

TSF 21

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 19-21 ดุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การวิเคราะห์การเพิ่มการพาความร้อนและการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง โดยใช้อีเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์

Experimental Analysis of Convective Heat Transfer Enhancement and Energy Consumption in Drying Process Utilizing Electrohydrodynamics

<u>ธัชพงศ์ กรีวัชรินทร์,</u> ไชยณรงค์ จักรธรานนท์*, สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 * ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-5643001-9 ต่อ 3144, โทรสาร: ต่อ 3049 E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีอีเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของวัสดุ พรุนที่อยู่ภายใต้กระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน บทความนี้ศึกษาผลของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการ ถ่ายเทความร้อนและความชื้นของวัสดุพรุน อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้มีค่า 60 [°]C และ 0.35 m/s ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 0 – 30 kV จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้กระแสลมเกิดการ หมุนวน ซึ่งส่งผลทำให้การไหลแบบแยกบริเวณผิวหน้าของวัสดุพรุนถูกทำลายลง เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความ ร้อนและความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุพรุนเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยขนาดความแรงของลมหมุนวนแปรผันกับขนาด แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 2 เท่าของการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป ($DR \propto e^{V}$) จากการวิเคราะห์การใช้พลังงานพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าจะให้ความคุ้มค่าของการใช้พลังงานที่มาก ในช่วงที่ภายในวัสดุพรุนมีความชื้นสูง โดยค่า SEC ของการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบใช้สนามไฟฟ้าร่วมมีค่าต่ำกว่า การอบแห้งแบบใช้ลมร้อนทั่วไป 40 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: อีเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (EHD) กระบวนการอบแห้ง การเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน ค่าการใช้ พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยผลผลิต (SEC)

Abstract

Electrohydrodynamic technique is used for enhancing the convective heat transfer on surface of porous material in a drying process utilizing hot-air flow. This paper experimentally investigates the effects of electrical voltage on heat transfer and moisture removal in a porous material. Temperature and velocity of airflow are tested at 60° C and 0.35 m/s, respectively. The electrical voltage is applied in range of 0 – 30 kV. It is found that the influence of the electric field conduct airflow to circulate above the material surface. This causes the separation flow to be eliminated, resulting in high rate of heat transfer and moisture removal. In addition, strength of circulating flow is proportional to the increment of voltage. With



electric fields, the drying rate is approximately improved by 1.5 - 2 ($DR \propto e^{\vec{V}}$). From analysis, worthy of energy usage is high when moisture content in the material is high. Moreover, the SEC of hot-air drying process utilizing electrohydrodynamics is lower than that of conventional hot-air drying by around 40 percent.

Keywords: Electrohydrodynamics, Drying process, Heat and mass transfer enhancement, Specific energy consumption.

1. บทนำ

ด้วยวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและเศรษฐกิจทำให้ ประเทศต่าง ๆให้ความสนใจด้านการใช้พลังงานอย่าง คุ้มค่ามากที่สุด สำหรับประเทศอุตสาหกรรม การเกษตรวิธีการรักษาและปรับปรุงคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นวัสดุพรุน (Porous material) เป็นสิ่ง ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก และวิธีที่นิยมใช้คือ กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot-air drying process) ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราการอบแห้งและลด การใช้พลังงานโดยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ระหว่างลมร้อนกับวัสดุพรุนในระหว่างการอบแห้งจึง อยู่ในความสนใจของวิจัยหลายกลุ่มเป็นอย่างมาก

Alemrajabi และคณะ [1] ทำการเพิ่มอัตราการ อบแห้งแบบใช้ลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า วัสดุพรุนถูก แทนด้วยแพคเบด (Packed bed) ซึ่งบรรจุเม็ดแก้ว น้ำและอากาศ สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างแท่งอีเล็ก โตรดและแผ่นกราวด์ที่ทำจากทองแดง (การติดตั้ง แบบ wire-to-plate) จากการทดลองพบว่าอัตราการ อบแห้งเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงบริเวณผิวของ แพคเบด

Isobe และคณะ [2] ใช้วิธีอีเล็กโตรไฮโดร ใดนามิกส์อบแห้งวัสดุที่อุณหภูมิบรรยากาศเมื่อไม่ใช้ การเป่าลมร้อน ในการทดลองอีเล็กโตรดทองแดง 1 แท่งติดตั้งเหนือแผ่นกราวด์อลูมินั่ม ซึ่งเป็นการติดตั้ง แบบ wire-to-plate จากการทดลองพบว่าสนามไฟฟ้า แรงดันสูงไม่เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยตรงแก่ วัสดุแต่ช่วยเร่งให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นเป็น 3 เท่า ของการอบแห้งแบบปกติ และอัตราการอบแห้งแปร ผันตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ แต่แปรผกผันกับ ระยะห่างระหว่างแท่งอีเล็กโตรดกับแผ่นกราวด์ Lai และ Sharma [3] วางแพคเบดที่บรรจุน้ำและ ลูกแก้วขนาดหนึ่งในอุโมงค์ลมและติดตั้งอีเล็กโตรดกับ กราวด์แบบ multi-wire-to-plate โดยใช้อีเล็กโตรดนิ เกิล (Nickel) จำนวน 3 แท่งติดตั้งในแนวตั้งฉากกับ การไหลของลมและวางเรียงกันในลักษณะรูป สามเหลี่ยมด้านเท่าเหนือแพคเบดซึ่งฐานทำจากแผ่น ทองแดง ในงานวิจัยพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและขนาดความเร็วของลมที่ ไหลในทิศขวางกับสนามไฟฟ้า เมื่อไม่มีการไหลของ ลมอัตราการอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับขนาดของ แรงดันไฟฟ้า



Chaktranond และ Rattanadecho [4] ศึกษาการ เพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนร่วมกับ สนามไฟฟ้าในแพคเบดที่มีความพรุนสองค่า (ชั้นของ แพคเบดวางเม็ดแก้วขนาดต่างกัน) และอีเล็กโตรดถูก ติดตั้งแบบ multi-wire-to-wire โดยอีเล็กโตรดทองแดง 4 แท่งติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและเส้นลวด กราวด์ทองแดงติดตั้งอยู่เหนือแพคเบดดังรูปที่ 1 ภาพถ่ายจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ สนามไฟฟ้าจะเกิดลมหมุนบริเวณรอบ ๆลวดกราวด์ และอิทธิพลของลมหมุนวนทำให้การถ่ายเทความร้อน



และความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบดเพิ่มขึ้นอย่าง มาก ผลของการจัดเรียงความพรุนที่ต่างกันทำให้เกิด ความดันแคปิลลารี่ (Capillary pressure) ในแต่ละชั้น แตกต่างกันซึ่งส่งผลทำให้อัตราการระเหยออกจาก แพคเบดมีค่าแตกต่างกัน

จากงานวิจัยที่กล่าวมานำเสนอการใช้สนามไฟฟ้า ร่วมกับการอบแห้งเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง แต่การใช้ พลังงานยังถูกนำพิจารณาน้อยมาก ในงานวิจัยนี้ทำ ศึกษาการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งภายใต้ สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่ค่าต่างๆ โดยการติดตั้งอีเล็ก โตรดเป็นแบบ multi-wire-to-wire

2. ชุดทดสอบและสภาวะทดสอบ

จากรูปที่ 2 ลมร้อนอุณหภูมิ 60⁰C ใหลผ่านหน้า ์ตัดทดสอบขนาด 15 cm X 15 cm แพคเบดที่ใช้มี ขนาด 3 cm (กว้าง) X 12 cm (ยาว) X 6 cm (สูง) ซึ่ง ทำจากแผ่นอะคริลิค (Acrylic plate) ผิวภายนอกหุ้ม ้ฉนวนกันความร้อน ส่วนภายในบรรจุน้ำและเม็ดแก้วที่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.125 mm (ค่าความพรุน,) ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น φ~ 0.385 (Initial saturation) ของแพคเบดมีค่า S = 0.5 และอุณหภูมิ ภายในแพคเบด ถูกวัดค่า ด้วย สาย ไฟเบอร์ออปติ ก (Luxtron Fluroptic Ther-mometer, Model 790, Santa Clara, Canada, accurate to ±0.5 °C) และวัด อุณหภูมิ ณ ที่ระดับความลึก z = 0, 2 และ 4 cm (วัด จากผิวด้านบนลึกลงไปในแพคเบด) น้ำหนักของแพค เบดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาถูกวัด ค่าโดยโหลดเซล (Load cell)

สนามไฟฟ้าถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันสูง (Glassman, model MJ30N400) อีเล็ก โตรด 4 เส้นถูกติดตั้งในแนวตั้งฉากกับการไหลและ ลวดกราวด์ 1 เส้นถูกติดตั้งในแนวขวางกับการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3

แรงดันไฟฟ้า และระยะห่าง ที่ใช้ในการทดลอง ได้ ถูกทดสอบ แล้ว ว่าไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สปาร์ ค ของกระแสไฟฟ้า (Breakdown voltage or ion spark) และรายละเอียดของสภาวะทดสอบแสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 สภาวะทดสอบ

Condition	Symbol	Value
Glass bead	d	0.125 mm
Saturation	S	0.5
Drying temperature	Т	60 °C
Ambient temperature	T _a	25 °C
Mean air velocity	u_{b}	0.35 m/s
Applied voltage	V	0 – 30 kV
Drying time	t	24 hr

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ 3.1 ลักษณะและอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้เกิดแรงเนื่องจากประจุ ไฟฟ้า (Coulomb force) สามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \tag{1}$$

โดยที่ q คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า และ *Ē* คือ สนามไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการแมกซ์ เวลล์ (Maxwell's equations)

$$q = \nabla \cdot \varepsilon \vec{E} \tag{2}$$

$$\vec{E} = -\nabla \cdot \vec{V} \tag{3}$$



ซึ่ง *ɛ* คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของของไหล และ V คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า

เพื่อแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศอัน เนื่องจากสนามไฟฟ้าแรงดันสูง สมมติให้อากาศเป็น อนุภาคกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมครอนและเริ่ม เคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง และแรงต้านการเคลื่อนที่ พิจารณาจากแรงต้าน (Drag force)

$$\vec{u}_p = \frac{\vec{F}_E}{3\pi\mu_f d_p} \tag{4}$$

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางจาก ปลายขั้วอีเล็กโตรดไปสู่กราวด์ แต่จากรูปที่ 5 ซึ่ง แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า ที่เคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง พบว่าลักษณะการหมุน วนของอากาศมีลักษณะแตกต่างจากรูปแบบของแรง เนื่องจากสนามไฟฟ้าอย่างสิ้นเชิง ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิ-



รูปที่ 4 เส้นแรงของความเข้มของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศเนื่องจาก สนามไฟฟ้า

พลของการใหลแบบเฉือน (Shear flow) โดยแรง เนื่องจากสนามไฟฟ้าหรือแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) จะผลักอากาศส่วนที่ถูกชาร์จให้เคลื่อนที่จากขั้ว อีเล็กโตรดสู่กราวด์ และในขณะเดียวกันอากาศรอบ ๆ ที่ไม่ถูกชาร์จจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เป็นลักษณะ หมุนวน (Circulating flow)

3.2 ภาพถ่ายการไหลของกระแสอากาศ

เพื่ออธิบายลักษณะลมหมุนวนที่เกิดจาก สนามไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้ ควันธูปแสดงเส้นทางการ ไหลของกระแสอากาศและใช้หลอดไฟส่องสว่างขนาด 500 W จำนวน 2 ดวง ส่องทำ 45 องศากับอุโมงค์ลม ภาพการไหลของลมถูกบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอล วีดีโอ (Sony DCR-PC 108/PC 109E)



รูปที่ 6 ภาพการใหลเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 7 ภาพการไหลเมื่อใช้สนามไฟฟ้า



จากรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการไหลเมื่อไม่ใช้สนามไฟฟ้า จะเห็นว่าบริเวณขอบด้านบนของผิวหน้าของแพคเบด จะเกิดการไหลแบบแยก (Flow separation) ซึ่งจะเป็น สาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังผิว แพคเบดไม่ดี

รูปที่ 7 แสดงผลของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อการ ใหลของลมร้อน เมื่อ V = 15 kV และ H = 2, L = 0 cm ลักษณะของกระแสอากาศเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบ หมุนวนอยู่เหนือแพคเบด ซึ่งทำให้การไหลแยกถูก ทำลายลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งลมร้อนสามารถสัมผัส กับผิวของแพคเบดมากขึ้น โดยความรุนแรงของลม หมุนนั้นแปรผันตรงตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่ม มากขึ้น ($\bar{u}_{EHD} \propto \bar{V}^2$)

3.3 อิทธิพลของขนาดของสนามไฟฟ้า

เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดของสนามไฟฟ้าที่มี ผลต่อการระเหยมวลน้ำออกจากแพคเบด อีเล็กโตรด ถูกติดตั้งที่ L = 0 cm และ H = 4 cm ขนาดของ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่า V = 0, 10, 20 และ 30 kV

รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้าอุณหภูมิ บริเวณผิวหน้าของแพคเบดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ค่อนข้างช้าในช่วงอุ่นเริ่มแรก (Warm-up period) และ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate of drying) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของลมหมุนวนจะขับให้มวลน้ำ นั้นเคลื่อนที่ไปที่ผิวของแพคเบดได้เร็วขึ้นและความ ร้อนที่รับจากลมร้อนถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของ ความชื้นบริเวณผิวหน้าของแพคเบด ซึ่งสอดคล้องกับ รูปที่ 9 ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง การใช้ สนามไฟฟ้าช่วยเพิ่มอัตราของน้ำที่หายไปจากแพค เบดมีค่าสูงกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้ามาก

หากเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งในแต่ละช่วงดัง รูปที่ 10 พบว่า การเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะทำ ให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นสูงมากยิ่งขึ้น และเป็นผล ทำให้เวลาในการอบแห้งน้อยลง (ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง เวลาที่อัตราความชื้นระเหยออกจากแพคเบดตกลง) โดยการใช้สนามไฟฟ้าขนาด V = 10, 20 และ 30 kV ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 1.4, 1.8 และ 2.2 เท่าของการไม่ใช้สนามไฟฟ้าตามลำดับ หรือกล่าวได้ ว่าอัตราส่วนของอัตราการอบแห้งแปรผันกับเอ็ก โปเนนเชียลของขนาดแรงดันไฟฟ้า (*DRR* ∝ e^{v̄})





3.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การวิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้ง พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดไฟฟ้า (ขนาด 2 kW) จากพัดลม 88 W และจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันสูง (*I* = 0.4 mA) โดยคำนวณเวลาที่ใช้ในการ อบแห้ง (*t_{pR}*) จากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) เป็นหลัก และผลการวิเคราะห์แสดงใน ตารางที่ 2 ที่ซึ่ง DRR (Drying rate ratio) คือ อัตราส่วนของอัตราการอบแห้งกรณีใช้สนามไฟฟ้าต่อ อัตราการอบแห้งแบบไม่ใช้สนามไฟฟ้า (หรือใช้ลม ร้อนเพียงอย่างเดียว) และ SEC (Specific energy consumption) คือค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วย ผลผลิต)

เมื่อวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วย ผลผลิตพบว่าค่า SEC จะลดลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 แต่หากสังเกตที่การใช้ แรงดันไฟฟ้า 20 kV เป็นต้นไป ค่าความชันของ เส้นกราฟมีแนวโน้มที่จะลดลงแสดงให้เห็นถึงความ คุ้มค่าของการใช้พลังงานอาจไม่เพิ่มสูงมากหากใช้ แรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินความจำเป็น

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่า SEC กับค่า ความอิ่มตัว พบว่าช่วงที่แพคเบดมีความชิ้นหรือมีค่า ความอิ่มตัวสูงการใช้สนามไฟฟ้าจะให้ความคุ้มค่าของ การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งที่มาก แต่อย่างไรก็ ตามการใช้สนามไฟฟ้ายังสามารถช่วยขับความชื้น ออกจากแพคเบดได้มากกว่าการไม่ใช้สนามไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่งความชิ้นเหลืออยู่ในแพคเบดน้อย มากๆ

ตารางที่ 2 รายละเอียดผลการทดลองแต่ละกรณี

V (kV)	Energy (kWh)	DRR	SEC (J/g)	
0	20.880	1	2.784	
10	16.736	1.4	1.883	
20	14.672	1.8	1.554	
30	12.600	2.2	1.296	



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วย มวลน้ำที่ระเหยจากแพคเบดกับแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วย มวลน้ำที่ระเหยจากแพคเบดกับค่าความอิ่มตัว

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่มี ต่อกระบวนการอบแห้งแบบใช้ลมร้อนและวิเคราะห์ถึง ค่าการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- จากภาพถ่ายการไหลของลมแสดงให้เห็นว่า การใช้สนามไฟฟ้าทำให้ลมเกิดการหมุนวน และช่วยลดอิทธิพลของการไหลแบบแยก (Separation flow) ซึ่งทำให้ลมร้อนสามารถ สัมผัสกับผิวของแพคเบดได้ดีขึ้น เป็นผลให้ อัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนดียิ่งขึ้น
- การเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีผลทำให้อัตราส่วนของ การอบแห้งเพิ่มขึ้น 1.4 – 2 เท่า และอัตรา



การอบแห้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับ แรงดันไฟฟ้า

 การอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า ร่วมมีความคุ้มค่าของการใช้พลังงานที่สูงก็ ต่อเมื่อความชิ้นในแพคเบดมีค่ามาก นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ความชิ้นที่คง เหลืออยู่ในแพคเบดน้อยกว่าการอบแห้งแบบ ใช้ลมร้อนปกติทั่วไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้ง โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงาน คณะกรรมการอุดมศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Alemrajabi, A. and Lai, F.C. (2005). EHDenhanced drying of partially wetted glass beads, *Drying Technology*, vol. 233, pp. 597-609.

[2] Isobe, S., Barthakur, N., Yoshino, T., Okushima, L. and Sase, S. (1999). Electrohydrodynamic drying characteristics of agar gel. *Food Sci. Technol. Res.*, vol. 5(2), pp. 132-136.

[3] Lai, F.C. and Sharma, R.K. (2005). EHDenhanced drying with multiple needle electrode, *J. Electrostatics*, vol. 63, pp. 223-237.

[4] Chaktranond, C. and Rattanadecho, P. (2010). Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement in Porous Material Subjected to Electric Fields (Effects of Particle Sizes and Layered Arrangement), *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34(8), pp.1049-1056.