



ผลของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง สี และการหดตัวของมะม่วงสุก



โดย
นางสาววิลาวัลย์ จึงมานะกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

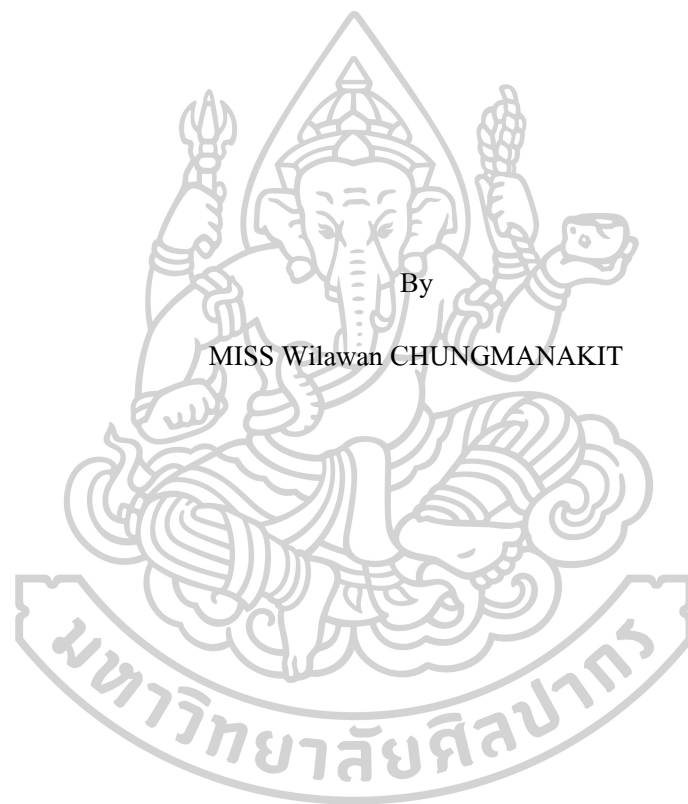
ผลของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินต้อจนผลศาสตร์การทำแห้ง สี และการหดตัวของ
มะม่วงสุก



โดย
นางสาววิลาวัลย์ จึงมานะกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF CORONA WIND DRYING ON DRYING KINETICS OF COLOR AND
SHRINKAGE OF RIPE MANGO




A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2020
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ ผลของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินต์ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง
สี และการหดตัวของมะม่วงสุก
โดย วิชาวิทย์ จึงมานะกิจ
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)
พิจารณาเห็นชอบ โดย
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ สมุทเสณีโต)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชพงศ์ ชูศรี)
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑู ชูศรี)



60403205 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน, มะม่วงสุก, อัตราส่วนการหดตัว, จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง

นางสาว วิลาวัณย์ จึงมานะกิจ: ผลของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง สี และการหดตัวของมะม่วงสุก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน (corona wind drying) เป็นเทคโนโลยีการทำแห้งแบบใหม่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำแห้งแบบพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการทำแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying) โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้คือหาสภาวะที่เหมาะสมของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนและศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแท่นวางตัวอย่าง ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity, D_{eff}) ค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (%Shrinkage ratio) และค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE^*)

สำหรับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนพบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง โดยพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาทีเป็นสภาวะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว และค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมต่ำ

สำหรับการทำแห้งด้วยโคโรนาวินพบว่า ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ลดลงมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว และค่าการเปลี่ยนแปลงของสี โดยรวมต่ำ และพบว่าระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแท่นวางตัวอย่างมีผลในทางตรงข้ามกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแท่นวางตัวอย่างมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว และค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบการทำแห้งด้วยโคโรนาวินกับการทำแห้งด้วยลมร้อนพบว่า การทำแห้งด้วยโคโรนาวินสามารถลดเวลาในการทำแห้งตัวอย่างลงไปได้มากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนถึง

75% และยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านสี และการหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และพบว่าการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแท่นวางตัวอย่าง เป็น 5 เซนติเมตร, 15 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และ 3 เซนติเมตรตามลำดับ เป็นสภาวะที่ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นที่สุด และยังสามารถคงคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี



60403205 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : corona wind drying/ ripe mango/ shrinkage ratio/ drying kinetics

MISS WILAWAN CHUNGMANAKIT : EFFECT OF CORONA WIND DRYING ON DRYING KINETICS OF COLOR AND SHRINKAGE OF RIPE MANGO THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TOUCHPONG CHOOSRI

Corona wind drying is a new drying technology that improves the efficiency of convection drying processes using air as the drying medium, especially hot air drying. The objective of this study was to study the optimum conditions of hot air drying of ripe mangoes and to evaluate the influence of the distance between electrode gap (LE), voltage, and distance between electrode to sample tray (LS) on effective moisture diffusivity (D_{eff}), a total color difference (ΔE^*) and %Shrinkage ratio (%S).

For hot-air drying, the high temperature and air velocity resulted in high effective moisture diffusivity (D_{eff}). The hot-air drying at 60 °C with an air velocity of 1.0 m/s had high D_{eff} and low in ΔE^* and %S.

For corona wind drying the decreasing of LE affected the D_{eff} increase and had low ΔE^* and %S. For voltage and LS of the process, they showed the opposite results that the increase of voltage and LS resulted in an increase of D_{eff} . Besides, they resulted in the low ΔE^* and %S.

When comparing corona wind drying with hot air drying, it was found that corona wind drying was able to reduce the drying time by 75% which higher than that of hot air drying and resulted in the low of ΔE^* and %S. Moreover, the results found that LE, voltage and LS at 5 cm, 15kV and 3 cm, respectively, had the shortest drying time and the physicochemical properties of dried products were maintained as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ ความเมตตา ความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากหลากหลายฝ่าย ทางผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบุคคล และองค์กร ที่ได้ให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชพงศ์ ชูศรี อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพีปริญญาเอก นายภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี ที่ช่วยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ และยังคงคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือซึ่งกันและกัน

ขอขอบคุณนายปาร์ศชัยอลศิลาปินเกาหีสผู้คอยให้กำลังใจผ่านเสียงเพลง ช่วยให้ข้าพเจ้ารู้สึกผ่อนคลาย คลายความกังวลที่เกิดขึ้นในใจให้หมดไป และช่วยให้ข้าพเจ้ามีแรงฮึดสู้เพื่อฝ่าฟันการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ซึ่งอนุเคราะห์ทุนที่ใช้ในการวิจัยและเปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยในครั้งนี้

วิลาวัณย์ จิงมานะกิจ

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ | ซ |
| สารบัญตาราง | ฅ |
| สารบัญภาพ | ญ |
| รายการอ้างอิง | 2 |
| ประวัติผู้เขียน | 8 |



สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 1 แผนการทดลองของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม..... | 18 |
| ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน | 19 |
| ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่างในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 15 kV..... | 20 |
| ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม (ΔE^*) และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (%S) ของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะที่ต่างต่าง | 28 |
| ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม และร้อยละอัตราส่วนการหดตัวของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน โดยใช้ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ..... | 35 |
| ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม และร้อยละอัตราส่วนการหดตัวของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน โดยใช้ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ..... | 42 |

สารบัญภาพ

หน้า

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 1 วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายสำหรับเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาของแก๊ส | 5 |
| ภาพที่ 2 แสดงลักษณะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กโตรดที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน | 6 |
| ภาพที่ 3 แสดงกลไกการเกิดกระแสโคโรนาจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า..... | 8 |
| ภาพที่ 4 แสดงกลไกการเกิดกระแสโคโรนา 2 แบบ คือ (a) กระแสโคโรนาบวก และ..... | 10 |
| ภาพที่ 5 การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน | 12 |
| ภาพที่ 6 แผนภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยอากาศร้อน และ โคโรนาวิน | 16 |
| ภาพที่ 7 แผนภาพตัวแปรระยะห่างของอิเล็กโตรดสำหรับศึกษาการทำแห้งด้วยโคโรนาวิน และลมร้อน โดย G คือ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode และ P คือ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง | 17 |
| ภาพที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์ความสามารถการดูดน้ำกลับ | 22 |
| ภาพที่ 9 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิและความเร็วลมต่างๆ | 26 |
| ภาพที่ 10 กราฟอัตราการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิและความเร็วลมต่างๆ..... | 27 |
| ภาพที่ 11 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล..... | 29 |
| ภาพที่ 12 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม..... | 30 |
| ภาพที่ 13 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราส่วนการหดตัว..... | 32 |
| ภาพที่ 14 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ | 33 |

ภาพที่ 15 กราฟอัตราการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ34

ภาพที่ 16 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น36

ภาพที่ 17 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม37

ภาพที่ 18 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราส่วนการหดตัว39

ภาพที่ 19 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ40

ภาพที่ 20 กราฟอัตราการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ41

ภาพที่ 21 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล44

ภาพที่ 22 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม45

ภาพที่ 23 กราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราส่วนการหดตัว46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย โดยมะม่วงมียอดส่งออกถึง 66,501 ตัน ในปี พ.ศ. 2562 (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ทั้งในรูปมะม่วงสด และมะม่วงแปรรูป มะม่วงมียอดส่งออกเพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยเฉพาะการส่งออกในรูปของมะม่วงทำแห้ง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเป็นอีกหนึ่งสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมทั้งในและนอกประเทศ เนื่องจากมีรสชาติเอกลักษณ์ แต่เมื่ออยู่ในช่วงฤดูการออกผลกลับพบปัญหา มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีมากจนล้นตลาดส่งผลให้ราคามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตกต่ำ จึงมีการนำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมาแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่า และยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งการทำแห้ง (Drying) เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมนำมาแปรรูปผักและผลไม้ โดยพบว่าการทำแห้งมะม่วงที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม คือ การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) (Pu และ Sun, 2017) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก แต่กลับมีลักษณะปรากฏที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ เช่น ด้านการเปลี่ยนแปลงของสีที่เข้มขึ้น การหดตัวสูง และคุณค่าทางสารอาหารลดลง (Zielinska และคณะ, 2018) อันเนื่องมาจากการทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการถ่ายโอนมวล และความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ จึงใช้เวลานานในการทำแห้งซึ่งเป็นข้อจำกัดของการทำแห้งด้วยวิธีนี้ (Maskan, 2001) ต่อมาได้มีการศึกษาการทำแห้งผัก และผลไม้โดยใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูง (Electrohydrodynamic drying) หรือการทำแห้งด้วยโคโรนาวิน (Corona wind drying) เป็นวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการถ่ายโอนมวล และความร้อนให้สูงขึ้น ลดปัญหาการใช้อุณหภูมิสูงที่ใช้ในการทำแห้งแบบลมร้อน ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ของการทำแห้งที่ไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal technology) และประหยัดพลังงาน (Kudra และ Martynenko, 2015; Martynenko และคณะ, 2017) นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง คงลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้นทั้ง การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีน้อยลง และคงคุณค่าทางสารอาหารได้มากขึ้น (Martynenko และคณะ, 2017; Martynenko และคณะ, 2019) จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีทางเลือกของการทำแห้งที่น่าสนใจในการนำมาทำแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของสี และลดการหดตัว และเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการถ่ายโอนมวล และความร้อน ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการทำแห้งด้วยวิธีใช้โคโรนาวินยังมีไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำแห้ง

มะม่วงสุกด้วยลมร้อน และศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ถึงแท่นวางตัวอย่างด้วยการทำแห้งโคโรนาวิน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาข้อมูลผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ถึงแท่นวางตัวอย่าง ด้วยการทำแห้งโคโรนาวินต่อสี และการหัดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุก

1.2.2 เพื่อศึกษาข้อมูลผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยการทำแห้งโคโรนาวินต่อสี และการหัดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุก

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 การใช้โคโรนาวินร่วมกับการทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการทำให้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกสูง และมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านสี และการหัดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

1.3.2 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ถึงแท่นวางตัวอย่างต่อการทำแห้งด้วยโคโรนาวินส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหัดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกน้อยลง

1.3.3 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยการทำแห้งโคโรนาวินส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำแห้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหัดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกดีขึ้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วัตถุดิบใช้เป็นมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองสุก ขนาดต่อลูกอยู่ที่ 200-400 กรัม จากตลาดปทุมมงคล จังหวัด นครปฐม

1.4.2 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองถูกนำมาคัดเลือกโดยการวัดค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid) โดยใช้เครื่องมือ Hand refractometer ซึ่งจะกำหนดให้อยู่ในช่วง 16-18 °Brix และคัดเลือกโดยการวัดค่าความแน่นเนื้อ โดยใช้เครื่องมือ Penetration resistance ให้มีค่าใกล้เคียงกันที่ 1.68 ± 0.24 กิโลกรัม/8 เซนติเมตร โพรป

1.4.3 ตัวแปรต้น

1.4.3.1 อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 50, 55 และ 60 °C และที่ความเร็วลม 3 ระดับคือ 0.5, 1 และ 1.5 m/s สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยการทำแห้งแบบลมร้อน

1.4.3.2 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Distance between electrode gap, G) 3 ระดับ คือ 5, 6 และ 7 cm และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับที่วางตัวอย่าง (Distance between electrode and sample tray, P) 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 cm สำหรับการทำแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยการทำแห้งแบบโคโรนาวิน

1.4.3.3 ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) 3 ระดับ คือ 0, 7.5 และ 15 กิโลโวลต์ (kV) สำหรับการทำแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยการทำแห้งแบบโคโรนาวิน

1.4.4 ตัวแปรตาม

1.4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff})

1.4.4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*)

1.4.4.3 ร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (S)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการทำแห้งด้วยโคโรนาวิน

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

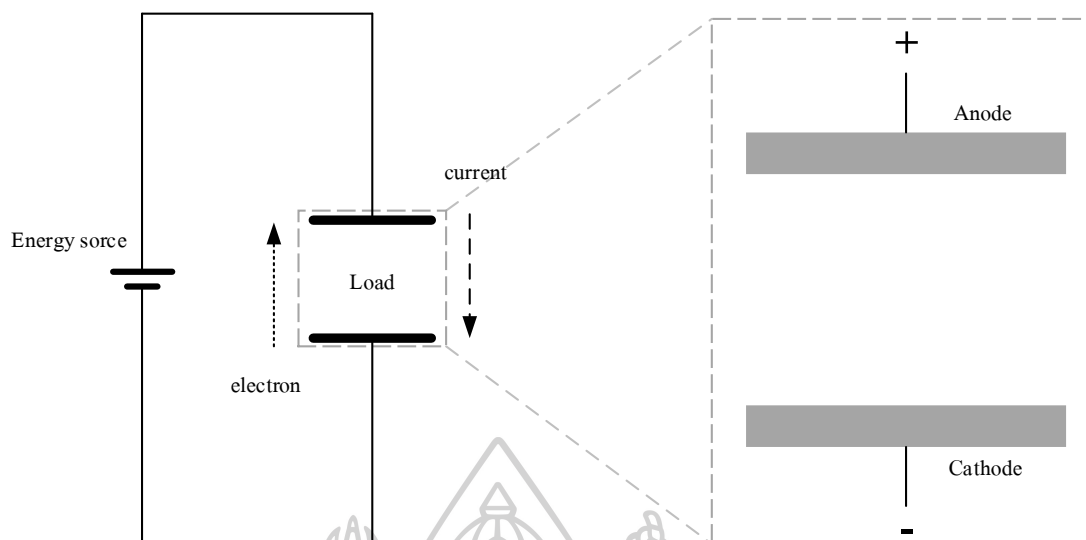
2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วง มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* มะม่วงเป็นไม้ผลที่นำเข้ามาปลูกเป็นเวลานาน เดิมทีมะม่วงเป็นผลไม้ที่ให้เกษตรกรเลือกปลูกเพื่อสนองความต้องการต่อผู้บริโภคแต่ต่อมาพบว่าในปัจจุบัน (พ.ศ. 2560-2563) มะม่วงมีบทบาทสำคัญในการส่งออกโดยมีมูลค่าการส่งออกถึง 2,000 ล้านดอลลาร์ต่อปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในทุกๆปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563)

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง เป็นมะม่วงที่กลายพันธุ์มาจากมะม่วงน้ำดอกไม้พระประแดง ผลเป็นรูปทรงรี ผิวผลเหลืองทองสีเหลืองสวยงามตั้งแต่ยังไม่แก่จัด เมื่อบ่มสุกจะมีสีเหลืองสดใส เนื้อละเอียด มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีลักษณะพิเศษกว่าพันธุ์น้ำดอกไม้ คือเปลือกหนากว่า นิยมรับประทานสุก ทนโรคและแมลง รวมถึงการตอบสนองต่อการบังคับให้ออกผลนอกฤดูได้ดี (สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ, 2558)

2.2 ปรากฏการณ์โคโรนา

โคโรนา คือ ปรากฏการณ์การไหลของกระแสอนุภาคที่มีประจุซึ่งถูกเร่งให้เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ภาพที่ 1 แสดงวงจรไฟฟ้า (Electric circuits) อย่างง่ายสำหรับเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาของแก๊ส โดยวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 3 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Energy source) ตัวนำไฟฟ้า (Wire) และ โหลด (Load) การเอาพลังงานไฟฟ้าไปใช้งาน เมื่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรกระแสไฟฟ้า (Electric current) จะไหลผ่านสายไฟไปยังโหลดแล้วไหลกลับมายังแหล่งกำเนิด การไหลของกระแสไฟฟ้าสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในวงจรไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ขณะที่อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วบวกไปขั้วลบเสมอ สำหรับโหลด (Load) การเอาพลังงานไฟฟ้าไปใช้งาน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า หรือ อิเล็กโทรด (Electrode) เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อใช้แนบกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะของวงจรไฟฟ้าในที่นี้ คือแก๊สหรืออากาศ



ภาพที่ 1 วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายสำหรับเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาของแก๊ส

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดอาจมีลักษณะแตกต่างกันได้ในด้านความเข้ม และความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้านี้เนื่องมาจากลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรดดังแสดง ลักษณะความเข้มและความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโตรด 3 ชนิดในภาพที่ 2 โดยอิเล็กโตรดแบบ plate to plate (ภาพที่ 2 (c)) จะสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าทุกๆจุดในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดคงที่ และสม่ำเสมอ สามารถคำนวณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ไหลอยู่หว่างอิเล็กโตรดทั้งสองด้านได้ด้วยความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1

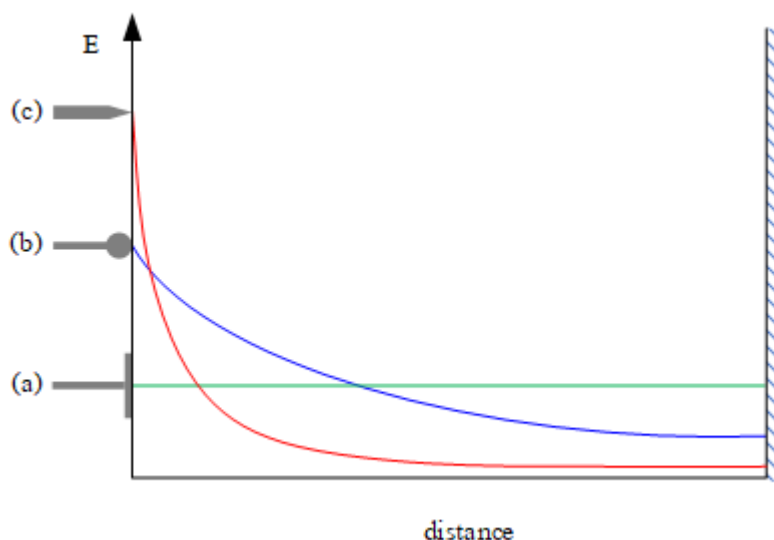
$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

- เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร (V/cm) หรือ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm)
- U คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) หรือ กิโลโวลต์ (kV)
- d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดมีหน่วยเป็น cm

ส่วนอิเล็กโตรดแบบ ball to plate และ needle to plate (ภาพที่ 2 (b) และ (a)) ให้สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform Field) ซึ่งจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดแตกต่างกัน สามารถคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าแบบนี้ได้จากสมการที่ 2

$$E = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (2)$$

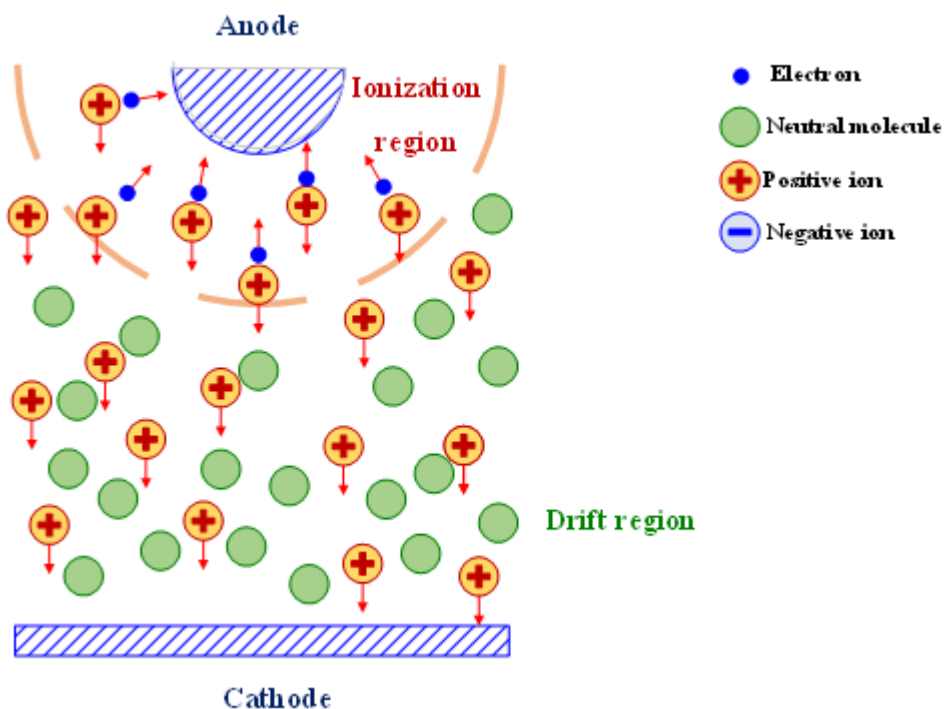
เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า ≤ 1 ดังนั้นกล่าวได้ว่า η^* คือ ดัชนีที่บอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กโตรดที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน
ที่มา : ดัดแปลงมาจากสำรวย (2561)

ปรากฏการณ์โคโรนาเป็นปรากฏการณ์สำคัญทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับแก๊ส เช่น อากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นวัสดุที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า (dielectric material) เปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้พิจารณาภาพที่ 3 โดยปรากฏการณ์โคโรนาของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field strength) ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่ามากพอจนทำให้บริเวณอิเล็กโตรดด้านแอนโอดมีความเครียดทางไฟฟ้าเป็นบริเวณที่แรงให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการแตกตัว (ionization region) เป็นไอออนบวก เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลของแก๊สบริเวณดังกล่าวได้รับพลังงานจาก

สนามไฟฟ้าจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นและหลุดออกจากโมเลกุลกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนด้านแอโนดทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนอิสระที่หลุดมาจากโมเลกุลแก๊สซึ่งเรียกอิเล็กตรอนด้านแอโนดว่า collector electrode การแตกตัวของแก๊สทำให้กระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่านแก๊สได้ กลไกการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุ โดยไอออนบวกของแก๊สจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นเนื่องจากถูกเร่งด้วยแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb force) ทางไฟฟ้าให้เคลื่อนที่จากด้าน collector electrode ไปยังอิเล็กตรอนด้านแคโทดซึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ในรูปไอออนบวกให้กลับมาเป็นโมเลกุลปกติที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเรียกว่า emitter electrode โมเลกุลของแก๊สภายในสนามไฟฟ้านี้มีทั้งที่เป็นไอออนบวกที่มีพลังงานจลน์สูงซึ่งเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าด้วยความเร็ว และโมเลกุลปกติที่เป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า ในกรณีนี้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจึงมีการชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง และเกิดการถ่ายโอนโมเมนตัม (momentum transfer) ให้กับโมเลกุลที่เป็นกลาง และมีการชนกันอย่างต่อเนื่องทำให้โมเลกุลของแก๊สทั้งหมดที่อยู่ในสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน การเคลื่อนที่นี้จะมีลักษณะเป็นกระแสการไหลของโมเลกุลที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหากยังคงแรงดันไฟฟ้าป้อนให้กับวงจร เป็นปรากฏการณ์การไหลของลมที่มีประจุ (ionic wind) หรือเรียกว่า กระแสโคโรนา (corona wind) (Defraeye และ Martynenko, 2019; Zhang และคณะ, 2014) โดยปรากฏการณ์กระแสโคโรนาก็จะเกิดควบคู่กับการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของความร้อน การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นความถี่วิทยุ คลื่นแสง คลื่นเสียงทั้งในย่านความถี่ที่มนุษย์ได้ยิน และอัลตราโซนิก



ภาพที่ 3 แสดงกลไกการเกิดกระแสโคโรนาจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า
ที่มา : ดัดแปลงมาจากสำราญ (2561)

ปรากฏการณ์ทางเสียงเริ่มเกิดขึ้นที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (disruptive critical voltage) เป็นค่าระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เริ่มเกิดกระบวนการแตกตัวของแก๊สอันเนื่องมาจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแก๊สซึ่งมีพลังงานจลน์สูงวิ่งเข้าชน โมเลกุลของแก๊สให้เปลี่ยนเป็นไอออน และอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดพลังงานเสียงทั้งในช่วงความถี่สูง และช่วงที่มนุษย์สามารถได้ยินปรากฏเป็นเสียงซ่า

ปรากฏการณ์ทางแสงเกิดขึ้นที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage) ซึ่งเป็นระดับความต่างศักย์ที่มีสูงกว่าระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวิกฤติแตกตัวจะทำให้สังเกตเห็นแสงสีม่วงเรืองแสงรอบๆ อิเล็กโตรด โดยแสงเรืองนี้จะปรากฏให้เห็นชัดเจนบริเวณที่มีความขรุขระหรือสกปรกมากหรือบริเวณที่มีความแหลมคมของอิเล็กโตรด ปรากฏการณ์ทางแสงนี้เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลแก๊สได้รับพลังงานจลน์จากการชนของอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่โมเลกุลไม่เกิดการแตกตัวทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งโมเลกุลนั้นจะอยู่ในสถานะไม่เสถียร (meta stable) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกลับคืนสู่สถานะพื้น (ground state) จะ

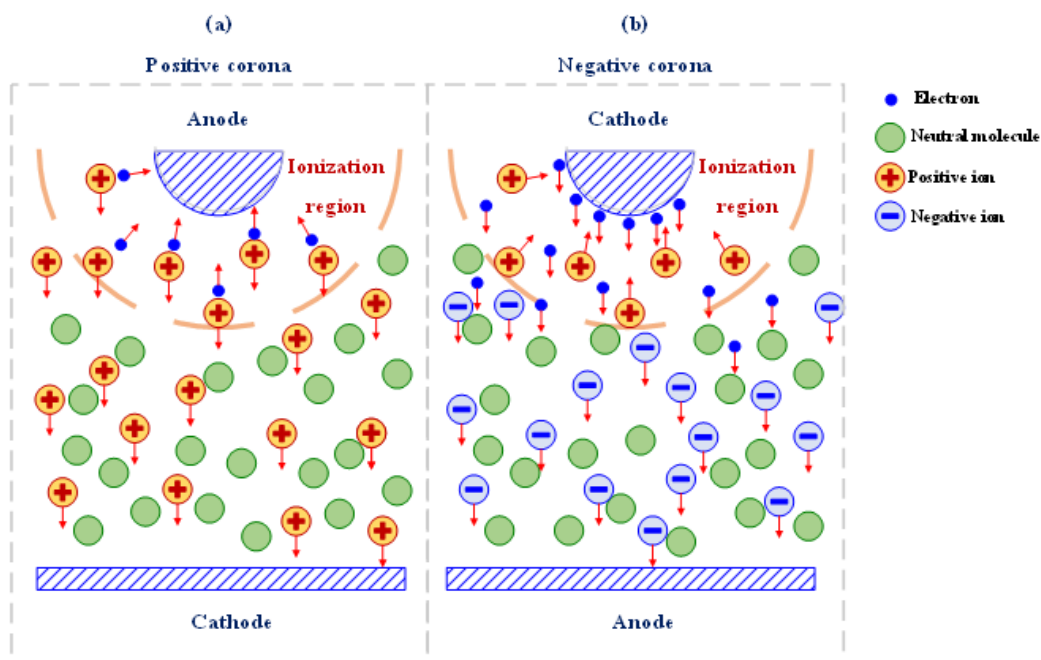
ปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับคืนกลับมาในรูปพลังงาน โฟตอน (photon) ที่เป็นพลังงานแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นเราจะมองเห็นแสงเรืองรอบ collector electrode

ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ในแก๊ส (Breakdown in gas) เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีความมากกว่าระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวิกฤติมองเห็นจะทำให้แก๊สรอบอิเล็กโตรดแตกตัวได้ทั้งหมดจนมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สมากพอที่จะทำให้แก๊สบริเวณนั้นเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลข้ามผ่านอากาศได้ สามารถสังเกตปรากฏการณ์เบรกดาวน์ได้จากการเกิดเป็นลำแสงหรือประกายที่มีความไฟสว่างมาก (spark) ระหว่างอิเล็กโตรดหรือเห็นการวาบไฟตามผิวอิเล็กโตรด (flashover) การเกิดปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับอิเล็กโตรด โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์แสดงได้ด้วยสมการที่ (3) เป็นค่าที่แสดงถึงความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของแก๊สซึ่งเป็นสมบัติของฉนวนไฟฟ้า

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (3)$$

- เมื่อ E_b คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน
 U_b คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดมีหน่วยเป็น cm

การเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสโคโรนาสามารถทำได้ 2 แบบคือ กระแสโคโรนาบวก (positive corona discharge) และกระแสโคโรนาลบ (negative corona discharge) แสดงกลไกการเกิดกระแสโคโรนาดังภาพที่ 4 โดยกระแสโคโรนาบวก (ภาพที่ 4 a) เกิดจากการที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจ่ายไฟเป็นขั้วบวก (cathode) ให้กับอิเล็กโตรดที่อยู่ทางด้านบนทำให้แก๊สบริเวณอิเล็กโตรดทางด้านบนเกิดการแตกตัวเป็นประจุบวก และเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดขั้วลบ (anode) ที่อยู่ทางด้านล่าง ส่วนกระแสโคโรนาลบ (ภาพที่ 4 b) เกิดจากการที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจ่ายไฟเป็นขั้วลบให้กับอิเล็กโตรดทางด้านบนทำให้แก๊สบริเวณอิเล็กโตรดทางด้านบนเกิดการแตกตัวเป็นประจุลบ และเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดขั้วบวกด้านล่าง



ภาพที่ 4 แสดงกลไกการเกิดกระแสโคโรนา 2 แบบ คือ (a) กระแสโคโรनावก และ (b) กระแสโคโรนาลบ
ที่มา: คัดแปลงมาจากสำรวาย (2561)

2.3 การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HAD)

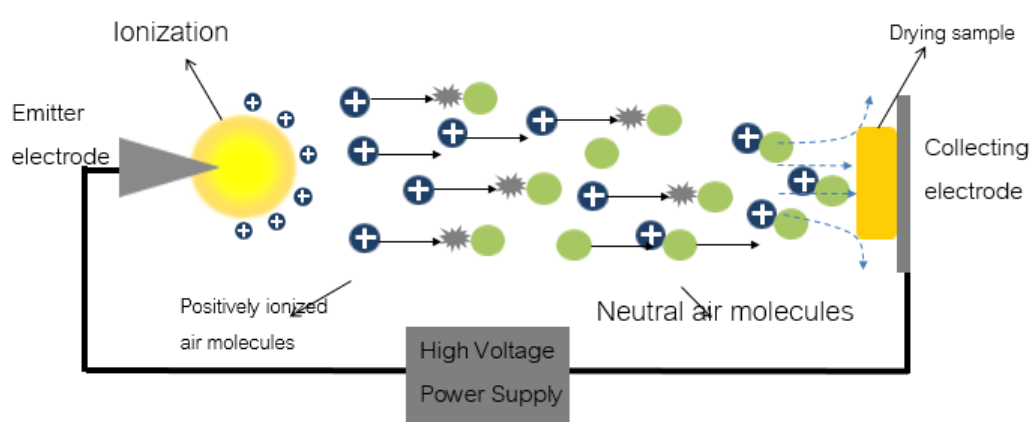
การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HAD) คือ การลด หรือการกำจัดความชื้นออกจากอาหารโดยการระเหยการที่น้ำในอาหารจะระเหยพัดพาไปตามกระแสของอากาศ เรียกว่า การทำแห้งแบบพาความร้อน (convective hot air drying) จุดมุ่งหมายของการทำแห้ง คือ เพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ และรักษาคคุณค่าสารอาหารให้ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมากที่สุด โดยการลดปริมาณความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรือปฏิกิริยาอื่นๆ นอกจากนี้จุดมุ่งหมายอีกประการของการทำแห้ง คือ การลดปริมาตรของชิ้นอาหาร ซึ่งจะสะดวกต่อการขนส่ง และการใช้งานของผู้บริโภค (พงศสวัสดิ์มานิต, 2535) พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นการทำแห้งที่นิยมทั้งในระดับเกษตรกร และระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวกสบายในกระบวนการทำ และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก เพียงแค่มีตู้อบ (chamber) พัดลม (fan/blower) และเครื่องทำความร้อน (heater) แต่การทำแห้งด้วยวิธีนี้ก็กลับมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอกที่ปรากฏไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จากผลการศึกษาของ (Pu และ Sun, 2017; Vega-Galvez และคณะ, 2012; Yao และคณะ, 2020) พบว่า การ

ทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่เข้มข้น การหดตัวสูง คุณค่าทางสารอาหารลดลง และ การใช้พลังงานในระบบสูงเนื่องจากมีระยะเวลาการทำแห้งที่นาน (An และคณะ, 2016; Pu และ Sun, 2017; Salarikia และคณะ, 2017) ในปัจจุบันจึงได้มีหลายๆงานวิจัยที่พยายามศึกษาหาวิธีการปรับปรุงข้อจำกัดหลายๆด้านของการทำแห้งด้วยลมร้อน ทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายโอนมวลและความร้อน โดยใช้ร่วมกันกับวิธีการทำแห้งแบบอื่นๆ เช่น (Jia และคณะ, 2019) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งลูกพลับด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งช่วยให้ได้ลูกพลับที่มีคุณภาพมากขึ้นพร้อมกับประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้เวลาการทำแห้งที่ลดลง และ (Onwude และคณะ, 2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการทำแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อการทำแห้งมันหวาน โดยทำการศึกษาการทำงานร่วมกัน 4 รูปแบบ คือ การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดพร้อมกันการทำแห้งด้วยลมร้อน (IR-HAD) การทำแห้งด้วยลมร้อนต่อการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HAD+IR) การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อการทำแห้งด้วยลมร้อน (IR+HAD) และการทำแห้งแบบสลับเป็นระยะๆ โดยเริ่มด้วยการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสลับด้วยการทำแห้งด้วยลมร้อน (IIR+HA) พบว่า การทำแห้งแบบสลับเป็นระยะๆ (IIR+HAD) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำแห้งได้ดีขึ้นเนื่องจากใช้ระยะเวลาการทำแห้งน้อยลง พลังงานที่ใช้ในระบบจึงลดลง แต่ในด้านของการเปลี่ยนแปลงสี และการหดตัวกลับพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นต้น

2.4 การประยุกต์ใช้โคโรนาวินกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

เป็นที่ทราบกันดีว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีที่ง่าย และสะดวกต่อการใช้งาน แต่การทำแห้งด้วยวิธีนี้กลับมีข้อจำกัดคือ มีอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ จึงใช้เวลานานในการทำแห้งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆตามมา เช่น ด้านการเปลี่ยนแปลงของสีที่เข้มข้น การหดตัวมากขึ้น และคุณค่าทางสารอาหารลดลง (Maskan, 2001; Zielinska และคณะ, 2018) โดยปกติแล้วการกำจัดความชื้นออกจากชิ้นอาหารด้วยการทำแห้งด้วยลมร้อนจะเกิดขึ้นจากการที่มีลมร้อนพัดผ่านชิ้นอาหารที่มีความชื้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นภายในชิ้นอาหาร กับความชื้นในอากาศทำให้เกิดการเคลื่อนที่จากที่ความชื้นสูง (ชิ้นอาหาร) ไปสู่ความต่ำ (อากาศ) ชิ้นอาหารจึงแห้ง แต่ที่การทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากลมร้อนที่ใช้ไม่สามารถลดความดันไอที่อยู่รอบๆชิ้นอาหารลงได้ ซึ่งโดยทั่วไปชิ้นอาหารที่มีความชื้นจะมีความดันไอรอบๆชิ้นอาหารซึ่งจะประพุดตัวเป็นเสมือนตัว

กั้น ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในออกสู่ภายนอก ดังนั้นการทำแห้งที่สามารถบังคับทิศทางลมให้กระทบกับผิวหน้าชิ้นอาหารได้โดยตรง (jet impingement) หรือการใช้โคโรนาวินจะเป็นตัวที่ช่วยลดความดันไอรอบๆ ชิ้นอาหารลงได้ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวล และความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น (Balcer และ Lai, 2004; De Bonis และ Ruocco, 2011; Karami, 2011) ในหลายๆปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษางานวิจัยโดยใช้โคโรนาวินในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล และความร้อน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์ (Electrohydrodynamic, EHD)



ภาพที่ 5 การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน

ที่มา : Defraeye และ Martynenko (2018)

ความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการหดตัว

Elmizadeh และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการทดลองการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 70 °C ควบคุมกับความเข้มข้นไฟฟ้า 3 ระดับ คือ 2.5, 3.5 และ 4.5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 °C ควบคุมกับความเร็วมวลที่ 1 เมตรต่อวินาทีต่อการทำแห้งชิ้นควินซ์ พบว่า การทำแห้งโดยใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าการหดตัวที่น้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าค่าการหดตัวก็จะยิ่งลดลง ในด้านการเปลี่ยนแปลงสีพบว่าความเข้มข้นไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีแต่ในทางกลับกันกับพบว่าการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงมีการเปลี่ยนแปลงสีที่มากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

Bajgai และ Hashinaga (2007) ได้ทำการศึกษาการทดลองการทำแห้งหิวไซเท้าญี่ปุ่นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 430 กิโลโวลต์ต่อเมตรเทียบกับการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าหิวไซเท้าที่อบด้วยการทำแห้งแบบใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงมีการหดตัวที่น้อยกว่าการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน

Dinani และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงรวมกับการทำแห้งด้วยลมร้อนทำแห้งขึ้นหืดที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 2.43-4.2 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3 ระดับ คือ 5, 6 และ 7 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า ความเข้มข้นไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณความชื้นในขึ้นหืด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าค่า solid density จะเพิ่มขึ้นและค่า apparent density จะลดลง แต่ในทางกลับกันพบการลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะส่งผลให้ค่า apparent density ลดลงซึ่งจะสัมพันธ์กับความเป็นรูพรุนของหืดที่จะเพิ่มมากขึ้น

ความเข้มข้นไฟฟ้าต่อค่าสี

Martynenko และ Zheng (2016) ได้ทำการทดลองการทำแห้งโดยใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 4 ระดับ คือ 0, 2, 4 และ 7.5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการใช้ความเร็วลม 4 ระดับ คือ 0, 1, 3 และ 5 เมตรต่อวินาที ต่อการทำแห้งขึ้นแอปเปิ้ลพบว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่ 3.9 กิโลโวลต์ ควบคู่กับความเร็วมค่าที่ 1 เมตรต่อวินาที อัตราการทำแห้งจะเร็วขึ้น และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมพบว่าที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 0, 5 และ 10 กิโลโวลต์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แต่กลับพบว่าที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

จำนวนการใช้อิเล็กโทรดต่ออัตราการทำแห้ง

Dalvand และคณะ (2013) ศึกษาการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงต่อผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่อการทำแห้งขึ้นกีวีโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าต่างกัน 3 ระดับ คือ 6, 10.5 และ 15 กิโลโวลต์ ต่อจำนวนอิเล็กโทรด 3 ระดับคือ 1, 9 และ 17 อิเล็กโทรด ที่อุณหภูมิ 24 °C พบว่ายิ่งจำนวนอิเล็กโทรด

เพิ่มขึ้นอัตราการทำแห้งจะลดลง แต่ในทางกลับกันพบว่ายิ่งระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้น อัตราการทำแห้งก็จะเพิ่มขึ้นที่จำนวนอิเล็กโทรดเท่ากัน

Li และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงต่อผลของจำนวนอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อการทำแห้ง okara cake โดยใช้จำนวนอิเล็กโทรด 1 และ 3 ควบคู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 35, 50 และ 65 เซนติเมตร ซึ่งพบว่า ที่การทำแห้งที่จำนวน 3 อิเล็กโทรด กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 50 เซนติเมตร มีอัตราการทำแห้งมากที่สุด และเมื่อเทียบอัตราการทำแห้งระหว่าง 1 และ 3 อิเล็กโทรดพบว่า ที่จำนวน 3 อิเล็กโทรด มีอัตราการทำแห้งมากกว่าที่ระดับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เท่ากัน

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่ออัตราการทำแห้ง

Cao และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งข้าวสาลีโดยใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงที่อุณหภูมิ ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับที่วางตัวอย่างที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ดังนี้ 20, 35 และ 50 °C, 10, 20 และ 30 กิโลโวลต์, 30, 40, 50 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 20 °C มีค่าอัตราการทำแห้งมากที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ แต่เมื่อดูระดับความต่างศักย์ไฟฟ้างกลับพบว่ายิ่งระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการทำแห้งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อศึกษาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับที่วางตัวอย่างพบว่ายิ่งมีระยะห่างน้อยลงเท่าไร ค่าปริมาณความชื้นก็จะลดลงมากเท่านั้น

บทที่ 3

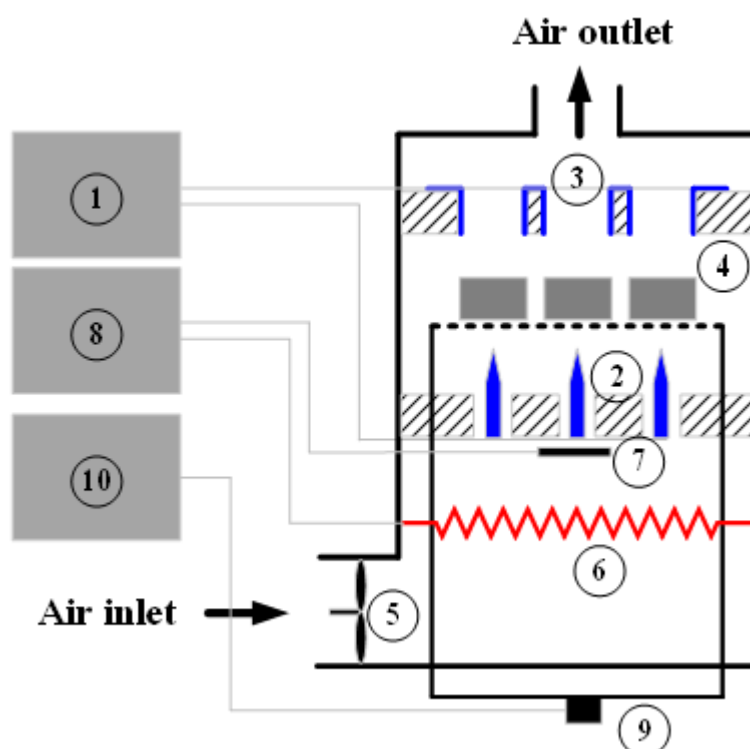
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การคัดเลือก และเตรียมตัวอย่าง

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผู้ทดลองได้ซื้อจากตลาดปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม จากนั้นนำมาล้างปอกเปลือกแล้วทำการวัดความแน่นเนื้อ และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid) เริ่มต้น เมื่อวัดเสร็จจึงหั่นมะม่วงน้ำดอกไม้เป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 1.5x1.5x1.0 เซนติเมตร นำไปเรียงบนตะแกรงเสตนเลสสำหรับทำแห้ง และชั่งน้ำหนักก่อนอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่งเสร็จแล้วจึงทำการคั้นน้ำจากมะม่วงน้ำดอกไม้ส่วนที่เหลือเพื่อหาค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น และชิ้นเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้บางส่วนไปหาค่าความชื้นเริ่มต้น

3.2 อุปกรณ์ และวิธีการทำแห้ง

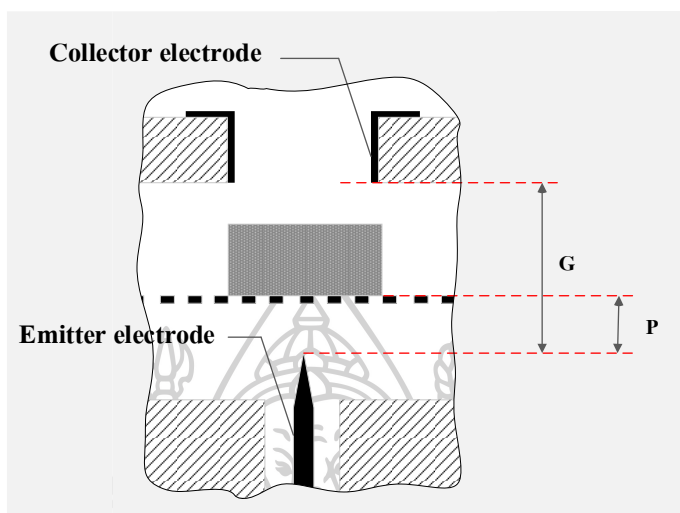
ภาพที่ 6 แสดงลักษณะอุปกรณ์การทดลองสำหรับศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน และ โคโนวินา โดยวิธีการทำแห้งที่ศึกษานี้เป็นการทำแห้งโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการทำแห้ง ห้องทำแห้งทำมาจากวัสดุ poly(methyl methacrylate) ความหนา 5 cm ด้านล่างของอุปกรณ์การทำแห้งจะติดตั้งพัดลมทำให้เกิดการไหลของลมจากอากาศผ่านตัวอย่างในห้องทำแห้ง การไหลของลมในการทดลองสามารถควบคุมได้จากการวัดค่าความเร็วลมด้วย vane type anemometer (Lutron AM-4201) ร่วมกับการใช้อุปกรณ์หรี่ไฟ (dimmer) เพื่อปรับความเร็วพัดลม สำหรับอุณหภูมิของลมสามารถควบคุมได้ด้วย Temperature controller ซึ่งต่ออยู่กับขดลวดความร้อน และ PT100 sensor (Polyscience, USA) ติดตั้งอยู่ที่ตัวอย่าง ในการทดลองทั้งหมดจะมีการติดตามน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำแห้งจึงมีการติดตั้ง Load cell ไว้กับตะแกรงวางตัวอย่างทำจากวัสดุ poly(tetrafluoroethylene) ที่ด้านล่างของอุปกรณ์เพื่อส่งข้อมูลน้ำหนักของตัวอย่างทุกๆ 60 วินาที ไปยัง data logger (Lufft OPUS 200)



ภาพที่ 6 แผนภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยอากาศร้อน และ โคโรนาวิน ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง, (2) emitter electrode, (3) collector electrode, (4) ตัวอย่าง, (5) พัดลม, (6) heater, (7) PT-100, (8) Temperature controller, (9) load cell และ (10) Data logger

ระบบในการสร้างกระแสโคโรนาจะใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบ multiple points-to-tube ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลม 9 ชิ้น (เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 6 เซนติเมตร) ทำหน้าที่เป็น emitter electrode ติดตั้งอยู่ด้านล่างของตัวอย่าง กับอิเล็กทรอนิกส์แบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส 9 ชิ้น (ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร) ทำหน้าที่เป็น collector electrode ติดตั้งอยู่ด้านบนของตัวอย่าง อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Model TDM-2.5/60, Beijing Mutual Inductance Factory, China) ซึ่งสามารถปรับค่าความต่างศักย์ได้ในช่วง 0 – 60 kV ในการควบคุมความเข้มสนามไฟฟ้าจะใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Model JGY-100, China) เพื่อวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองฝั่ง และใช้ ammeter (Model 44C2, China) วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองฝั่ง ภาพที่ 7 แสดงตัวแปรด้านระยะห่างของอิเล็กโตรดที่ทำการศึกษาในงานวิจัย



ภาพที่ 7 แผนภาพตัวแปรระยะห่างของอิเล็กโตรดสำหรับศึกษาการทำแห้งด้วยโคโรนาวิง และลมร้อน โดย G คือ ระยะห่างระหว่าง *Emitter electrode* กับ *Collector electrode* และ P คือ ระยะห่างระหว่าง *Emitter electrode* กับตัวอย่าง

3.2.1 การทำแห้งด้วยลมร้อน

การทำแห้งด้วยลมร้อนในการศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการเป็นตัวแปรที่ใช้ศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน และกำหนดสภาวะที่ใช้ในการศึกษานี้ 9 สภาวะดังแสดงในตารางที่ 1 โดยก่อนนำตัวอย่างใส่ในห้องทำแห้งจะต้องปรับความเร็ว และอุณหภูมิลมให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ เมื่อห้องทำแห้งอยู่ในสภาวะที่กำหนดจึงนำตัวอย่างใส่ และเริ่มต้นกระบวนการทำแห้งโดยบันทึกน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 60 วินาที ตลอดกระบวนการทำแห้งจนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ ข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์จนผลศาสตร์การทำแห้งของกระบวนการต่อไป

ตารางที่ 1 แผนการทดลองของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

| สภาวะ | อุณหภูมิ, T (°C) | ความเร็วลม, v (m/s) |
|--------|------------------|---------------------|
| V05T50 | 50 | 0.5 |
| V10T50 | 50 | 1.0 |
| V15T50 | 50 | 1.5 |
| V05T55 | 55 | 0.5 |
| V10T55 | 55 | 1.0 |
| V15T55 | 55 | 1.5 |
| V05T60 | 60 | 0.5 |
| V10T60 | 60 | 1.0 |
| V15T60 | 60 | 1.5 |

3.2.2 การทำแห้งด้วยโคโรนา

การทำแห้งด้วยโคโรนาเป็นวิธีการทำแห้งที่ใช้วิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีพื้นฐาน โดยอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งกำหนดได้จากสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งด้วยลมร้อนจาก 3.2.1 ส่วนตัวแปรด้านกระแสโคโรนาในการศึกษานี้ประกอบด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้า (U) ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง (P)

โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 (Defraeye และ Martynenko, 2018)

$$E = \frac{U}{d} \quad (4)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (kV/cm), U คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode ที่วัดได้ (kV) และ d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm) และสามารถคำนวณความเร็วของไอออนิกวินสามารถได้จากสมการที่ 5 โดย μ_e จะเป็นสัดส่วนโดยตรงของความเข้มสนามไฟฟ้า (E) (Chen และ N.N., 1994)

$$\mu_e = E \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho}} \quad (5)$$

เมื่อ μ_e คือ ความเร็วของไอออนิกวิน, E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (kV/cm), ϵ_0 คือ ค่าไดอิเล็กทริกเปอร์มีทิวิตีของอากาศ (dielectric permittivity of air) (8.85×10^{-12} F/m) และ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (air density) (1.0359 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)

3.2.2.1 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ในการทำแห้งแบบโคโรนาวินต่อการทำแห้งมะม่วงสุกตามสภาวะการทำแห้งที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 ด้วยปรับระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) ให้ได้ระยะตามที่ต้องการ ให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องทำแห้งปรับอุณหภูมิ และความเร็วลมเป็น 1 เมตรต่อวินาที แล้วจึงปรับความเข้มสนามไฟฟ้าให้มีค่าตามที่กำหนด จากนั้นจึงนำตัวอย่างใส่ และเริ่มต้นกระบวนการทำแห้ง โดยบันทึกน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 60 วินาที ตลอดกระบวนการทำแห้งจนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ ข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์หาลักษณะการแห้งของกระบวนการต่อไป ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน

| สภาวะ | ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด, G (cm) | ความต่างศักย์ไฟฟ้า, U (kV) |
|--------|--------------------------------------|-------------------------------|
| G5U0 | 5 | 0 |
| G5U7.5 | 5 | 7.5 |
| G5U15 | 5 | 15 |
| G6U0 | 6 | 0 |
| G6U7.5 | 6 | 7.5 |
| G6U15 | 6 | 15 |
| G7U0 | 7 | 0 |
| G7U7.5 | 7 | 7.5 |
| G7U15 | 7 | 15 |

3.2.2.2 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode และ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง (P)

ในการทำแห้งแบบโคโรนาวินต่อการทำแห้งมะม่วงสุกตามสภาวะการทำแห้งที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3 โดยปรับระยะห่างให้ได้ระยะตามที่ต้องการ ให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องทำแห้งปรับอุณหภูมิ และความเร็วลมเป็น 1 เมตรต่อวินาที แล้วจึงปรับความเข้มสนามไฟฟ้าให้มีค่า 15 kV จากนั้นจึงนำตัวอย่างใส่ และเริ่มต้นกระบวนการทำแห้งโดยบันทึกน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 60 วินาที ตลอดกระบวนการทำแห้งจนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ ข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์จนผลศาสตร์การทำแห้งของกระบวนการต่อไป

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่างในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 15 kV

| สภาวะ | ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด, G (cm) | ตำแหน่งของตัวอย่าง, P (cm) |
|-------|--------------------------------------|-------------------------------|
| G5P1 | 5 | 1 |
| G5P2 | 5 | 2 |
| G5P3 | 5 | 3 |
| G6P1 | 6 | 1 |
| G6P2 | 6 | 2 |
| G6P3 | 6 | 3 |
| G7P1 | 7 | 1 |
| G7P2 | 7 | 2 |
| G7P3 | 7 | 3 |

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้ง

3.3.1 การวิเคราะห์ความชื้น

ค่าความชื้น (Moisture content, M) สามารถวิเคราะห์หาความชื้นฐานแห้ง (dry basis, M_d) ของตัวอย่างได้ตามวิธีของ AOAC (Cunniff, 1995)

$$M_d(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ M_d คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.), W คือ มวลเปียกของตัวอย่าง (g) และ d คือ มวลแห้งของตัวอย่าง (g)

3.3.2 การวิเคราะห์ค่าสี

ใช้วิธีการประมวลผลจากเครื่อง Hunter Lab ที่มีการประมวลค่าสีด้วยระบบสี L^* , a^* , b^* และนำค่ามาคำนวณค่า ΔE โดยค่า L^* คือ ค่าความสว่าง a^* คือ ค่าสีแดง-เขียว และ b^* คือ ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมโดยรวม (total color differences, ΔE^*) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 (Pothula และคณะ, 2015)

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (7)$$

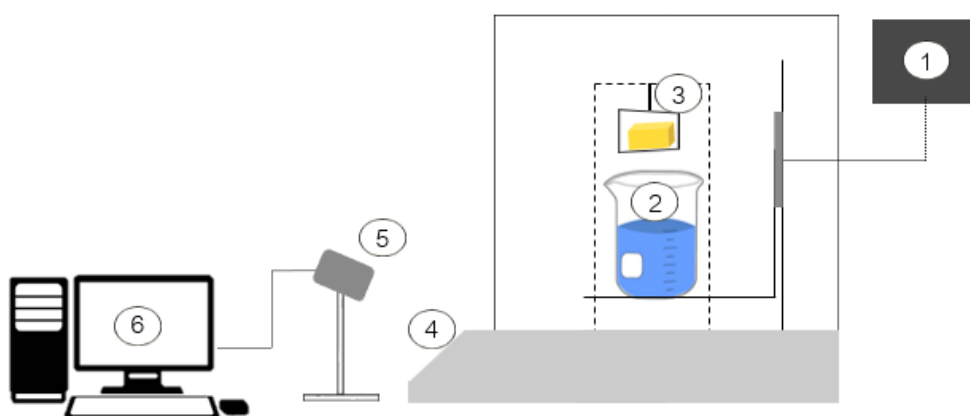
3.3.3 การวิเคราะห์การหดตัว

ใช้เวอร์เนียงคาลิปเปอร์วัดพื้นที่ผิวตัวอย่างก่อน และหลังการทำแห้งโดยวัดด้านกว้าง และด้านยาวอย่างละ 5 ซ้ำ จากนั้นจึงนำไปหาค่าอัตราส่วนการหดตัวดังสมการที่ 8

$$\% \text{ อัตราส่วนการหดตัว} = \frac{\text{พื้นที่ผิวตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง}}{\text{พื้นที่ผิวดตัวอย่างก่อนการทำแห้ง}} \quad (8)$$

3.3.4 การวิเคราะห์การคืบน้ำ

ค่าการคืบน้ำสามารถหาได้จากมะม่วงสุกทำแห้ง ทำได้โดยนำมะม่วงสุกทำแห้งใส่ลงใน ตะแกรง ณ ตำแหน่งที่ 3 ดังที่แสดงในภาพที่ 8 เสร็จแล้วจึงทำการบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้น จึงเลื่อนตะแกรงที่ใส่ตัวอย่างแซในบีกเกอร์แล้วทำการบันทึกค่าน้ำหนักตัวอย่างอย่างต่อเนื่องจน น้ำหนักเริ่มคงที่ เสร็จแล้วจึงนำมาคำนวณหาอัตราส่วนการคืบน้ำได้ดังสมการที่ 9



ภาพที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์ความสามารถการคืบน้ำกลับ

(1) เครื่องควบคุมการขึ้น-ลง (2) บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร (3) ช่องใส่ตัวอย่าง (4) เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (5) กล้อง (6) คอมพิวเตอร์

$$RR = \frac{M_t - M_0}{M_e - M_0} \quad (9)$$

เมื่อ RR คือ อัตราการคืบน้ำ (g H₂O/g d.b.), M_t คือ น้ำหนักของน้ำที่เวลาใด ๆ (g), M_0 คือ น้ำหนักของน้ำที่เวลาเริ่มต้น (g) และ M_e คือ น้ำหนักของน้ำที่สภาวะสมดุล (g)

3.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้งทางจลนพลศาสตร์

- อัตราส่วนความชื้น

ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ และปริมาณความชื้นที่สมดุลของ ตัวอย่าง จะคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างที่แสดงดังสมการ 10 11 และ 12 ตามลำดับ

$$X_i = \frac{W_i - W_d}{W_d} \quad (10)$$

$$X_t = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (11)$$

$$X_{eq} = \frac{W_{eq} - W_d}{W_d} \quad (12)$$

เมื่อ X_i คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง), W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กิโลกรัม), W_d คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กิโลกรัม), X_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง), W_t คือ น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาใดๆ (กิโลกรัม), X_{eq} คือ ปริมาณความชื้นที่สมดุล (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง) และ W_{eq} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่สมดุล (กิโลกรัม) สำหรับปริมาณความชื้นที่สมดุลหาได้จากอบตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้น้ำหนักคงที่เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ปริมาณความชื้นจะถูกนำมาคิดดังสมการที่ 13

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (13)$$

จากนั้นนำค่าอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาการทำแห้งมาพลอตกราฟของการทำแห้งเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตามสมการของ Lewis model ดังสมการที่ 14

$$MR = \exp(-kt) \quad (14)$$

- กราฟการทำแห้ง

กราฟการทำแห้ง (drying curve) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลการทำแห้งระหว่างความชื้นของตัวอย่างกับเวลาการทำแห้ง ลักษณะของกราฟการทำแห้งแสดงถึงพฤติกรรมการทำแห้งของตัวอย่างในกระบวนการที่ใช้โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Lewis model แสดงดังสมการที่ 15 ในการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลองจากค่า sum of square error (SSE) ดังสมการที่ 16

$$MR = \exp(-kt) \quad (15)$$

เมื่อ t คือ เวลาในการทำแห้ง (s) และ k คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$$SSE = \sum_{i=1}^n [Y_{exp,i} - Y_{pre,i}]^2 \quad (16)$$

เมื่อ SSE คือ sum of square error (-) n คือ จำนวนของค่าตอบสนอง Y_{exp} คือ ค่าตอบสนองจากการทดลอง และ Y_{pre} คือ ค่าตอบสนองจากแบบจำลอง

- อัตราการทำให้แห้ง

อัตราการทำให้แห้ง (Drying rate, DR) หาได้จากปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$DR = - \frac{x_{t+\Delta t} - x_t}{\Delta t} \quad (17)$$

Drying rate (DR) คือ อัตราการทำให้แห้ง (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง (s^{-1}) $x_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นที่ $t + \Delta t$ (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง), x_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง), Δt คือ เวลาที่เพิ่มขึ้น (วินาที), $x_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นที่ $t + \Delta t$ (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง), x_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (น้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของแห้ง)

- สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity, D_{eff})

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity, D_{eff}) สามารถทำนายได้จาก diffusion model ที่แสดงในสมการที่ 18, 19 และ 20 diffusion model ได้มาจาก Fick's second law ของการแพร่ ซึ่งใช้เพื่ออธิบายการแพร่ความชื้นออกจากตัวอย่าง และสามารถใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องทำให้แห้ง (Crank, 1975)

$$\begin{aligned} MR = & \frac{8^3}{\pi^6} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 (2m+1)^2 (2k+1)^2} \\ & \times \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2} t \right] \\ & \times \exp \left[-(2m+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Y^2} t \right] \\ & \times \exp \left[-(2k+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Z^2} t \right] \end{aligned} \quad (18)$$

เมื่อ X , Y และ Z คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของตัวอย่าง (เมตร) ตามแนวความกว้าง ยาว และหนา ตามลำดับ, D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s) และ n , m และ k คือ ค่าคงที่ของ สมการ ดังนั้นเพื่อนำสมการที่ 18 มาใช้ให้เหมาะสมต่อการใช้ สมการที่ 18 จึงถูกลดรูปเป็นดัง สมการที่ 19

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (19)$$

เมื่อ L^2 คือ ผลรวมของค่า $X^2 + Y^2 + Z^2$

ในการศึกษาครั้งนี้จะหาค่า D_{eff} จากความชัน (m) ของ $\ln MR$ กับระยะเวลาของการทำแห้งตาม สมการที่ 20

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (20)$$

3.3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการการศึกษาการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) แบบ 3-Level Factorial design ดังตารางที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Design-Expert (v 6.0.8.) ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการทำแห้งด้วยลมร้อน

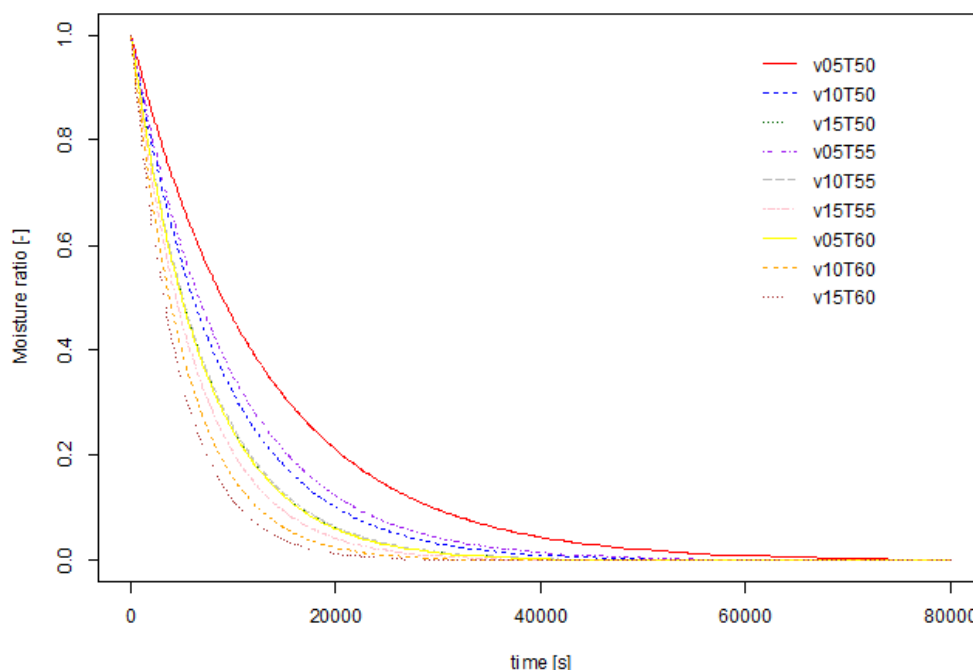
วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และสองทาง (two-way ANOVA) และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยหลายๆ คู่ในแต่ละตัวแปรตาม โดยใช้ Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วย SPSS software v.18 ตามสภาวะการทดลองในตารางที่ 2 และ 3 ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในทุกๆ การทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทำแห้งด้วยลมร้อน

จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อน

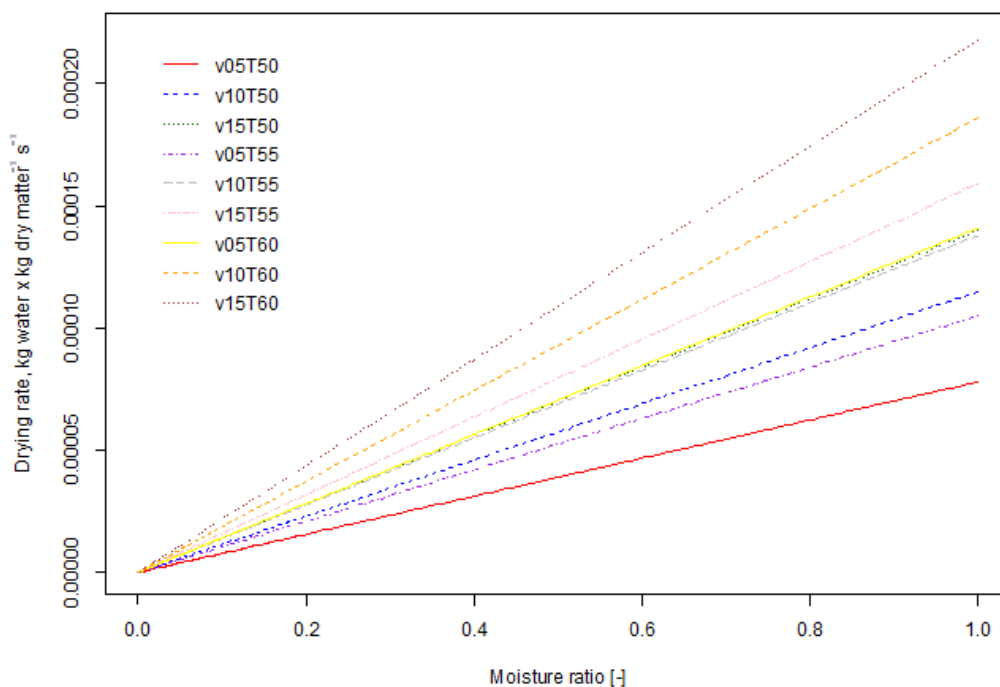


ภาพที่ 9 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ และ ความเร็วลมต่างๆ

การทดลองนี้ในขั้นต้นทำการศึกษาการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน โดยตัวแปรขั้นต้นในการศึกษาสำหรับขั้นตอนนี้คืออุณหภูมิ (50, 55 และ 60°C) และความเร็วลม (0.5, 1 และ 1.5 m/s) ดังแผนการทดลองในตารางที่ 1 แบบจำลอง Lewis ถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนในงานวิจัยนี้ ภาพที่ 9 แสดงพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนด้วยกราฟการทำแห้งจะเห็นได้ว่าความชื้นของตัวอย่างในทุกสภาวะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับเวลา เวลาในการทำแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วลมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วลมที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อากาศเกิดการขยายตัวจึงสามารถรับความชื้นจากชื้นตัวอย่างออกมาได้มาก พร้อมกับมีความเร็วลมที่สูงจึงช่วยพัดเอาความชื้นจากตัวอย่างออกมาได้มากเช่นกัน จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น (De Bonis และ Ruocco, 2007, 2011; Motevali และคณะ, 2011; Salarikia และคณะ, 2017) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Vega-Galvez และคณะ, 2012) ซึ่งได้ทำ

การทดลองการทำแห้งแอปเปิ้ลด้วยลมร้อนที่หลายอุณหภูมิ และความเร็วลม พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วลมอัตราการแห้งก็จะเร็วขึ้น

อัตราการแห้งด้วยลมร้อน



ภาพที่ 10 กราฟอัตราการแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะ อุณหภูมิ และความเร็วลมต่างๆ

อัตราการแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ และความเร็วลมต่างๆแสดงดัง ภาพที่ 10 พบว่าอัตราการแห้งของทุกสภาวะจะลดลงแบบเชิงเส้นกับความชื้นของตัวอย่างใน การศึกษานี้พบเฉพาะพฤติกรรมการทำงานในช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) เท่านั้นซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยการทำแห้งมะม่วงสุกที่ผ่านมา (Braga และคณะ, 2019; Goyal และคณะ, 2006; Sehrawat และคณะ, 2018) โดยสภาวะการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิ 60°C และความเร็ว ลม 1.5 m/s มีอัตราการแห้งที่สูงที่สุด

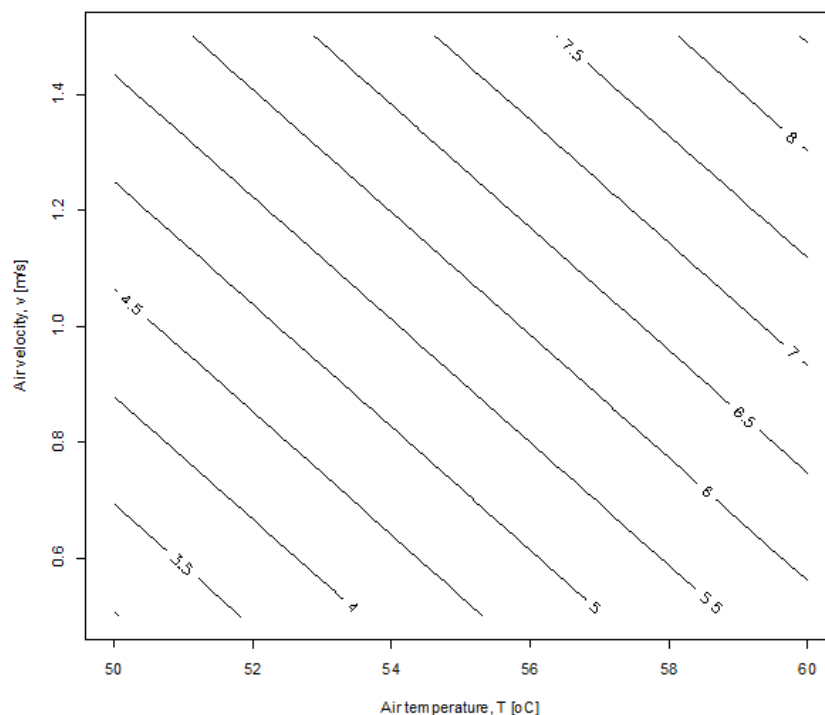
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (%S) ของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะที่ต่างต่าง

| | สภาวะการทดลอง | | $D_{eff} \times 10^9$ (m ² /s) | ΔE^* (-) | S (%) |
|--------|-------------------|------------|--|---------------------|----------|
| | อุณหภูมิ | ความเร็วลม | | | |
| | (^o C) | (m/s) | | | |
| V05T50 | 50 | 0.5 | 3.108 | 30.54 | 40.23 |
| V10T50 | 50 | 1 | 4.574 | 29.33 | 31.18 |
| V15T50 | 50 | 1.5 | 5.675 | 30.08 | 35.25 |
| V05T55 | 55 | 0.5 | 4.297 | 38.87 | 46.01 |
| V10T55 | 55 | 1 | 5.564 | 36.44 | 46.58 |
| V15T55 | 55 | 1.5 | 6.650 | 33.37 | 41.57 |
| V05T60 | 60 | 0.5 | 5.691 | 30.20 | 34.16 |
| V10T60 | 60 | 1 | 7.369 | 20.80 | 28.43 |
| V15T60 | 60 | 1.5 | 8.868 | 36.49 | 37.72 |

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดยใช้การทดลองแบบทรีเลเวลแฟคทอเรียลดีไซน์ (3-Level Factorial design) เพื่อเลือกสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมต่อการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน ซึ่งจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) สูง ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*) และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (%S) จะมีค่าต่ำ จากตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองการทำแห้งด้วยลมร้อนของมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ต่อค่า D_{eff} ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว พบว่าค่า D_{eff} มีค่าอยู่ในช่วง 3.108 - 8.868 $\times 10^9$ m²/s, ΔE^* มีค่าอยู่ในช่วง 20.80 - 38.87 และค่า %S มีค่าอยู่ในช่วง 28.43 - 46.58 โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องการศึกษาต่อการตอบสนองปัจจัยสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้แบบจำลองสมการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญที่

$\alpha = 0.05$ พบว่าแบบจำลอง Linear relationship มีความเหมาะสมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ประสิทธิภาพ และแบบจำลอง Quadratic Model มีความเหมาะสมต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวตามลำดับ โดยจะพิจารณาจากค่า p-value ($p < 0.5$) และ lack of fit ($p > 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการที่ 21-23 ตามลำดับ



ภาพที่ 11 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพ

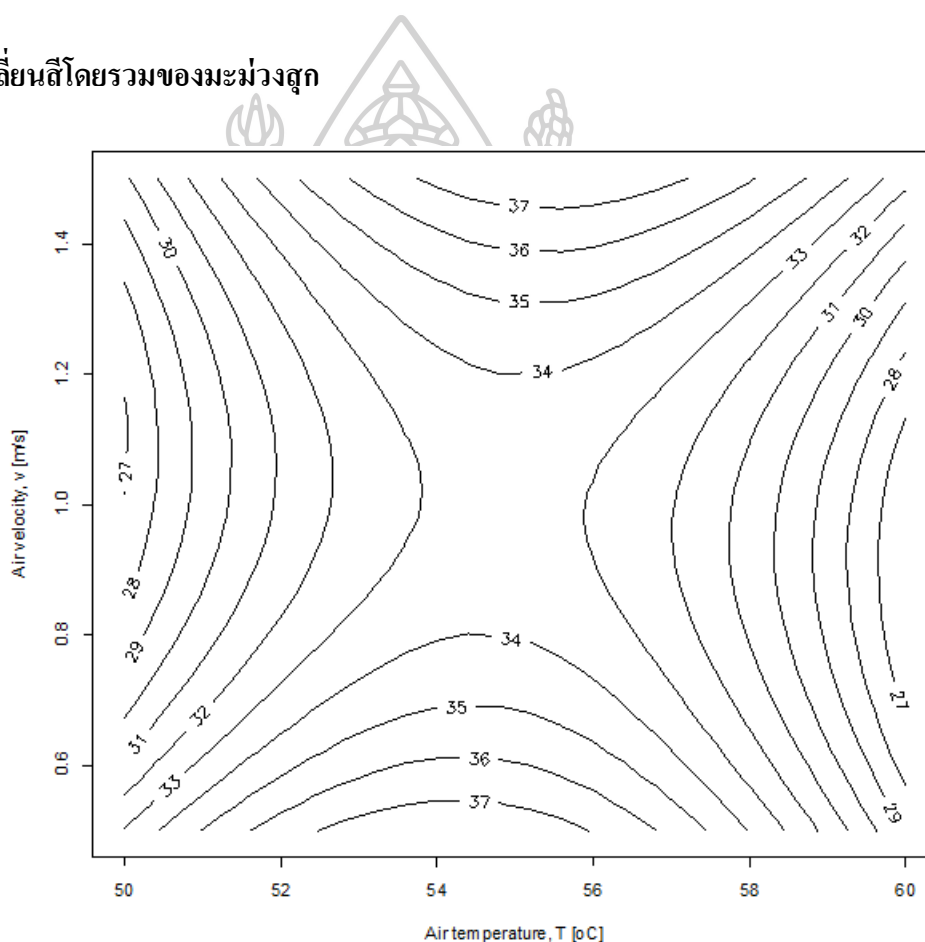
$$D_{eff} = -1.28 \times 10^{-8} + 2.87 \times 10^{-8}T + 2.78 \times 10^{-9}v \quad (21)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพ, T คือ อุณหภูมิ และ v คือ ความเร็วลม

จากภาพที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วง (อุณหภูมิ และความเร็วลม) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพ (D_{eff}) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วลม ส่งผลให้ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อลดอุณหภูมิ และความเร็วลมจะส่งผลให้ค่า D_{eff} ลดลง จึงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ และความเร็วลมเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า D_{eff} โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 50°C และความเร็วลม 0.5 m/s จะมีค่า D_{eff} ต่ำที่สุด ($3.108 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) และที่อุณหภูมิ 60°C และ

ความเร็วลม 1.5 m/s จะมีค่า D_{eff} สูงที่สุด ($8.868 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s}$) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างของความร้อนที่ขึ้นตัวอย่างกับอากาศมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในขึ้นตัวอย่างเคลื่อนที่สู่ภายนอกซึ่งก็คือการทำให้อัตราการระเหยเกิดได้มากขึ้นตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเร็วลมมากขึ้นจะทำให้ไปลดความดันไอซึ่งประพจน์ตัวเป็นตั้งตัวต้านทานการระเหยของความชื้นภายในขึ้นอาหารลดลง ค่า D_{eff} จึงมีค่าเพิ่มขึ้น (De Bonis และ Ruocco, 2007; Salarikia และคณะ, 2017)

ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของมะม่วงสุก

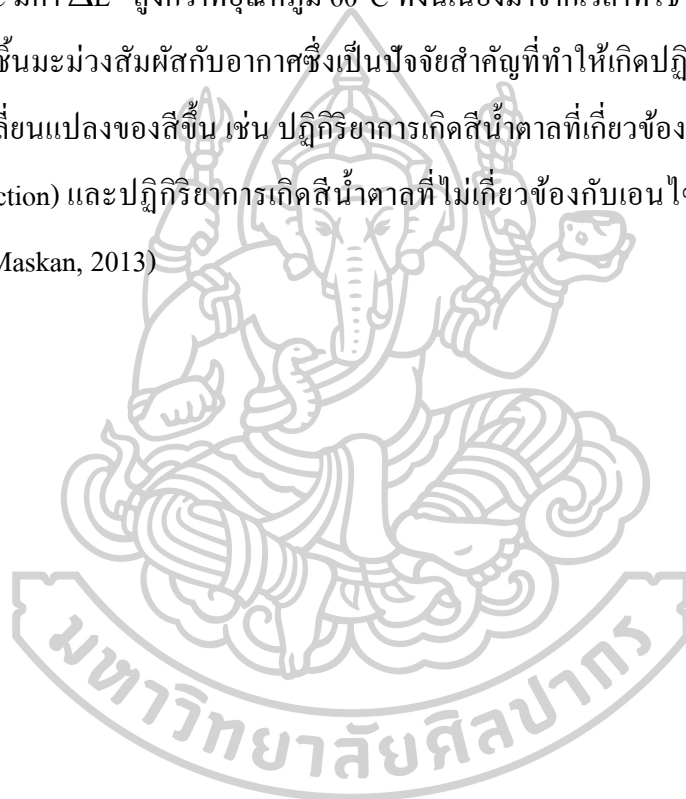


ภาพที่ 12 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม

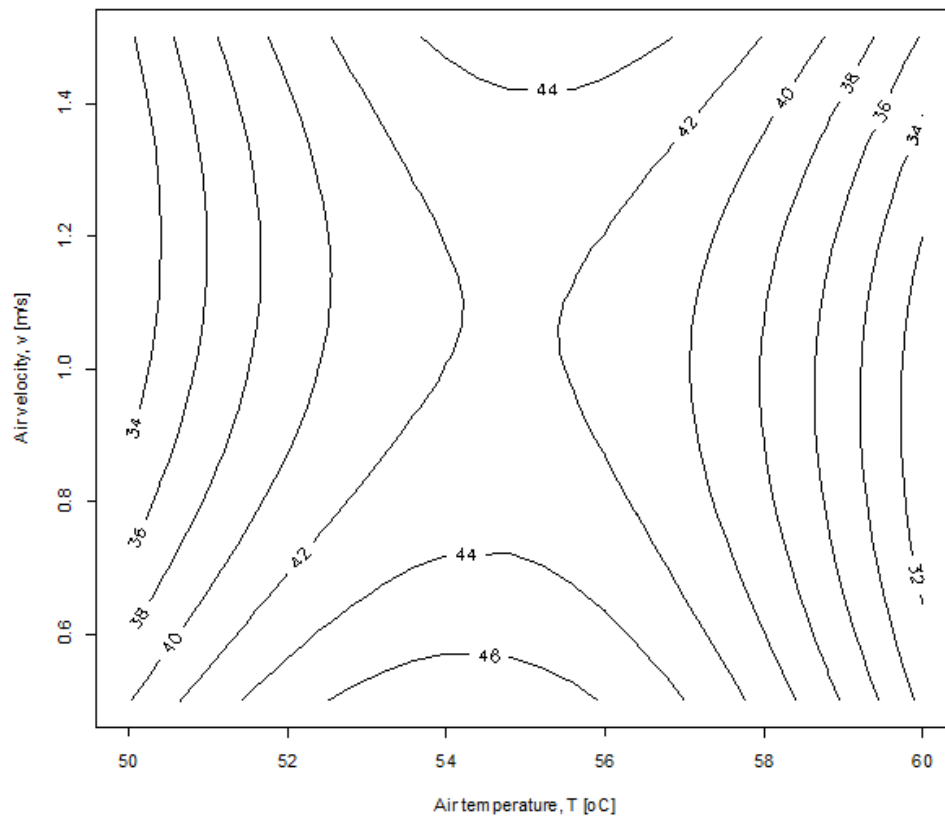
$$\Delta E^* = -1.714.04 + 28.62T - 73.74v - 0.27T^2 + 16.86v^2 + 0.73vT \quad (22)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม, T คือ อุณหภูมิ และ v คือ ความเร็วลม

จากภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วง (อุณหภูมิ และ ความเร็วลม) ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม (ΔE^*) พบว่า โดยส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วลม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kaveh และคณะ, 2020; Yang และคณะ, 2018) จึงเป็นจุดบ่งชี้ว่าอุณหภูมิ และความเร็วลมเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า ΔE^* โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 55°C และความเร็วลม 0.5 m/s จะมีค่า ΔE^* สูงที่สุด (38.87) และที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วลม 1 m/s จะมีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด (20.80) นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 50°C มีค่า ΔE^* สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C ทั้งนี้เนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่ค่อนข้างนานจึงทำให้ชิ้นมะม่วงสัมผัสกับอากาศซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีขึ้น เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (browning reaction) (Horuz และ Maskan, 2013)



ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก



ภาพที่ 13 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราการหดตัว

$$S = -1130.95 + 44.39T - 80.76v - 0.41T^2 + 14.57v^2 + 0.90vT \quad (23)$$

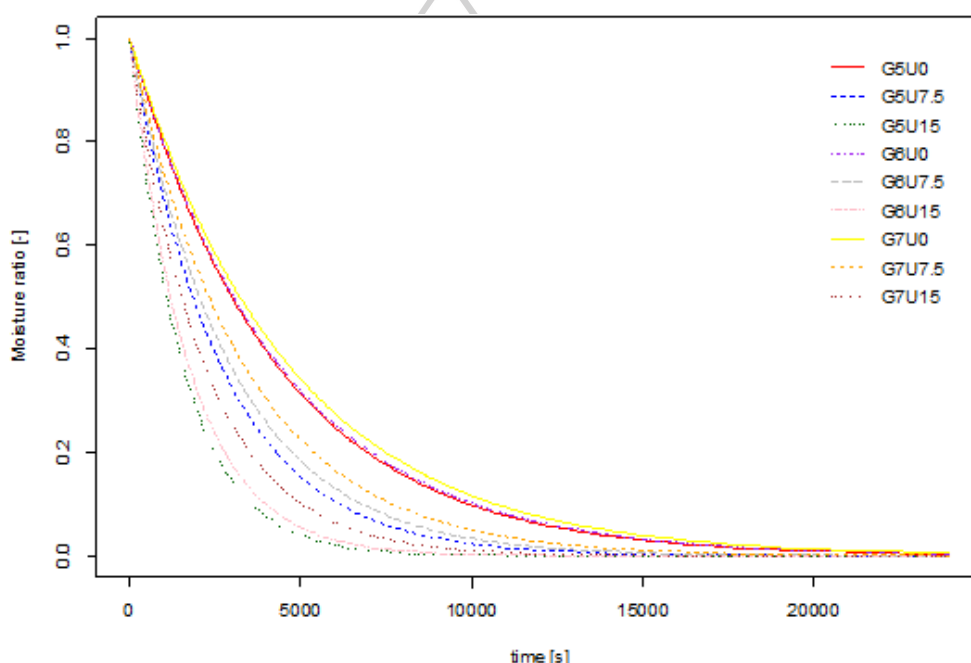
เมื่อ S คือ ร้อยละอัตราการหดตัว, T คือ อุณหภูมิ และ v คือ ความเร็วลม

จากภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วง (อุณหภูมิและความเร็วลม) ต่อค่าร้อยละอัตราการหดตัว (%S) พบว่าค่าร้อยละอัตราการหดตัวมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Horuz และ Maskan, 2013; Önal และคณะ, 2019) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาการทำแห้งสั้นลง ในขณะที่ทางด้านของความเร็วมังเห็นแนวโน้มไม่ชัดเจน จึงชี้ได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่าร้อยละอัตราการหดตัว โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 55°C และความเร็วมัง 1 m/s จะมีค่า %S สูงที่สุด (46.58) และที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วมัง 1 m/s จะมีค่า %S ต่ำที่สุด (28.43)

ดังนั้นจากผลการทดลองข้างต้นจึงทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน คือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูง (7.369×10^9) ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (20.80) และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (28.43) มีค่าต่ำ ตามลำดับ

ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และระดับความต่างศักย์ต่อการทำแห้งด้วยโคโรนาวิ

จนผลศาสตร์การทำแห้งด้วยโคโรนาวิ

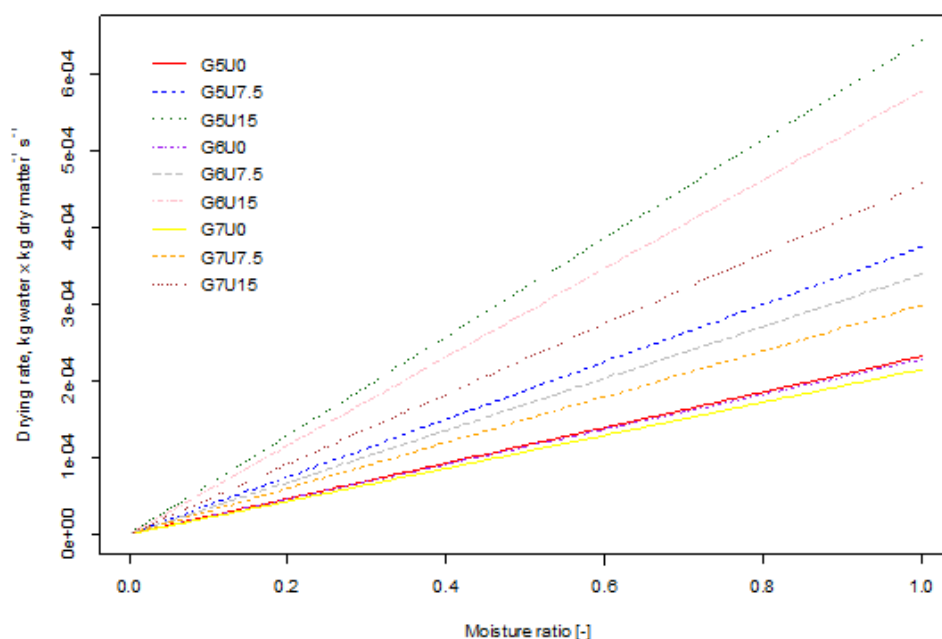


ภาพที่ 14 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

การทดลองนี้ในขั้นต้นทำการศึกษากการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วลม 1 m/s โดยตัวแปรขั้นต้นในการศึกษาสำหรับขั้นตอนนี้ คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (5, 6 และ 7 เซนติเมตร) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (0, 7.5 และ 15 กิโลโวลต์) ดังแผนการทดลองในตารางที่ 2 แบบจำลอง Lewis ถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนในงานวิจัยนี้ ภาพที่ 14 แสดงพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิด้วยกราฟการทำแห้ง จะเห็นได้ว่าความชื้นของตัวอย่างในทุกสภาวะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับเวลา

และเวลาในการทำแห้งจะลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในขณะที่เวลาในการทำแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับงานวิจัยอื่นๆ (Basiry และ Esehaghbeygi, 2010; Cao และคณะ, 2004; Goodenough และคณะ, 2007; Martynenko และคณะ, 2017)

อัตราการทำแห้งด้วยลมร้อน



ภาพที่ 15 กราฟอัตราการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่สถานะอุณหภูมิ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 15 พบว่าอัตราการทำแห้งของทุกสถานะจะลดลงแบบเชิงเส้นกับความชื้นของตัวอย่างในการศึกษานี้พบเฉพาะพฤติกรรมการทำงานในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) เท่านั้น โดยสถานะการทำงานที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ มีอัตราการทำแห้งที่สูงที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 4 และ 5 โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าก็จะมากตามส่งผลให้เกิดความเร็วของไอออนิกวินในระบบที่มากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากความเร็วของไอออนิกวินจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า ในขณะที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อ

ลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลง ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น ความเร็วของไอออนิกวินในระบบก็จะมากขึ้นตามลำดับ (Martynenko และคณะ, 2019) นอกจากนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าช่วยให้ไอออนอิสระได้รับพลังงานในการเคลื่อนที่ (momentum) ไปชนกับไอออนที่มีสภาพเป็นกลางส่งผลให้ไอออนิกวินเกิดได้แรงขึ้น (Zhang และคณะ, 2014) ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Dalvand และคณะ, 2013) ได้ทำการทดลองโดยใช้การทำแห้งแบบกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงต่อการทำแห้งกึ่งที่หลายระดับความต่างศักย์ พบว่า ยิ่งเพิ่มระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการแห้งก็จะเร็วขึ้นตามลำดับ

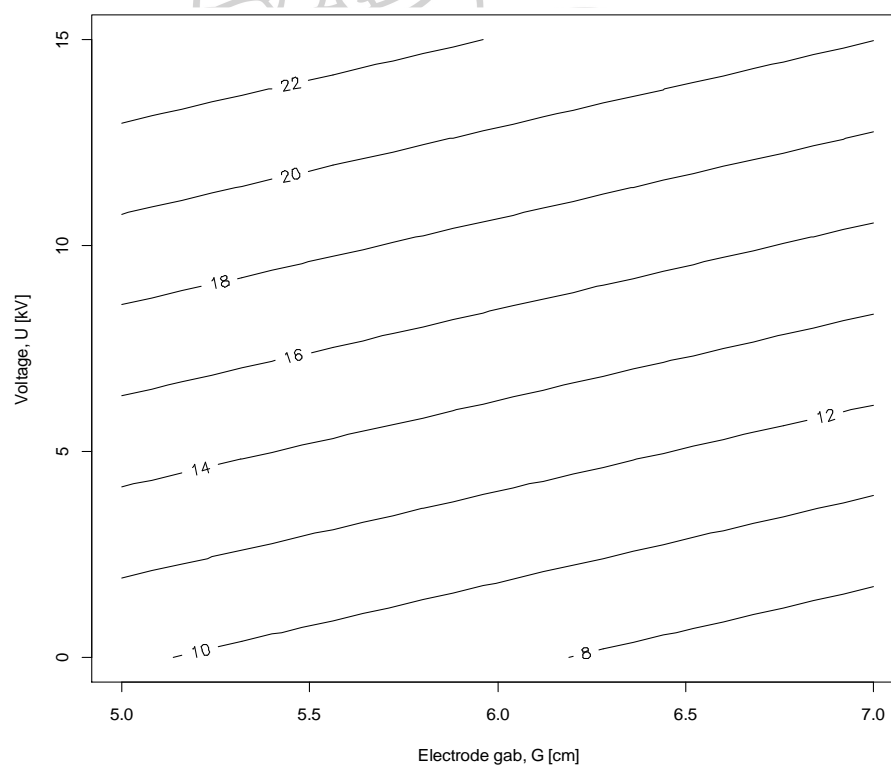
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และร้อยละอัตราส่วนการหาคั่วของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน โดยใช้ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

| | สถานะการทำแห้ง | | D _{eff} x10 ⁸ (m ² /s) | ΔE* (-) | S (%) |
|--------|----------------|-----------|--|---------------------------|--------------------------|
| | G (cm) | U (kV) | | | |
| G5U0 | 5 | 0 | 0.94±0.02 ^b | 17.90±1.88 ^{cd} | 24.06±0.99 ^b |
| G5U7.5 | 5 | 7.5 | 1.52±0.08 ^d | 14.44±0.97 ^{ab} | 22.79±1.05 ^{ab} |
| G5U15 | 5 | 15 | 2.61±0.13 ^g | 12.18±1.04 ^a | 20.30±1.30 ^a |
| G6U0 | 6 | 0 | 0.92±0.03 ^b | 20.63±1.00 ^{de} | 25.14±4.06 ^b |
| G6U7.5 | 6 | 7.5 | 1.37±0.11 ^d | 16.90±2.59 ^{bc} | 26.06±1.41 ^{bc} |
| G6U15 | 6 | 15 | 2.34±0.03 ^f | 18.27±2.75 ^{cd} | 25.30±0.29 ^{bc} |
| G7U0 | 7 | 0 | 0.87±0.022 ^{ab} | 22.86±3.24 ^e | 32.42±1.29 ^e |
| G7U7.5 | 7 | 7.5 | 1.21±0.20 ^c | 15.60±0.54 ^{bc} | 28.47±1.05 ^{cd} |
| G7U15 | 7 | 15 | 1.85±0.06 ^e | 14.83±0.47 ^{abc} | 25.62±1.86 ^{bc} |
| V10T60 | | | 0.74±0.21 ^h | 22.17±1.34 ^c | 29.48±1.12 ^d |

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันที่กำกับในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 5 แสดงผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อค่า D_{eff} ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว พบว่าค่า D_{eff} มีค่าอยู่ในช่วง $0.74 - 2.61 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{s}$, ΔE^* มีค่าอยู่ในช่วง $12.18 - 22.86$ และค่า S มีค่าอยู่ในช่วง $20.30 - 32.42$ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของทุกระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อสังเกตค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะพบว่า ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับอัตราการทำแห้งข้างต้น นอกจากนี้เมื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของทุกสภาวะการทำแห้งด้วยโคโรนาวินเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งจะพบว่าการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ จะมีค่า D_{eff} สูงที่สุด (2.61×10^8) และที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 7 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0 กิโลโวลต์ จะมีค่า D_{eff} ต่ำที่สุด (0.87×10^8)



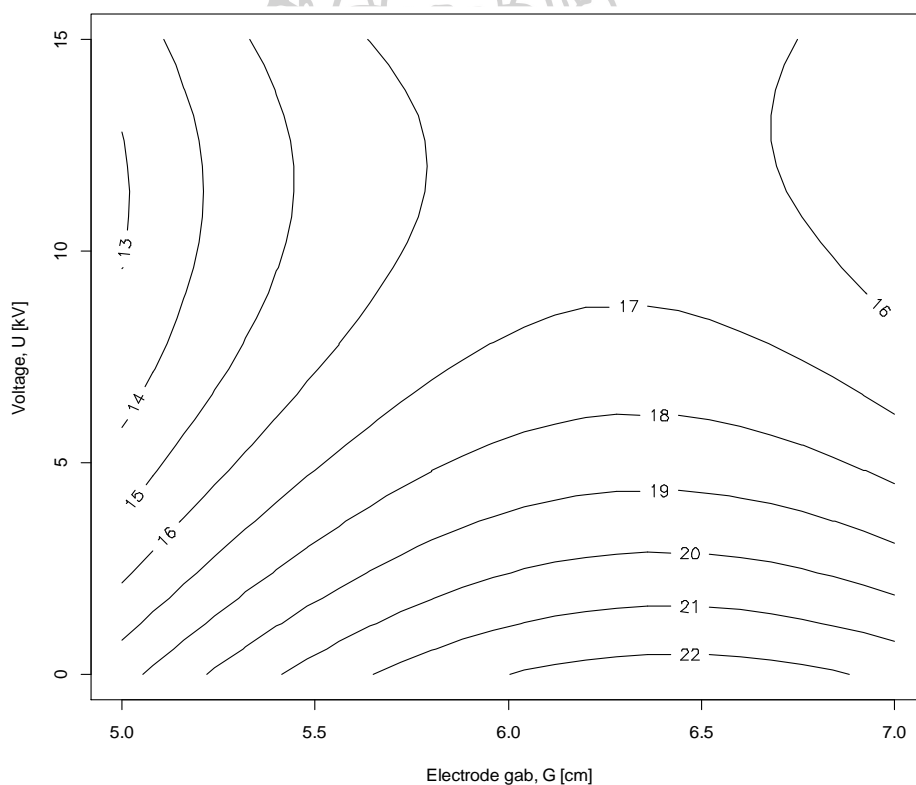
ภาพที่ 16 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

$$D_{eff} = 15.14 \times 10^{-8} - 1.90 \times 10^{-8}G + 6.78 \times 10^{-8}U \quad (24)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ U คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อค่า D_{eff} พบว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ส่งผลให้ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลให้ค่า D_{eff} ลดลง จึงแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า D_{eff}

ค่าการเปลี่ยนสีโดยรวมของมะม่วงสุก



ภาพที่ 17 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

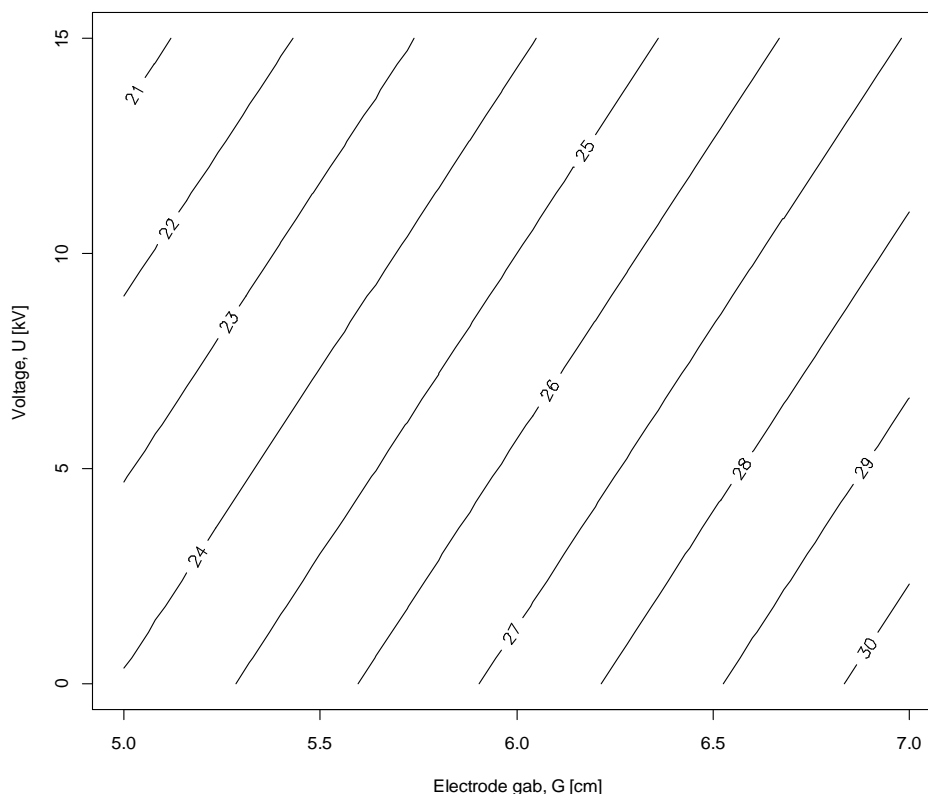
$$\Delta E^* = 13.96 - 1.90G + 6.78U - 0.43G^2 + 2.22U^2 - 1.73GU \quad (25)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และ E คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม (ΔE^*) พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และเพิ่มระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า อันเป็นผลเนื่องมาจากการทำแห้งด้วยโคโรนาพลาสมาทำให้ระยะเวลาการทำแห้งสั้นลงทำให้เม็ดสีในชั้นตัวอย่างโดนทำลายน้อยลง การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีโดยรวมจึงน้อยลงทำให้คงคุณค่าของสีได้ใกล้เคียงกับของสด (Kantrong และคณะ, 2014) จึงเป็นจุดบ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า ΔE^* โดยพบว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่ 5 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ที่ 15 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด (12.18) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่ 7 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ที่ 0 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีค่า ΔE^* สูงที่สุด (22.86)



ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก



ภาพที่ 18 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราส่วนการหดตัว

$$S = 25.70 + 3.23G - 1.73U - 0.30G^2 + 0.11U^2 - 0.76GU \quad (26)$$

เมื่อ S คือ ค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ E คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

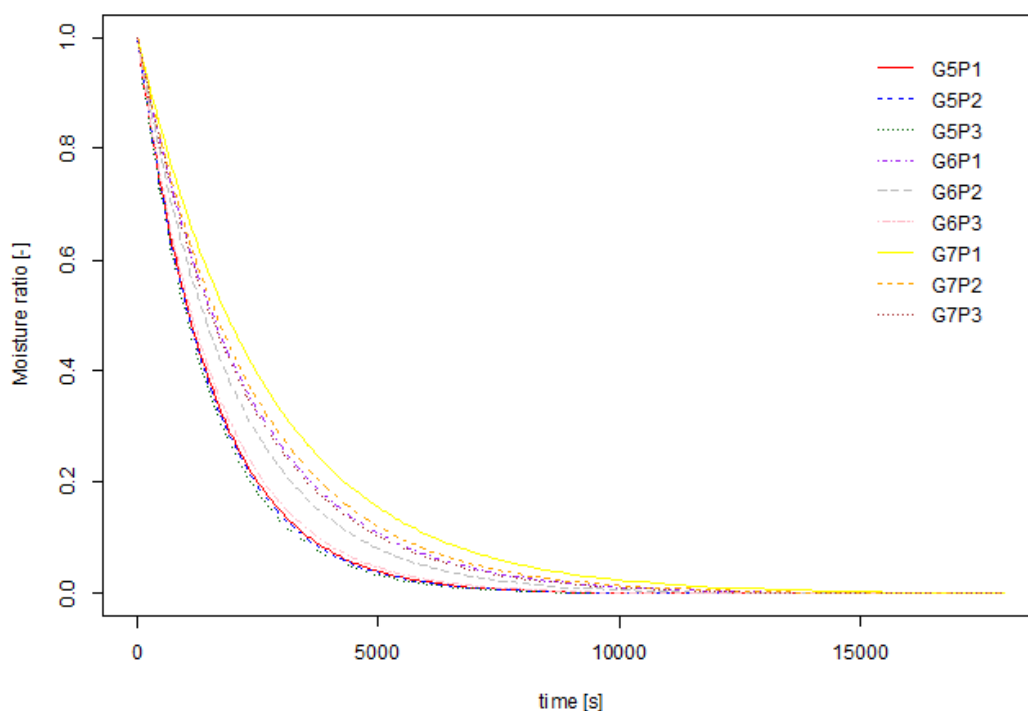
จากภาพที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว พบว่าค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด แต่ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ายังไม่เห็นแนวโน้มชัดเจนนัก อันเป็นผลเนื่องมาจากการทำแห้งด้วยโคโรนาวินทำให้ระยะเวลาการทำแห้งสั้นลงจึงทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง จึงเป็นจุดบ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการหดตัว โดยพบว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ที่

15 กิโลโวลต์ จะมีค่าร้อยละการหดตัวต่ำที่สุด (12.18) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 7 เซนติเมตร กับค่าความต่างศักย์ที่ 0 กิโลโวลต์ จะมีค่าร้อยละการหดตัวสูงที่สุด (32.42)

และจากที่กล่าวไปข้างต้นจะพบว่าสภาวะการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวน้อย คือสภาวะการทำแห้งที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร (EE) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์

ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็ก และตำแหน่งตัวอย่างการทำแห้งด้วยโคโรนาวิน

จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน

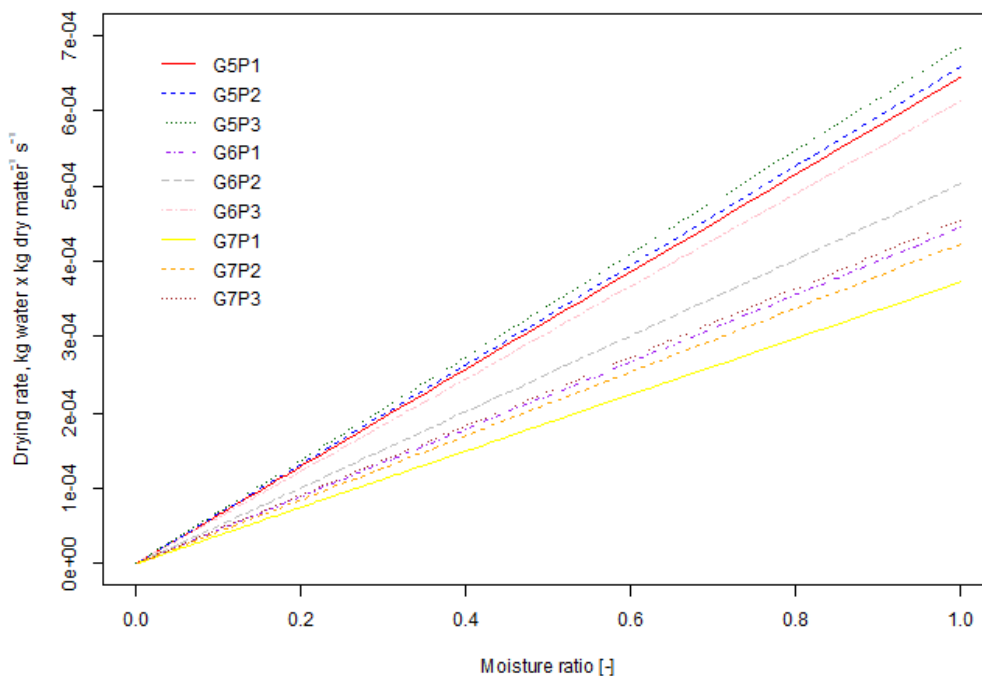


ภาพที่ 19 กราฟการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ

การทดลองนี้ในขั้นต้นทำการศึกษาการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วลม 1 m/s โดยตัวแปรขั้นต้นในการศึกษาสำหรับขั้นตอนนี้ คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (5, 6 และ 7 เซนติเมตร) และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ (1, 2 และ 3 เซนติเมตร) ดังแผนการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 แบบจำลอง Lewis ถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง

มะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินในงานวิจัยนี้ ภาพที่ 19 แสดงพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินด้วยกราฟการทำแห้งจะเห็นได้ว่าความชื้นของตัวอย่างในทุกสภาวะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับเวลา และเวลาในการทำแห้งจะลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น ในขณะที่เวลาในการทำแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง (LS)

อัตราการทำแห้งด้วยโคโรนาวิน



ภาพที่ 20 กราฟอัตราการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ

อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวินที่สภาวะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 20 พบว่าอัตราการทำแห้งของทุกสภาวะจะลดลงแบบเชิงเส้นกับความชื้นของตัวอย่างในการศึกษานี้พบเฉพาะพฤติกรรมการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) เท่านั้น โดยสภาวะการทำแห้งที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร และตำแหน่งตัวอย่างที่ 3 เซนติเมตร มีอัตราการทำแห้งที่สูงที่สุด

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 19-20) พบว่า อัตราการทำแห้งจะเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่างจะทำให้มีพื้นที่ให้อากาศรอบๆ อิเล็กโทรดปล่อยอิเล็กตรอน (emitter electrode) สามารถแตกตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดไอออนอิสระในระบบมากขึ้น จึงทำให้เกิดโคโรนาวินหรือไอออนิกวินในระบบมากขึ้น เนื่องจากไอออนิกวิน หรือโคโรนาวินจะเกิดขึ้นได้จากเกิดการชนกันของไอออนอิสระ กับ ไอออนที่เป็นกลาง (neutral particles) ตามลำดับซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลมากขึ้น อัตราการทำแห้งจึงเร็วขึ้น (Dalvand และคณะ, 2013; Hashinaga และคณะ, 1999; Karami, 2011; Zhang และคณะ, 2014)

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

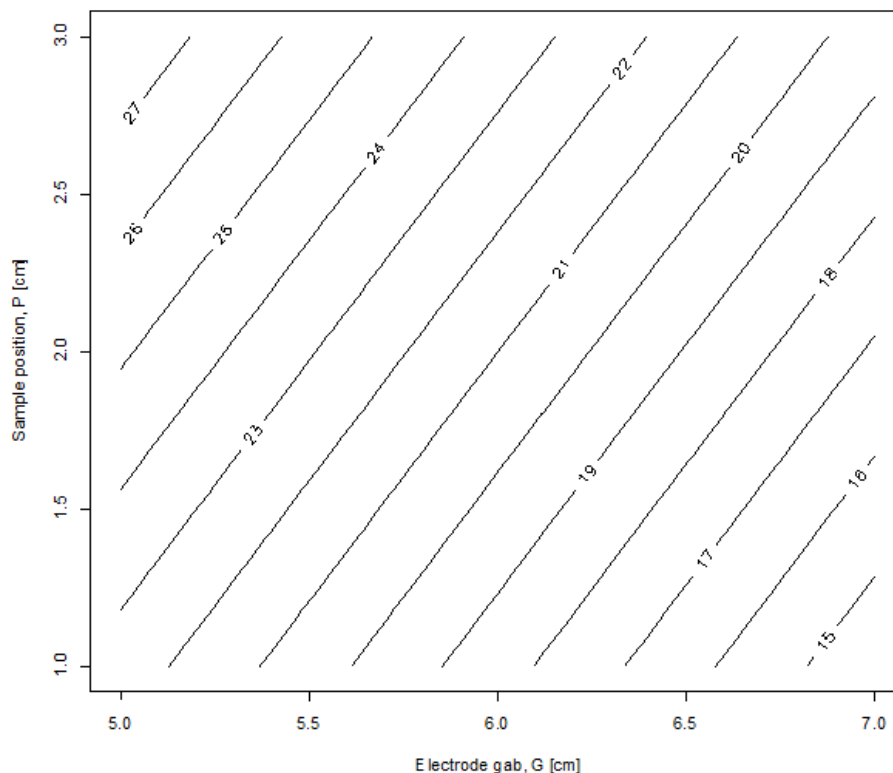
ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และร้อยละอัตราส่วนการหดตัวของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยโคโรนาวิน โดยใช้ความเร็วลม 1 m/s อุณหภูมิ 60°C ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ

| | สภาวะการทำแห้ง | | $D_{\text{eff}} \times 10^8$ (m^2/s) | ΔE^* (-) | S (%) |
|--------|----------------|-----------|---|--------------------------|--------------------------|
| | G (cm) | P (cm) | | | |
| G5P1 | 5 | 1 | 2.16±0.51 ^{cd} | 16.00±1.32 ^c | 20.49±1.09 ^{bc} |
| G5P2 | 5 | 2 | 2.34±1.46 ^{bc} | 15.64±0.32 ^c | 21.58±0.55 ^{bc} |
| G5P3 | 5 | 3 | 2.72±0.31 ^a | 14.95±0.65 ^c | 22.28±0.34 ^{bc} |
| G6P1 | 6 | 1 | 1.80±0.73 ^f | 16.14±1.5 ^{bc} | 29.15±1.44 ^a |
| G6P2 | 6 | 2 | 2.03±0.78 ^{dc} | 15.08±4.01 ^c | 25.54±7.47 ^{ab} |
| G6P3 | 6 | 3 | 2.48±0.52 ^b | 17.06±0.87 ^{bc} | 25.87±0.77 ^{ab} |
| G7P1 | 7 | 1 | 1.51±0.37 ^g | 23.12±0.45 ^a | 23.51±1.58 ^{bc} |
| G7P2 | 7 | 2 | 1.71±0.53 ^{fg} | 21.91±0.36 ^a | 28.24±1.15 ^a |
| G7P3 | 7 | 3 | 1.84±0.75 ^{ef} | 18.63±1.66 ^b | 29.83±0.5 ^a |
| V10T60 | | | 0.74±0.21 ^h | 22.17±1.34 ^a | 29.48±1.12 ^a |

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันที่กำกับในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 6 แสดงผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และ ระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่างต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์โดยรวม (ΔE^*) และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (S) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (LE) ของทุกระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง เนื่องจากเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (LE) จะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบจะสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสร้างโคโรนาวินในระบบมากขึ้น (Hashinaga และคณะ, 1999; Karami, 2011; Li และคณะ, 2006; Zhang และคณะ, 2014) นอกจากนี้เมื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ของทุกสภาวะการทำแห้งด้วยโคโรนาวินเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งจะพบว่าการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่างที่ 3 เซนติเมตร จะมีค่า D_{eff} สูงที่สุด ($2.72 \pm 0.31 \times 10^8$) และการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 7 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่างที่ 1 เซนติเมตรจะมีค่า D_{eff} ต่ำที่สุด ($1.51 \pm 0.37 \times 10^8$)





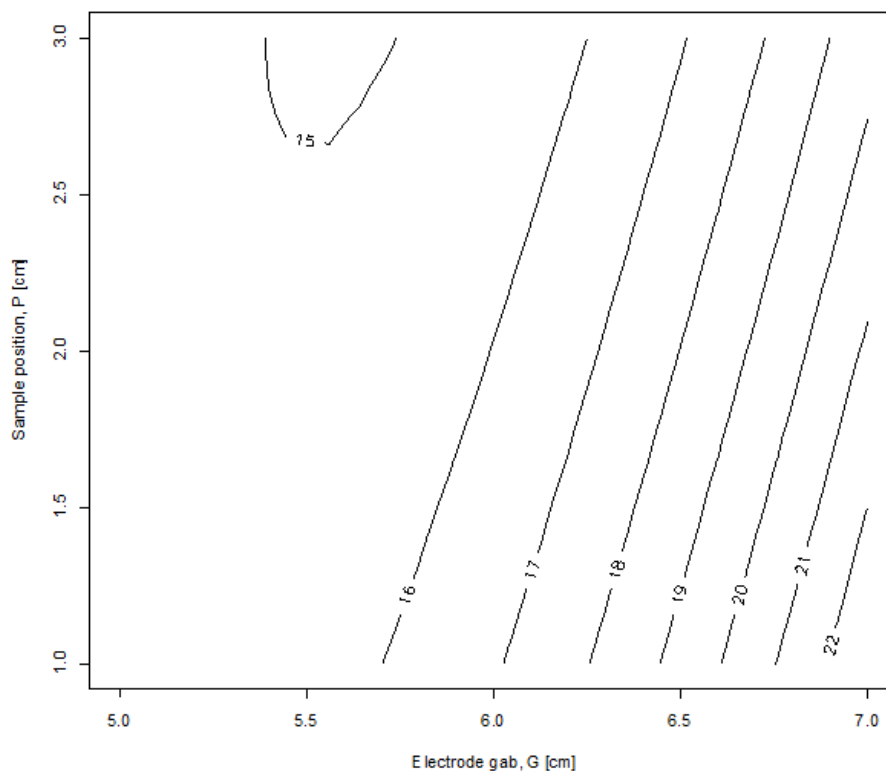
ภาพที่ 21 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

$$D_{eff} = 21.01 \times 10^{-7} - 4.13 \times 10^{-8}G + 2.62 \times 10^{-8}P \quad (27)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ P คือ ตำแหน่งตัวอย่าง

จากภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) พบว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ส่งผลให้ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับที่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง ส่งผลให้ค่า D_{eff} เพิ่มขึ้น จากจุดนี้จึงแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่างเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า D_{eff}

ค่าการเปลี่ยนสีโดยรวมของมะม่วงสุก



ภาพที่ 22 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวม

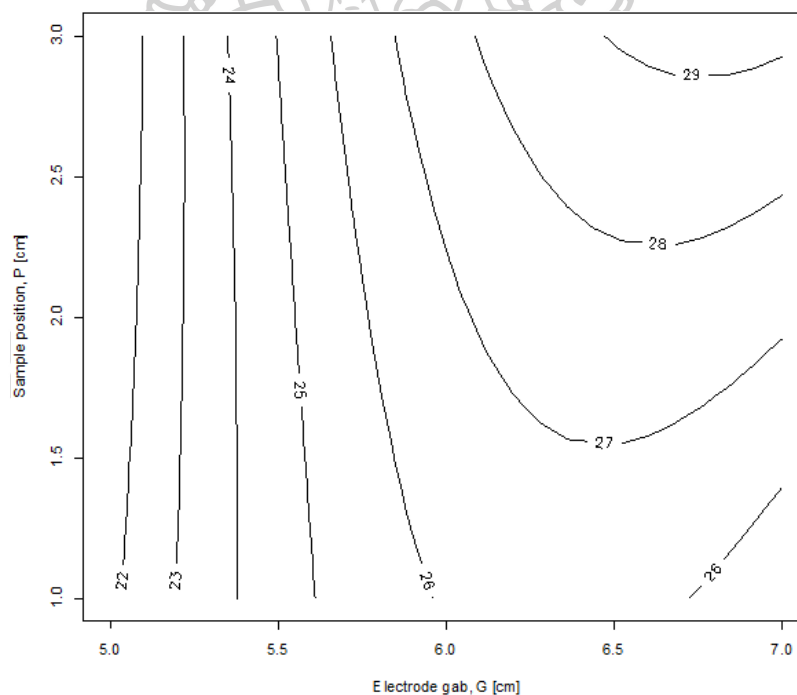
$$\Delta E^* = 21.36 - 4.13G + 2.62P - 0.03G^2 - 0.48P^2 - 0.58GP \quad (28)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรประสิทธิผล, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ P คือ ตำแหน่งตัวอย่าง

จากภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวม (ΔE^*) พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง อันเป็นผลเนื่องมาจากการทำแห้งด้วยโคโรนาวินทำให้ระยะเวลาการทำแห้งสั้นลงทำให้เม็ดสีในชิ้นตัวอย่าง โคนทำลายน้อยลง การเปลี่ยนแปลงของสี โดยรวมจึงน้อยลงทำให้คงคุณค่าของสี ได้ใกล้เคียงกับของสด (Kantrong และคณะ, 2014) จึงเป็นจุดบ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่างเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า ΔE^*

โดยพบว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่างที่ 3 เซนติเมตร จะมีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด (14.95) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 7 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่างที่ 1 เซนติเมตร จะมีค่า ΔE^* สูงที่สุด (23.12) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ที่ความเร็วลม 1 m/s พบว่าการทำแห้งด้วยโคโรนาวินมีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวม (ΔE^*) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Martynenko และคณะ, 2019) ซึ่งศึกษาการทำแห้งของเห็ดแชมปิญองด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ที่ความเร็วลม 1 m/s เทียบกับการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง

ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก



ภาพที่ 23 กราฟโครงร่างแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกต่อร้อยละอัตราส่วนการหดตัว

$$S = 26.81 + 2.87G + 0.81P - 2.53G^2 + 0.07P^2 + 1.13GP \quad (29)$$

เมื่อ S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล, G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และ P คือ ตำแหน่งตัวอย่าง

จากภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และตำแหน่งตัวอย่าง ต่อค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (S) พบว่าค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง จึงเป็นจุดบ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับตัวอย่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการหดตัว โดยพบว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่าง 2 เซนติเมตร จะมีค่าร้อยละการหดตัวต่ำที่สุด (21.58) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 7 เซนติเมตร กับตำแหน่งตัวอย่าง 3 เซนติเมตร จะมีค่าร้อยละการหดตัวสูงที่สุด (29.83)

และจากที่กล่าวไปข้างต้นจะพบว่าสภาวะการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวน้อย คือสภาวะการทำแห้งที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งตัวอย่าง 3 เซนติเมตร



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การทำแห้งด้วยลมร้อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

จากผลการทดลองการทำแห้งด้วยลมร้อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองพบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนที่เหมาะสมคือการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที

5.2 การทำแห้งด้วยโคโรนาวิน

5.2.1 ผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และผลของระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อลดระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode และเพิ่มระดับความต่างศักย์ไฟฟ้ามกขึ้นส่งผลให้อัตราการทำแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมมีค่าน้อยลง

5.2.2 ผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode (G) และผลของระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง (LS)

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อลดระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับ Collector electrode และการเพิ่มระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง ส่งผลให้อัตราการทำแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมมีค่าน้อยลง

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงพบว่าสภาวะของการทำแห้งด้วยโคโรนาวินที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (LE) ที่ 5 เซนติเมตร กับระยะห่างระหว่าง Emitter electrode กับตัวอย่าง ที่ 3 เซนติเมตร และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัวมีค่าต่ำ





รายการอ้างอิง

- An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., & Xiao, G. (2016). Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. *Food Chem*, *197 Pt B*, 1292-1300. doi:10.1016/j.foodchem.2015.11.033
- Bajgai, T. R., & Hashinaga, F. (2007). High Electric Field Drying of Japanese Radish. *Drying Technology*, *19*(9), 2291-2302. doi:10.1081/drt-100107499
- Balcer, B. E., & Lai, F. C. (2004). EHD-Enhanced Drying with Multiple-Wire Electrode. *Drying Technology*, *22*(4), 821-836. doi:10.1081/drt-120034265
- Basiry, M., & Esehaghbeygi, A. (2010). Electrohydrodynamic (EHD) drying of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Electrostatics*, *68*(4), 360-363. doi:10.1016/j.elstat.2010.05.002
- Braga, T. R., Silva, E. O., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2019). Drying of mangoes (*Mangifera indica* L.) applying pulsed UV light as pretreatment. *Food and Bioprocess Technology*, *114*, 95-102. doi:10.1016/j.fbp.2018.11.013
- Cao, W., Nishiyama, Y., & Koide, S. (2004). Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field. *Journal of Food Engineering*, *62*(3), 209-213. doi:10.1016/s0260-8774(03)00232-2
- Chen, Y., & N.N., B. (1994). Electrohydrodynamic (EHD) Drying of Potato Slabs. *Journal of Food Engineering*, *23*, 107-119.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). United states: Oxford University.
- Cunniff, P. (1995). *Official methods of analysis of AOAC international* (16th ed.). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Dalvand, M. J., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, S. (2013). Effect of needle number on drying rate of kiwi fruit in EHD drying process. *Agricultural Sciences*, *04*(01), 1-5. doi:10.4236/as.2013.41001
- De Bonis, M. V., & Ruocco, G. (2007). Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement. *Journal of Food Engineering*, *78*(1), 230-237. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.09.032
- De Bonis, M. V., & Ruocco, G. (2011). An experimental study of the local evolution of moist

- substrates under jet impingement drying. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(1), 81-87. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.08.014
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018). Electrohydrodynamic drying of food: New insights from conjugate modeling. *Journal of Cleaner Production*, 198, 269-284. doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.250
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2019). Electrohydrodynamic drying of multiple food products: Evaluating the potential of emitter-collector electrode configurations for upscaling. *Journal of Food Engineering*, 240, 38-42. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.07.011
- Dinani, S. T., Hamdami, N., Shahedi, M., & Havet, M. (2015). Quality assessment of mushroom slices dried by hot air combined with an electrohydrodynamic (EHD) drying system. *Food and Bioproducts Processing*, 94, 572-580. doi:10.1016/j.fbp.2014.08.004
- Elmizadeh, A., Shahedi, M., & Hamdami, N. (2018). Quality assessment of electrohydrodynamic and hot-air drying of quince slice. *Industrial Crops and Products*, 116, 35-40. doi:10.1016/j.indcrop.2018.02.048
- Goodenough, T. I. J., Goodenough, P. W., & Goodenough, S. M. (2007). The efficiency of corona wind drying and its application to the food industry. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1233-1238. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.09.016
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2006). Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. *Biosystems Engineering*, 95(1), 43-49. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.05.001
- Hashinaga, F., Bajgai, T. R., Isobe, S., & Barthakur, N. N. (1999). Electrohydrodynamic (Ehd) Drying of Apple Slices. *Drying Technology*, 17(3), 479-495. doi:10.1080/07373939908917547
- Horuz, E., & Maskan, M. (2013). Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 285-293. doi:10.1007/s13197-013-1032-9
- Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K., & Li, C. (2019). Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 67-76. doi:10.1016/j.fbp.2019.08.018

- Kantrong, H., Tansakul, A., & Mittal, G. S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *J Food Sci Technol*, 51(12), 3594-3608. doi:10.1007/s13197-012-0888-4
- Karami, R., Kamkari, B. and Kashefi, K. . (2011). Investigation of Corona wind Effect on Heat and Mass Transfer Enhancement. *Engineering and Technology International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 5(10), 1598-1604.
- Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Chen, G. (2020). Drying kinetic, quality, energy and exergy performance of hot air-rotary drum drying of green peas using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Food and Bioprocess Processing*, 124, 168-183. doi:10.1016/j.fbp.2020.08.011
- Kudra, T., & Martynenko, A. (2015). Energy Aspects in Electrohydrodynamic Drying. *Drying Technology*, 33(13), 1534-1540. doi:10.1080/07373937.2015.1009540
- Li, F. D., Li, L. T., Sun, J. F., & Tatsumi, E. (2006). Effect of electrohydrodynamic (EHD) technique on drying process and appearance of okara cake. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 275-280. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.028
- Martynenko, A., Astatkie, T., Riaud, N., Wells, P., & Kudra, T. (2017). Driving forces for mass transfer in electrohydrodynamic (EHD) drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 18-25. doi:10.1016/j.ifset.2017.07.022
- Martynenko, A., Bashkir, I., & Kudra, T. (2019). Electrically enhanced drying of white champignons. *Drying Technology*, 1-11. doi:10.1080/07373937.2019.1670672
- Martynenko, A., & Zheng, W. (2016). Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. *Journal of Food Engineering*, 168, 215-222. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.07.043
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, 36(11), 6433-6441. doi:10.1016/j.energy.2011.09.024
- Önal, B., Adiletta, G., Crescitelli, A., Di Matteo, M., & Russo, P. (2019). Optimization of hot air drying temperature combined with pre-treatment to improve physico-chemical and

- nutritional quality of 'Annurca' apple. *Food and Bioproducts Processing*, 115, 87-99.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.002>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 241, 75-87. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008
- Pothula, A. K., Igathinathane, C., Nichol, K., & Archer, D. (2015). Milled industrial beet color kinetics and total soluble solid contents by image analysis. *Industrial Crops and Products*, 65, 159–169.
- Pu, Y.-Y., & Sun, D.-W. (2017). Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156, 108-119.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006>
- Salarikia, A., Miraei Ashtiani, S. H., & 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
- Sehrawat, R., Nema, P. K., & Kaur, B. P. (2018). Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. *Lwt*, 92, 548-555. doi:10.1016/j.lwt.2018.03.012
- Vega-Galvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martinez-Monzo, J., Garcia-Segovia, P., . . . Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chem*, 132(1), 51-59. doi:10.1016/j.foodchem.2011.10.029
- Yang, X.-H., Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Xiao, H.-W., Zhang, Q., & Kan, Z. (2018). Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annum* L.) during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 231, 101-108. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.03.013
- Yao, L., Fan, L., & Duan, Z. (2020). Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices. *Food Chem*, 305, 125477. doi:10.1016/j.foodchem.2019.125477
- Zhang, Y., Liu, L., & Ouyang, J. (2014). On the negative corona and ionic wind over water electrode surface. *Journal of Electrostatics*, 72(1), 76-81. doi:10.1016/j.elstat.2013.11.010

Zielinska, M., Ropelewska, E., & Zapotoczny, P. (2018). Effects of freezing and hot air drying on the physical, morphological and thermal properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). *Food and Bioproducts Processing*, 110, 40-49.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.006>

พงษ์สวัสดิ์มานิต, ร. (2535). วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สถิติการส่งออก. Retrieved from

http://impexp.oae.go.th/service/export.php?S_YEAR=2560&E_YEAR=2563&PRODUCT_GROUP=5252&PRODUCT_ID=4987&wf_search=&WF_SEARCH=Y.

สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ. (2558). การปลูกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.).





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล wilawan chungmanakit
วัน เดือน ปี เกิด 27 october 1994
สถานที่เกิด bangkok
ที่อยู่ปัจจุบัน 88/42 หมู่บ้านกรานต์วีดี ถ.พุทธมณฑลสาย 3 แขวงบางไผ่ เขตบางแค
กรุงเทพ 10160

