

ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและความเข้มสนามไฟฟ้าในการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ต่อ
จลนพลศาสตร์การทำแห้ง การเปลี่ยนสี และการหดตัวของมะม่วงสุก
(Effect of Electrode Gap and Electric Field Strength in Corona Wind Drying on
Drying Kinetics, Color Changes and Shrinkage of Ripe Mango)

วิฑู ชูศรี¹ และ รัชพงษ์ ชูศรี^{2*}
Withu Choosri¹ and Touchpong Choosri^{2*}

Received: August 27, 2022

Revised: October 24, 2022

Accepted: November 9, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์ต่อจลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง สี และการหดตัวของมะม่วงสุก โดยใช้สภาวะอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนในกระบวนการทำแห้งคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส และ 1.0 m/s กำหนดสภาวะในการกำเนิดโคโรนาวินด์จากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 3, 4 และ 5 ซม. และความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 0 (ไม่ใช้ไฟฟ้า), 4 และ 8 กิโลโวลต์/ซม. (kV/cm) ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลงและเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น มีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (D_{eff}) ของกระบวนการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) และการหดตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงได้ และพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์คือ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 3 ซม. และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 8 กิโลโวลต์/ซม. จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งลดลงและได้ผลิตภัณฑ์แห้งที่มีคุณภาพด้านสีและการหดตัวดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

คำสำคัญ: การทำแห้งแบบโคโรนาวินด์, ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด, จลนพลศาสตร์การทำแห้ง, การหดตัว, มะม่วงสุก

ABSTRACT

This research was to study the effect of the electrode gap and electric field strength in corona wind drying on drying kinetics, color changes and shrinkage by using the static temperature and velocity at 50 °C and 1.0 m/s. The generation of corona wind was determined from the interval gap between electrodes 3, 4 and 5 cm. and the electric field strength at 0 (non-electric), 4 and 8 kV/cm., respectively. The results showed that the decrease of the electrode gap and increase of the electric potential difference resulted in an increase of the effective diffusivity coefficient (D_{eff}), while the total color differences (ΔE^*) and the product shrinkage decreased. In addition, the optimum conditions for corona drying were the electrode gap at 3 cm. and the electric potential difference at 8 kV/cm. These optimum conditions led to decrease of the drying time and caused the color and shrinkage quality of drying product was better than that from hot air drying.

Keywords: Corona wind drying, electrode gap, drying kinetics, shrinkage, ripe mango

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

บทนำ

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง (*Mangifera indica* Linn.) ในวงศ์ Anacardiaceae เป็นสายพันธุ์มะม่วงที่เหมาะสำหรับรับประทานผลสุกเมื่อสุกจะมีผิวสีเหลืองกลิ่นหอม เนื้อละเอียด รสชาติหวาน มีคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาดต่างประเทศ [1] อย่างไรก็ตามเมื่อถึงฤดูกาลให้ผลผลิตพร้อมๆกัน จะทำให้มีปริมาณผลผลิตมากเกินความต้องการของผู้บริโภคจึงเกิดผลไม่ล้นตลาดทำให้เกิดการเน่าเสีย การทำแห้งมะม่วงสุกเป็นวิธีหนึ่งช่วยแก้ปัญหาการสูญเสียนี้ได้ ซึ่งการทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของอาหารสดทำให้สามารถถนอมและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง และยังเป็น การเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหารด้วย [2]

การทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนเป็นวิธีการทำแห้งที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อนและใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ [3] อย่างไรก็ตามวิธีการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนมักส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคต่ำ ผลที่เกิดขึ้นนี้ เช่น สีคล้ำขึ้น เกิดการหดตัว เนื้อสัมผัสแข็งเหนียว กลิ่น และรสชาติเปลี่ยนแปลง [4-5] ทั้งนี้เนื่องจากอาหารเป็นวัสดุชีวภาพที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพจากความร้อนในกระบวนการแปรรูป ดังนั้นการทำแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying) จึงต้องคำนึงถึงการลดความร้อนที่อาหารจะได้รับในกระบวนการแปรรูปเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพและชีวภาพ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวลง การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลและความร้อนโดยการปรับสภาวะในการไหลของลม เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อปรับปรุงกระบวนการทำแห้งอาหาร เช่น การใช้ลมในรูปแบบกระแสลมเจ็ต (jet impingement) พุ่งเข้ากระทบผิวหน้าชิ้นตัวอย่าง [6] การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic) [7] หรือใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงร่วมกับลมร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล

และความร้อนในกระบวนการทำแห้งด้วยความร้อนให้สูงขึ้น [8-9]

การประยุกต์ใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงร่วมกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นเทคโนโลยีที่เรียกว่าการทำแห้งด้วยโคโรนาเวินด์ (Corona wind drying) มีหลักการคือ เหนี่ยวนำให้โมเลกุลอากาศเกิดการแตกตัวเป็นประจุภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง โมเลกุลอากาศที่มีประจุจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนามไฟฟ้าด้วยแรงทางไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้ากระทำต่อประจุ เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ตามที่ได้อธิบายถึงกลไกไว้โดย Yabe et al. (1996) [8] โดยแรงนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสลมที่มีทิศทางไหลตามสนามไฟฟ้าเรียกว่า โคโรนาเวินด์ (Corona wind) ปรากฏการณ์นี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลและความร้อนในกระบวนการทำแห้งให้สูงขึ้น โดยในการพัฒนากระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาเวินด์นี้ มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำแห้ง เช่น ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ และความเข้มสนามไฟฟ้า เป็นต้น โดย Hashinaga et al. (1999) [10] สรุปว่า ขนาดของอิเล็กโทรดในรูปทรงเข็ม ความแรงของสนามไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเข็มอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และ Cao et al. (2004) [9] พบว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือลดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้งในกระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาเวินด์ให้สูงขึ้นได้

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และความเข้มสนามไฟฟ้าร่วมกับอากาศร้อนที่สภาวะอุณหภูมิและความเร็วลมที่ต่ำสุดในกระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาเวินด์ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง การเปลี่ยนสี และการหดตัวของผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแห้ง เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง (*Mangifera indica* L.) คัดเลือกจากท้องตลาดในจังหวัดนครปฐม โดยควบคุมความสม่ำเสมอของตัวอย่างจากสี ขนาด ความแน่นเนื้อ และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid) ด้วยการคัดเลือกมะม่วงที่มีสี และขนาดสม่ำเสมอจากการประเมินสายตา ความแน่นเนื้อมีค่า 9.56 ± 2.82 N จากการวัดด้วย penetrometer (FT 327, Italy) และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16.05 ± 2.20 °Brix จากการวัดด้วย hand refractometer (Atago, Master-M, Japan) นำมะม่วงมาปอกเปลือกจากนั้นวัด Brix นำตัวอย่างที่คัดเลือกได้มาทำความสะอาด ปอกเปลือก และตัดแต่งเป็นชิ้นขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ $2.0 \times 2.0 \times 1.0$ ซม. โดยปริมาณร้อยละความชื้นฐานแห้ง (%dry basis moisture content) ของตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ AOAC (2000) [11] เท่ากับ 440.00 ± 0.15 g/g

2. อุปกรณ์และเครื่องมือการทำแห้ง

อุปกรณ์การทำแห้งด้วยอากาศร้อนและโคโรนาเวินด์ (Figure 1) มีโครงสร้างอุปกรณ์ทำแห้งผลิตจากแผ่น poly (methyl methacrylate) หนา 5 มม. มีขนาดกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ $15 \times 55 \times 85$ cm พัดลม (1) ทำให้เกิดการไหลของอากาศจากด้านบนผ่านตัวอย่างในห้องทำแห้ง การควบคุมความเร็วลมในการทำแห้งทำโดยใช้ vane type anemometer (Lutron AM-4201) ร่วมกับการใช้อุปกรณ์หรี่ไฟ (dimmer) เพื่อปรับความเร็วพัดลม ส่วนอุณหภูมิของลมในการทำแห้งจะควบคุมด้วย (2) Temperature controller ซึ่งต่ออยู่กับ (3) ขดลวดความร้อน และ (4) PT100 sensor

(Polyscience, USA) ติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าอากาศ โดย (5) ตัวอย่างน้ำหนักรวม 179.27 ± 7.65 g ถูกวางอยู่บนตะแกรงที่มีพื้นที่หน้าตัดสำหรับลมผ่านขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 8×8 cm ถูกยึดอยู่บน (6) Load cell ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณน้ำหนักของตัวอย่างและส่งข้อมูลน้ำหนักของตัวอย่างทุกๆ 60 วินาทีไปบันทึกยัง (7) คอมพิวเตอร์ การกำเนิดกระแสลมโคโรนาในการทำแห้งมีการติดตั้ง (8) emitter electrode ทำจากเข็มสแตนเลสปลายแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 9 แท่งติดตั้งอยู่ด้านบนตัวอย่าง (9) collector electrode ลักษณะเป็นตะแกรง สแตนเลส ติดตั้งอยู่ด้านล่างของตัวอย่าง แหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (cx-1540A, Cheng Du innovative electronic factory, China) (10) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงผ่านอิเล็กโทรดทั้ง 2 โดยวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดได้จากมัลติมิเตอร์ (Model JGY-100, China) ผ่าน high voltage probe (Fluke 80K-40 High Voltage Probe, Fluke Corporation, USA) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (11) สามารถปรับตั้งได้โดยการปรับเลื่อน emitter electrode ขึ้น-ลง ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดในการทำแห้งสามารถกำหนดได้จากการปรับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (1)

$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

เมื่อ E ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (kV/cm) U คือ ค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด (kV) และ d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

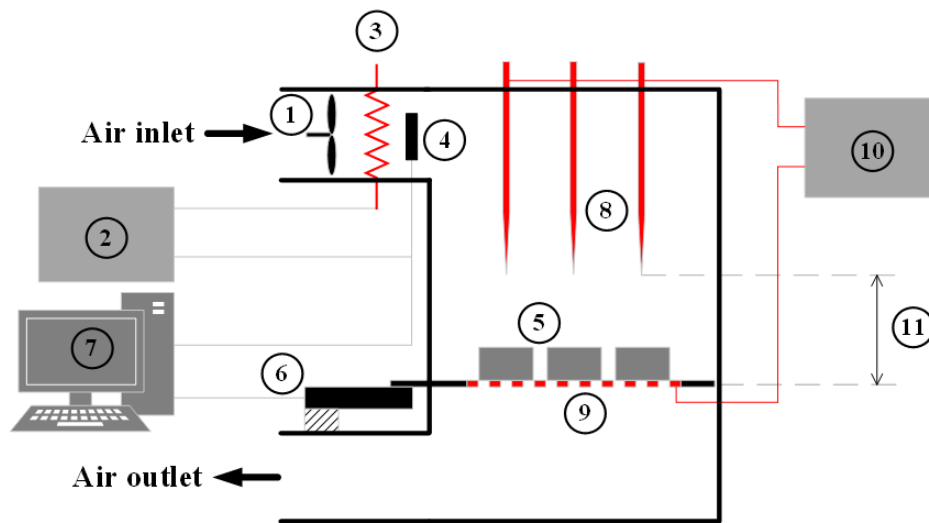


Figure 1 The experimental set up of hot air drying and corona wind drying was consisted (1) fan, (2) Temperature controller, (3) heater, (4) PT-100, (5) sample, (6) load cell, (7) computer, (8) Emitter electrode, (9) Collector electrode, (10) High voltage transformer and (11) electrode gap

3. วิธีการทำแห้ง

การทำแห้งด้วยลมร้อนเริ่มจากการผ่านลมร้อนเข้าไปในห้องทำแห้งโดยปรับตั้งอุณหภูมิและความเร็วลมให้ได้สภาวะตามต้องการโดยกำหนดสภาวะในการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน 9 สภาวะที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1, 1.5 และ 2 m/s ดังแสดงใน Table 1 เมื่อห้องทำแห้งอยู่ภายใต้สมดุลในสภาวะที่กำหนดจึงนำตัวอย่างที่เตรียมไว้บนตะแกรงใส่ในห้องทำแห้งและเริ่มบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่างทุก 60 วินาที กระบวนการทำแห้งจะสิ้นสุดเมื่อน้ำหนักตัวอย่างมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นด้วยวิธีของ AOAC (2000) [11] เพื่อนำไปใช้คำนวณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำแห้งต่อไป

การทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ทุกสภาวะที่ศึกษา กำหนดให้ใช้อุณหภูมิและความเร็วลมคงที่ 50 องศา

เซลเซียส และ 1.0 m/s โดยสภาวะในการกำเนิดกระแสโคโรนา กำหนดที่ความเข้มสนามไฟฟ้าเป็น 0, 4 และ 8 kV/cm และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 3, 4 และ 5 cm (Figure 1) กระบวนการทำแห้งเริ่มจากการปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามที่กำหนด ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของลมของห้องทำแห้งให้อยู่ภายใต้สมดุลที่กำหนด 50 องศาเซลเซียส และ 1.0 m/s นำตัวอย่างที่เตรียมไว้บนตะแกรงใส่ในห้องทำแห้ง และปรับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ไหลอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดจากการปรับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดและเริ่มบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่างทุก 60 วินาที จนสิ้นสุดการทำแห้งเมื่อน้ำหนักตัวอย่างมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นด้วยวิธีของ AOAC (2000) [11] เพื่อนำไปใช้คำนวณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำแห้งต่อไปเช่นเดียวกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

Table 1 The established conditions for hot air drying and corona wind drying

	Hot air drying		Corona wind drying		
	T (°C)	v (m/s)		E (kV/cm)	G (cm)
T50v1.0	50	1.0	E0G3	0	3
T50v1.5	50	1.5	E0G4	0	4
T50v2.0	50	2.0	E0G5	0	5
T60v1.0	60	1.0	E4G3	4	3
T60v1.5	60	1.5	E4G4	4	4
T60v2.0	60	2.0	E4G5	4	5
T70v1.0	70	1.0	E8G3	8	3
T70v1.5	70	1.5	E8G4	8	4
T70v2.0	70	2.0	E8G5	8	5

where T is temperature (°C), v is velocity (m/s), E is electric field strength (kV/cm) and G is electrode gap (cm)

4. การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

ความชื้นของตัวอย่างจากข้อมูลการทดลองจะถูกนำมาใช้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์การทำแห้งของแต่ละสภาวะการทำแห้ง โดยใช้ความชื้นของตัวอย่างในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (-), X_t คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (kg water/kg dry matter), X_o คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งเริ่มต้นของตัวอย่าง (kg water/kg dry matter) และ X_{eq} คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งสมดุลของตัวอย่างกับสภาวะการทำแห้ง (kg water/kg dry matter)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการทำแห้งแสดงด้วยเส้นโค้งการทำแห้ง (Drying curve) เป็นพฤติกรรมการทำแห้งตัวอย่างในแต่ละสภาวะ ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Lewis [12], Page [13] และ Henderson and Pabis [14] ดังสมการที่ 3, 4 และ 5

$$MR = \exp(-kt) \quad (3)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (4)$$

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5)$$

เมื่อ a, k และ n คือค่าคงที่ในแบบจำลอง และ t คือเวลาในการทำแห้ง (วินาที)

ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ทางสถิติคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2), รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error, $RMSE$) และค่าไคสแควร์ (χ^2) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังที่แสดงในสมการที่ (6), (7) และ (8) ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุดควรจะมีค่า R^2 สูงที่สุดแต่มีค่า $RMSE$ และ χ^2 ต่ำที่สุด

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual sum square}}{\text{Total sum square}} \quad (6)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i}]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i}]^2}{n-z} \quad (8)$$

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

โดย MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง, MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง, n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์, z คือ จำนวนของค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อัตราเร็วในการทำแห้ง ณ เวลาใดๆ ของกระบวนการสามารถแสดงได้ด้วยอัตราการแห้ง (drying rate) แสดงถึง การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการ (9)

$$DR = -\frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad (9)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการแห้ง (kg water \times kg dry matter⁻¹ s⁻¹) $X_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นของตัวอย่างที่ $t + \Delta t$ (kg water / kg dry matter) และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (s)

ประสิทธิภาพการทำแห้งโดยรวมของทั้งกระบวนการแสดงได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) ในการวิเคราะห์ ค่า D_{eff} สำหรับการถ่ายโอนมวล (ความชื้น) ออกจากตัวอย่างในสามมิติ [15-16] แสดงดังสมการที่ (10) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากกฎ Fick's second law of diffusion โดยข้อสมมติ (assumption) ในการใช้สมการนี้ คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของทุกตัวอย่างมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้น ไม่เกิดการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง และ D_{eff} มีค่าคงที่ตลอดทั้งชิ้นของตัวอย่าง

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 (2m+1)^2 (2k+1)^2} \times \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2} t\right] \times \exp\left[-(2m+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Y^2} t\right] \times \exp\left[-(2k+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Z^2} t\right] \quad (10)$$

เมื่อ X, Y และ Z คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของชิ้นตัวอย่าง ด้านกว้าง ยาว และสูง (m) และ n, m และ k คือ indexes of summations (-), MR คือ อัตราส่วนความชื้น โดยในการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสามารถลดให้อยู่ในรูปของสมการลำดับที่หนึ่ง และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากความชันของกราฟที่

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาในการทำแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (11) และ (12) โดยค่า L^2 มาจาก $X^2 + Y^2 + Z^2$

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (11)$$

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (12)$$

5. การวิเคราะห์ค่าสี

ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งมีความชื้น 0.25 ± 0.12 g/g solid แสดงการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากกระบวนการทำแห้งได้โดยวิเคราะห์จากพารามิเตอร์สีของตัวอย่างในมิติของ Hunter Lab ในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยค่า L^* (Lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง (0-100) ค่า a^* (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีเขียว ค่า b^* (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน โดยค่าบวก L^* , a^* และ b^* หมายถึง ความสว่าง ความเป็นสีแดงและมีความเป็นสีเหลือง ตามลำดับ ขณะที่ค่าลบแสดงถึงความมืด ความเป็นสีเขียว และความเป็นสีน้ำเงิน ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้การทดลองวัดขึ้นมะม่วงทั้งก่อนและหลังทำแห้งจำนวน 9 ชิ้น และหาค่าเฉลี่ยโดยวัดตัวอย่างละ 3 ชิ้น สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (Total color differences: ΔE^*) ได้จากสมการที่ (13):

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (13)$$

เมื่อ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าพารามิเตอร์สีของตัวอย่างก่อนทำแห้ง และ L^* , a^* และ b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของตัวอย่างหลังทำแห้ง

6. การวิเคราะห์การหดตัว (Shrinkage)

การหดตัวของตัวอย่างแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างภายหลังการทำแห้งเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทำแห้งดังสมการที่ (14) จากการวัดขนาดของตัวอย่าง (ความกว้าง \times ความยาว \times ความหนา) ก่อนและหลังการทำแห้ง จะถูกวัดด้วยเวอร์เนียร์เนยีคาลิปเปอร์ (Mitutoyo, series No. 522, Japan) อย่างน้อย 3 ชิ้น

$$S = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (14)$$

เมื่อ S คือ ร้อยละการหดตัวของตัวอย่าง (%) V_0 คือ ปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง (m^3) และ V คือ ปริมาตรของตัวอย่างหลังการทำแห้ง (m^3)

7. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยนี้ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำแต่ละสถานะและทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม R version 3.2.2 (R Core Team 2015 program) ร่วมกับแพ็คเกจเสริม agricolae เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามต่างๆ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของแต่ละตัวแปรด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในการทดลองนี้จะทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำในทุกสถานะการทดลอง และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ ตามแผนการทดลองแบบ 3-Level Factorial design ตามที่ระบุไว้ใน Table 1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) สำหรับการทำให้แห้งด้วยลมร้อนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งต่อค่า D_{eff} , ΔE^* และ S ตามลำดับ ส่วนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์จะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อค่า D_{eff} , ΔE^* และ S ตามลำดับ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยอากาศร้อนและโคโรนาวินด์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำให้แห้งด้วยอากาศร้อนและโคโรนาวินด์จากข้อมูลความชื้นของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการทำให้แห้งซึ่งแสดงข้อมูลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำ

แห้งกับความชื้นของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยความสัมพันธ์นี้จะแสดงถึงพฤติกรรมการทำแห้งของแต่ละสถานะการทำแห้ง งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ Lewis, Page และ Henderson and Pabis ดังแสดงไว้ในสมการที่ (3)-(5) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำแห้งสำหรับกระบวนการและสถานะการทำแห้งที่ศึกษาจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำแห้ง (drying time) กับความชื้นของตัวอย่าง (moisture content) การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ชนิดคือ R^2 , $RMSE$ และ χ^2 ดังแสดงใน Table 2 เพื่อแสดงความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลอง เมื่อพิจารณากระบวนการทำให้แห้งด้วยลมร้อนพบว่า แบบจำลองของ Page มีค่า R^2 สูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.98539-0.99080 ในขณะที่ค่า $RMSE$ และ χ^2 ต่ำที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 0.02301-0.02619 และ 0.00053-0.00069 ตามลำดับในทุกสถานะ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้อธิบายข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาที่พบในการทำแห้งมะม่วง [17-18]

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

Table 2 constants and statistic values for models of hot air drying and corona wind drying

Model	Drying conditions	Model constants	R^2	RMSE ($\times 10^2$)	$\chi^2 (\times 10^5)$	
Hot air drying						
Lewis	V1.0T50	$k=7.187 \times 10^{-5}$	0.98435	0.03230	0.00111	
	V1.5T50	$k=7.521 \times 10^{-5}$	0.97905	0.03422	0.00120	
	V2.0T50	$k=8.445 \times 10^{-5}$	0.98496	0.02921	0.00086	
	V1.0T60	$k=7.365 \times 10^{-5}$	0.98194	0.03100	0.00100	
	V1.5T60	$k=10.681 \times 10^{-5}$	0.98500	0.02859	0.00082	
	V2.0T60	$k=11.185 \times 10^{-5}$	0.97770	0.03268	0.00108	
	V1.0T70	$k=10.306 \times 10^{-5}$	0.98429	0.02832	0.00081	
	V1.5T70	$k=12.295 \times 10^{-5}$	0.96617	0.03660	0.00140	
	V2.0T70	$k=14.505 \times 10^{-5}$	0.97239	0.03344	0.00116	
Page	V1.0T50	$k=6.791 \times 10^{-5}$	$n=1.00407$	0.99008	0.02619	0.00069
	V1.5T50	$k=8.875 \times 10^{-5}$	$n=0.99761$	0.98960	0.02500	0.00063
	V2.0T50	$k=8.048 \times 10^{-5}$	$n=1.01182$	0.98933	0.02482	0.00062
	V1.0T60	$k=8.453 \times 10^{-5}$	$n=0.99592$	0.99080	0.02301	0.00053
	V1.5T60	$k=10.610 \times 10^{-5}$	$n=0.99988$	0.98898	0.02457	0.00061
	V2.0T60	$k=11.133 \times 10^{-5}$	$n=1.01471$	0.98784	0.02433	0.00059
	V1.0T70	$k=10.430 \times 10^{-5}$	$n=1.00407$	0.98857	0.02454	0.00060
	V1.5T70	$k=13.388 \times 10^{-5}$	$n=1.00773$	0.98617	0.02421	0.00059
	V2.0T70	$k=14.541 \times 10^{-5}$	$n=1.01384$	0.98539	0.02488	0.00062
Henderson and Pabis	V1.0T50	$k=7.403 \times 10^{-5}$	$a=1.02919$	0.98539	0.03136	0.00104
	V1.5T50	$k=7.483 \times 10^{-5}$	$a=0.99590$	0.98173	0.03211	0.00105
	V2.0T50	$k=8.312 \times 10^{-5}$	$a=0.98511$	0.98597	0.02819	0.00080
	V1.0T60	$k=7.088 \times 10^{-5}$	$a=0.96534$	0.98609	0.02783	0.00078
	V1.5T60	$k=10.626 \times 10^{-5}$	$a=0.99439$	0.98527	0.02835	0.00081
	V2.0T60	$k=11.053 \times 10^{-5}$	$a=0.98893$	0.97792	0.03253	0.00107
	V1.0T70	$k=10.139 \times 10^{-5}$	$a=0.98485$	0.98502	0.02777	0.00078
	V1.5T70	$k=12.310 \times 10^{-5}$	$a=0.95629$	0.96881	0.03527	0.00130
	V2.0T70	$k=14.589 \times 10^{-5}$	$a=1.00505$	0.97252	0.03334	0.00116

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

Table 2 (continued) constants and statistic values for models of hot air drying and corona wind drying

Model	Drying conditions	Model constants	R^2	$RMSE$ ($\times 10^3$)	χ^2 ($\times 10^5$)	
Corona wind drying						
Lewis	E0G3	$k=7.305 \times 10^{-5}$	0.98985	0.02547	0.00065	
	E0G4	$k=6.919 \times 10^{-5}$	0.98740	0.02882	0.00083	
	E0G5	$k=8.665 \times 10^{-5}$	0.98750	0.02749	0.00076	
	E4G3	$k=12.802 \times 10^{-5}$	0.98436	0.02755	0.00076	
	E4G4	$k=16.187 \times 10^{-5}$	0.98479	0.02562	0.00066	
	E4G5	$k=15.367 \times 10^{-5}$	0.97512	0.03204	0.00106	
	E8G3	$k=22.847 \times 10^{-5}$	0.95405	0.03519	0.00128	
	E8G4	$k=22.440 \times 10^{-5}$	0.96345	0.03579	0.00129	
	E8G5	$k=14.641 \times 10^{-5}$	0.98342	0.02665	0.00071	
Page	E0G3	$k=6.123 \times 10^{-5}$	$n=1.02307$	0.99067	0.02445	0.00060
	E0G4	$k=6.671 \times 10^{-5}$	$n=1.00588$	0.99023	0.02545	0.00065
	E0G5	$k=6.329 \times 10^{-5}$	$n=1.03906$	0.98980	0.02486	0.00062
	E4G3	$k=9.511 \times 10^{-5}$	$n=1.03721$	0.98768	0.02447	0.00060
	E4G4	$k=13.301 \times 10^{-5}$	$n=1.02346$	0.98545	0.02506	0.00063
	E4G5	$k=10.415 \times 10^{-5}$	$n=1.04869$	0.98627	0.02432	0.00059
	E8G3	$k=18.325 \times 10^{-5}$	$n=1.03793$	0.97990	0.02394	0.00058
	E8G4	$k=15.752 \times 10^{-5}$	$n=1.04086$	0.98166	0.02536	0.00065
	E8G5	$k=14.930 \times 10^{-5}$	$n=1.00217$	0.98553	0.02493	0.00062
Henderson and Pabis	E0G3	$k=7.359 \times 10^{-5}$	$a=1.007265$	0.98990	0.02540	0.00065
	E0G4	$k=6.992 \times 10^{-5}$	$a=1.010346$	0.98906	0.02689	0.00073
	E0G5	$k=8.786 \times 10^{-5}$	$a=1.014566$	0.98862	0.02621	0.00069
	E4G3	$k=12.946 \times 10^{-5}$	$a=1.011035$	0.98452	0.02740	0.00075
	E4G4	$k=16.549 \times 10^{-5}$	$a=1.022996$	0.98534	0.02515	0.00063
	E4G5	$k=15.595 \times 10^{-5}$	$a=1.014306$	0.97572	0.03161	0.00103
	E8G3	$k=22.281 \times 10^{-5}$	$a=0.977071$	0.95497	0.03490	0.00126
	E8G4	$k=23.276 \times 10^{-5}$	$a=1.038573$	0.96460	0.03522	0.00125
	E8G5	$k=14.501 \times 10^{-5}$	$a=0.990786$	0.98363	0.02649	0.00070

where R^2 is the coefficient of determination, χ^2 is the reduced Chi-square and $RMSE$ is the root mean square error

1.1 กราฟการทำแห้งมะม่วงสุก

พฤติกรรมการทำแห้งของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ในแต่ละสภาวะการทำแห้ง แสดงได้ด้วยเส้นโค้งการทำแห้ง (drying curve) (Figure 2) ซึ่ง drying curve นี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในกระบวนการทำแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (Figure 2a) และโคโรนาวินด์ (Figure 2b) พบว่า พฤติกรรมการทำ

แห้งโดยรวมของกระบวนการทำแห้งทั้ง 2 วิธี มีลักษณะคล้ายกัน คือ ในช่วงแรกของกระบวนการทำแห้ง ความชื้นของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วและต่อจากนั้นการลดของความชื้นจะช้าลงตามลำดับ จนในช่วงท้ายของกระบวนการทำแห้งความชื้นของตัวอย่างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความชื้นของตัวอย่างสมดุลกับสภาวะในกระบวนการทำแห้ง (equilibrium moisture content) ซึ่งความชื้นของตัวอย่างจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไปหรือมี

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

อัตราการแห้งเท่ากับ 0 เนื่องจากในช่วงเริ่มต้น กระบวนการแห้งขึ้นตัวอย่างมีความชื้นสูง ทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำภายในชิ้นตัวอย่างกับความดันไอน้ำในอากาศร้อนที่ใช้ทำแห้งมีค่าสูงตามไปด้วย จึงส่งผลให้มีแรงขับของการถ่ายโอนมวลสูง เมื่อกระบวนการทำแห้งดำเนินไปความดันไอน้ำภายในชิ้นตัวอย่างจะลดลง เนื่องจากความชื้นในตัวอย่างลดลง ส่งผลให้แรงขับของการถ่ายโอนมวลลดต่ำลงตามไปด้วย [19] Figure 2a แสดงพฤติกรรมกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะการทำแห้งต่างๆ พบว่า กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 m/s เป็นสภาวะในการทำแห้งที่สามารถลดความชื้นตัวอย่างลงได้เร็วที่สุดในขณะที่กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 m/s เป็นสภาวะในการทำแห้งที่ลดความชื้นตัวอย่างลงได้ช้าที่สุด เมื่อเปรียบเทียบในทุกสภาวะการทำแห้งจะพบว่า อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งที่ระดับอุณหภูมิสูงมีผลให้ความชื้นของตัวอย่างลดลงได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า และพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้ความเร็วลมร้อนที่ระดับความเร็วสูงสามารถลดความชื้นของตัวอย่างลงได้เร็วกว่าการใช้ระดับความเร็วลมที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบในสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นการทำแห้งตัวอย่างด้วยอุณหภูมิและความเร็วลมในระดับที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ศึกษา

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งบลูเบอร์รี่ [20] และ ศึกษาการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน [17]

สำหรับพฤติกรรมกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์ แสดงดัง Figure 2b โดยศึกษาตัวแปรในกระบวนการทำแห้ง 2 ชนิด คือ electric field strength และ electrode gap ต่อพฤติกรรมกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก พบว่าสภาวะการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ที่สามารถลดความชื้นของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งได้เร็วที่สุด คือ สภาวะในการทำแห้งที่ใช้ electric field strength 8 kV/cm และ electrode gap 3 cm และพบว่า การทำแห้งตัวอย่างโดยไม่มีสนามไฟฟ้าหรือใช้ electric field strength 0 kV/cm จะลดความชื้นของตัวอย่างได้ช้าที่สุด ซึ่งในสภาวะนี้ electrode gap จะไม่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์ และจากการทำแห้งโดยใช้ electric field strength ในระดับสูงและการลด electrode gap ลง จะช่วยให้กระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์สามารถลดความชื้นในตัวอย่างลงได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก electric field strength ที่มีค่าสูงขึ้นจะเพิ่มจำนวนโมเลกุลอากาศที่เป็นประจุมากขึ้น ส่งผลให้กระแสลมโคโรนามีความเร็วยิ่งขึ้นจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลได้มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของการทำแห้งสูงขึ้น [9-10, 21-23]

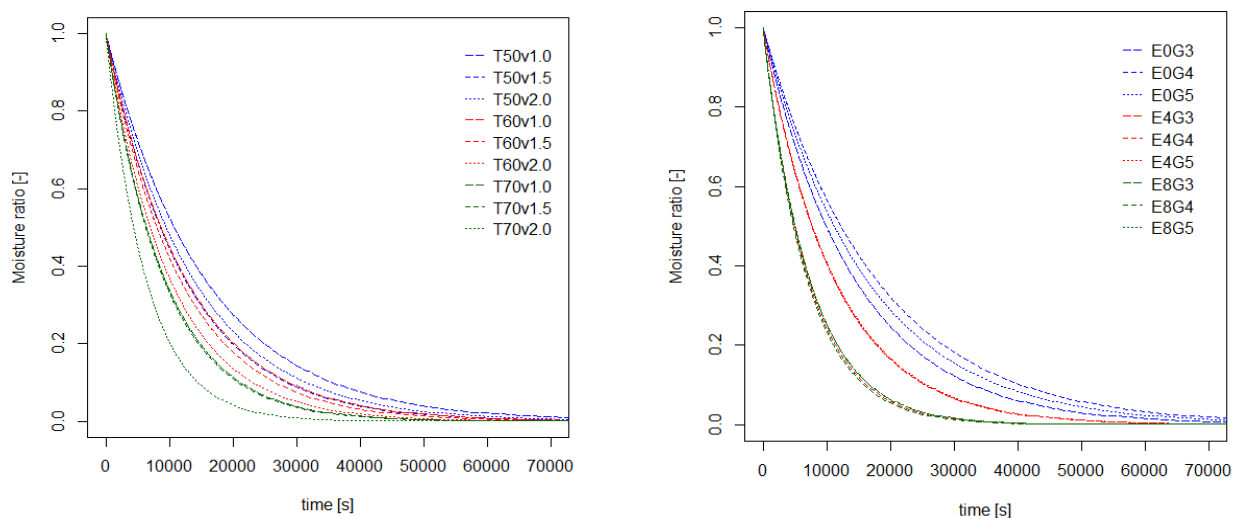


Figure 2 Drying curves of ripe mango at various conditions from (a) hot air drying and (b) corona wind drying

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

1.2 อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ที่สภาวะต่างๆ แสดงดัง Figure 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กลไกการทำแห้งทั้ง 2 วิธีในทุกๆ สภาวะ จะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling period) เท่านั้น และไม่ปรากฏช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant period) ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองกระบวนการใช้ตัวกลางในการทำแห้งชนิดเดียวกันคืออากาศ และโดยทั่วไปพบว่า กลไกการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำอิสระในอาหาร แต่ตัวอย่างที่นำมาทำแห้งในการศึกษานี้คือมะม่วงสุก ซึ่งมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในชิ้นตัวอย่างไม่มากพอที่จะแสดงให้เห็นช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ จาก Figure 3 อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกของทั้ง 2 กระบวนการมีลักษณะคล้ายกัน โดยอัตราการทำแห้งจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงเริ่มต้นกระบวนการเนื่องจากความชื้นในชิ้นตัวอย่างในช่วงเริ่มต้นกระบวนการมีค่ามากที่สุด ทำให้มีแรงขับของการถ่ายโอนมวลสูงในช่วงต้นของกระบวนการทำแห้ง และอัตราการทำแห้งจะค่อยๆ ลดลงในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้นของตัวอย่าง กระบวนการทำแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของชิ้นตัวอย่างอยู่ภายใต้สมดุลกับลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการทำแห้ง และ ณ จุดสมดุลของกระบวนการทำแห้งนี้ อัตราการทำแห้งของกระบวนการจะมีค่าเท่ากับ 0 เป็นการสิ้นสุดกระบวนการทำแห้ง ผลการทดลองที่พบในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ศึกษาการทำแห้งแอปเปิ้ล [24] กีวี [25] และหัวไชเท้า [26]

พิจารณาอัตราการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนใน Figure 3a พบว่าทั้งอุณหภูมิและความเร็วลมร้อน มีผลต่ออัตราการทำแห้งตัวอย่าง เมื่อพิจารณาในสภาวะการทำแห้งที่ความเร็วลม (air velocity) เท่ากัน พบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาในสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิลม (air temperature) เท่ากัน พบว่าสภาวะที่ใช้ความเร็วลมร้อน (air velocity) สูงกว่าจะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าที่ air velocity ต่ำกว่า ดังนั้นการทำแห้งด้วยสภาวะ air temperature และ air velocity ที่มีค่าสูงในงานวิจัยนี้คือ 70 องศาเซลเซียส และ 2 m/s ตามลำดับ จะเป็นกระบวนการทำแห้งที่ให้อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกสูงที่สุด

Figure 3b แสดงอัตราการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์ในทุกสภาวะ พบว่า ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field strength) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (electrode gap) มีผลต่ออัตราการทำแห้งตัวอย่าง โดยการทำแห้งด้วยค่า electric field strength ที่สูง มีผลทำให้อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์มีค่าสูงกว่าการการทำแห้งที่ใช้ electric field strength ที่ต่ำกว่า ในขณะที่ electrode gap มีผลตรงกันข้าม คือกระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ที่ใช้ electrode gap ที่แคบจะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่ากระบวนการทำแห้งด้วย electrode gap ที่กว้างกว่าเมื่อพิจารณาในกระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ที่ electric field strength เท่ากัน

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

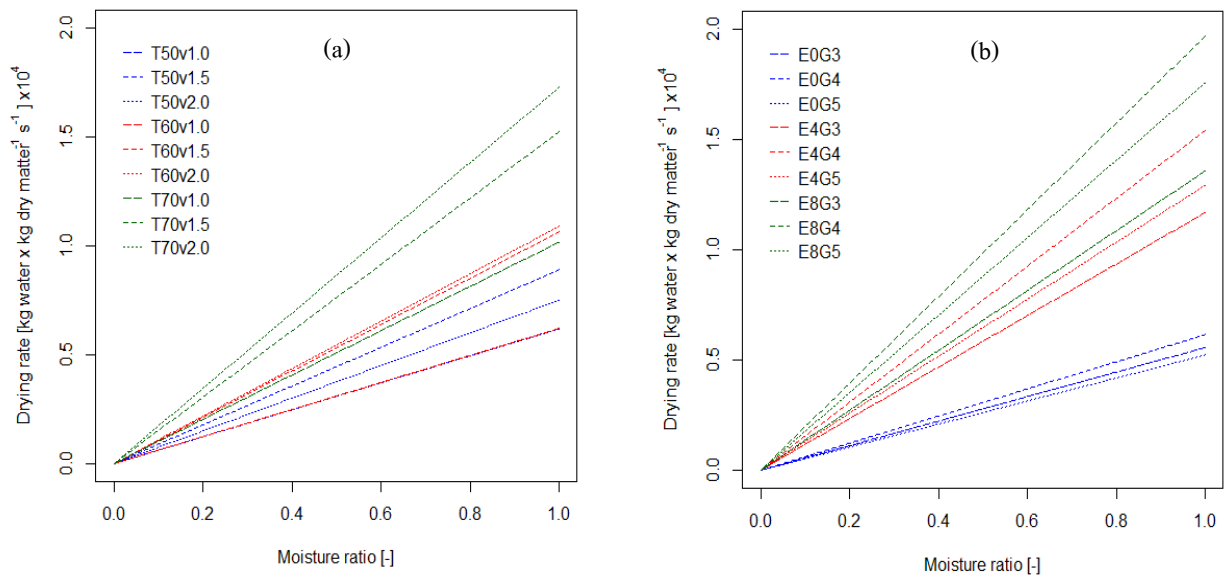


Figure 3 Drying rate of ripe mango at various conditions from (a) hot air drying (b) corona wind drying

1.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ของกระบวนการทำแห้ง

ค่า D_{eff} ของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ที่พบในการศึกษานี้แสดงดัง Table 3 โดยค่า D_{eff} แสดงถึงความสามารถในการกำจัดความชื้นโดยรวมของกระบวนการทำแห้งแต่ละสถานะสำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนมีค่า D_{eff} อยู่ในช่วง 1.61×10^{-8} - 3.39×10^{-8} m²/s ส่วนค่า D_{eff} ของกระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์อยู่ในช่วง

1.64×10^{-8} - 5.25×10^{-8} m²/s ค่า D_{eff} มีความสัมพันธ์กับทั้ง air temperature-air velocity และ electric field strength-electrode gap ที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ที่สภาวะต่างๆ ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (linear equation) และสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ตามลำดับดังสมการที่ (15) และ (16) แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4a และ 4b

$$D_{eff} = -2.15 \times 10^{-8} + 5.53 \times 10^{-10}T + 7.67 \times 10^{-9}v \quad (15)$$

$$D_{eff} = -5.71 \times 10^{-8} + 1.03 \times 10^{-8}E + 3.45 \times 10^{-8}G - 1.48 \times 10^{-10}E^2 - 3.82 \times 10^{-9}G^2 - 1.39 \times 10^{-9}EG \quad (16)$$

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

Table 3 Effective diffusivity coefficient (D_{eff}), total color differences (ΔE^*) and area shrinkage percentage (S) of dried ripe mango at various conditions from (a) hot air drying (b) corona wind drying

Drying conditions	D_{eff} (m^2/s) $\times 10^8$	ΔE^* (-)	S (%)
Hot air drying			
V1.0T50	1.61 \pm 0.15 ^f	28.89 \pm 2.04 ^a	40.91 \pm 2.24 ^{bc}
V1.5T50	1.81 \pm 0.05 ^{ef}	27.39 \pm 1.69 ^{ab}	45.17 \pm 1.80 ^a
V2.0T50	1.93 \pm 0.05 ^e	25.03 \pm 1.14 ^{abcd}	39.47 \pm 1.32 ^{bcd}
V1.0T60	1.70 \pm 0.06 ^{ef}	26.84 \pm 0.21 ^{abc}	38.65 \pm 1.63 ^{cd}
V1.5T60	2.36 \pm 0.13 ^d	25.99 \pm 1.92 ^{abcd}	42.09 \pm 1.83 ^{abc}
V2.0T60	2.63 \pm 0.12 ^c	23.38 \pm 1.78 ^{bcd}	39.39 \pm 2.26 ^{bcd}
V1.0T70	2.34 \pm 0.02 ^d	23.96 \pm 4.21 ^{bcd}	36.42 \pm 1.93 ^d
V1.5T70	2.94 \pm 0.18 ^b	23.07 \pm 2.60 ^{cd}	42.75 \pm 1.86 ^{ab}
V2.0T70	3.39 \pm 0.22 ^a	22.19 \pm 1.08 ^d	39.60 \pm 0.92 ^{bcd}
Corona wind drying			
E0G3	1.64 \pm 0.03 ^f	29.03 \pm 0.15 ^{ab}	41.63 \pm 1.31 ^a
E0G4	1.55 \pm 0.09 ^f	28.79 \pm 0.27 ^b	41.82 \pm 1.99 ^a
E0G5	1.95 \pm 0.10 ^e	29.29 \pm 0.20 ^a	40.05 \pm 0.68 ^a
E4G3	2.90 \pm 0.08 ^d	15.14 \pm 0.33 ^d	30.19 \pm 2.74 ^c
E4G4	3.65 \pm 0.03 ^b	17.03 \pm 0.17 ^c	33.86 \pm 0.73 ^b
E4G5	3.51 \pm 0.20 ^{bc}	16.72 \pm 0.17 ^c	33.12 \pm 1.79 ^{bc}
E8G3	5.23 \pm 0.19 ^a	12.39 \pm 0.35 ^s	24.23 \pm 1.31 ^d
E8G4	5.15 \pm 0.34 ^a	13.62 \pm 0.12 ^e	25.71 \pm 2.59 ^d
E8G5	3.32 \pm 0.05 ^c	12.88 \pm 0.20 ^f	26.44 \pm 1.22 ^d

^{a-f} Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

จาก Figure 4a แสดงให้เห็นว่า air temperature และ air velocity เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า D_{eff} โดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมส่งผลให้ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้น ในขณะที่การลดอุณหภูมิและความเร็วลมจะส่งผลให้ค่า D_{eff} ต่ำลง (Figure 4a) กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะ air temperature และ air velocity สูงที่สุดในการศึกษานี้คือ 70 องศาเซลเซียส และ 2 m/s ตามลำดับ เป็นสภาวะที่มีค่า D_{eff} สูงที่สุด ($3.39 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) ในขณะที่ทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะ air temperature และ air velocity ต่ำที่สุดคือ 50 องศาเซลเซียส และ 1 m/s ตามลำดับ จะมีค่า D_{eff} ต่ำที่สุด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิอากาศที่สูงทำให้ความชื้นในอากาศลดต่ำลง ความ

แตกต่างของความชื้นที่ขึ้นตัวอย่างกับอากาศจึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในขึ้นตัวอย่างออกสู่อากาศมากขึ้น ส่วนการเพิ่ม air velocity ให้สูงขึ้น จะลดความหนาของชั้นฟิล์มรอบๆ ผิวตัวอย่างซึ่งต้านทานการถ่ายโอนความชื้นจากชั้นอาหารสู่อากาศ ค่า D_{eff} ของกระบวนการจึงมีค่าเพิ่มขึ้น [6, 27]

Figure 4b พบว่าทั้ง electric field strength และ electrode gap มีผลต่อค่า D_{eff} โดยการทำให้ electric field strength สูง และ electrode gap น้อยจะมีค่า D_{eff} สูงที่สุด การทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์ที่ electric field strength 8 kV/cm และ electrode gap 3 cm มีค่า D_{eff} สูงที่สุดเท่ากับ $5.23 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ส่วนการลด electric field

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

strength และเพิ่ม electrode gap จะทำให้ค่า D_{eff} ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่ม electric field strength เป็นการเพิ่มอัตราการไหลของลมที่มีประจุ (ionic wind) ซึ่งถูกบังคับทิศทางไหลด้วยแรงทางไฟฟ้าให้พุ่งเข้ากระทบกับผิวหน้าชิ้นอาหารได้โดยตรง ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลและความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทำแห้งโดยไม่มีสนามไฟฟ้าจะมีค่า D_{eff} เท่ากับการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ air temperature 50 องศาเซลเซียส และ air velocity 1 m/s เนื่องจากไม่มีผลจากโคโรนาวินด์มาช่วยเสริมประสิทธิภาพการทำแห้งสถานะนี้จึงมีค่า D_{eff} เท่ากับการทำแห้งด้วยลมร้อนนั่นเอง

2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง

การเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำแห้งเป็นผลเนื่องจากตัวอย่างได้รับผลกระทบจากสถานะการทำแห้งที่ใช้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งโดยการเปลี่ยนแปลงสำคัญที่มักพบกับการทำแห้งอาหาร คือ การเปลี่ยนสีและการหดตัว จากการศึกษพบว่า ทั้ง

กระบวนการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์กับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของตัวอย่างในด้านการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่างลงได้

2.1 การเปลี่ยนแปลงสี

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านสีของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ในงานวิจัยนี้แสดงด้วยค่า ΔE^* ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกหลังผ่านการทำแห้งเปรียบเทียบกับสีมะม่วงสุกก่อนการทำแห้ง Table 3 แสดงค่า ΔE^* ในทุกสถานะการทำแห้งจากกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ พบว่าค่า ΔE^* ของตัวอย่างจากการทำแห้งด้วยลมร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 22.19 - 28.89 และ 12.39 - 29.29 ตามลำดับ พบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลม และ electric field strength - electrode gap ที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ต่อค่า ΔE^* อยู่ในรูปแบบของสมการกำลังสอง ดังสมการที่ (17) และ (18)

$$\Delta E^* = 31.16 + 0.17T - 2.61v - 4.38 \times 10^{-3}T^2 - 2.23v^2 - 0.10Tv \quad (17)$$

$$\Delta E^* = 16.71 - 4.34E + 6.07G + 0.28E^2 - 0.72G^2 + 1.44 \times 10^{-2}EG \quad (18)$$

Figure 4c และ 4d แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการทำแห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ต่อค่า ΔE^* พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งด้วยลมร้อนมีผลให้ค่า ΔE^* ลดลง (Figure 4c) สถานะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 m/s จึงเป็นสถานะที่ค่า ΔE^* ของตัวอย่างต่ำที่สุด (22.19) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) ในชิ้นตัวอย่างเป็นหลัก จากความสัมพันธ์ใน Figure 4c พบว่าการเพิ่มความเร็วลมร้อนมีผลต่อการลดค่า ΔE^* ลงจากการที่ความเร็วลมร้อนมีความสัมพันธ์กับจลนพลศาสตร์ในการทำแห้ง โดยการเพิ่มความเร็วลมร้อนจะเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศที่ไหลผ่านตัวอย่าง ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นตัวอย่างจึงแห้งได้เร็วกว่าการใช้ความเร็วลมร้อนที่ต่ำกว่า ซึ่งการที่ตัวอย่างแห้งได้เร็วจะ

ช่วยลดค่า ΔE^* ลงได้มากกว่ากระบวนการทำแห้งที่ใช้ความเร็วลมต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์จะเกิดได้ยากเมื่อ a_w หรือความชื้นของตัวอย่างต่ำ ดังนั้นสถานะการทำแห้งที่ใช้ความเร็วลมสูงจึงสามารถลดค่า ΔE^* ลงได้มากกว่ากระบวนการทำแห้งที่ใช้ความเร็วลมต่ำกว่า เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนต่อค่า ΔE^* พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำแห้งมีผลต่อการลดค่า ΔE^* ถึงแม้ว่าสถานะที่มีอุณหภูมิสูงจะเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็ตาม แต่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส อาจไม่แตกต่างกันมาก จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงสีในกระบวนการทำแห้งนี้ถูกควบคุมด้วยจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งเป็นหลักตามที่อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้นการทำแห้งด้วยสถานะอุณหภูมิร่วมกับความเร็วลมสูงซึ่งมีอัตราการทำ

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

แห้งสูง จึงใช้เวลาในการทำแห้งสั้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้นได้น้อยลง [28-29]

สำหรับการทำแห้งด้วยโคโรนาเวินด์ พบว่า ทั้ง electric field strength และ electrode gap มีผลต่อค่า ΔE^* เมื่อเพิ่ม electric field strength ขึ้น และลด electrode gap ลง มีผลให้ค่า ΔE^* มีแนวโน้มลดลง (Figure 4d) อย่างไรก็ตาม electric field strength มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า ΔE^* มากกว่า electrode gap ดังจะเห็นได้ว่า electrode gap จะมีผลในการลดค่า

ΔE^* ได้มากเมื่อใช้ electric field strength สูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ electric field strength หรือ การลด electrode gap ทำให้กระแสลมโคโรนาที่แรงขึ้น ทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้น จึงใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง ระยะเวลาของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในกระบวนการทำแห้งจึงลดลงร่วมกับการใช้อุณหภูมิทำแห้งในระดับต่ำ จึงลดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างได้ดีขึ้น [30]

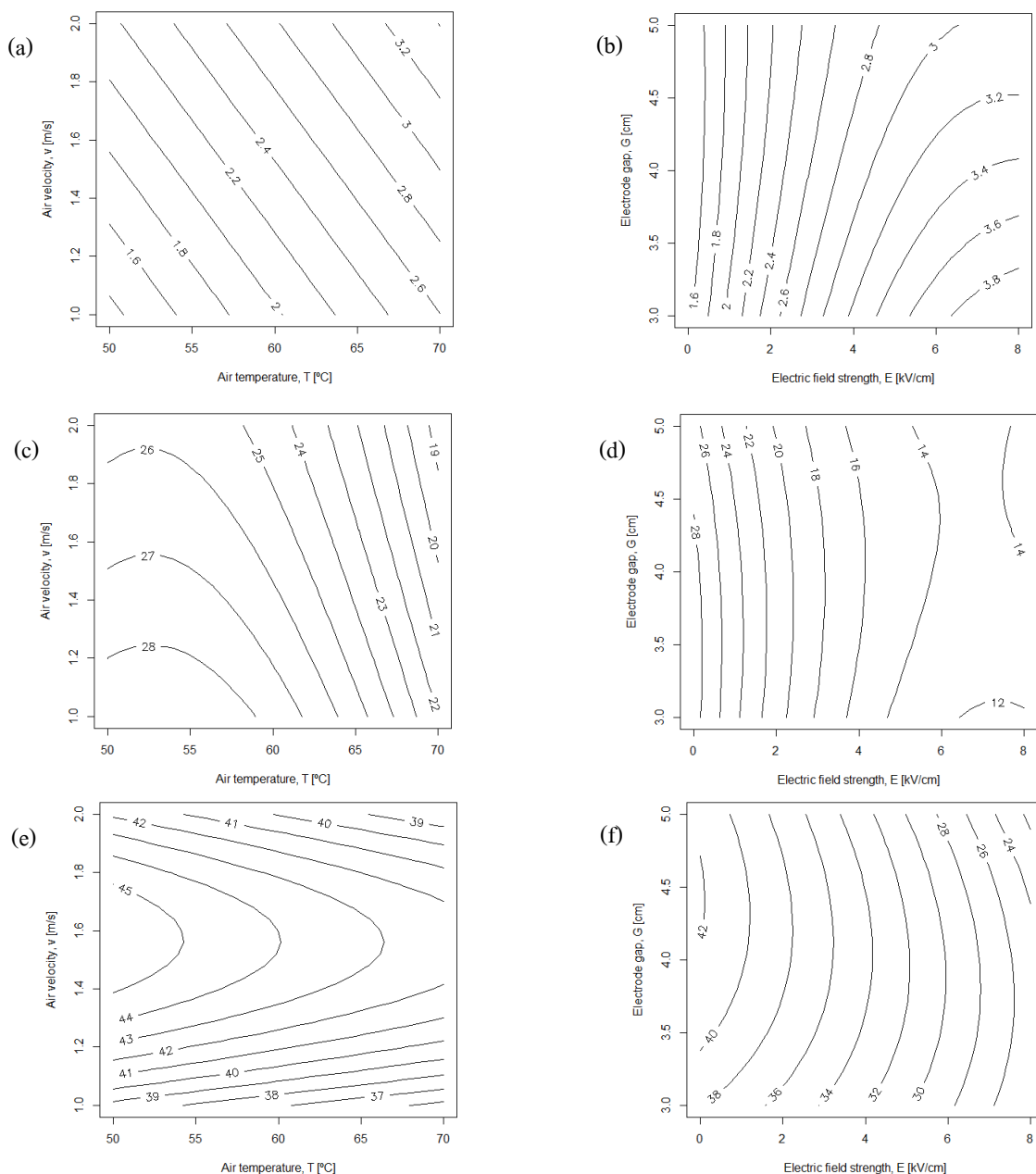


Figure 4 Effect of air temperature and air velocity on D_{eff} , ΔE^* and S in hot air drying (a) (c) (e) and corona wind drying (b) (d) (f)

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

2.2 การหดตัว

การหดตัวของชิ้นตัวอย่างมะม่วงสุกที่ผ่านการทำให้แห้งเป็นปัจจัยสำคัญด้านคุณภาพของตัวอย่างที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการทำให้แห้ง มีความสัมพันธ์กับคุณภาพทั้งในด้านลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัส การหดตัวในการศึกษานี้แสดงด้วยค่าร้อยละการหดตัวโดยปริมาตรหรือ S ใน Table 3 แสดงข้อมูลร้อยละการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งจากกระบวนการทำให้แห้งทั้ง 2 วิธี พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งมีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ

$$S = 69.47 - 1.67T + 34.18v + 1.01 \times 10^{-2}T^2 - 15.74v^2 + 0.23Tv \quad (19)$$

$$S = 20.08 - 3.23E + 11.39G + 4.02 \times 10^{-2}E^2 - 1.47G^2 + 0.24EG \quad (20)$$

พบว่า air temperature และ air velocity ที่ใช้ในการทำให้แห้งด้วยลมร้อนมีผลร่วมกันต่อค่า S ของตัวอย่าง (Figure 4e) โดยกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า S ของตัวอย่างลดลง ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการเกิด case hardening ที่บริเวณผิวของตัวอย่างซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราเร็วในการทำให้แห้งโดย case hardening จะมีผลให้เกิดการชะลอการหดตัวของตัวอย่างลง ในขณะที่การใช้ความเร็วลม 1 และ 2 m/s มีผลต่อการลดค่า S ได้มากกว่าที่ 1.5 m/s และการทำให้แห้งที่สภาวะความเร็วลม 1 m/s ที่สามารถลดค่า S ได้มากกว่าที่ 1.5 m/s นั้น อาจเนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการทำให้แห้ง ความแตกต่างระหว่างปริมาณความชื้นภายในกับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างมีค่าต่ำ จึงส่งผลให้ความเครียดภายในชิ้นตัวอย่าง (internal stress) มีค่าน้อย จึงส่งผลให้การหดตัวของตัวอย่างในกระบวนการทำให้แห้งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อใช้สภาวะการทำให้แห้งที่ใช้ความเร็วอากาศสูงขึ้น (1.5 m/s) จะส่งผลให้ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างภายในกับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวของตัวอย่างเกิดได้มากกว่าที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ส่วนสภาวะการทำให้แห้งที่ใช้ความเร็วอากาศที่สูงที่สุด (2.0 m/s) แม้ว่าสภาวะนี้จะมีผลให้ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างภายในและพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างมีค่ามากที่สุดก็จริง แต่การหดตัวของตัวอย่างที่สภาวะนี้ได้รับอิทธิพลของการเกิด case hardening ที่

36.33-43.61 และ 22.95-39.65 สำหรับการทำให้แห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาเวินด์ ตามลำดับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำให้แห้งด้วยลมร้อนและโคโรนาเวินด์ต่อค่า S ได้ ดัง Figure 4e และ 4f ตามลำดับ โดย air temperature air velocity และ electric field strength electrode gap ที่ใช้ในการทำให้แห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาเวินด์ มีความสัมพันธ์ต่อค่า S ในรูปแบบของสมการกำลังสองดังสมการที่ (19) และ (20) ตามลำดับ

ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเป็นหลักเนื่องจากในสภาวะที่ความเร็วลมสูงผิวหน้าของตัวอย่างจะแห้งได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้การหดตัวของตัวอย่างเกิดน้อยลง ดังนั้นการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่ความเร็วอากาศ 2.0 m/s จึงเกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่ความเร็วอากาศ 1.5 m/s จาก Table 3 สภาวะการทำให้แห้งที่มีค่า S ของตัวอย่างต่ำที่สุด (22.19) คือที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 หรือ 2 m/s การหดตัวนี้เกิดขึ้นเมื่อชิ้นมะม่วงสัมผัสกับลมร้อนในระหว่างกระบวนการทำให้แห้ง น้ำอิสระที่อยู่ภายในชิ้นมะม่วงจะระเหยออก ปริมาณน้ำในชิ้นมะม่วงจึงลดต่ำลง ทำให้แรงตึงผิวระหว่างน้ำและผนังเซลล์ภายในชิ้นมะม่วงลดลง จึงเกิดการหดตัวของชิ้นตัวอย่างขึ้น [31]

จาก Table 3 แสดงการหดตัวในทุกสภาวะการทำให้แห้งด้วยโคโรนาเวินด์ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1 m/s พบว่าค่า S ของตัวอย่างจากการทำให้แห้งขึ้นกับทั้ง electric field strength และ electrode gap โดย Figure 4f แสดงให้เห็นว่า electric field strength ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า S ของตัวอย่างลดลง ในขณะที่การทำให้แห้งโดยใช้ระยะห่างของ electrode gap ที่ 3 cm มีแนวโน้มที่จะลดค่า S ได้มากกว่าที่ระยะ 4 และ 5 cm อาจเนื่องมาจากระยะของลมโคโรนาเวินด์ที่พุ่งออกจากปลายเข็มเข้ากระทบตัวอย่างในระยะทางที่สั้น มีโอกาส

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

เลี้ยวเบนออกจากตัวอย่างได้น้อยกว่าการใช้ electrode gap ที่ระยะกว้างกว่า จึงส่งผลให้ตัวอย่างจาก electrode gap ที่ระยะแคบจะแห้งได้เร็วกว่า สถานะการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์ที่มีค่า S ต่ำที่สุดคือที่ electric field strength 8 kV/cm มีค่า S 24.23-26.44% จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า S มีความสัมพันธ์กับจลนพลศาสตร์การทำแห้งแบบผกผัน กล่าวคือ กระบวนการที่มีอัตราเร็วในการทำแห้งสูง (สถานะที่ electric field strength สูง) สามารถลดค่า S ของตัวอย่างลงได้ ทั้งนี้การลดความชื้นที่ผิวหน้าตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้พื้นผิวหน้าของตัวอย่างแห้งและแข็งซึ่งจะช่วยรักษารูปทรงของตัวอย่างไว้ได้ ตัวอย่างจึงเกิดการหดตัวหรือยุบตัวน้อยกว่าการทำแห้งที่ใช้ electric field strength ต่ำซึ่งมีอัตราการแห้งต่ำ [4, 31]

สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบผลของสถานะในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งและสมบัติทางเคมี-กายภาพทางด้านสีและการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพจะพิจารณาจากกระบวนการที่มีค่า D_{eff} สูง และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจากกระบวนการที่มีค่า ΔE^* และ S ต่ำ จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและโคโรนาวินด์ สำหรับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน พบว่า การใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความเร็วลมสูง คือ ที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 2 m/s จะมีอัตราการแห้งสูงที่สุด มีการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวน้อยที่สุด ส่วนสำหรับการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์จะเป็นการปรับปรุงกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลและความร้อนของลมร้อนในกระบวนการทำแห้ง พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการทำแห้งด้วยโคโรนาวินด์สามารถทำได้โดยการเพิ่ม electric field strength ขึ้น และลด electrode gap ลง

ทำให้ทำแห้งตัวอย่างได้เร็วขึ้นและตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะมีการเปลี่ยนสีและการหดตัวน้อยที่สุด โดยสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด์คือที่ electric field strength 8 kV/cm ร่วมกับ electrode gap ขนาด 3 cm ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1 m/s

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ในการดำเนินการโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยรามคำแหง และภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนในการทำวิจัยมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Salirat, S. and Inchonbot. S. (2013). Influence of period fruit bagging by using by carbon bag to mango CV. Namdokmai sethong quality. Research reports. Maejo University, Chiang Mai. (in Thai).
- [2] Tirawanichakul, S., Chanchiew, S. and Tirawanichakul, Y. (2013). Pennywort drying using infrared radiation: drying kinetics, energy consumption and quality aspect. KRU Research Journal. 18(2): 311-324. (in Thai).
- [3] Wu, Z.H., Li, W.L., Zhao, L.J., Shi, J.F. and Liu, Q. (2015). Drying characteristics and product of *Lycium barbarum* under stages-varying temperatures drying process. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 31(11): 287-293.

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

- [4] Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*. 48(2): 177–182.
- [5] Zielinska, M., Zielinska, D. and Markowski, M. (2018). The Effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, color and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). *Food and Bioprocess Technology*. 11: 585–602.
- [6] De Bonis, M.V. and Ruocco, G. (2005). Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement. *Journal of Food Engineering*. 78(1): 230–237.
- [7] Huang, D., Men, K., Li, D. and Wen, T. (2019). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 63: 104950. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.104950
- [8] Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K. (1996). Active heat transfer enhancement by utilizing electric fields. *Annual Review of Heat Transfer*. 7: 193–244.
- [9] Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S. and Lu, Z. (2004). Drying enhancement of rough rice by an electric field. *Biosystems Engineering*. 87(4): 445–451.
- [10] Hashinaga F., Bajgai T.R., Isobe S. and Barthakur N.N. (1999). Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slices. *Dry Technology*. 17: 479–95.
- [11] AOAC. (2000). Official methods of analysis. AOAC Official Method 935.29. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD.
- [12] Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*. 13(5): 427–432.
- [13] Page, G. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers. M.Sc. thesis, Purdue University. West Lafayette, Indiana.
- [14] Henderson, S.M. and Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6: 169–174.
- [15] Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- [16] Pasban, A., Sadrnia, H., Mohebbi, M. and Shahidi, S.A. (2017). Spectral method for simulating 3D heat and mass transfer during drying of apple slices. *Journal of Food Engineering*. 212: 201–212.
- [17] Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J. and Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. ‘Amelie’) with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*. 88(4): 429–437.
- [18] Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R. and Ilyas, S.M. (2006). Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*. 95(1): 43–49.
- [19] Erbay, Z. and Icier, F. (2010) A review of thin layer drying of foods: theory, modeling and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 50: 441–464.
- [20] López, J., Uribe, E., Vega-Galvez, A. and Miranda, M. (2010). Effect of air

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

- temperature on drying kinetics, vitamin c, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O'Neil. *Food and Bioprocess Technology*. 3(5):772-777.
- [21] Balcer, B.E. and Lai, F.C. (2004). EHD-enhanced drying with multiple-wire electrode. *Drying Technology*. 22(8): 21–836.
- [22] Dinani, S.T., Hamdami, N., Shahedi, M. and Havet, M. (2014). Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices. *Energy Conversion and Management*. 86: 70 –80.
- [23] Martynenko, A., Bashkir, I. and Kudra, T. (2019). Electrically enhanced drying of white champignons. *Drying Technology An International Journal*. 1-11.
- [24] Sturm, B., Vega, A.M.N and Hofacker, W. (2014). Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering*. 62(2): 455–460.
- [25] Orikasa, T., Wu, L., Shiina, T. And Tagawa, A. (2008). Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*. 85(2): 303-308.
- [26] Liu, J., Xue, J., Xu, Q., Shi, Y., Wu, L. and Li, Z. (2017). Drying kinetics and quality attributes of white radish in low pressure superheated steam. *International Journal of Food Engineering*. 13(7): doi:10.1515/ijfe-2016-0365
- [27] Salarikia, A., Ashtiani, S.H.M. and Mahmood Reza Golzarian, M.R. (2017). Comparison of drying characteristics and quality of peppermint leaves using different drying methods. *Journal of Food Processing and Preservation*. 41(3): e12930. doi:10.1111/jfpp.12930
- [28] Chunthaworn, S., Achariyaviriya, S., Achariyaviriya, A. and Namsanguan, K. (2012). Color kinetics of longan flesh drying at high temperature. *Procedia Engineering*. 32: 104 – 111.
- [29] Nadian, M.H., Rafiee, S., Aghbashlo, M., Hosseinpour, S. and Mohtasebi, S.S. (2015). Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying. *Food and Bioprocess Technology*. 94: 263-274.
- [30] Arévalo-Pinedo, A. and Murr, F.E.X. (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*. 76: 562-567.
- [31] Khraisheh, M.A.M., Cooper, T.J.R. and Magee, T.R.A. (1997). Microwave and air drying I. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *Journal of Food Engineering*. 33(1-2): 207-219.

*Corresponding author e-mail: c_touchpong@hotmail.com

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม