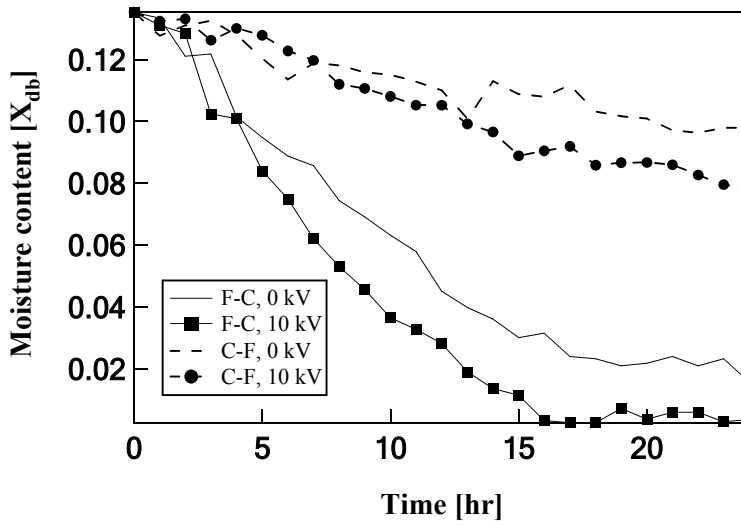


Fig. 19 Comparison on moisture content in double-layer packed bed in various cases.