

การวิเคราะห์การถ่ายเทมวลและความร้อนในเตาวัสดุพูน แบบไม่อิ่มตัวภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า สำหรับหม้อสนามทหาร

Analysis of Mass and Heat Transfer in Unsaturated Porous Packed-Bed under The Influence of Electrohydrodynamics (EHD) for Military Field Pot

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกักเก็บและถ่ายเทความร้อนในเตาที่มีการจัดวางของเม็ดทรายแก้วในรูปแบบต่างๆ โดยศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในเม็ดทรายแก้วซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัว พลังงานความร้อนจากเตาขนาด 1,000 วัตต์ โดยหม้อสนามทหารที่ใช้เป็นขนาดมาตรฐาน 1 ลิตร จากผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ไม่มีเม็ดทรายแก้ว การถ่ายโอนความร้อนจากเตาเกิดได้รวดเร็ว โดยสังเกตจากอุณหภูมิสุดท้ายของการให้ความร้อน รองลงมาเป็นกรณีที่มีการจัดเรียงของเม็ดทรายแก้วแบบ C/F เมื่อหยุดให้ความร้อน พบว่ากรณีที่ไม่มีเม็ดทรายแก้ว อุณหภูมิของน้ำร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกรณีที่ไม่มีเม็ดทรายแก้วที่มีการจัดเรียงรูปแบบต่างๆ อุณหภูมิของน้ำร้อนค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการสะสมความร้อนของเม็ดทรายแก้วโดยกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ C/F อุณหภูมิของน้ำร้อนลดลงช้าที่สุดการศึกษอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัว ใช้แท่งอิเล็กโทรดจำนวน 4 เส้น โดยระยะห่างของอิเล็กโทรดและกราวด์เป็น 2 เซนติเมตร สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้เป็น 15 กิโลโวลต์ ความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนถูกทดสอบที่ 0.35 เมตรต่อวินาที และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาของการทดสอบ 24 ชั่วโมง วัสดุพูนในเตาประกอบด้วยเม็ดทรายแก้ว อากาศ และน้ำที่มีการจัดเรียงแบบ C/F จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของเม็ดทรายแก้วที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.04 เท่า นอกจากนี้ยังทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ทำให้มวลของเม็ดทรายแก้วที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงมากกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.54 เท่า

ABSTRACT

This research aims to enhance heat storage and heat transfer in glass bead with arrangement. Field stove is generated at 1,000 watt. Due to influence on the final temperature distribution in the air case, the conduction and the convection on flow are the best. Moreover, in the glass bead arrangement cases, the conduction and the convection of C/F packed bed case are the best. Afterwards, Field stove is closed; in the air case, temperature is quickly decreased because of no heat storage. In the glass bead arrangement cases, the temperature in C/F packed bed case is still high; the heat storage of C/F case is higher than another case. After that an experimental study on the mass and heat transfer in unsaturated porous packed bed is presented. The number of wire electrodes and longitudinal distance between electrodes and ground wires are specified at 4 and 2 cm, respectively. The packed bed composes of water, air, and glass bead. High electrical voltage is applied at 15 kV. In addition, temperature and velocity of hot air are controlled at 60 and 0.35 m/s, respectively. Each experiment has been investigated for 24 hours. The results show that the influence of Corona wind is flowed above the packed beds, the drying rate is enhanced considerably. With electrical voltage applied, the surface temperature and weight of packed bed are improved about 1.04 and 1.54 times, respectively.

Key Words: Heat storage, Electrohydrodynamics, Drying process, Heat and mass transfer enhancement

1. บทนำ

การประกอบอาหารของทหารในสนามนั้น ปัจจัยที่มีความสำคัญคืออากาศและเชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร อากาศส่วนมากเป็นเตาสนามและหม้อสนามทหารซึ่งโดยทั่วไปมักถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงและทนทาน ซึ่งจะทำให้เกิดการใช้งานของอุปกรณ์ที่ยาวนาน เชื้อเพลิงก็จัดว่ามีความสำคัญ ปริมาณเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนสำหรับการประกอบอาหารจึงควรเหมาะสมและเกิดประโยชน์ได้สูงสุด

การหุงต้มอาหารด้วยหม้อสนามโดยปกติใช้หลักการของการให้ความร้อนที่ได้จากหม้อสนามทำให้เกิดเป็นลมร้อนมาทำการไล่ความชื้นหรือลดค่าความชื้น (Moisture content) ออกจากอาหารที่ปรุงหรือเรียกว่าวิธีการอบแห้ง (Drying process) อันจะทำให้อาหารสุก ซึ่งเป็นกลไกในการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามการอบแห้งใช้เวลานาน เป็นผลให้มีการใช้พลังงานมาก ดังนั้นเพื่อปรับปรุงอัตราการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Conventional method) นักวิจัยหลายกลุ่มจึงมุ่งพัฒนาการอบแห้งแบบดั้งเดิมร่วมกับวิธีการหรือแนวทางอื่นๆ เช่น ไมโครเวฟ (Microwave)¹⁻² อินฟราเรด (Infrared)³⁻⁴ และการใช้สนามไฟฟ้า (Electric fields) (Electrohydrodynamics, EHD)⁵⁻⁶ เพื่อที่จะเพิ่มอัตราการลดความชื้นให้ออกมาจากอาหาร โดยยังคงใช้ปริมาณของความร้อนเท่าเดิม อันจะก่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน

การใช้ไมโครเวฟ (Microwave irradiation) ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงทั้งก้อนของผลิตภัณฑ์ และสร้างความร้อนจากแหล่งความร้อน (Heat source) ในตำแหน่งที่แน่นอน อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้งานค่อนข้างยาก³ ส่วนกระบวนการอบแห้งด้วยอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamic

drying) คือ การให้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงประยุกต์ใช้กับอากาศขนาดใหญ่ เพื่อชักนำให้เกิดการไหลแบบทุติยภูมิ (Secondary flow) หรือการไหลที่มีการหมุนวน (Circulating flow) เรียกว่าโคโรนาวินด์ ผลสุทธิของการเกิดการไหลแบบทุติยภูมิจะเพิ่มการผสมของของไหลและลดความเสถียรของชั้นขีดยึด (Boundary layer) ดังนั้นจะทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficients)⁵

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาวิธีการเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งด้วยการใช้อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ ดังศึกษาได้จากหลายงานวิจัย เช่น Lai และ Sharma⁷ ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราการอบแห้ง โดยใช้ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยการใช้อิเล็กโตรดหนึ่งแถวและหลายแถว จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับความแข็งแรงของโคโรนาวินด์ และอิทธิพลของโคโรนาวินด์จะลดลงเมื่อความเร็วของกระแสอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากอิเล็กโตรดแถวเดียวใช้พลังงานในการถ่ายเทความร้อนและมวลมากกว่าอิเล็กโตรดหลายแถว จึงทำให้เมื่อใช้อิเล็กโตรดแถวเดียวจึงเกิดประสิทธิภาพมากกว่าการใช้อิเล็กโตรดหลายแถว

Chaktranond และ Rattanadecho⁸ ศึกษาการใช้สนามไฟฟ้า เพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้งที่ใช้กระแสลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายไปยังลวดทองแดงซึ่งติดตั้งในแนวตั้งฉากและแนวขวางการไหลของกระแสลมถูกใช้อยู่ในช่วง 0 ถึง 15 กิโลโวลต์ ลูกแก้วที่บรรจุในแพคเกจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 และ 0.38 มิลลิเมตร อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าหน้าตัดทดสอบคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส

และ 0.35 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของโคโรนาวินด์ที่เกิดขึ้นในกระแสลมร้อนเหนือแพดเบดทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการเพิ่มขนาดของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้อุณหภูมิภายในแพดเบดสูงเร็วขึ้น

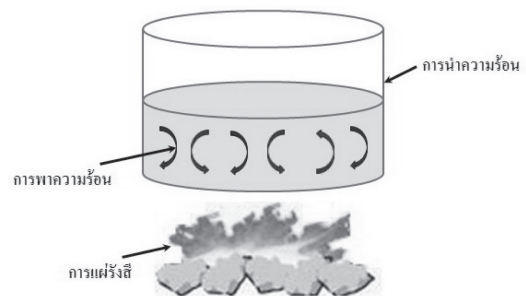
การสะสมความร้อนไว้ในผลิตภัณฑ์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า เนื่องจากการใช้พลังงานเท่าเดิมแต่ทำให้คงความร้อนในผลิตภัณฑ์ที่ยาวนานขึ้น มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาตัวกลางที่เหมาะสมในการกักเก็บความร้อน⁹⁻¹⁰ ใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานความร้อนที่ได้จากการให้ความร้อนแบบธรรมชาติ

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาการถ่ายเทมวลและความร้อนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ร่วมกับวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อน เมื่อหม้อสนามถูกวางบนเตาสนาม ความร้อนจากเตาจะเคลื่อนที่ผ่านผนังหม้อสู่น้ำด้านล่างขึ้นมายังบริเวณผิวน้ำด้านบน อย่างไรก็ตามการพาความร้อนโดยปกติจะไม่มี การเก็บความร้อน ความร้อนเมื่อเคลื่อนที่จนถึงผิวด้านบนบางส่วนจะหายไปกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเม็ดทรายแก้วมาใส่เพื่อใช้เป็นตัวเก็บสะสมความร้อน โดยศึกษาการจัดเรียงของเม็ดทรายแก้วซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุพอร์ซ เพื่อทำการหารูปแบบการจัดเรียงที่เหมาะสม โดยทำการเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีเม็ดทรายแก้ว สุดท้ายจะมีการศึกษาร่วมกับการใช้สนามไฟฟ้า ที่มีจำนวนแท่งอิเล็กโตรดเท่ากับ 4 เส้น และระยะห่างของอิเล็กโตรดกับกราวด์เท่ากับ 2 เซนติเมตร โดยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงทดสอบที่ 15 กิโลโวลต์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือ การถ่ายเทพลังงานระหว่างสองบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน สามารถแบ่งกลไกออกเป็น 3 ชนิด คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนทั้งสามชนิดอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันอย่างแยกไม่ออก ดังแสดงในรูปที่ 1 การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยตัวกลางจากโมเลกุลไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันไปเรื่อยๆ จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ สุดท้ายการแผ่รังสี (Heat radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน

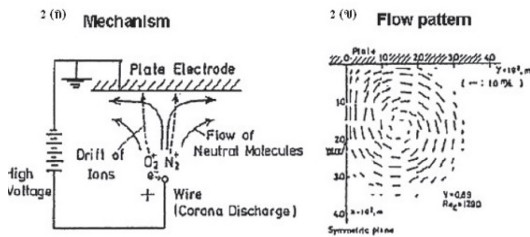


รูปที่ 1 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อน

2.2 ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนาวินด์

กลไกการเกิดโคโรนาวินด์หรือกระแสหมุนวนเกิดจากการเหนี่ยวนำอากาศบริเวณผิวของอิเล็กโตรดขั้วบวกที่ถูกปล่อยกระแสไฟฟ้า โดยอากาศ

นี้จะเคลื่อนไปยังกราวด์อิเล็กโทรด (Ground electrode) ขณะที่อากาศนี้เคลื่อนจะเกิดการชนกับโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลาง (Neutral molecules) ดังรูปที่ 2(ก) ทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum exchange) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ของกระแสหมุนวนหรือโคโรनावินด์ ซึ่งแสดงได้ชัดเจนจากงานวิจัยของ Yabe และคณะ¹¹ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข)



รูปที่ 2 กลไกการเกิดโคโรनावินด์¹¹

ปฏิกริยาระหว่างของไหลและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamic: EHD) ผลของปฏิกริยาทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แรงที่เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า แสดงด้วยสมการ

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

เมื่อเป็นความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ρ คือความหนาแน่นของไหล ϵ คือความซึมซาบของวัสดุ (Dielectric permittivity) T คืออุณหภูมิ และ ρ_c คือความหนาแน่นของประจุ โดยเทอมแรกเป็นแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb force) ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเกิดโคโรनावินด์ เทอมสองเป็นแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริก

(ϵ) และเทอมสามเป็นแรงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.3 สมการความสัมพันธ์

สมการที่ใช้ในการพิจารณาการอบแห้งและทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้จากการหาค่าความอิ่มตัวของน้ำ (Water saturation; S) ของตัวกลางที่เป็นรูพรุน (Porous medium) ของของไหล ให้คำจำกัดความว่า

$$S = \frac{\text{Volume of fluid}}{\text{Total volume of voids}} = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{void}}} \quad (2)$$

ค่าความชื้น (Moisture content; X) ในวัสดุพูนเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลรวมของน้ำ (Total mass of water; M_w) กับมวลรวมของของแข็งแห้ง (Total mass of dry solid; M_s)

$$X = \frac{M_w}{M_s} \quad (3)$$

สมการที่ (2) เขียนในเทอมของค่าความอิ่มตัวของน้ำ

$$X = \frac{\phi \rho_w}{(1 - \phi) \rho_s} S \quad (4)$$

โดย ϕ คือค่าความพูน (Porosity) หน่วย m^3/m^3 , และ ρ_s คือ ความหนาแน่นของน้ำและของแข็ง (kg/m^3) ตามลำดับ จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ผ่านวัสดุพูนคำนวณได้จาก

$$q = -\lambda_{\text{eff}} \nabla T \quad (5)$$

โดยคือ λ_{eff} ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal conductivity; $\text{W}/\text{m.K}$) และ ∇T คือ ความชันของอุณหภูมิ

(Temperature gradient) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประสิทธิผล (λ_{eff}) ถูกสมมติจากฟังก์ชันของค่าความอืดตัวของน้ำซึ่งได้จากการทดลองของ Aoki et al.¹²

$$\lambda_{eff} = \frac{0.8}{1 + 3.7e^{-5.95S}} \quad (6)$$

3. การวิเคราะห์การถ่ายความร้อนในเม็ดทรายแก้วที่มีการจัดเรียงแบบต่างๆ

การวิเคราะห์การถ่ายความร้อน กระทำโดยใช้เตาไฟฟ้าแบบแผ่นความร้อนขนาด 100 วัตต์แทนเตาสนามเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดทำความร้อนเท่ากับ 15 เซนติเมตร บนเตามีภาชนะขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร บรรจุเม็ดทรายที่มีการจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ ด้านบนมีหม้อสนามทหารบรรจุน้ำปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการวัดการถ่ายเทความร้อนของมวลสารในภาชนะทดลอง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ในการทดลอง

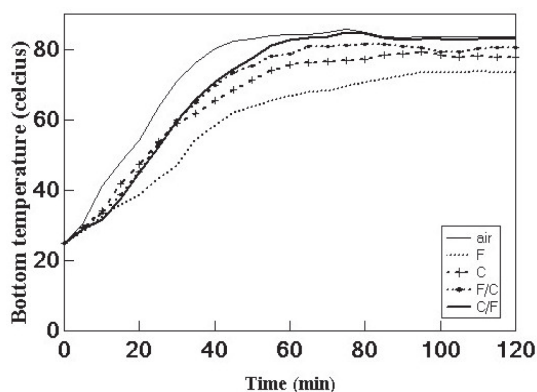
การทดสอบการจัดเรียงของอนุภาคเม็ดทรายใช้ขนาดเม็ดทรายสองขนาดคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 มิลลิเมตรเป็นทรายแก้วเม็ดละเอียด (Fine; F) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.385 มิลลิเมตร เป็นทรายแก้วเม็ดหยาบ (Coarse; C) แล้วทำการจัดเรียงเป็นแบบต่างๆ แบ่งเป็น 5 กรณี ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดเรียงเม็ดทรายแก้วแบบต่างๆ

กรณี	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดทรายแก้ว (มม.)	สัญลักษณ์	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)
1	ไม่มี	air	30.8
2	0.125	F	31.1
3	0.385	C	31.2
4	0.125/ 0.385	F/C	30.9
5	0.385/ 0.125	C/F	30.8

3.1 โหมดรับและสะสมพลังงานความร้อน

การทดลองแต่ละกรณีมีระยะเวลาการให้ความร้อน 2 ชั่วโมง (นาฬิกาที่ 0 ถึง 120) ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำที่ก้นภาชนะดังรูปที่ 4 โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 นาที



รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิน้ำที่ก้นหม้อสนามในโหมดรับและสะสมพลังงานความร้อน

จากรูปที่ 4 พบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากเวลาเริ่มต้นถึง 50 นาทีแรก อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีที่ 1 ที่ไม่มีการใส่เม็ดทรายแก้วอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วที่สุด นอกจากนี้พบว่าทุกกรณีศึกษาอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาประมาณ 120 นาที จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่ากรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการจัดเรียงเม็ดทรายแก้วนั้นความร้อนถ่ายเทด้วยการพามากกว่าการนำความร้อน หมายความว่าอิทธิพลของการพาความร้อนมีค่าสูงกว่าการนำความร้อนในภาชนะบรรจุเม็ดทรายแก้ว ตารางที่ 2 แสดงอุณหภูมิสุดท้ายในสภาวะคงตัว ของทุกกรณีที่กั้นหม้อสนามและที่ผิวน้ำ

ตารางที่ 2 อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำที่กั้นภาชนะและที่ผิวน้ำ

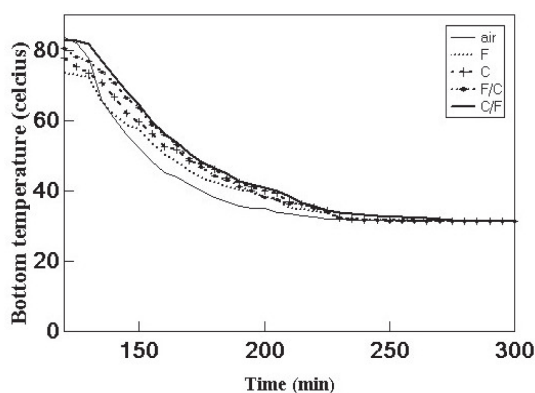
กรณี	สัญลักษณ์	กั้นหม้อสนาม (°C)	ผิวน้ำ (°C)
1	air	83.5	83.2
2	F	73.4	72.2
3	C	77.7	76.5
4	F/C	80.4	79.7
5	C/F	82.8	82.5

จากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่า ช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการระเหยนี้เรียกว่า ช่วงของการทำให้แห้ง (Drying period) ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำที่กั้นหม้อสนามและอุณหภูมิน้ำที่ผิวมีค่าใกล้เคียงกัน การจัดเรียงเม็ดทรายแก้วแต่ละแบบก็มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ไม่เท่ากัน จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ชัดว่ากรณีที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นการจัดเรียงแบบ F และ C ตามลำดับ ให้ผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่น้อย ส่วนกรณีที่ให้การนำ และการพาความร้อนที่เป็นอันดับสอง คือ กรณีที่ 5

เป็นกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ C/F ซึ่งการจัดเรียงเป็นชั้นสองชั้น (Double layer)

3.2 โหมดถ่ายเทพลังงานความร้อนออก

การศึกษาจะทำการหยุดให้ความร้อนจากเตาและปล่อยให้ความร้อนที่สะสมอยู่ถ่ายเทออกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (นาทีที่ 120 ถึง 300) โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 นาที รูปที่ 5 แสดงกราฟของอุณหภูมิของน้ำที่กั้นหม้อสนามและที่ผิวน้ำ ตามลำดับที่เวลาต่างๆ



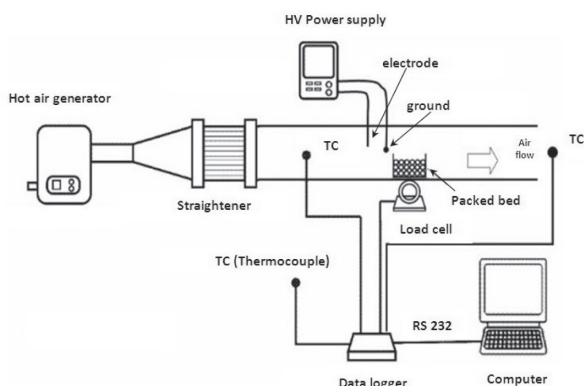
รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิน้ำที่กั้นหม้อสนามในโหมดถ่ายเทพลังงานความร้อนออก

เมื่อหยุดให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้า ความร้อนที่ส่งมาที่น้ำในหม้อสนามจะได้มาจากเม็ดทรายแก้ว การจัดเรียงเม็ดทรายแก้วแต่ละแบบจะเก็บสะสมและถ่ายเทความร้อนออกในปริมาณที่ไม่เท่ากัน จากการศึกษาพบว่านาทีที่ 120 ถึง 130 กรณีที่ 2 ถึง 5 อุณหภูมิของน้ำในกรณีที่มีการจัดเรียงเม็ดทรายแก้วมีลักษณะค่อนข้างที่จะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมความร้อนภายในเม็ดทรายแก้ว สำหรับกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีเม็ดทรายแก้วอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกรณีนี้ไม่มีตัวกลางในการสะสมพลังงานความร้อน

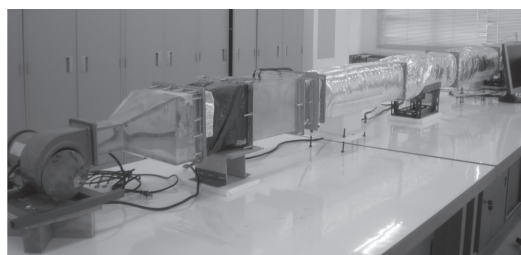
การลดลงของอุณหภูมิกรณีใส่เม็ดทราย แก้วจะช้ากว่ากรณีไม่ใส่เม็ดทราย ทั้งนี้เนื่องจาก ความร้อนที่ถ่ายเทออกอยู่ในรูปแบบการนำความร้อนมากกว่าการพาความร้อน สำหรับการทดสอบในครั้งนี้พบว่า กรณีที่ 5 อุณหภูมิลดลงช้าที่สุดเนื่องมาจากการรับและสะสมพลังงานไว้มากที่สุดในช่วงการให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้า เมื่อเวลาประมาณนาทีที่ 220 อุณหภูมิของน้ำและกันหม้อสนามในกรณีที่ 1 เริ่มเข้าสู่สภาวะตั้งต้นที่อุณหภูมิประมาณ 31 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 ซึ่งมีการจัดเรียงของเม็ดทรายแก้วแบบ C/F พบว่าเวลากลับสู่อุณหภูมิตั้งต้นประมาณนาทีที่ 270 ซึ่งนานกว่าประมาณ 50 นาที

4. การออกแบบสำหรับการวิเคราะห์วัสดุพูนแบบไม่อิมิตัวที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

แผนภาพชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 และภาพถ่ายชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 อากาศร้อนไหลผ่านอุโมงค์ลมที่มีพื้นที่หน้าตัดทดสอบขนาด 15 (15 ตารางเซนติเมตร กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำให้เกิดโคโรนาวินด์ถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage power supply) กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโตรดผ่านอากาศไปยังกราวด์ ขั้วอิเล็กโตรดและกราวด์ซึ่งทำจากลวดทองแดงถูกที่ติดตั้งในทิศทางตั้งฉากและขวางกับทิศทางการไหล จำนวนแท่งอิเล็กโตรดที่ใช้จำนวน 4 เส้น และระยะห่างจากอิเล็กโตรดกับกราวด์ 2 เซนติเมตรซึ่งเป็นการจัดวางที่เหมาะสม จากสุวิมล และคณะ¹³



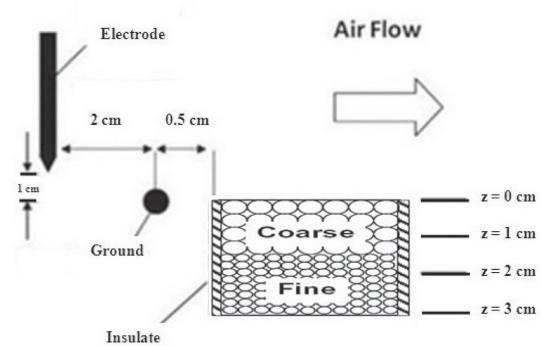
รูปที่ 6 แสดงแผนภาพชุดทดสอบ



รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายชุดทดสอบ

อุณหภูมิของอากาศถูกวัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple type K) ซึ่งติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังของหน้าตัดทดสอบ (Test section) โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ติดตั้งด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างลมร้อนเพื่อรักษาให้อุณหภูมิลมร้อนที่ไหลเข้าคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ลูกแก้วและน้ำถูกบรรจุในกล่องแพคเกจที่มีขนาด $3.2 \times 11.8 \times 3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร กล่องนี้ทำจากแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) หนา 0.8 มิลลิเมตร น้ำหนักของความชื้นภายในแพคเกจที่เปลี่ยนไปถูกอ่านค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบโหลดเซลล์ (Load cell) อุณหภูมิภายในแพคเกจ ถูกวัดด้วยเส้นลวดไฟเบอร์ออปติค วัดอุณหภูมิ (LUXTRON Fluoroptic Thermometer) จำนวน 4 เส้นถูกติดตั้งไว้ที่ระดับ 0, 1, 2

และ 3 เซนติเมตร โดยให้อิเล็กโตรดวางสูงกว่า กราวด์ 1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสม ได้จากผลงานวิจัยของ Saneewong Na Ayuttaya¹⁴ ดังในรูปที่ 8 ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิของ กระแสลม อุณหภูมิภายในแพคเบต และน้ำหนัก ของแพคเบต ณ เวลาต่างๆ ถูกบันทึกค่าโดย เครื่องบันทึกข้อมูล



รูปที่ 8 แพคเบตและตำแหน่งของอิเล็กโตรด

ตารางที่ 3 สภาวะทดสอบ

สภาวะทดสอบ	สัญลักษณ์	ค่า
ค่าความชื้นเริ่มต้น	Min	12.52 %db
อุณหภูมิทดลอง	T	60°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	TM	25°C
ความเร็วลม	Ub	0.35 m/s
แรงดันไฟฟ้า	V	15 kV
เวลาอบแห้ง	t	~ 24 hr (1440 min)
เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดทรายแก้ว	C/F	0.385/0.125 mm

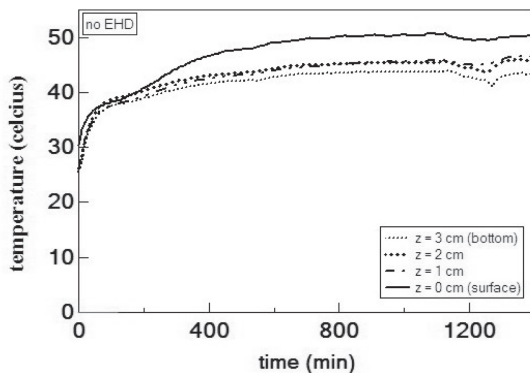
5. การศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัว

เพื่อสังเกตอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อแพคเบต ได้ทำการวัดค่าอุณหภูมิของกระแสลมที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแพคเบต และพบว่าอุณหภูมิของกระแสลมก่อนและหลังแพคเบตมีค่าใกล้เคียงกันมาก จากการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่าอิทธิพลของความร้อนจากหลอดอิเล็กโตรดมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแพคเบต การทดลองทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 นาที และกำหนดให้ค่าความอิ่มตัว (Initial saturation) มีค่าเท่ากับ 0.5

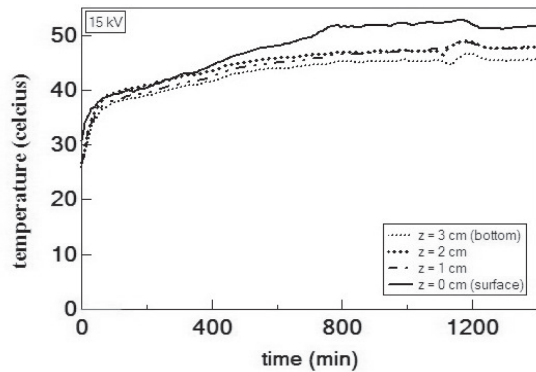
5.1 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่ออุณหภูมิภายในแพคเบต

รูปที่ 9 และ 10 แสดงอุณหภูมิภายในแพคเบตเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ ตามลำดับ จากกราฟในช่วง 100 นาทีแรกอุณหภูมิภายในแพคเบตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคงที่ที่ประมาณ 40 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ผิวแพคเบตมีค่าน้อยกว่าภายในแพคเบต หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละชั้นเริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างช้าๆ จนกระทั่งคงที่ โดยอุณหภูมิที่ผิวแพคเบตมีค่าสูงกว่าภายในแพคเบต

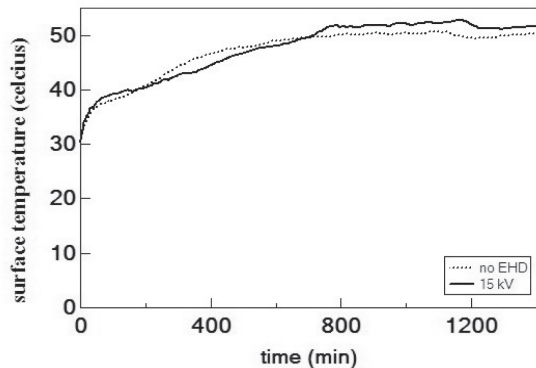
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดลองปริมาณความชื้นในแพคเบตยังมีค่ามาก เมื่อความร้อนจากลมร้อนไหลเข้าสู่แพคเบต น้ำภายในแพคเบตจะดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในแพคเบตทั้ง 3 ตำแหน่งมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเริ่มแรกอุณหภูมิที่ผิวมีค่าต่ำกว่าภายในแพคเบต เนื่องจากความชื้นภายในมาเติมเต็มที่ผิวอย่างต่อเนื่อง ต่อมาเมื่อน้ำส่วนใหญ่ระเหยออกจากแพคเบต อุณหภูมิที่ผิวจึงเริ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัด และที่อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของแพคเบตให้อุณหภูมิที่สูงที่สุด



รูปที่ 9 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิว เมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิของแพคเบตที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิว เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV

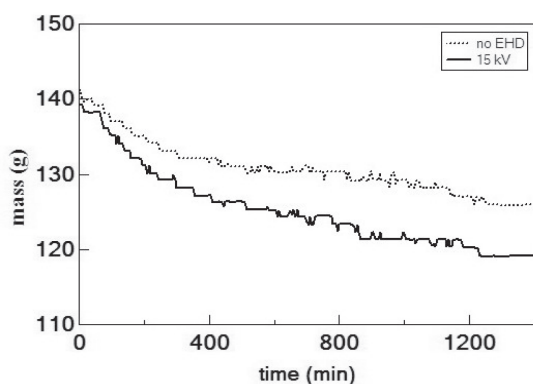


รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้า

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบต ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.04 เท่า โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่าอันเป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้ายังช่วยทำให้อัตราการระเหยความชื้นออกจากแพคเบต ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นด้วย

5.2 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อมวลภายในแพคเบต

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า เมื่อใช้สนามไฟฟ้าจะทำให้อัตราการอบแห้งดีกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า รูปที่ 12 จึงพิจารณามวลของแพคเบตในกระบวนการอบแห้งที่ใช้สนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สนามไฟฟ้า จากรูปแสดงให้เห็นว่าในทุกช่วงเวลาน้ำหนักของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้าให้มวลที่ลดลงมากกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่แพคเบต ทำให้มวลของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงมากกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.54 เท่า



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบมวลของแพคเบตเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้าและใช้สนามไฟฟ้า

6. สรุปผลการศึกษา

6.1 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเม็ดยาแห้งที่มีการจัดเรียงอนุภาคแบบต่างๆ พบว่า เมื่อให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้ามาที่น้ำในหม้อสนาม กรณีที่ให้การนำและการพาความร้อนดีที่สุด คือ กรณีที่ไม่มีเม็ดยาแห้ง กรณีที่ตรงลงมา คือ กรณีที่มีการจัดเรียงแบบ C/F เมื่อหยุดให้ความร้อน พบว่ากรณีที่ไม่มีเม็ดยาแห้ง อุณหภูมิของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกรณีที่ไม่มีเม็ดยาแห้ง อุณหภูมิของน้ำค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วจึงค่อยๆ ลดลง โดยกรณีที่มีการจัดเรียงแบบ C/F อุณหภูมิลดลงช้าที่สุด การออกแบบเตาสนามแบบเดิมที่ไม่มีการจัดเรียงอนุภาคเม็ดยาแห้งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า อันเป็นผลให้ต้องใช้พลังงานในการประกอบอาหารมากขึ้นตามไปด้วย

6.2 การศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนแบบไม่อมตัว พบว่าเมื่อเริ่มทำการทดลองอุณหภูมิที่ผิวแพคเบตมีค่าน้อยกว่าภายในแพคเบต หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในแพคเบตแต่ละชั้นเริ่มที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างช้าๆ จนกระทั่งคงที่ โดยอุณหภูมิที่ผิวแพคเบตมีค่าสูงกว่าภายในแพคเบต อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.04 เท่า ซึ่งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นด้วย และในทุกช่วงเวลาน้ำหนักของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้าให้มวลที่ลดลงมากกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า มวลของแพคเบตที่ใช้สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงมากกว่าเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า 1.54 เท่า

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.ร.จปร.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำวิจัยและขอขอบคุณกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

1. 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, pp.151-161.
2. สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา, ธีรพจน์ เวชพันธุ์, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2009). การศึกษากระบวนการทำความร้อนในชั้นวัสดุที่เป็นของเหลวโดยใช้คลื่นไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE₁₀) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติ. วารสารทางวิชาการสภาอาจารย์ รร.จปร. ปีที่ 7 หน้า 210 - 219
3. Sakai, N. and Hanzawa, T. (1994). Application and advances in infrared heating in Japan, *Trends Food Sci. Technol*, Vol.5 (11), pp.357-362.
4. Wang, J. and Sheng, K.C. (2004). Modeling of multi-layer far-infrared dryer, *Drying Technol*, Vol.22, pp.809-820.
5. Alem-Rajabif, A. and Lai, F.C. (1995). EHD-enhancement drying of partially wetted glass beads, *Drying Technol*, Vol.23, pp.597-609.
6. Lai, F.C. and Lai, K.W. (2002). EHD-Enhanced drying with wire electrode, *Drying Technol*, Vol. 20 (7), pp.1393-1405.
7. Lai, F. C., and Sharma, R. K. (2005). EHD-Enhanced drying with multiple needle electrodes. *Journal of Electrostatics*, vol.63, pp.223-237.
8. Chaktranond, C., and Ratandecho, P. (2009). Enhancement of mass and heat transfer in the unsaturated packed-bed with electric fields. 8th Conference of Heat and Mass Transfer Network of Thailand.
9. Hale Jr, N.W. and Viskanta, R. (1980). Solid-liquid phase-change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above or below. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 23, pp.283-292.
10. Alexeev, V.A. (1999). Heat Transfer in Heat Storage Arrangements Under Melting. *Advances in Cold-Region Thermal Engineering and Sciences*, vol 533, pp.535-544.
11. 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.
12. Aoki, K., Hattori, M., Kitamura, M. and Shiraishi, N. (1991). Characteristics of heat transport in porous media with water infiltration, *ASME/JSME Therm. Eng.* vol.4, pp.303-308.
13. สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ธัชพงศ์ กริวัชรินทร์, รวิศุต สุนทรินคะและ ปิยฉัตร บรรลุศิลป์, 2010, "อิทธิพลของตำแหน่งการจัดวางอิเล็กโตรดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนแบบไม่อัดตัวในระหว่างกระบวนการอิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์", การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 9) หน้า 224 - 230
14. Saneewong Na Ayuttaya, S., Chaktranond, C. and Rattanadecho, P. (2010). Influence of Electrode Wire Structure on Corona Wind in a 2-D Rectangular Duct Flow (Numerical Analysis). Paper presents in the 1st International Conference on Mechanical Engineering 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani, Thailand.