

## 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](mailto:cchainar@engr.tu.ac.th)

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต  
อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121  
[ratphadu@engr.tu.ac.th](mailto:ratphadu@engr.tu.ac.th)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) เพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อน ในการทดลองวัสดุที่ถูกอบแห้งถูกจำลองด้วยแพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มม. ซึ่งเป็นแพคเกจแบบ 1 ชั้น (One-layered packed bed) และแพคเกจ 2 ชั้น (Double-layered packed bed) ซึ่งแบ่งเป็นกรณีแพคเกจแบบ F-C และ แพคเกจแบบ C-F และจะศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความชื้นและต่ออุณหภูมิภายในชุดแพคเกจ สนามไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบจะถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลม ค่าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 0 – 15 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) เหนือแพคเกจ และตำแหน่งการวางชั้นของลูกแก้วในแพคเกจ ด้วยการวางลูกแก้วขนาดเล็กเหนือชั้นของลูกแก้วขนาดใหญ่ (F-C layer) จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการวางชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่เหนือชั้นลูกแก้วขนาดเล็ก (C-F layer) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันคาปิลลารี (Capillary pressure) ที่แตกต่างกันของชั้นแพคเกจ

### 1. บทนำ

การอบแห้งเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ 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) และทำการศึกษอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในแพคเกจ (Packed bed) ในการทดลองลวดและแผ่นโลหะที่ทำจากทองแดงถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างของแพคเกจตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการการอบแห้งขึ้นกับความชื้นของสนามไฟฟ้าและความเร็วของอากาศซึ่งไหลในทิศทางขวาง (Cross flow) กับทิศของสนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ใช้ นอกจากนี้อิทธิพลของโคโรนาวินด์ (Corona wind) จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้น

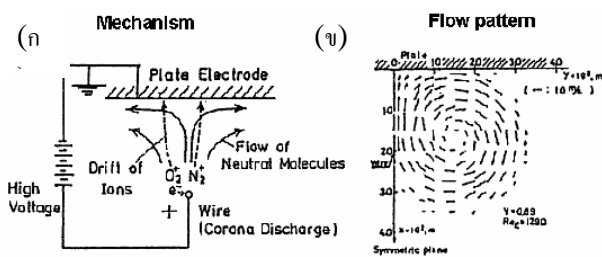
Ratanadecho และคณะ [6] ทำการศึกษาการอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยวิธีทดลองและโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วัสดุที่ทำการศึกษาคือวัสดุที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated material) และความพรุน (Porosity) ของวัสดุมีค่าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของความชื้น (Moisture content) ในวัสดุพรุนต่อกลไกของการแพร่ของไอน้ำ (Vapor diffusion) และอิทธิพลของการไหลแบบแคปิลลารี (Capillary flow) ภายในแพคเกจเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟ Ratanadecho และคณะ [5] พบว่า แพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้แรงคาปิลลารีที่สูงกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าแพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นมี Ratanadecho และคณะ [5] เท่านั้นที่ได้ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแพคเกจ แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมทำให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน กล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟทำให้ความร้อนเกิดขึ้นจากภายในแพคเกจและความร้อนจะไหลจากภายในแพคเกจออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนเข้าสู่แพคเกจ

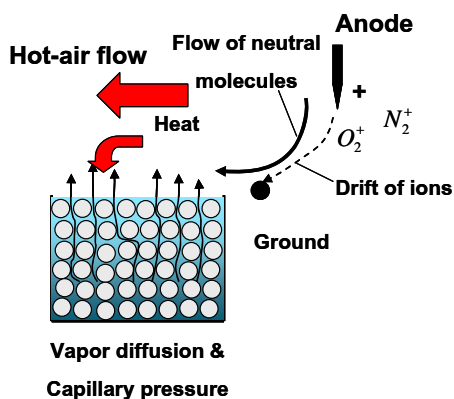
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนของแพคเกจที่เป็นแบบมีความพรุนต่างๆ หนึ่ง (One-layered packed bed) และแพคเกจที่มีความพรุน 2 ค่าที่แตกต่างกัน (Double-layered packed bed) โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่งในแพคเกจ และทำการตรวจสอบค่าอัตราส่วนความชื้นของแพคเกจ ณ เวลาต่างๆ

## 2. หลักการเพิ่มการถ่ายเทมวลด้วยโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์โดยสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายโดยรูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง แล้วไหลไปยังอิเล็กโทรดขั้วบวก อากาศที่อยู่ใกล้ๆ กับผิวของอิเล็กโทรดนี้ถูกไอออไนซ์ (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 กลไกการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้งโดยใช้โคโรนาวินด์

รูปที่ 2 แสดงแนวคิดของการนำปรากฏการณ์โคโรนาวินด์มาใช้เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพอรุน เมื่อลมร้อนไหลผ่านสนามไฟฟ้า อากาศร้อนบางส่วนจะถูกไอออไนซ์แล้วอากาศส่วนที่อยู่รอบๆ จะถูกทำให้หมุนวน และอากาศที่หมุนวนนี้มีผลทำให้ชั้นของบาวดาร์เรย์เลอร์ (Boundary layer) ที่อยู่ผิวด้านบนของแพคเกจมีอิทธิพลน้อยลงซึ่งทำให้ความชื้นที่ผิวของแพคเกจเกิดการถ่ายเทไป

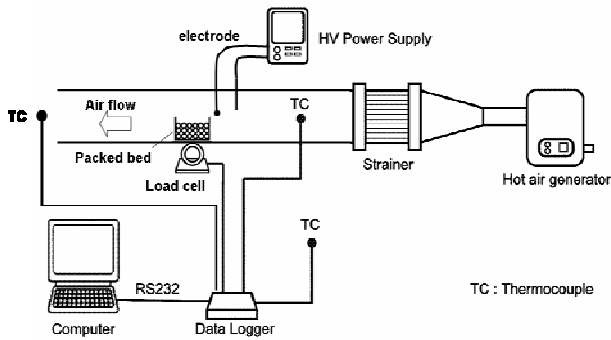
ยังอากาศร้อนเร็วขึ้นและยังทำให้ความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายเทเข้ามายังแพคเกจได้เร็วขึ้น

## 3. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

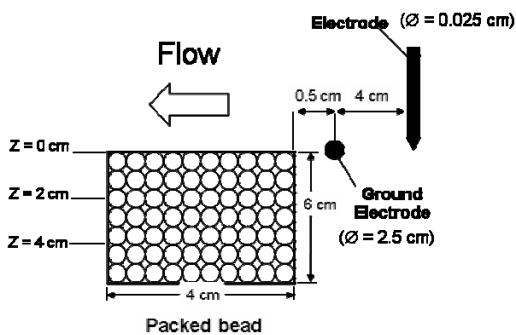
รูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบของงานวิจัยนี้ กระแสลมจากพัดลมไหลผ่านอุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel) ซึ่งมีขนาดหน้าตัด  $15 \times 15$  ตร.ซม. แล้วถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเครื่องสร้างลมร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดผ่านอากาศไปยังกราวด์อิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดที่จากลวดทองแดง 4 เส้นที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม และลวดอิเล็กโทรดแต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 มม. ส่วนกราวด์อิเล็กโทรดถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้ๆ กับแพคเกจและในทิศทางที่ขวางกับทิศการไหลของกระแสลม ดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิของกระแสลมถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple type K, TC) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบไว้ให้คงที่ที่ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  น้ำหนักของความชื้นภายในแพคเกจที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซล (Load cell)

กล่องแพคเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นอะคริลิค (Acrylic plate) ความหนา 0.5 มม. ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเกจ ซึ่งมีขนาด 4 ซม. กว้าง  $\times$  12 ซม. ยาว  $\times$  6 ซม. สูง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพคเกจ ลวดไฟเบอร์ออปติค (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. (วัดจากผิวด้านบนเล็กน้อยไปในแพคเกจ) ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของกระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเกจ และน้ำหนักของแพคเกจ ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Datataker DT505)

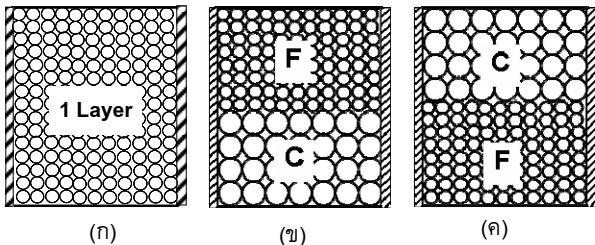
ในการทดลองความเร็วเฉลี่ยของกระแสลม ( $U_b$ ) มีค่า 0.35 เมตรต่อวินาที และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้มีค่า 15 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นแรงดันที่ไม่ทำให้เกิดสปาร์คของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) และลักษณะของแพคเกจที่ใช้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ 1. หนึ่งเลเยอร์แพคเกจ (แพคเกจที่บรรจุลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียว)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



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 4 ขนาดของแพคเบดและตำแหน่งของอิเล็กโทรด



รูปที่ 5 แผนภาพแพคเบดแบบต่างๆ (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, $\phi$	Permeability, K ( $m^2$ )
0.125	~ 0.385	~ $8.41 \times 10^{-12}$
0.38	~ 0.371	~ $3.52 \times 10^{-11}$

ตารางที่ 2. คุณลักษณะของความพรุน (Porosity) ในแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดต่างๆ

#### 4. สมการ

ค่าอัตราส่วนความชื้นโดยฐานแห้ง (Moisture content with dry based) ของแพคเบดหาได้จาก

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

ที่ซึ่ง  $m_{water}$  คือ มวลของน้ำในแพคเบด และ  $m_{bead}$  คือ มวลของลูกแก้วที่บรรจุในแพคเบด

ค่าความอิ่มตัว (Saturation) ของแพคเบดหาได้จาก

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

ที่ซึ่ง  $\rho_l$  คือความหนาแน่นของน้ำ และ  $V_B$  คือปริมาตรของแพคเบด

#### 5. ผลการทดลองและวิจารณ์

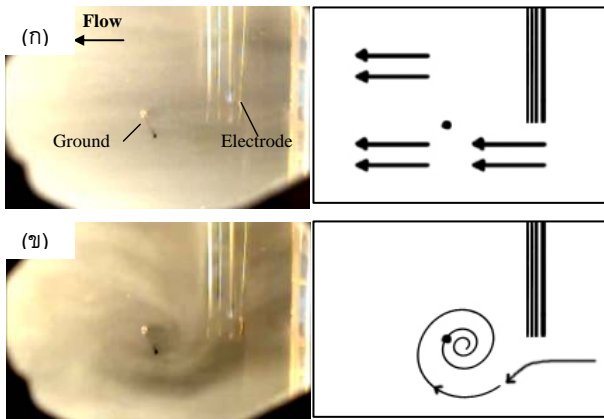
ในการทดลองอุณหภูมิภายในแพคเบดอยู่ในสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิของของแข็ง ก๊าซ และของเหลวถือว่ามีความเท่ากัน และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ใช้ทดสอบมีค่าประมาณ 2,600 ( $Re = \rho_a U_b D_h / \mu_a$  ซึ่ง  $\rho_a$  คือความหนาแน่น  $D_h$  เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ และ  $\mu_a$  คือค่าความหนืด)

##### 5.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ

เพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคควีนรูบ โดยแสงจากสปอตไลท์ขนาด 500 วัตต์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ทางออกของชุดทดสอบถูกส่องเข้ามาในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของอากาศ แต่เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงเกินกว่าที่จะถ่ายภาพของควีนรูบได้ชัดเจน ดังนั้นเราจึงทำการลดความเร็วของอากาศลงมาที่ 0.1 เมตรต่อวินาที แล้วใช้กล้องวิดีโอ ดิจิตอล (SONY DCR-PC108/PC109E) จับภาพต่อเนื่องการเคลื่อนที่ของควีนรูบ

จากรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศกรณีที่ไม่มีความดันไฟฟ้าและกรณีที่มีสนามไฟฟ้า โดยในกรณีที่ไม่มีความดันไฟฟ้าอากาศมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบตามแนวท่อดูดซับ ส่วนกรณีที่มีสนามไฟฟ้าสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าอากาศเกิดการหมุนวนในทิศตามเข็มนาฬิกา และศูนย์กลางของการหมุนเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งระหว่างอิเล็กโทรดกับกราวด์ แต่อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีแล้วควรเกิดวอร์เทค 2 ลูกที่สมมาตรกัน แต่ในการทดลองนี้ไม่พบการเกิดการหมุนของวอร์เทค (Vortex) อีกหนึ่งลูกซึ่ง

ควรเกิดขึ้นและหมุนในทิศทางตรงข้ามกับวอร์เทคูลแรก ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าตำแหน่งของกราวด์ก่อนมาทางด้านล่างของท่อทดสอบและมีระยะเยื้องในแนวตั้งระหว่างกราวด์และอิเล็กโทรด ซึ่งอาจทำให้ประจุจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่เยื้องลงมาที่กราวด์ อีกทั้งการหมุนวนของวอร์เทคส่วนที่สังเกตได้มีทิศทางตรงข้ามกับการไหลของอากาศ



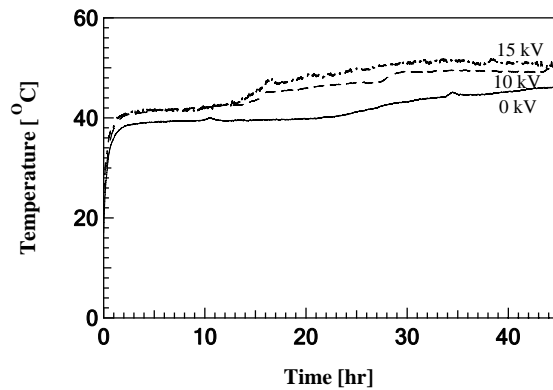
รูปที่ 6 รูปการเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณอิเล็กโทรด (ก) ไม่สนามไฟฟ้า และ (ข) เมื่อใช้สนามไฟฟ้าขนาด 10 kV

## 5.2 การอบแห้งโดยใช้แพคเบด 1 ชั้น

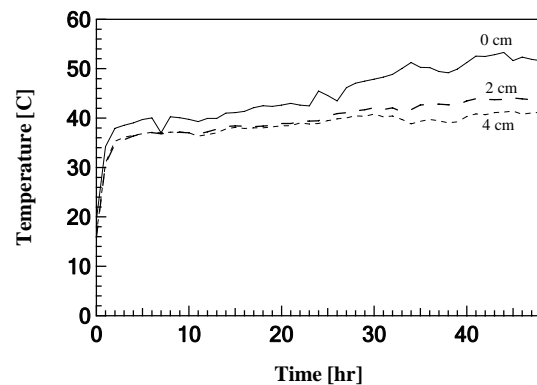
ในการตรวจสอบการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความชื้นในแพคเบดแบบ 1 ชั้น กำหนดให้ค่าความอิ่มตัว (Saturation,  $s$ ) ของวัสดุพรุนมีค่าเท่ากับ 1 และเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 48 ชั่วโมง และเพื่อทดสอบว่าผลของความร้อนที่เกิดจากลวดอิเล็กโทรด (Joule heating effect) ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของแพคเบด ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิของลวดอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิของลวดอิเล็กโทรดมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิของอากาศมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแพคเบดจะเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบดมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่ากรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ขนาดสนามไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะขนาดความแรงโคโรนาวินด์ตามแปรผันตามขนาดของสนามไฟฟ้า

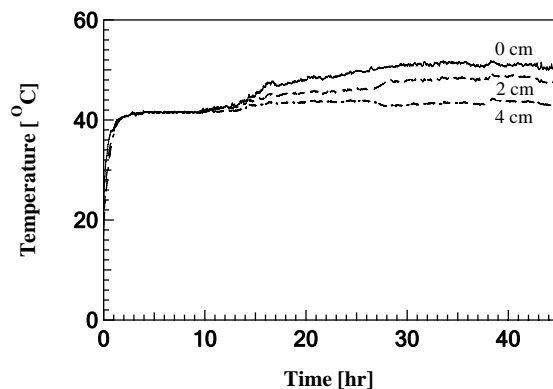
จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่า อุณหภูมิที่ผิวของแพคเบดจะสูงขึ้นเร็วกว่าส่วนที่อยู่ด้านในแพคเบด และแพคเบดที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วกว่าที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ ซึ่งทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากผลของแรงดันคาปิลารี (Capillary pressure) ซึ่งจะอธิบายกลไกนี้ต่อไป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแพคเบดที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ลูกแก้วขนาด 0.38 มม.



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



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

การเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลจากความชื้นในแพคเบดไปสู่อากาศร้อนโดยโคโรนาวินด์ถูกตรวจสอบผ่านการวัดปริมาณน้ำหนักของแพคเบดที่ลดลง หรืออัตราส่วนความชื้นของ แพคเบด (Moisture content in packed bed) ที่ ณ เวลาต่างๆ

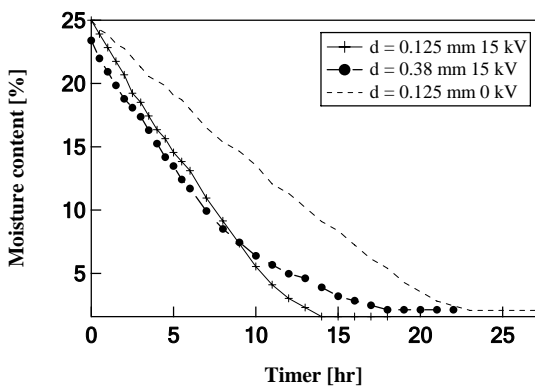
รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอัตราการความชื้นที่ลดลงหรืออัตราการอบแห้งมีค่าสูงเร็วกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า

ประมาณ 1.8 เท่า ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุพูน และ แพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กมีอัตราการอบแห้งสูงกว่า แพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ประมาณ 1.4 เท่า ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันคาปิลารี โดยทางทฤษฎีแล้ว แพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าความพูน (ดังตารางที่ 2) มากกว่า แพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่ ซึ่งความดันคาปิลารีเป็นฟังก์ชันของค่าความพูน [5, 7]

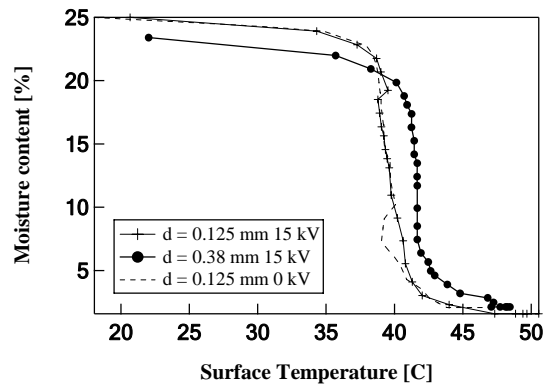
$$p_c = p_g - p_l = \frac{\sigma}{(K/\phi)} J(s_e) \quad (3)$$

ที่ซึ่ง  $p_g$  และ  $p_l$  คือ ค่าความดันของก๊าซและของเหลวในแพลกเก็ต  $\sigma$  คือ ค่าความตึงผิว และ  $J(s_e)$  คือ ฟังก์ชันริเวอร์ (Levertt function) ซึ่งขึ้นกับค่าความอิ่มตัวของวัสดุพูน จากสมการที่ (3) ถ้าหาก  $(\sigma J(s_e))_{small\ bead} \sim (\sigma J(s_e))_{small\ bid}$  แล้ว  $P_{c,small\ bead} > P_{c, big\ bead}$  ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่มีความพูนสูงจะมีค่าแรงดันคาปิลารีสูงกว่าวัสดุที่มีความพูนต่ำกว่า ซึ่งส่งผลทำให้ความชื้นสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 11 พบว่าที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะค่าอัตราส่วนความชื้นของแพลกเก็ตมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งเกิดเนื่องจากการระเหย (Evaporation) อย่างมากที่ผิวของแพลกเก็ต และเรียกช่วงของปรากฏการณ์นี้ว่า ช่วงการทำให้แห้ง (Drying period or evaporating period) เมื่ออุณหภูมิภายในของแพลกเก็ตมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนจะถูกใช้ไปกับความร้อนแฝงเพื่อทำให้น้ำที่ผิวหน้าของแพลกเก็ตกลายเป็นไอ และเมื่อน้ำส่วนใหญ่ที่ผิวหน้าของแพลกเก็ตระเหยไปจะเกิดความแห้งขึ้นบางส่วนที่ผิวหน้าของแพลกเก็ต ช่วงการอบแห้งนี้เรียกว่าช่วงของการตก (Falling period) นอกจากนี้ในช่วงดังกล่าวนี้อิทธิพลของแรงดันคาปิลารีจะมีค่ามากขึ้นทำให้ความชื้นที่ยังคงอยู่ในแพลกเก็ตสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้อีก ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมแพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดเล็กจึงมีอัตราส่วนความชื้นเหลือน้อยกว่าแพลกเก็ตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการอบแห้งเท่ากัน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างลูกแก้วขนาดต่างๆ

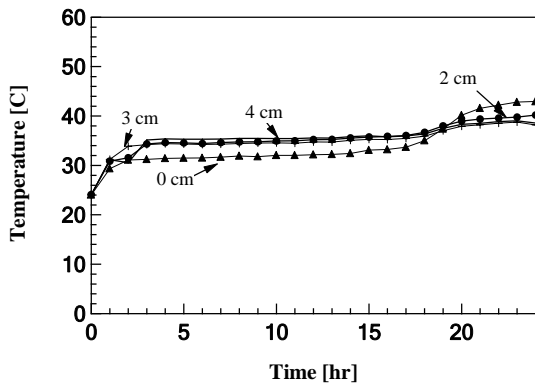
## 5.2 การอบแห้งโดยใช้แพลกเก็ต 2 ชั้น

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

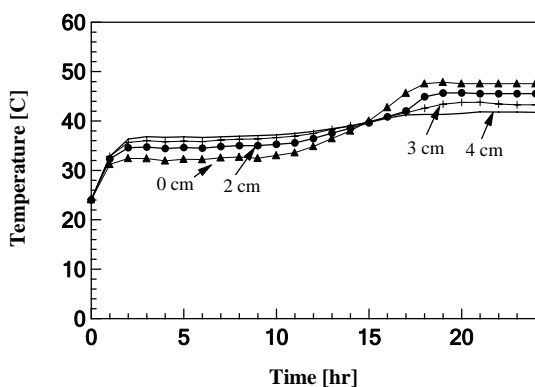
จากรูปที่ 12 13 และ 15 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพลกเก็ตแบบ 2 ชั้น มีลักษณะแตกต่างจากในแพลกเก็ตแบบ 1 ชั้น อย่างเห็นได้ชัด ในช่วงที่มีการระเหย (อุณหภูมิประมาณคงที่) อุณหภูมิที่ผิวบนแพลกเก็ตมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิผิวส่วนอื่นๆ และกลับมามีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าบริเวณอื่นๆ ในแพลกเก็ตหลังจากผ่านช่วงการระเหยไปแล้ว ส่วนรูปที่ 14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแพลกเก็ตกลับมีลักษณะคล้ายกับในแพลกเก็ตแบบ 1 ชั้น ทั้งนี้เป็นเพราะผลของแรงดันคาปิลารี จากที่อธิบายมาข้างต้นวัสดุที่มีความพูนมากโดยทั่วไปจะมีแรงดันคาปิลารีมากกว่าวัสดุพูนที่มีความพูนน้อย ดังนั้นเมื่อลูกแก้วขนาดเล็กถูกวางอยู่บนลูกแก้วขนาดใหญ่ อิทธิพลของแรงดันคาปิลารีจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นบนไหลไปสู่ที่ผิวมากซึ่งเป็นผลทำให้ความชื้นที่อยู่ในส่วนชั้นด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ที่ผิวได้ง่ายขึ้น ดังนั้นทำให้ปริมาณความชื้นส่วนใหญ่ถูกใช้ไปสำหรับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ สำหรับในกรณี C-F เนื่องจากความดันคาปิลารีมีค่าน้อย ความชื้นในส่วนชั้นลูกแก้วขนาดใหญ่ไม่สามารถไหลไปสู่ที่ผิวหน้าเพื่อทำให้เกิดการระเหยได้เร็ว และถึงแม้ว่าค่าความดันคาปิลารีของชั้นลูกแก้วขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่า แต่ความชื้นไม่สามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้ทำให้ความชื้นถูกสะสมอยู่ในส่วนของชั้นด้านบนซึ่งมีลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่ ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพลกเก็ตจะมีค่าพอๆ กัน

รูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนและแพลกเก็ตดีขึ้น โดยรูปที่ 16 ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของแพลกเก็ต ( $z = 0$  cm) ซึ่งพบว่า ในกรณี C-F แพลกเก็ตการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแพลกเก็ตสูงขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นส่วนใหญ่ถูก

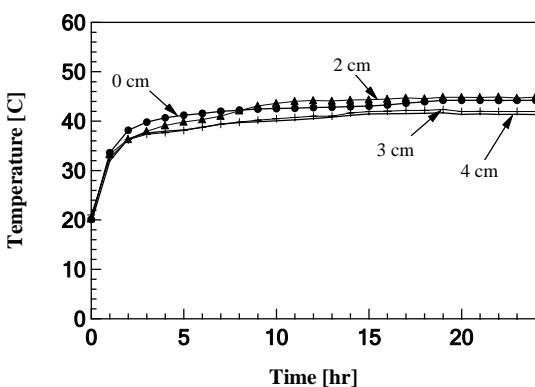
กันอยู่ในส่วนของชั้นด้านบน ส่วนในกรณี F-C แพคเกจการใช้สนามไฟฟ้าทำให้ความชื้นที่ผิวสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนไปเร็วขึ้น ซึ่งเป็นทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากช่วงการระเหย



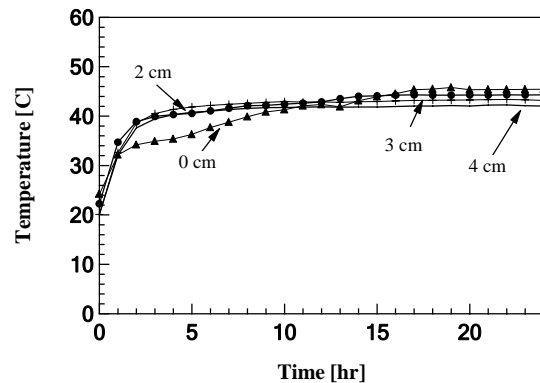
รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ  $V = 0$  kV



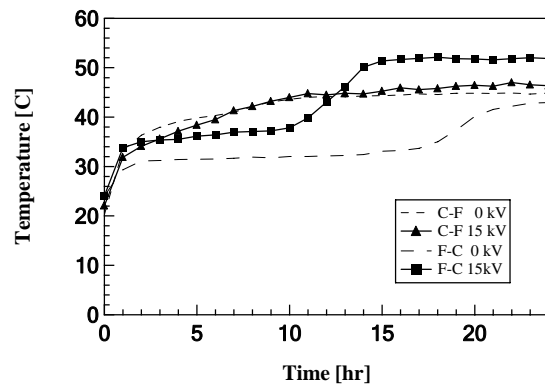
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ F-C เมื่อ  $V = 10$  kV



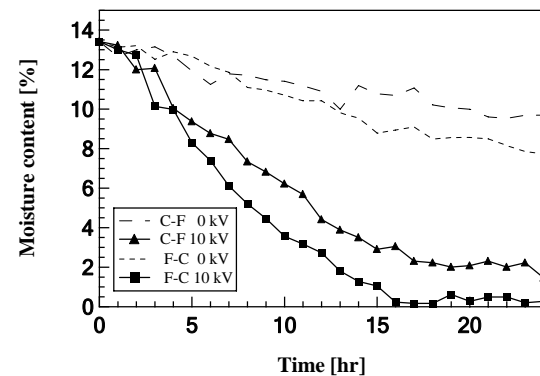
รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเกจแบบ C-F เมื่อ  $V = 0$  kV



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 โดยใช้อิทธิพลของโคโรนา วินด์ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

ด้วยอิทธิพลของโคโรนาวินด์ทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าของแพคเบตสามารถระเหยไปสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิภายในของแพคเบตมีค่าสูงเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และอัตราการอบแห้งแปรผันตามขนาดสนามไฟฟ้าที่ใช้

ในกรณีของแพคเบตแบบ 1 ชั้น วัสดุที่มีความพูนมากกว่าจะเกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนได้ดีกว่าวัสดุที่มีความพูนน้อยกว่า ซึ่งเป็นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงดันคาปิลารีที่ไม่เท่ากัน และในการทดลองพบว่าสนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้ง 1.4 และ 1.8 เท่า สำหรับกรณีแพคเบตที่บรรจุลูกแก้วขนาดใหญ่และบรรจุลูกแก้วขนาดเล็กตามลำดับ

ในกรณีของแพคเบตแบบ 2 ชั้น ด้วยผลของแรงดันคาปิลารีที่ไม่เท่ากันทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นไปสู่ผิวมีปริมาณต่างกัน โดยกรณีแพคเบตแบบ F-C จะให้ผลอัตราการอบแห้งเร็วกว่าแพคเบตแบบ C-F ประมาณ 1.5 เท่าและ 1.7 เท่าสำหรับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า และใช้สนามไฟฟ้าตามลำดับ และการใช้สนามไฟฟ้าทำให้อัตราการอบแห้งของแพคเบต 2 ชั้นค่าสูงชันมากกว่า 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.