

การอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับ
การสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

DRYING OF CISSUS QUADRANGULARIS LINN. USING
VIBRATION ASSISTED INFRARED DRYING
UNDER VACUUM CONDITIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-108-110

การอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยอินฟราเรดร่วมกับ
การสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

DRYING OF CISSUS QUADRANGULARIS LINN. USING
VIBRATION ASSISTED INFRARED DRYING
UNDER VACUUM CONDITIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-108-110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DRYING OF CISSUS QUADRANGULARIS LINN. USING
VIBRATION ASSISTED INFRARED DRYING
UNDER VACUUM CONDITIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-D-108-110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยอินฟราเรดร่วมกับ การสันสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ
นักศึกษา	นายเศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์
รหัสประจำตัว	56601042
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-VIR) สำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn) (CQ) โดยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ การทำการทดลองอบแห้งเบื้องต้นด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (HA) เพื่อผลิตเพชรสังฆาตแห้งสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง และศึกษาอิทธิพลของการสันสะเทือนของเบด สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุสำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาตแบบอินฟราเรด นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบ VC-VIR โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM)

การอบแห้ง CQ ด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ดำเนินการทดลองเพื่อจำลองการอบแห้งที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรม เพื่อลดอคติในการผลิตเพชรสังฆาตแห้งโดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้ง (40, 60, 80, และ 100°C) ที่มีความหนา 5 mm ต่อลักษณะการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพและพฤกษเคมี โดยทำการอบแห้ง CQ ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10 ± 0.15 g water/g dry matter จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเป็น 0.1 g water/g dry matter ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มระดับอุณหภูมิการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้ง (DR) และสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เวลาในการอบแห้งจะลดลง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 85 ถึง 1920 min ค่า DR สูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.0059 ถึง 0.0248 g water/g dry matter·min และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7302 ถึง 9.1281×10^{-9} m²/s พลังงานที่ต้องการใช้สำหรับกระบวนการอบแห้งมีค่าต่ำที่สุด 13.62 kWh/kg เมื่ออบแห้ง CQ ที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 100°C ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าสามารถรักษาคุณภาพของ CQ แห้งได้ นอกจากนี้การลดอุณหภูมิในการอบแห้ง

ส่งผลให้ค่าความเป็นสีเขียวสูง ค่าความหนาแน่นมวลรวมและเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยลง โดยผลการทดลองพบว่า CQ แห่งที่ผลิตได้จากการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความแตกต่างของสีรวมต่ำที่สุดเท่ากับ 16.76 เปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 88.47% ค่าความหนาแน่นมวลรวมเท่ากับ 0.1817 g/cm³ ในขณะที่มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอซิทินสูงสุดคือ 1062 mg GAE/100 g dry matter และ 0.955 mg/100 g dry matter ดังนั้น CQ ภายใต้วิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C จึงถูกเลือกเป็นสิ่งทดลองอ้างอิง

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของการอบแห้งแบบอินฟราเรดคืออิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบด (โหมดปิดและเปิดที่ 800 rpm) สภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง (โหมดปิดและเปิดที่ 5 kPa abs.) และความหนาของชั้นวัสดุ (5, 10 และ 15 mm) ด้วยวิธีการอบแห้ง CQ 4 วิธีคือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (VIR) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-IR) และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-VIR) เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสิ่งทดลองอ้างอิงคือการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C และตัวอย่างควบคุม (CQ สด) ผลการทดลองพบว่าปัจจัยของการอบแห้งทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อการอบแห้ง CQ แบบอินฟราเรดอย่างมีนัยสำคัญ การใช้การสั่นสะเทือนของเบดและสภาวะสุญญากาศร่วมกันในการอบแห้งแบบอินฟราเรด ที่ความหนาของชั้นวัสดุน้อยที่สุดสามารถปรับปรุงลักษณะการอบแห้งได้ ดังนั้นการอบแห้งด้วยวิธี VC-MIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุ 5 mm ทำให้อัตราการอบแห้งสูงสุด (DR) มีค่ามากที่สุดคือ 0.258 g water/g dry matter·min ซึ่งแม้ว่าการใช้เทคนิคการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศจะช่วยเพิ่มค่า D_{eff} แต่ก็มีความต้องการใช้พลังงานที่สูงและทำให้สารสำคัญที่มีอยู่ลดลง โดยเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยวิธี VIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคอซิทินมากที่สุดคือ 1,083.62 mg GAE/100 g dry matter และ 3.472 mg/100 g dry matter ตามลำดับ ความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) น้อยที่สุดเท่ากับ 13.69 และมีค่า DR สูงสุดที่ 0.112 g water/g dry matter·min นอกจากนี้ยังมีค่าความต้องการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง (SEC) ต่ำคือ 17.62 kWh/kg

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองโดยมีค่าตอบสนองคือปริมาณสารเคอซิทิน ทำการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken Design ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มรังสีอินฟราเรด (4576, 6036 และ 7496 W/m²) ความดันภายในห้องอบแห้ง (5, 15 และ 25 kPa abs.) และความหนาของชั้นวัสดุ (5, 10 และ 15 mm) จากรูปแบบสมการที่ได้พบว่า ความเข้มรังสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อค่าเคอซิทินอย่างมีนัยสำคัญ สมการการถดถอยกำลังสองมีค่า $R^2 = 0.95$ เมื่อทำการทำนายปริมาณสารเคอซิทินจากสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งซึ่งมีความเข้มรังสีอินฟราเรด 7496

W/m² ความดันภายในห้องอบแห้ง 19.94 kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ได้ ปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายเป็น 2.123 mg/100 g dry matter จากการตรวจสอบ ความถูกต้องของปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายกับปริมาณสารเคอซีทินจากการทดลอง โดยการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 7496 W/m² ความดันภายในห้องอบแห้ง 20 kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ซึ่งได้ปริมาณสารเคอซีทินจากการทดลอง 2.312 mg/100 g dry matter จากการทดสอบทางสถิติได้ผลว่า ปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายและการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)



Thesis	Drying of <i>Cissus quadrangularis</i> Linn. using Vibration Assisted Infrared Drying under Vacuum Conditions
Student	Mr.Setthawat Thanimkarn
Student ID.	56601042
Degree	Doctor of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen
Thesis Co - Advisor	Asst. Prof. Dr. Ekkapong Cheevitsopon

ABSTRACT

This research aimed to develop a vibratory bed assisted vacuum infrared drying (VC-VIR) technique for *Cissus quadrangularis* Linn. (CQ) drying. A laboratory scale VC-VIR dryer was designed and fabricated. Preliminary study on convective hot air (HA) drying of CQ was also conducted to produce a reference treatment. Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of CQ were investigated. The optimum condition for VC-VIR drying of CQ was determined by response surface methodology (RSM).

HA drying of CQ was conducted to imitate conventional industrial drying of CQ. To reduce bias in production of the reference treatment, the effect of drying temperature (40, 60, 80, and 100°C) on drying characteristics of CQ and physical properties and phytochemicals of the dried CQ were investigated. CQ with the thickness of 5 mm was dried from about 10 ± 0.15 to 0.1 g water/g dry matter. The results showed that increasing drying temperature increased drying rate (DR) and effective moisture diffusivity and consequently decreased drying time. The drying time, maximum DR, and effective moisture diffusivity were in the ranges of 85-1920 min, 0.0059-0.0248 g water/g dry matter·min, and $0.7302-9.1281 \times 10^{-9}$ m²/s, respectively. The lowest specific energy consumption of 13.62 kWh/kg was required when drying CQ at the highest temperature of 100°C. Lower drying temperature could preserve quality of the dried CQ. Decreasing drying temperature resulted in greener and lower bulk density and shrinkage. The lowest total color difference (16.76), shrinkage percentage

(88.47%), and bulk density (0.1817 g/cm^3), and the highest total phenolic content (TPC, 1062 mg GAE/100 g dry matter) and quercetin content ($0.955 \text{ mg/100 g dry matter}$) of CQ were obtained by hot air drying at 60°C . Therefore, CQ subjected to HA drying at 60°C was selected as the reference treatment.

To investigate the effects of three drying factors including vibration (on and off modes of 800 rpm vibration), vacuum (on and off modes of 5 kPa abs.), and material thickness (5, 10, and 15 mm) on IR drying of CQ, infrared (IR), vibratory bed assisted infrared (VIR), vacuum infrared (VC-IR), and vibratory bed assisted vacuum infrared (VC-VIR) drying of CQ were conducted. For comparison, two more treatments were prepared, i.e. the reference treatment (60°C HA-dried CQ) and the control treatment (fresh CQ). The results showed that all three drying factors had considerable effects on IR drying of CQ. Combining vibration and vacuum systems in IR drying of the thinnest CQ could improve its drying characteristics. Hence, VC-VIR drying of 5-mm CQ provided the highest maximum drying rate (DR) of $0.258 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$. Although the vacuum operation contributed to improved effective moisture diffusivity (D_{eff}), it consumed high energy and degraded active compounds of CQ. Therefore, the greatest TPC and quercetin content of $1083.62 \text{ mg GAE/100 g dry matter}$ and $3.472 \text{ mg/100 g dry matter}$ were respectively produced by VIR drying of 15 mm CQ. The lowest total color difference (ΔE) of 13.69 was also obtained by this drying treatment. It also required low specific energy consumption (SEC) of 17.62 kWh/kg and provided maximum DR of $0.112 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$.

The optimal condition for VC-VIR drying of CQ was determined using RSM. The response factor was quercetin content. Box-Behnken Design was applied with three factors including infrared intensity (4576, 6036, and 7496 W/m^2), drying chamber pressure (5, 15, and 25 kPa abs.) and material thickness (5, 10 and 15 mm) Result from the regression model showed that, Infrared intensity, pressure in drying chamber, and material thickness had significant effect on quercetin content. The second order polynomial regression model obtained was good fitted with R^2 of 0.95. The predicted quercetin content was obtained from the optimum drying condition suggested by the model, which was the infrared intensity of 7496 W/m^2 , the drying chamber pressure of 19.94 kPa abs., and material thickness of 15 mm, was $2.123 \text{ mg/100 g dry matter}$. Model

validation comparing between the predicted and experimental quercetin contents was determined. VC-VIR drying of CQ was conducted at the infrared intensity of 7496 W/m^2 , drying chamber pressure of 20 kPa abs., and material thickness of 15 mm to mimic the optimum condition from RSM. The experimental quercetin content was 2.312 mg/100 g dry matter. The statistical result showed that predicted and experimental quercetin contents were not significantly different ($p>0.05$).



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญ วนิชย์ จงยิ่งเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา เป็นกำลังใจ สร้างแรงบันดาลใจ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้านับตั้งแต่วันแรกที่เข้ารับการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยช่วยให้คำแนะนำในการสร้างเครื่องอบแห้ง สอบถาม ติดตาม และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเฉพาะทาง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำชี้แนะแนวทางในการศึกษา รวมถึง ดร.จิตราพร กังสวัสดิ์ ที่เป็นกำลังใจที่ดีเยี่ยม ติดตาม สอบถามจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณศักรินทร์ บุญล้ำ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของเพชรสังฆาต

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และคณะเกษตรศาสตร์ที่พิจารณาอนุมัติทุนการศึกษา และให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าในการมาศึกษาต่อ

การศึกษาปริญญาเอกนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้ถ้าขาดกำลังใจสำคัญจากภรรยาและบุตรสาว ขอขอบคุณที่อยู่เคียงข้างไม่ว่าจะสุขหรือทุกข์ อดทนกับความกดดันและคอยดูแลทุกคนในครอบครัวจึงทำให้ข้าพเจ้าสามารถผ่านอุปสรรคต่างๆจนการศึกษาสำเร็จลุล่วง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
กิตติกรรมประกาศ.....	VII
สารบัญ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XIII
สารบัญรูป.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เพชรสังฆาต.....	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	4
2.1.2 สรรพคุณทางยา.....	5
2.1.3 สมบัติทางเคมีของเพชรสังฆาต.....	6
2.2 เควอซิทิน.....	7
2.4 สารประกอบฟีนอลิก.....	9
2.5 หลักการอบแห้งวัสดุ.....	10
2.5.1 ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น.....	10
2.5.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	10
2.5.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	11
2.6 แบบจำลองการอบแห้ง.....	13
2.6.1 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี.....	14
2.6.2 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี.....	19
2.6.3 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด.....	21
2.7.1 หลักการพื้นฐานการแผ่รังสี.....	21
2.7.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยน้ำ.....	23
2.7.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว.....	24
2.7.4 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด.....	26
2.8 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	29
2.8.1 แนวความคิดและหลักการทั่วไป.....	29
2.8.2 การออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	32
2.8.2.1 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง.....	33
2.8.2.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.9.1 การอบแห้งอินฟราเรดและการอบแห้งอินฟราเรดภายใต้สภาวะ สุญญากาศ.....	34
2.9.2 อิทธิพลของการอบแห้งต่อคุณภาพและสารสำคัญในวัสดุ.....	35
2.9.3 เพชรสังฆาต.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดรวมกับการสันสะเทือน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	39
3.1.1 ปริมาณน้ำที่ต้องระเหย.....	39
3.1.2 พลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้ง.....	40
3.1.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง.....	41
3.1.4 ชุดควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้า.....	41
3.1.4.1 ชุดการทำงานอินฟราเรด.....	43
3.1.4.2 ชุดกลไกสร้างการสันสะเทือนของวัสดุ.....	43
3.1.4.3 ชุดลดความชื้นแบบครีป.....	43
3.1.4.4 ชุดควบคุมความดันภายในห้องอบแห้ง.....	43
3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 แผนการทดลอง.....	44
3.3.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาต แห้งสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง.....	47
3.3.1.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	47
3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของการสั้นสะเทือนของเบด สภาวะสุญญากาศ และ ความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของ เพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด.....	47
3.3.2.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	48
3.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการ อบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั้นสะเทือนภายใต้สภาวะ สุญญากาศ (VC-VIR).....	48
3.3.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	49
3.3.3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	50
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง.....	51
3.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	51
3.6 การวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน.....	53
3.7 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง.....	53
3.7.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างสีโดยรวม.....	53
3.7.2 การวิเคราะห์ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวม.....	53
3.7.3 การวิเคราะห์การหดตัว.....	54
3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเพชรสังฆาตอบแห้ง.....	54
3.8.1 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด.....	54
3.8.2 การวิเคราะห์ปริมาณควอซิทิน.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	56
4.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาตอบแห้ง แบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง.....	56
4.1.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต.....	56
4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	59
4.1.4 คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ค่าสี ความหนาแน่น มวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัว.....	60
4.1.5 คุณภาพทางเคมีของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารเคอซิทิน.....	61
4.1.6 การตัดสินใจเลือกเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่ง ทดลองอ้างอิง.....	62
4.2 อิทธิพลของการสันสะท้อนของเบด สภาวะสุญญากาศ และความหนาของ ชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการ อบแห้งแบบอินฟราเรด.....	62
4.2.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต.....	63
4.2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	67
4.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	68
4.2.4 คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ความแตกต่างสีรวม.....	69
4.2.5 คุณภาพทางเคมีของเพชรสังฆาตแห้ง: ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและ ปริมาณสารเคอซิทิน.....	70
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบ อินฟราเรดร่วมกับการสันสะท้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	73
4.3.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต.....	73
4.3.2 การวิเคราะห์สมการการถดถอยกำลังสอง.....	74
4.3.3 อิทธิพลของปัจจัยของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VC-VIR ต่อปริมาณสารเคอซิทิน.....	78
4.3.3.1 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความดันภายในห้อง อบแห้ง ต่อปริมาณสารเคอซิทินในเพชรสังฆาต อบแห้ง.....	78
4.3.3.2 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้น วัสดุ.....	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3.3 อิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งและความหนาของชิ้นวัสดุ.....	80
4.3.4 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม.....	81
4.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณสารเคออสิตินระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลอง.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	83
5.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง.....	83
5.2 อิทธิพลของการสันสะท้อนของเบด สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชิ้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด.....	83
5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสันสะท้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	95
ภาคผนวก ข แบบรูปประกอบของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสันสะท้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่.....	หน้า
2.1 สารประกอบทางเคมีของเพชรสังฆาต.....	6
2.2 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี.....	20
2.3 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์.....	20
2.4 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ.....	24
2.5 ความลึกของการทะลุทะลวงอาหารชนิดต่างๆต่อฟลักซ์ความร้อนเนื่องจาก การแผ่รังสีของอุปกรณ์แผ่รังสี.....	29
2.6 ผลจากการอบแห้งต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและ α -glucosidase ของถั่วเหลือง.....	36
2.7 สารประกอบทางเคมีของเพชรสังฆาต.....	37
3.1 สภาวะการทดลองสำหรับสิ่งทดลองต่างๆ.....	48
3.2 ปัจจัย ระดับและขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการ อบแห้งเพชรสังฆาตด้วยอินฟราเรดร่วมกับการสันสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ...	49
3.3 สิ่งทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken.....	50
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วย วิธีการอบแห้งแบบลมร้อน.....	59
4.2 ค่าความเป็นสีเขียว ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของ เพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	61
4.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งเพชรสังฆาต ด้วยรังสีอินฟราเรด.....	63
4.4 ผลของการสันสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อค่า การเปลี่ยนแปลงสีรวมของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด.....	70
4.5 ผลของการสันสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อ ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100 g dry matter) ของการอบแห้ง เพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด.....	72
4.6 ผลของการสันสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อ ปริมาณสารเคอซีทิน (mg /100 g dry matter) ของการอบแห้งเพชรสังฆาต ด้วยรังสีอินฟราเรด.....	72
4.7 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken.....	73
4.8 เวลาในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของเพชรสังฆาตที่สิ่งทดลองต่างๆ.....	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่.....	หน้า
4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง quadratic.....	75
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย.....	76
4.11 ปริมาณสารเคออสตินของเพชรสังฆาตแห่งที่ได้จากการทดลองอบแห้ง (Y) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย (\hat{Y}).....	77
4.12 การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยการทดสอบค่าเฉลี่ย.....	82
ข.1 แบบรูปประกอบของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะ สุญญากาศ.....	112
ข.2 แบบรูปประกอบภายในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการ สั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	113



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เพชรสังฆาต (<i>Cissusquadrangularis</i> Linn.).....	4
2.2 โครงสร้างทางเคมีของสาร Quercetin.....	8
2.3 โครงสร้างของฟินอล.....	9
2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น.....	11
2.5 การแพร่กระจายความชื้นในวัสดุ.....	12
2.6 ลักษณะของเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง.....	13
2.7 การอบแห้งวัสดุการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	14
2.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
2.9 กราฟแสดงความยาวคลื่น ณ จุดยอด จากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆ....	23
2.10 ย่อานการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหาร เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะ ของเหลว.....	24
2.11 วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่นๆ.....	26
2.12 การลดลงของการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิววัสดุ.....	28
2.13 การอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยการแผ่รังสี.....	28
2.14 โพรไฟล์อุณหภูมิและโพรไฟล์ความชื้นระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสี.....	28
2.15 เส้นโครงสร้างของพื้นผิวดอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่หนึ่ง.....	31
2.16 เส้นโครงสร้างของพื้นผิวดอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่สอง.....	31
2.17 ลักษณะเฉพาะ 3 แบบ ของกราฟพื้นผิวดอบสนอง.....	32
2.18 โมเดลแสดงการกระจายของปัจจัยด้วยแผนการทดลอง Box-Behnken Design (a) และแผนการทดลอง Central Composite Design (b).....	33
2.19 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้ง.....	36
3.1 ระบบอบแห้งอินฟราเรดรวมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vibration assisted infrared drying under vacuum, VC-VIR).....	42
3.2 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดรวมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	42
3.3 ตัวอย่างเพชรสังฆาตที่ใช้ในการศึกษาที่ตัดส่วนหัว และทำยออก และหันให้มีความ หนา 5, 10 และ 15 mm.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	46
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	57
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	57
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	58
4.4 พลังงานจำเพาะ และเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน.....	60
4.5 ปริมาณสารเคอซิทิน (แผนภูมิแท่ง) และปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (แผนภูมิเส้น) ของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ.....	62
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งต่างกันที่มีความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 15 mm.....	65
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 5, 10 และ 15 mm.....	66
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งต่างกันที่มีความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 15 mm.....	66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 5, 10 และ 15 mm.....	67
4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด.....	68
4.11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด.....	69
4.12 การเปรียบเทียบปริมาณสารเคอซิทินที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย.....	78
4.13 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความดันภายในห้องอบแห้งต่อปริมาณสารเคอซิทิน.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคลือซิทิน.....	80
4.15 อิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคลือซิทิน.....	81
4.16 สภาวะที่เหมาะสม (Optimization plot) ของความเข้มรังสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณเคลือซิทิน.....	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.) เป็นสมุนไพรพื้นบ้านในแถบเอเชียและแอฟริกา และอยู่ในวงศ์ *Vitaceae* จากรายงานการวิจัยพบว่า เพชรสังฆาต ประกอบด้วยสารสำคัญหลายชนิด เช่น แคลโรทิน วิตามินเอ วิตามินซี ไตรเทอร์พีน สเตียรอยด์ ไตรเทอร์พีนอยด์ ฟลาโวนอยด์ แคลเซียม ออกซาเลต เป็นต้น เพชรสังฆาตนิยมใช้เป็นยาสมุนไพรและรักษาโรคผิวหนัง (Thiangtham, 2003) คณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ ได้ขึ้นทะเบียนเพชรสังฆาตให้อยู่ในระบบบัญชียาหลัก ในกลุ่มยาบรรเทาโรคผิวหนัง ซึ่งเป็นรายการยาที่ใช้สำหรับโรงพยาบาลและสถานบริการ สาธารณสุขรวมทั้งงานสาธารณสุขมูลฐาน (คณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ, 2556) แต่เนื่องจากเพชรสังฆาตมีแคลเซียมออกซาเลต ซึ่งจะทำให้รู้สึกระคายเคืองในลำคอหากรับประทานสด จึงนิยมนำมาแปรรูปโดยการทำให้แห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน และบดเป็นผงบรรจุแคปซูล ซึ่งนอกจากทำให้ไม่ระคายเคืองในลำคอเมื่อรับประทานแล้ว ยังเพิ่มความสะดวกในการรับประทาน และทำให้สามารถเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เพื่อรักษาสารสำคัญที่มีอยู่ในเพชรสังฆาตซึ่งเป็นพืชสมุนไพร การอบแห้งแบบลมร้อนไม่สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงได้ แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลเสียต่อลักษณะการอบแห้ง กล่าวคือ อัตราการอบแห้งต่ำและต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่นานขึ้น (Demiray et al., 2013; Wankhadea et al., 2013)

การอบแห้งถือเป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อแปรรูปยาสมุนไพรที่มีความสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ มีการพิสูจน์ว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยให้ปริมาณสารสำคัญที่พบในยาสมุนไพร เช่น สารประกอบฟีนอล สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ มีปริมาณมากขึ้น Lee et al., 2006; Mahinda et al., 2010; Park et al., 2009; Niamnuy et al., 2011) นอกจากนี้การอบแห้งแบบอินฟราเรดใช้การให้ความร้อนแบบแผ่รังสี เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับกันว่ามีข้อดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบพาความร้อนหลายประการ ซึ่งข้อดีหลักๆของเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดได้แก่ การสร้างระบบอบแห้งแบบอินฟราเรดทำได้ง่าย การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถเข้าร่วมกับการให้ความร้อนรูปแบบอื่นๆได้สะดวก รังสีอินฟราเรดให้ความร้อนได้เร็ว ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น และให้อัตราการถ่ายเทพลังงานสูง และพลังงานคลื่นจากรังสีอินฟราเรดสามารถถูกซึบเข้าสู่วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนได้โดยตรงจึงสูญเสียพลังงานต่ำ (Khir et al., 2006; Shih et al., 2008; Zare et al., 2012) ทั้งนี้มีการค้นพบว่าเทคนิคการอบแห้งแบบนี้สามารถให้ความร้อนแก่วัสดุได้สม่ำเสมอกว่าเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นจึงส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งดีกว่าด้วย (Sakai and

Hanzawa, 1994) จากผลการค้นพบนี้การอบแห้งแบบอินฟราเรดจึงเป็นเทคนิคการอบแห้งที่อาจให้ผลดีต่อการลดความชื้นสมุนไพรในด้านของการเพิ่มปริมาณสารสำคัญและการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง

แม้ว่ารังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานเพื่อการอบแห้งอย่างรวดเร็ว แต่ก็ได้รับความนิยมสำหรับการอบแห้งที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น มีรายงานวิจัยพบว่า ความเข้มของรังสีและความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการได้รับรังสีอินฟราเรดอย่างสม่ำเสมอ คือ 3100 ถึง 4290 W/cm² และ 12 ถึง 16 mm ตามลำดับ (Cakmak and Yildiz, 2011) ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจถึงการได้รับรังสีอินฟราเรดในระหว่างอบแห้งอย่างทั่วถึง การใช้เทคนิคเชิงกล เช่น การสั่นสะเทือนจึงน่าจะเป็นประโยชน์ จากงานวิจัยของ Das et al. (2004) รายงานว่าเมื่อใช้วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งด้วย พบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอินฟราเรดเท่านั้น โดยที่เทคนิคการสั่นสะเทือนสามารถลดอิทธิพลจากความหนาของชั้นวัสดุต่ออัตราการอบแห้งไปได้ เช่นเดียวกับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ จุดเดือดของน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าการอบแห้งที่บรรยากาศปกติ ทำให้สามารถระเหยน้ำออกจากวัสดุที่อุณหภูมิต่ำ และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง (Jaya and Das, 2003) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่า ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพของสีที่ดีกว่ากับการอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ เนื่องจากช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Afzal et al., 1999; Drouzas et al., 1999) ดังนั้นการใช้สภาวะสุญญากาศร่วมในการอบแห้งแบบอินฟราเรดจึงน่าจะเป็นประโยชน์เช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อการอบแห้งเพชรสังฆาต โดยมีจุดมุ่งหมายในการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการอบแห้ง ได้แก่ การสั่นสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุ ต่อลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ และคุณภาพของเพชรสังฆาต นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเสนอสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VC-VIR ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาพัฒนาวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศสำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาต โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศสำหรับการอบแห้งสมุนไพร ซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

1.3.2 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศในการอบแห้งสมุนไพร โดยเฉพาะกรณีศึกษาเกี่ยวกับเพชรสังฆาต ซึ่งสามารถต่อยอดความรู้สำหรับการอบแห้งสมุนไพรอื่นๆ ด้วย

1.3.3 แนวทางการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรม และเป็นจุดแข็งในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรในด้านของสารประกอบทางยา

1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย

1.4.1 เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นเครื่องขนาดห้องปฏิบัติการ

1.4.2 การศึกษานี้มีกรณีศึกษาเฉพาะกับสมุนไพรตัวอย่าง คือ เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง คือ เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.) และในส่วนของกรอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ลักษณะการอบแห้ง (Drying characteristics) และแบบจำลองการอบแห้ง (Drying model) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดในส่วนต่างๆดังนี้

2.1 เพชรสังฆาต

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

เพชรสังฆาต เป็นพืชสมุนไพรอยู่ในวงศ์ Vitaceae มีชื่อเรียกหลายชื่อตามท้องถิ่นต่างๆ เช่น เพชรสังฆาต, สันชะควด, สันชะฆาต, สามร้อยต่อ, สามร้อยข้อ, ชันข้อ, ตำลึงทอง เป็นต้น เป็นไม้เถาเถาอ่อนสีเขียวเป็นสีเหลี่ยม เป็นข้อต่อกัน มีมือสำหรับเกาะยึดออกทางข้อต่อตรงข้ามใบ ใบเป็นใบเดี่ยว ออกเรียงสลับตามข้อต้น รูปสามเหลี่ยม ปลายใบมน โคนใบเว้า ขอบใบหยักมนห่างๆ แผ่นใบเรียบสีเขียวเป็นมัน ก้านใบยาว 2-3 เซนติเมตร ออกดอกเป็นช่อตามข้อต้นตรงข้ามกับใบ ดอกสีเขียวอ่อน กลีบดอกมี 4 กลีบ โคนด้านนอกมีสีแดง ด้านในสีเขียวอ่อน เมื่อบานเต็มทีดอกอ้อมไปด้านล่าง เกสรเพศผู้มี 4 อัน ผลเป็นรูปทรงกลม ผิวเรียบเป็นมัน ผลอ่อนสีเขียว สุกสีแดงเข้มเกือบดำ เมล็ดกลม สีน้ำตาล มี 1 เมล็ด พบได้ในประเทศอินเดีย ประเทศแถบอาหรับ ทวีปแอฟริกา และไทย (Thiangtham, 2003)



รูปที่ 2.1 เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สรรพคุณทางยา

ในประเทศอินเดียมีการแปรรูปให้เป็นผงแห้งเพื่อใช้รักษาเกี่ยวกับอาหารไม่ย่อย ใบสามารถรักษาแผลสดและแผลเปื่อย ลำต้นใช้รักษาอาการประจำเดือนไม่ปกติ นอกจากนี้ในแถบแอฟริกาใต้ยังใช้ส่วนของรากนำมาทำให้แห้งเพื่อใช้สำหรับต้านการอักเสบอีกด้วย (Chopra et al., 1965)

ในตำรายาไทย ใช้ส่วนรากรักษากระดูกแตกหัก ส่วนลำต้นมีสรรพคุณแก้หุน้ำหนวก เลือดกำเดา ประจำเดือนมาไม่ปกติ ช่วยเจริญอาหาร ขับน้ำเหลืองเสีย ส่วนใบใช้รักษากระดูกแตกหัก รักษาโรคลำไส้ (เกี่ยวกับอาหารไม่ย่อย) ส่วนของเถาสดมีสรรพคุณขับลมในลำไส้ แก้จุกเสียด ท้องอืด ท้องเฟ้อ และริดสีดวงทวาร (นันทวัน บุญประภัสร์ และ อรุณช โชคชัยเจริญพร, 2542) โดยคณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติได้ขึ้นทะเบียนเพชรสังฆาตให้อยู่ในระบบบัญชียาหลักแห่งชาติในกลุ่มยาบรรเทาโรคริดสีดวงทวารหนัก ซึ่งเป็นรายการยาที่ใช้สำหรับโรงพยาบาลและสถานบริการสาธารณสุขรวมทั้งงานสาธารณสุขมูลฐาน โดยมีสูตรตำรับยาที่แสดงถึงส่วนผสมที่เป็นสมุนไพรอยู่ด้วยกัน 2 ตำรับยา (คณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ, 2556) นั่นก็คือ

- สูตรที่ 1 ในผงยา 100 กรัม ประกอบด้วย เถาเพชรสังฆาต หนัก 70 กรัม รากอัคคีทวาร หนัก 20 กรัม โกรฐน้ำเต้าหนัก 10 กรัม

- สูตรที่ 2 ในผงยา 85 กรัม ประกอบด้วย เถาเพชรสังฆาต หนัก 50 กรัม กะเม็ง (ทั้งต้น) หนัก 15 กรัม โกรฐน้ำเต้า หัวกระชาย หนักอย่างละ 10 กรัม

จากงานวิจัยยังพบการรายงานถึงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของเพชรสังฆาตได้แก่ ฤทธิ์ต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร โดยแสดงฤทธิ์ Antioxidant ช่วยยับยั้ง Lipid peroxidation เพิ่ม Antioxidative enzymes ลด Neutrophil infiltration และ Proinflammatory cytokins กลไกการออกฤทธิ์ดังกล่าวอาจมีความเกี่ยวข้องกับการรักษาโรคริดสีดวงทวาร (อัญชลี และเกสร, 2549)

Thiangtham (2003) ศึกษาพฤกษเคมีของเพชรสังฆาตแห้งที่ความชื้น 10% พบว่ามีไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เถ้า ไฟเบอร์ 0.58, 0.17, 1.16, 10, 0.1% ตามลำดับ และมีพลังงาน 3.43 kcal/100 g (Enechi and Odonwodo, 2003) ในส่วนของการศึกษาเพื่อแยกสารในกลุ่ม flavonoid ที่เป็นสาร Quercetin โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Quercetin ได้มีการศึกษาโดยใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย Column C-18 ตัวทำละลายเคลื่อนที่คือ 0.05% Ortho-phosphoric acid และ acetonitrile อัตราส่วน (65 : 35) UV detector ที่ 260 nm พบ peak ของสาร Quercetin ปรากฏที่ 10.68 min และสาร Ethyl paraben ซึ่งถูกใช้เป็น Internal standard ปรากฏที่ 13.68 min ความจำเพาะเจาะจง ภาวะเชิงเส้น ความแม่นยำ ความถูกต้อง และ ความเหมาะสมของระบบ พบว่าภาวะเชิงเส้นของสาร Quercetin ในระหว่างความเข้มข้น 0.3-1.5 $\mu\text{g/ml}$ มีค่า $R^2 = 0.9996$

Panpimanmas et al. (2010) ได้ทำการศึกษาประสิทธิผลและผลข้างเคียงของการใช้สมุนไพรเพชรสังฆาตในผู้ป่วยโรคริดสีดวงทวารระยะเฉียบพลัน จำนวน 570 คน โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ได้รับยาที่มีส่วนผสมของฟลาวานอยด์ (Daflon 500 มิลลิกรัม/เม็ด) กลุ่มที่ได้รับสมุนไพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรสังฆาต (500 มิลลิกรัม/เม็ด) และกลุ่มที่ได้รับยาหลอก ผลการศึกษาพบว่าผู้ป่วยในทุกกลุ่มส่วนใหญ่อาการดีขึ้นหลังการให้ยาครบ 7 วัน ประสิทธิภาพของการรักษาในผู้ป่วยทุกกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน และไม่มีผลข้างเคียงเกิดขึ้น สรุปได้ว่าเพชรสังฆาตให้ผลในการรักษาริดสีดวงทวารในระยะเฉียบพลันไม่แตกต่างจากยาที่มีส่วนผสมของฟลาวานอยด์

Aimmanas et al. (2002) ได้ทำการศึกษาความเป็นพิษของเพชรสังฆาตแห่งในหนูทดลอง 5 กลุ่มๆละ 12 ตัว ที่ dose ต่างกันคือ 0.03, 0.3 และ 3.0 g/kg ของน้ำหนักตัวต่อวัน ในเวลา 3 เดือน พบว่าเพชรสังฆาต ไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโลหิตวิทยาหรือการบาดเจ็บของอวัยวะภายในอย่างมีนัยสำคัญ

Chidambara et al. (2003) ได้ทำการศึกษาฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของ Gram-positive bacteria รวมทั้ง *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* และ *Streptococcus* ซึ่งสกัดด้วย Ethyl acetate และ Methanol ของลำต้นเพชรสังฆาตสด ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเพชรสังฆาตมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

2.1.3 สมบัติทางเคมีของเพชรสังฆาต

เพชรสังฆาตได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการศึกษาคัพระกอบทางเคมี มีสารสำคัญที่ได้รับรายงานจากงานวิจัยของสมุนไพรรชนิดนี้อยู่ด้วยกันหลายกลุ่ม เช่น Triterpene, Steroid, Stilbene, Flavonoid และสารประกอบอื่นๆ สารประกอบทางเคมีที่พบในเพชรสังฆาตแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบทางเคมีของเพชรสังฆาต (Thiangtham, 2003)

Type of compound	Compounds	Part of the plant	% Content found
Triterpene	δ -amyrin	Whole plant	0.14000%
	δ -amyrone	Whole plant	0.10000%
	Iso-aborenol	Whole plant	0.00030%
	Epi-friedelinol	Whole plant	0.00024%
	Lupenone	Whole plant	0.00022%
	Onocer-7-ene-3-alpha-21-beta-diol	Whole plant	0.00600%
	Onocer-7-ene-3- beta-21-alpha-diol	Whole plant	0.00300%
	Onocer-8-ene-3- beta-21-alpha-diol	Whole plant	0.00225%
Stilbene	Pallidol	Stem	0.00055%
	Parthenocissin A	Stem	0.00070%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

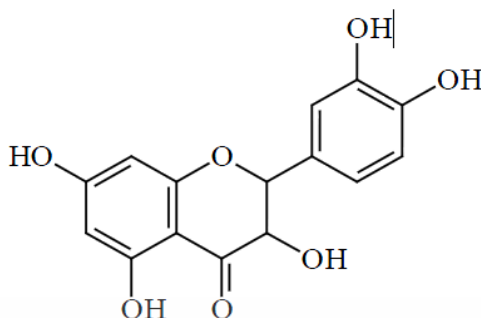
ตารางที่ 2.1 สารประกอบทางเคมีของเพชรสังฆาต (Thiangtham, 2003) (ต่อ)

Type of compound	Compounds	Part of the plant	% Content found
	Quadrangularin A	Stem	0.00090%
	Quadrangularin B	Stem	0.00040%
	Quadrangularin C	Stem	0.00080%
Flavonol	Kaemferol	Stem	0.00030%
	Quercetin	Stem	0.00210%

ในบรรดาสารสำคัญที่พบในเพชรสังฆาต สารเคอควิทิน (Quercetin) คือสารที่เป็นตัวหลักที่สำคัญ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันไม่ให้เกิดลิ้มเลือดในหลอดเลือดและปกป้องหลอดเลือด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการของโรคหลอดเลือดหัวใจ นอกจากนี้เคอควิทินยังช่วยลดการเป็นพิษต่อเซลล์ไขมัน แอลดีแอล (LDL) ซึ่งถือว่าเป็นกลไกที่สำคัญที่ช่วยในการทำงานของหลอดเลือดหัวใจ และลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหลอดเลือดหัวใจ อีกทั้งเคอควิทิน ยังทำให้เกิดการยับยั้งวงจรชีวิตเซลล์หยุดการขยายตัวของเซลล์ และรวมถึงการทำให้เกิด อะพ็อพโทซิส (Apoptosis) หรือการตายของเซลล์ในการเจริญเติบโตของเซลล์เต้านมที่ผิดปกติได้ (Kothan et al., 2004; Hamalainen et al., 2007; Suttana et al., 2010)

2.2 เคอควิทิน

มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลือง มีรูปร่างไม่แน่นอน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{15}H_{10}O_7$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นสารที่ให้ฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด มีมากในหัวหอม หอมแดง และพืชตระกูลถั่ว ให้ฤทธิ์ในการป้องกันการอักเสบ ป้องกันแบคทีเรียและไวรัส ช่วยป้องกันอาการแพ้ ป้องกันการแข็งตัวของเลือด ป้องกันการเกิดออกซิเดชันในหลอดเลือด และป้องกันหลอดเลือดเลี้ยงสมองอุดตันได้ การรับประทานผักและผลไม้ที่อุดมไปด้วยเคอควิทินในปริมาณสูงมีส่วนสัมพันธ์กับการทำงานของหัวใจที่ดี จากการศึกษาจำนวนมากพบว่า เคอควิทินถือว่าเป็นไฟโตนิวเทรียนท์ที่ปกป้องหลอดเลือด (Vasoprotective) และช่วยในการทำงานของหลอดเลือดหัวใจ ช่วยให้ระบบการไหลเวียนและการทำงานหัวใจดีขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสาร Quercetin (Balasundram et al., 2006)

ควอซีทิน เป็นสารพฤกษเคมีที่อยู่ในประเภทฟลาโวนอยด์ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มย่อยที่มีชื่อว่า ฟลาโวนอล (Flavonols) รายงานการศึกษามากมายยืนยันถึงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของฟลาโวนอยด์ที่ใช้ในการป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เช่น โรคเกี่ยวกับหัวใจและหลอดเลือด ฤทธิ์ต้านมะเร็ง การต้านแบคทีเรีย ต้านการอักเสบ ต้านอาการแพ้ เป็นต้น ซึ่งพบว่าคุณสมบัติเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารฟลาโวนอยด์ (Erich, 2006)

2.3 ฟลาโวนอยด์

เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่พบในพืช เป็นสารประกอบฟีนอลิกกลุ่มใหญ่ที่สุดของพืช ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight) ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน 15 อะตอม มีโครงสร้างเป็น $C_6-C_3-C_6$ เป็นวงแหวน 3 วง ได้แก่ วงแหวนเบนซีน (benzene ring) 2 วง (A and B) เชื่อมต่ออยู่กับวงแหวนไพแรน (Heterocyclic pyran ring) ซึ่งอยู่ตรงกลางของโครงสร้าง (C) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (Balasundram et al., 2006) โดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันซึ่งแทนที่ในโครงสร้างพื้นฐานได้เป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ ฟลาโวนอล ฟลาโวน ฟลาวานอล ไอโซฟลาโวน ฟลาวาโนน แอนโธไซยานิดิน และฟลาวาโนนอล

การกำจัดอนุมูลอิสระให้ลดลงสามารถควบคุมได้ด้วยสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระบวนการ ออกซิเดชันที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ สารต้านอนุมูลอิสระส่วนใหญ่พบได้ในพืช ผัก และผลไม้ ที่มีสารประกอบประเภทฟีนอลิก (Phenolic compound) เป็นองค์ประกอบ (Brenda, 2002; Erich, 2006) โดยมีรายงานการวิจัยพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบในผักและผลไม้มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Daduang et al., 2011) ดังนั้น การบริโภคผัก ผลไม้หรืออาหารที่มีสารประกอบฟีนอลิกอาจช่วยให้ร่างกายนำไปใช้ต่อต้านอนุมูลอิสระและช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคต่างๆ ได้

2.4 สารประกอบฟีนอลิก

เป็นกลุ่มของสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 1 หมู่ หรือมากกว่า ต่อกับวงแหวนอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มีความหลากหลายเชิงโครงสร้างมาก ดังรูปที่ 2.5 แม้ว่าฟีนอลมีความคล้ายกับแอลกอฮอล์มาก ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติก มีหมู่ไฮดรอกซิลต่ออยู่กับสายของคาร์บอน แต่ฟีนอลมีหมู่ไฮดรอกซิลต่ออยู่กับวงแหวนอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ออกซิเจนจับอยู่กับวงแหวนอะโรมาติกอย่างแน่นหนาและออกซิเจนเกาะอยู่กับไฮโดรเจนด้วยพันธะอย่างหลวมๆ ไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกซิลจึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ง่าย ทำให้ฟีนอลมีความเป็นกรดอ่อน (Vermerris and Nicholson, 2006)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของฟีนอล (Vermerris and Nicholson, 2006)

สารประกอบฟีนอลิก เป็นสารที่ได้จากกระบวนการต่างๆของพืชในระหว่างการเจริญเติบโต และในสภาวะที่มีความเครียด เช่น สภาวะที่มีการติดโรค สภาวะที่เกิดบาดแผล สภาวะที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต และอื่นๆ พบอยู่ในทุกๆส่วนของพืช มีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโต การแพร่พันธุ์ การป้องกันและต่อต้านเชื้อโรค ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต และเป็นสารให้สีในพืช ส่วนในอาหารสารประกอบฟีนอลิกให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสเฉพาะตัว เช่น อาจให้รสขม รสฝาด เป็นสารให้สี กลิ่น รส และเป็นสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบหนึ่งในกลุ่มของสารพฤกษเคมี (Phytochemicals) ที่พบมากที่สุด และมีคุณสมบัติต่างๆมากมาย เช่น แก้แพ้ แก้อักเสบ ต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ รักษาระบบหัวใจ ต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โดยประโยชน์หลักที่ได้รับจากสารประกอบฟีนอลิกก็คือ การต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยสารประกอบฟีนอลิกนั้นทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ (Free radical) ด้วยการให้อะตอมไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ และจับไอออนของโลหะที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกกระจายอยู่ในเนื้อเยื่อและเซลล์ของพืชแตกต่างกัน โดยที่สารประกอบฟีนอลิกที่ไม่ละลายน้ำเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ขณะที่สารประกอบที่ละลายน้ำพบอยู่ที่แวคิวโอล และที่เนื้อเยื่อด้านนอกของพืชพบสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณที่สูงกว่าเนื้อเยื่อด้านในของพืช (Balasundram et al., 2006; Naczka and Shahidi, 2004; Rice-Evans et al., 1997) โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในพืชนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ พันธุ์ เพาะปลูก อายุ สภาวะในการเจริญเติบโต ส่วนของพืช กระบวนการแปรรูป และการเก็บรักษา (King and Young, 1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการอบแห้งวัสดุ

ในการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนถ่ายเทจาก กระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุ เคลื่อนที่ออกมาถึงผิววัสดุโดยการเคลื่อนที่แบบคาпилลารี (Capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ลักษณะการอบแห้งเป็นการอธิบาย ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง รูปแบบของการเปลี่ยนแปลง ความชื้นแสดงตามฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.6 โดยปกติความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้นกับเวลาสามารถแบ่งพิจารณาเป็นช่วงตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการ ถ่ายเทความชื้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นช่วงต่างๆได้ดังนี้

2.5.1 ช่วงการปรับสถานะเบื้องต้น

จากรูปที่ 2.6 อยู่ในช่วง I เป็นช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง A ถึง B ช่วงนี้ อุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน และมีการระเหยของความชื้น เกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุ ค่าอัตราการอบแห้งของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ซึ่งอาจเริ่มขึ้น ภายหลังช่วงเวลาสั้นๆที่วัสดุปรับเข้าสู่สภาวะการอบแห้ง)

2.5.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

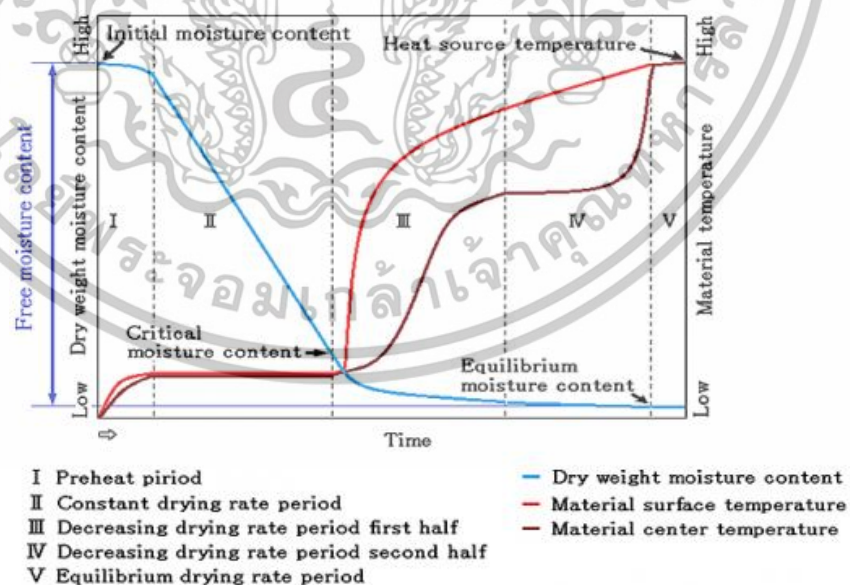
จากรูปที่ 2.6 อยู่ในช่วง II และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง B ถึง C เป็นช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูงอยู่ และ บริเวณผิววัสดุเต็มไปด้วยน้ำอิสระ (Free water) ซึ่งเป็นน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของอาหาร อาจมี การเกาะตัวกับองค์ประกอบของอาหารบ้างแต่แรงเกาะไม่แข็งแรงมากนัก มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา เคมีและจุลินทรีย์สามารถนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ได้ ในอาหารมีองค์ประกอบที่ละลายหรือเกิดคอลลอยด์กับ น้ำได้อยู่มากมาย องค์ประกอบเหล่านี้มีพันธะกับน้ำ และอยู่ในสภาวะ Adsorbed water และ Bound water ส่วนที่เหลือเป็นน้ำอิสระ (Free water)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่ผิววัสดุเท่านั้น สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิของวัสดุคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ อัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม (สมชาติ โสภณธนะฤทธิ์, 2540) ปริมาณน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุมีค่าคงที่ เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมาแทนที่น้ำที่อยู่ บริเวณผิวหน้าที่ระเหยไปอย่างเพียงพอ จนถึงระดับหนึ่งที่น้ำบริเวณผิวหน้าทั้งหมด ทำให้อัตราการ ทำแห้งลดลง จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า Critical moisture content โดยการถ่ายเทมวลเกิด จากการแพร่เนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและที่อากาศรอบนอก หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า หากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุมีค่าน้อย น้ำ ระเหยจากผิววัสดุได้อย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม หากความต้านทานใน การถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกมีค่ามาก น้ำระเหยจากผิววัสดุได้ช้า อัตราการอบแห้ง

ในช่วงนี้มีค่าน้อย ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient) ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วและทิศทางกระไหลของตัวกลางการอบแห้งผ่านวัสดุเป็นหลัก

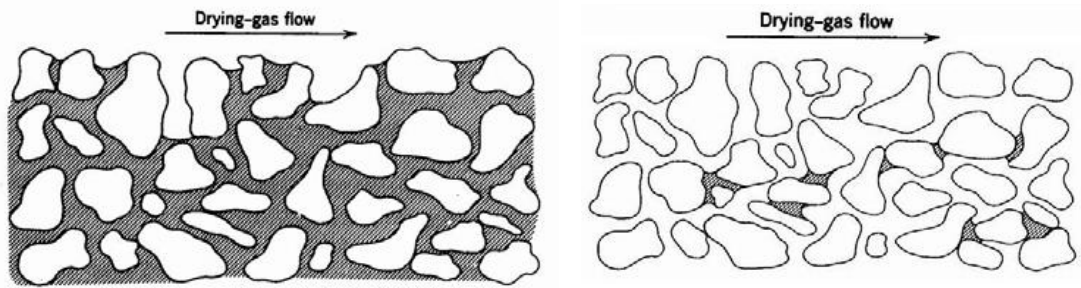
2.5.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

เริ่มจากจาก Critical moisture content จนสุดท้ายของการทำแห้ง โดยที่ค่าความชื้นของวัสดุเริ่มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยอัตราการลดลงของความชื้นค่อยๆลดลงกับเวลาการอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น เรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.6 ช่วงที่ III และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง C ถึง D น้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่มายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวของวัสดุไปยังอากาศ โดยเกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารขึ้นภายในเนื้อและผิวของวัสดุ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในวัสดุเป็นตัวควบคุมอัตราการระเหยของน้ำ อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิระเหยเปียก ดังแสดงในรูปที่ 2.7a เมื่ออบแห้งต่อไป โมเลกุลน้ำภายในวัสดุชั้นในแพร่กระจายสู่ชั้นบน และเกิดการระเหยเป็นไออีก ดังรูปที่ 2.7b จนกระทั่งในที่สุดความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่ากระบวนการอบแห้งสิ้นสุด ดังรูปที่ 2.6 ช่วงที่ IV และรูปที่ 2.8 อยู่ในช่วง D ถึง E ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง ผิวหน้าของวัสดุมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศแห้งที่เคลื่อนผ่าน แต่โมเลกุลน้ำที่เหลืออยู่เล็กน้อย ยังคงสามารถระเหยได้อีกจนกระทั่งเกิดความชื้นสมดุลขึ้น ที่จุดนี้ความชื้นภายในวัสดุเท่ากับความชื้นของอากาศแห้งที่เคลื่อนที่ผ่าน แต่วัสดุยังคงมีโมเลกุลน้ำอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังรูปที่ 2.7c



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (Moisture content) และอุณหภูมิระหว่างอบแห้ง (Heat-tech Co.,Ltd., 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ช่วงเวลาการอบแห้งลดลงช่วงที่หนึ่ง (b) ช่วงเวลาการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง



(c) ช่วงเวลาสิ้นสุดการอบแห้ง

รูปที่ 2.5 การแพร่กระจายความชื้นในวัสดุ (Foust et al., 1980)

ข้อมูลลักษณะการอบแห้งมีความสำคัญ เพราะเป็นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของวัสดุกับเวลา ซึ่งทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ อันนำไปสู่ความสามารถในการออกแบบกระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมได้

นอกจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นกับเวลาแล้ว ยังอาจคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) จากข้อมูลลักษณะการอบแห้งได้ดังสมการ (2.4)

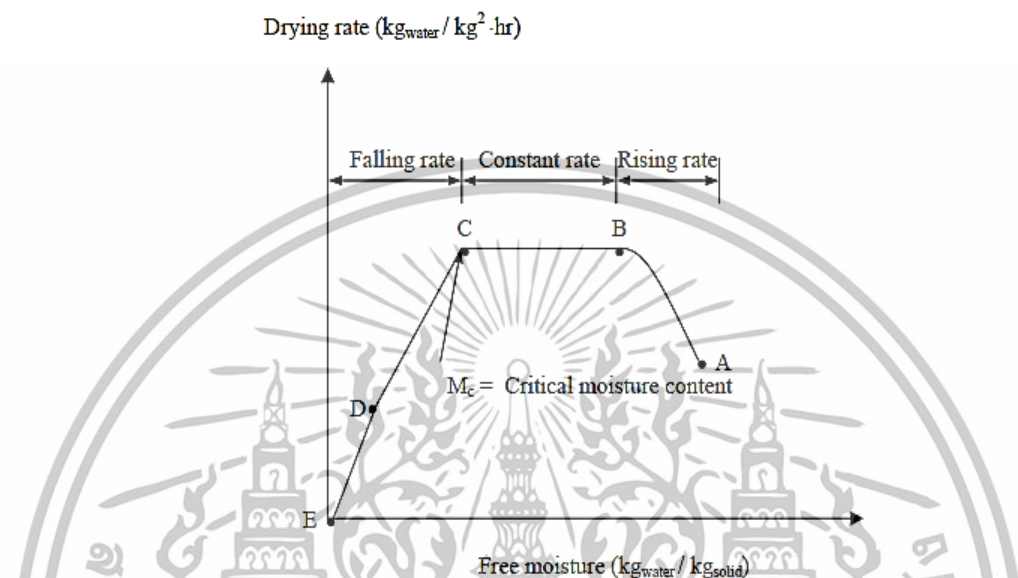
$$DR = -\frac{M_S}{A} \frac{dM}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ M_S = มวลแห้งของวัสดุ (g)

A = พื้นที่ผิวของวัสดุที่เกิดการระเหยน้ำ (m^2)

สำหรับในการหาค่า M_S ของวัสดุซึ่งได้จากการนำเอาวัสดุไปอบให้แห้งจนไม่มีความชื้นเหลืออยู่ เพื่อให้มั่นใจว่าวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่ามวลแห้งของวัสดุนั้นเหมาะสมอย่างแท้จริง ในกรณีที่ไม่ทราบค่า A ก็อาจระบุค่าอัตราการอบแห้งในรูปของมวลน้ำที่ระเหยไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้

ถ้านำค่าอัตราการอบแห้ง (DR) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น (MC) ได้เส้นโค้งที่เรียกว่า เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (Drying Rate Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแตกต่างจากเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่เปลี่ยนไปกับเวลา ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying Curve)

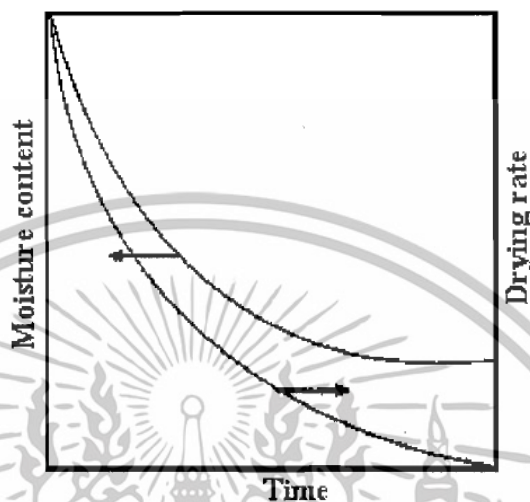


รูปที่ 2.6 ลักษณะของเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (สมชาติ โสภณภณฤทธิ, 2540)

2.6 แบบจำลองการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นกระบวนการการถ่ายเทความร้อนและมวล เพื่อต้องการระเหยน้ำออกจากวัสดุที่อบแห้ง จากหลักการของลักษณะการอบแห้งวัสดุประกอบด้วยช่วงอัตราการอบแห้ง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period), ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-rate Drying Period) อย่างไรก็ตามชีววัสดุหรือวัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่ เมื่ออบแห้งแบบการพาความร้อนปรากฏเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้กันในปัจจุบันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (Moisture ratio, MR) และเวลาในการอบแห้ง (time, t) ซึ่งในทางทฤษฎีก็เกิดขึ้นมาจากการพิจารณาลักษณะการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกัน ในระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ผิวหน้าของวัสดุไม่ได้อิมตัวไปด้วยน้ำซึ่งแตกต่างจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุไปที่ผิวมีค่าต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุ อัตราการระเหยน้ำในช่วงนี้ถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่ปริมาณความชื้นของวัสดุลดลงต่ำกว่าจุดวิกฤติ ศักยภาพของกระบวนการอบแห้งลดลงพร้อมกับอัตราการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรโดยทั่วไปอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลง นั้นหมายถึงอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการอบแห้ง จากรูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.7 การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

การทำนายอัตราการอบแห้งของวัสดุทางการเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้นค่อนข้างซับซ้อนกว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การวิเคราะห์กลไกการอบแห้งไม่ได้พิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ผิวภายนอกของวัสดุเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ความชื้นภายในวัสดุด้วย มีทฤษฎีมากมายที่อธิบายลักษณะการอบแห้งของวัสดุเกษตรในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเฉพาะ สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semitheoretical Drying Equation) และ สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์ (Empirical Drying Equation) ที่ช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้งได้ดี

2.6.1 สมการการอบแห้งทางทฤษฎี

ลักษณะกลไกทางกายภาพของความชื้นสำหรับวัสดุเกษตรที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนอาจเกิดขึ้นในแบบต่างๆ ดังนี้คือ

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force)
2. การพร่องน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid Diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface Diffusion)
4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion)
5. การเคลื่อนที่ของไอในรูปของไอเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Diffusion)
6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic Flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov (1996) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} \theta + \nabla^2 K_{13} P$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} \theta + \nabla^2 K_{23} P$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} M + \nabla^2 K_{32} \theta + \nabla^2 K_{33} P$$

(2.2)

เมื่อ ∇M = ความชื้นที่เปลี่ยนแปลง

$\nabla \theta$ = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

∇P = ความดันที่เปลี่ยนแปลง

K_{11} , K_{12} และ K_{33} คือ Phenomenological coefficients

สมการของ Luikov ในการอธิบายวัสดุการเกษตรที่ช่วยให้เข้าใจง่ายขึ้นได้ เช่น การไหลของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันอย่างมีนัยสำคัญเกิดขึ้นเฉพาะในการอบแห้งวัสดุที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งทั่วไป นั่นคือ สามารถตัดเทอมความดันของสมการ Luikov ได้ ดังนั้นสมการการอบแห้งที่ได้ คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} \theta \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.6) สามารถอธิบายการอบแห้งและพฤติกรรมของความร้อนของวัสดุการเกษตรได้ดีมาก แต่ในการอบแห้งจริงอาจไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่แห้งและแข็งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎีที่ได้แสดงดังสมการ (2.7) ซึ่งเรียกว่า แบบจำลองการถ่ายเทมวลของฟิคส์ (Fick's second law)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M \quad (2.4)$$

โดยทั่วไปว่าการไหลของความชื้นภายในวัสดุเกิดขึ้นโดยการแพร่ ดังนั้น $K_{11} = D$ (สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น) และเมื่อ

$$\nabla^2 M = \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad (2.5)$$

สมการ (2.7) จึงสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ $M =$ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/s

$t =$ เวลา, s

$r =$ ระยะทางการแพร่ความชื้น, m

$D =$ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/s

$C =$ ค่าคงที่

โดย $C = 0$ สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

$C = 1$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$C = 2$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

โดยที่เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า $M(r,0) = M(in)$ และ $M(r,t) = M(eq)$ และกำหนดให้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2.7)$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น

M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น, ฐานแห้ง

M_{eq} = ความชื้นสมดุล, ฐานแห้ง

และคำตอบของสมการ (2.10) ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะเริ่มต้น และสภาวะขอบเขตตามลักษณะรูปทรงของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังนี้

สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite Slap) สามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \frac{(2n+1)^2 \pi^2 Dt}{4L^2} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ n = ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3,...)

L = ความหนาของวัสดุ (m)

สำหรับทรงกลม (Sphere) ที่มีรัศมีเท่ากับ r

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[- \frac{n^2 \pi^2 Dt}{r^2} \right] \quad (2.9)$$

สำหรับทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีรัศมีเท่ากับ r

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \beta_n^2} \exp \left[- \frac{\beta_n^2 Dt}{r^2} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ β_n = ราก (Roots) ของฟังก์ชันเบสเซลออกเดอร์ศูนย์ตามลำดับที่ n

เห็นได้ว่าสมการ (2.11) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ มีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นเช่นเดียวกับสมการ (2.12) และ (2.13) เมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามากและค่าความแตกต่างน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วนของ $D\pi^2/r^2$ มีค่ามากกว่า 1.2 (Senadeera et al.,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2003) ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ($n = 1$) ซึ่งคำตอบที่ได้อาจไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุแผ่นระนาบ วัสดุทรงกลมและวัสดุทรงกระบอก ตามลำดับได้ดังนี้ (Lee et al., 2004; Gachovska et al., 2008; Khazaei et al., (2008); Vega-Galvez et al., 2008)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4 L^2}\right) \quad (2.11)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{r^2}\right) \quad (2.12)$$

$$MR = \frac{4}{r^2 \beta^2} \exp\left(-\beta^2 \frac{Dt}{r^2}\right) \quad (2.13)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D , Diffusion Coefficient) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในสมการของการอบแห้งตามรูปแบบสมการทางทฤษฎีที่ต้องนำมาใช้ในการจำลองสภาพการอบแห้ง โดยสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง (ไม่ขึ้นกับความชื้น) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความดันไอภายในและภายนอกวัสดุ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุทำให้ค่าความดันไอภายในและภายนอกแตกต่างกัน รูปแบบของสมการ Arrhenius เป็นที่นิยมในการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง แสดงได้ดังสมการ

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.14)$$

เมื่อ D_0 = Arrhenius factor, m^2/s

E_a = พลังงานกระตุ้น, $kJ/kmol$

R = ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kmol.K

T_{abs} = อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

จากรายงานวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุการเกษตรที่อบแห้งด้วยวิธีการพาความร้อนอยู่ในช่วง 10^{-10} - $10^{-9} \text{ m}^2/s$ (Doymaz, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 สมการออบแห้งกึ่งทฤษฎี

แบบจำลองกึ่งทฤษฎีเกิดจากการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นเนื่องจากแบบจำลองที่ได้ลดความซับซ้อนของ Fick's second law โดยไม่จำเป็นต้องสมมติฐานเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของวัสดุ โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุ และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton ตัวอย่างสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 2.2 แต่ความถูกต้องของแบบจำลองจำกัดอยู่เฉพาะภายใต้เงื่อนไขสำหรับการอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น (Fortes and Okos, 1980) สมการดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq})$$

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -k dt \quad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.15) ได้

$$\int_{M_{in}}^{M(t)} \frac{1}{M - M_{eq}} dM = - \int_0^t k dt \quad (2.16)$$

$$\ln \frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = -kt \quad (2.17)$$

และจัดรูปแบบสมการที่ (2.17) ได้

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.18)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง

ตารางที่ 2.2 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

ที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(Lewis, 1921)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Henderson and Pabis, 1961)
3	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Henderson, 1974)
4	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(Yaldiz et al., 2001)

2.6.3 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์

สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์ คือสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความชื้นและเวลาการอบแห้ง โดยไม่คิดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกทางกายภาพ (Ozdemir and Devres, 1999) ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งเป็นการรวมกันของคุณสมบัติการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในขณะอบแห้ง เช่น การแพร่ความชื้น (Moisture diffusivity), การนำความร้อน (Thermal conductivity) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass coefficients) ซึ่งพบว่าสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการตรงกับสภาวะการทดลอง ตัวอย่างสมการการอบแห้งเชิงประจักษ์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการการอบแห้งเชิงประจักษ์

ที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
2	Thompson	$t = a \ln MR + b (\ln MR)^2$	(Thompson et al., 1968)
3	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh, 1978)
4	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli et al., 2002)
5	linear-plus-exponential	$MR = \exp(-kt^n) + bt + c$	(Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

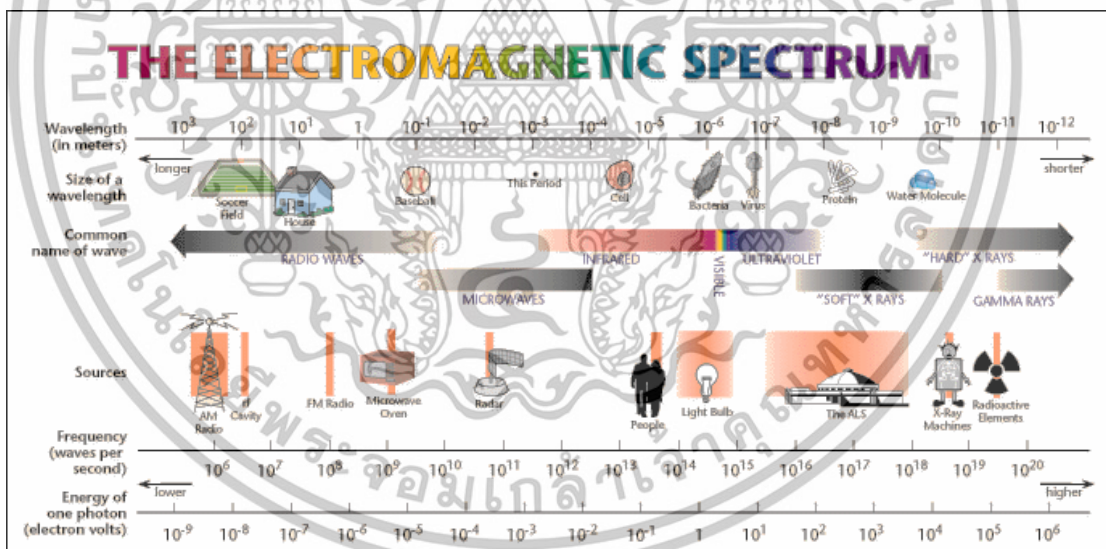
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานดังต่อไปนี้

2.7.1 หลักการพื้นฐานการแผ่รังสี

เป็นการแพร่ออกไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง ความถี่ (Frequency, ν) และความยาวคลื่น (Wavelength, λ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆเป็นไปตามสมการ $\lambda = c/\nu$ โดยที่ c เป็นความเร็วของคลื่นในตัวกลางนั้นๆ วัตถุใดๆเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นๆแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) ออกมา ซึ่งเป็นผลมาจากการสั่นและการหมุนของโมเลกุล อะตอม และอิเล็กตรอนภายในวัตถุนั้น ซึ่งรังสีความร้อนก็จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมระหว่างรังสีที่มองเห็นได้ (Visible) รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) และบางส่วนของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation, UV) ส่วนรังสีอินฟราเรดนั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างรังสีที่มองเห็นได้และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.8 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (กมล พลคำ, 2553)

รังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นในช่วง $0.75-1000 \mu\text{m}$ โดยแบ่งย่อยได้เป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $0.78-1.4 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared, Mid-IR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $1.4-3 \mu\text{m}$ และรังสีอินฟราเรดไกล (Far- Infrared, FIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $3-1000 \mu\text{m}$ (Sakai and Hanzawa, 1994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดไกลถือเป็นช่วงรังสีที่เหมาะสม โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุเข้าไปในวัสดุไปกระตุ้นโมเลกุลน้ำภายในวัสดุ ทำให้โมเลกุลน้ำสั่น และเกิดความร้อนขึ้น (Ginzburg, 1969; Heber and Rostogi, 2001) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดเพื่อลดความชื้นของวัสดุอาหารและวัสดุเกษตรหลายชนิด ได้มีการยืนยันว่าการอบแห้งแบบอินฟราเรดใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน (Khiri et al., 2006; Nowak and Lewicki, 2004)

วัตถุที่สามารถแผ่รังสีออกมาหรือดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์เรียกว่าวัตถุดำ (Blackbody) ที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเฉพาะหนึ่งๆ ไม่มีผิวของวัตถุใดสามารถแผ่รังสีออกมาโดยมีพลังงานมากกว่าวัตถุดำ วัตถุดำสามารถดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบทั้งหมดได้โดยไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นและทิศทางที่ตกกระทบ ทำนองเดียวกัน วัตถุดำแผ่พลังงานออกมาในรูปของรังสีอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ ทิศทาง จากการศึกษาและทดลองของ Joseph Stefan พบว่าพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นไปตามสมการ

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.19)$$

โดยที่ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ เรียกว่า ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์มานน์ (Stefan-Boltzmann constant) และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ในหน่วยเคลวิน ความสัมพันธ์ตามสมการนี้ได้รับการตรวจสอบในทางทฤษฎีโดย Ludwig Boltzmann ดังนั้นสมการนี้จึงรู้จักกันในนามของ Stefan-Boltzmann law และเรียก E_b ว่ากำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody emissive power)

กฎของสเตฟาน-โบลท์มานน์ ให้ค่าของกำลังของการแผ่รังสีซึ่งเป็นผลรวมของการแผ่รังสีตลอดทุกช่วงของความยาวคลื่น ในกรณีที่ต้องการทราบเพียงผลรวมของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุดำ ที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และต่อหนึ่งหน่วยความยาวคลื่นของคลื่นที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ λ ค่าหนึ่ง กฎของสเตฟาน-โบลท์มานน์ไม่สามารถหาได้ ดังนั้น Max Planck จึงได้พัฒนาสมการนี้โดยการเชื่อมโยงเข้ากับทฤษฎีควอนตัมของเขา จนได้สมการใหม่ที่เรียกว่า กฎของแพลนค์ (Planck's law) ดังสมการ

$$E_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T)] - 1} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (2.20)$$

$$\text{โดยที่ } C_1 = 2\pi^5 h^6 C_0^2 / 15 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = hc_0/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

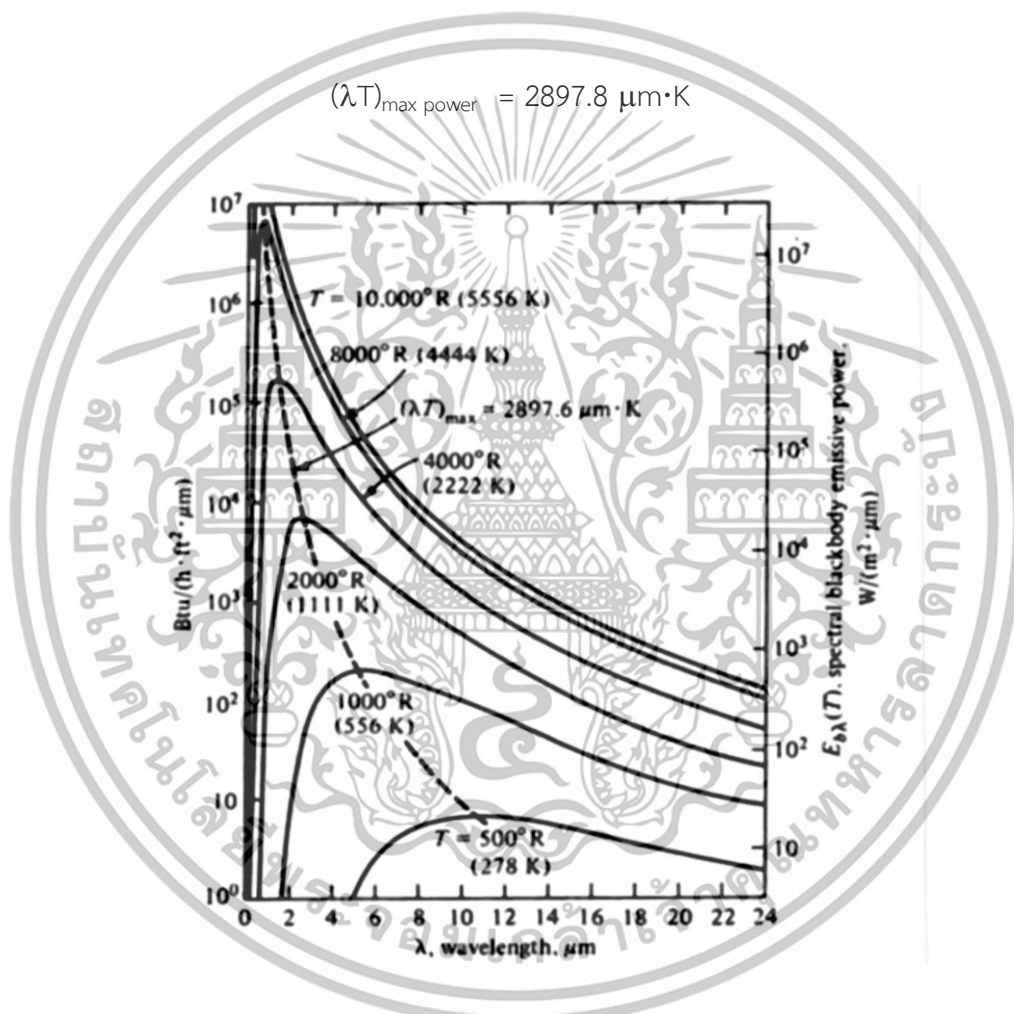
T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิว K

λ = ความยาวคลื่นที่แผ่ออกมา μm

ความสัมพันธ์ตามสมการนี้ใช้ได้กับพื้นผิวที่อยู่ในสุญญากาศหรืออากาศ สำหรับตัวกลางอื่นๆ ต้องแทน C_1 ด้วย C_1/n^2 โดยที่ n คือ ดัชนีหักเห (Index of refraction) ของตัวกลางนั้น

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุดยอดของเส้นโค้งดังรูปที่ 2.11 เลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า ความยาวคลื่น ณ จุดยอดนี้สำหรับเฉพาะ T ใดๆ เป็นไปตามกฎการเลื่อนที่ของวิน (Wien's displacement law) ดังสมการ

$$(\lambda T)_{\text{max power}} = 2897.8 \mu\text{m}\cdot\text{K} \quad (2.21)$$

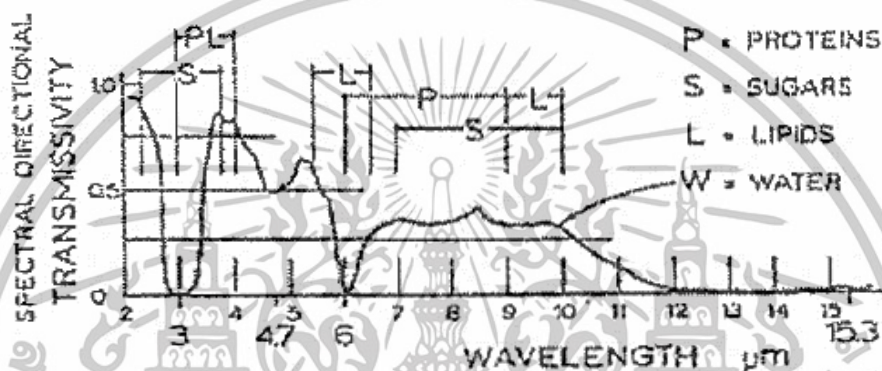


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความยาวคลื่น ณ จุดยอด จากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่างๆ (Ozisik, 1985)

2.7.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยน้ำ

รังสีอินฟราเรดที่แผ่ไปยังวัสดุส่วนมากถูกดูดกลืนโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำ น้ำแข็ง ไขมัน หรือ สารละลายน้ำ (water solution) ที่มีอยู่ในแคปิลลารี (capillary) ภายในวัสดุหรือโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆ วัสดุ ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำที่สถานะแตกต่างกันดูดกลืนรังสีที่มีความเข้มแตกต่างกัน Jamieson et al. (1963) และ Saprrow and Cess (1970) พบว่าไอน้ำที่ 0°C สามารถดูดกลืนเอกสารถิ่นเป็นเอกสารถิ่นที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 1.14, 1.38 และ 1.87 μm ได้น้อย แต่ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 2.7 และ 6.3 μm ได้ดี ส่วนน้ำในสถานะของเหลว (liquid water) ที่ 25°C ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 1.19, 1.43, 1.94, 2.93, 4.72 และ 6.10 μm ได้น้อยแต่ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่น 3, 4.7, 6 และ 15.3 μm ได้ดี ดังแสดงในรูป 2.12 สำหรับการดูดกลืนรังสีของไอน้ำที่อุณหภูมิ 27-827°C ขึ้นอยู่กับมวลไอน้ำต่อพื้นที่ ความดัน และอุณหภูมิ ส่วนอากาศมีผลกระทบน้อยมากต่อการดูดกลืนรังสีของไอน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมีผลต่อค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตั้งตารางที่ 2.4 โดยน้ำในสถานะของเหลวเริ่มดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ฟิล์มที่มีขนาดบางๆ และที่ความหนา 10 μm สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.10 ย่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหารเปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะของเหลว (Sandu, 1986)

ตารางที่ 2.4 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ (Sandu, 1986)

ความหนาของฟิล์มน้ำ μm	ความยาวคลื่น μm			
	3.0	4.7	6.0	15.3
1.2	0.80	0.04	0.30	-
3.0	0.97	0.10	0.55	-
10.0	1.00	0.35	1.00	1.00

2.7.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว

พลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่ง (i) เมื่อมีการกระทบลงบนพื้นผิวที่สอง (j) อาจได้รับการดูดกลืนหรือสะท้อนกลับ แต่ถ้าพื้นผิวดังกล่าวเป็นวัตถุดำ รังสีซึ่งตกกระทบถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด ความร้อนจากการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งอาจถ่ายเทมายังอีกวัตถุหนึ่งได้บางส่วนหรือทั้งหมด สัดส่วนของรังสีความร้อนที่ตกกระทบพื้นผิว j ต่อรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิว i เรียกว่า view factor หรือ shape factor (F_{ij}) การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถแสดงความสัมพันธ์อยู่ในสมการของสตีเฟน-โบลซ์แมนและ shape factor

$$Q_b = A_i \times F_{ij} \times \sigma(T_i^4 - T_j^4) \quad (2.22)$$

เมื่อ Q_b = อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุ i , W

A_i = พื้นที่ผิวของวัตถุ i , m^2

F_{ij} = view factor หรือ shape factor ระหว่างพื้นผิว i และ j

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} , $W/m^2.K^4$

T_i = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว i , K

T_j = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว j , K

การพิจารณาปัญหาการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณซึ่งล้อมรอบด้วยพื้นผิวหลายอัน (Enclosure) และเป็นพื้นผิวที่แท้จริงหรือพื้นผิวเทา (Gray surfaces) ซึ่งมีการสะท้อนรังสีความร้อนออกจากทุกพื้นผิว โดยมีรังสีบางส่วนถูกดูดกลืนไว้เท่านั้น ในการวิเคราะห์สมมติว่าแต่ละพื้นผิวใน enclosure มีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด (Isothermal) และตัวกลางระหว่างพื้นผิวภายใน Enclosure สมมติว่าเป็น Nonparticipating medium คือ ไม่มีผลต่อรังสีความร้อน อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิภายใน Enclosure ที่ประกอบด้วยพื้นผิว i และพื้นผิว j สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการของสตีเฟน-โบลซ์แมน ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังนี้

$$Q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j A_j}} \quad (2.23)$$

เมื่อ Q_{ij} = อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุ i และ j , W

A_j = พื้นที่ผิวของวัตถุ j , m^2

ϵ_i = ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ i

ϵ_j = ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ j

ในกรณีที่ enclosure ประกอบด้วยพื้นผิวมากกว่าสองพื้นผิว การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.13 และอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิออกจากพื้นผิว i มีค่าเท่ากับผลรวมของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว (Emissive power)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจากรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (Surface radiosity) ค่าการแผ่รังสีและ Shape factor ในรูปสมการ

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i - F_{ij})^{-1}} \tag{2.24}$$

โดยที่ E_{bi} คำนวณได้จาก

$$E_{bi} = \sigma T_i^4 \tag{2.25}$$

เมื่อ E_{bi} = Emissive power ของพื้นผิว i , W/m^2

J_i = ค่า surface radiosity ของผิว i , W/m^2

J_j = ค่า surface radiosity ของผิว j , W/m^2

N = จำนวนพื้นผิวภายใน Enclosure



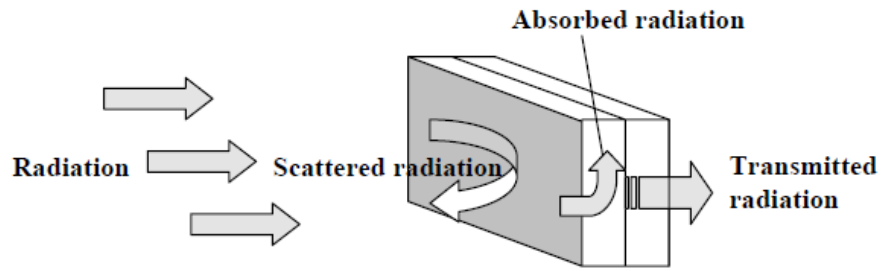
รูปที่ 2.11 วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่นๆ

2.7.4 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

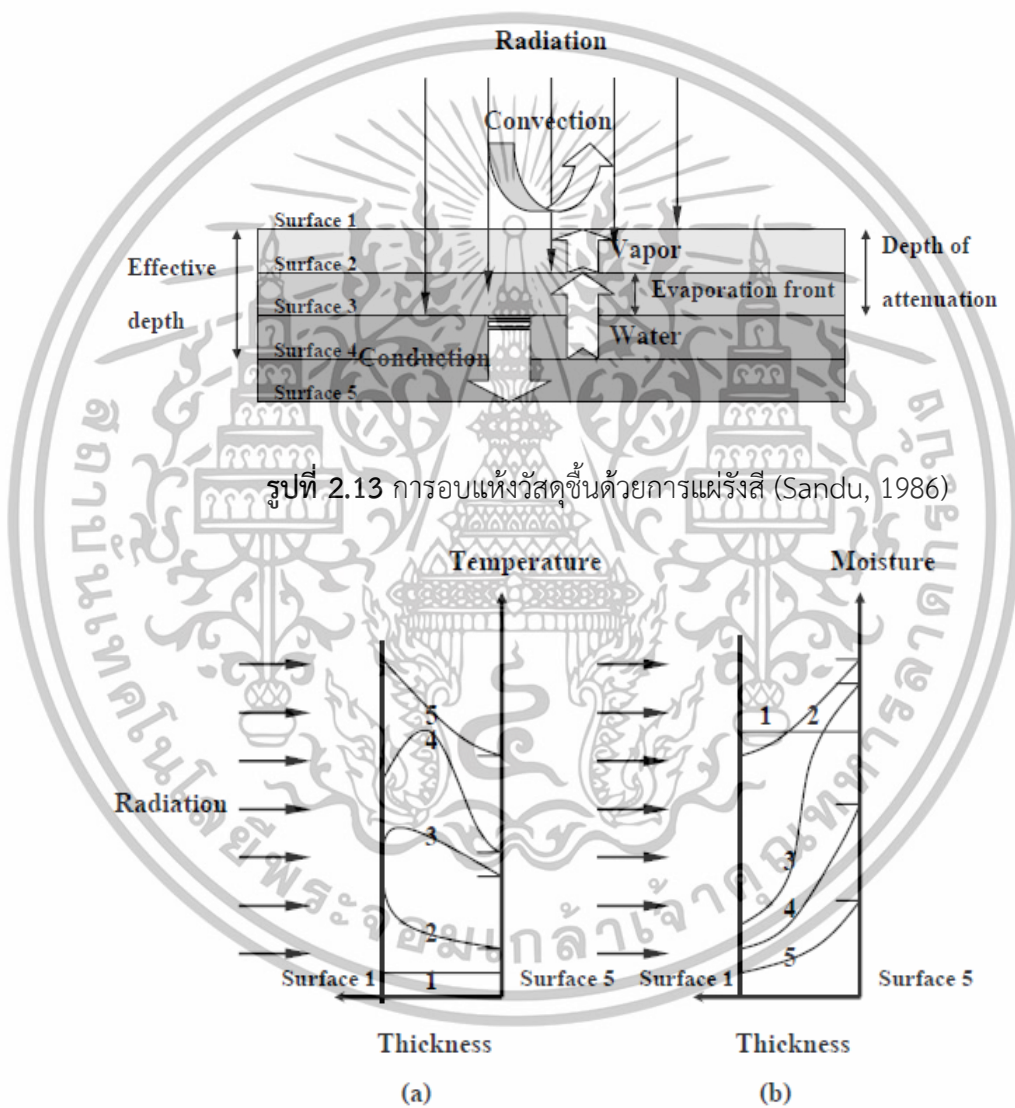
รูปที่ 2.14 อธิบายถึงผลการตกกระทบของรังสีบนผิววัสดุ โดยมีพลังงานบางส่วนที่วัสดุดูดซับเอาไว้ ในขณะที่บางส่วนถูกสะท้อนกลับออกไปตั้งแต่ที่ผิว และบางส่วนทะลุผ่านวัสดุไปโดยพุ่งตรงไปในแนวทิศทางเดิม หรือมีการหักเหของรังสี และจากงานวิจัยของ Sandu (1986) ได้กล่าวถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ โดยจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งวัสดุชื้น (Moist solid plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดแบบโพลีโครเมติกแผ่ออกมาตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นวัสดุชั้นด้านหนึ่ง โดยที่พื้นผิวด้านตรงข้ามสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิยาเบติก (Adiabatic) มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติและเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (Transient process) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากแผ่นวัสดุชั้นดูดซับทำให้อ่อนกำลังลงตามความลึก ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้เรียกว่า “ความลึกของการอ่อนกำลังลง (Depth of attenuation)” ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นตื้นๆ (Superficial layer) และเป็นบริเวณที่เกิดความร้อนเกือบคงที่ ซึ่งโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) มีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลงนี้ ขณะเดียวกันเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งขึ้น โดยพื้นผิวที่ 1 (Surface 1) มีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 3 (Surface 3) เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุชั้นโดยการนำความร้อน พิจารณารูปที่ 2.16 (หมายเลข 1) ในสภาวะเริ่มต้นพิจารณาว่าแผ่นวัสดุชั้นมีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ นำเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลง (หมายเลข 2 และ 3) การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นภายในแผ่นวัสดุชั้นและด้านหน้าของบริเวณการระเหย น้ำในสถานะของเหลวและไอน้ำเคลื่อนที่สู่ด้านหน้าผิวของการระเหยเนื่องจากแรงผลักดันต่างๆ เช่น การแพร่โมเลกุล, การแพร่ความร้อนและการแพร่แคปิลารีที่กระทำพร้อมกัน ส่วนการเพิ่มของความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 (หมายเลข 2 และ 3) ซึ่งสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นของแข็ง (หมายเลข 1) เกิดขึ้นระหว่างช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการแพร่ของน้ำในสถานะของเหลวเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุชั้นทำให้ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลแพร่ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ช้าดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “ข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลเนื่องมาจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด” ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้นต้องไม่มีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผล ซึ่งเป็นชั้นที่ลึกที่สุดภายในวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปได้ดีที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลนั้นเคลื่อนที่ออกมาด้วยการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ถ้าวัสดุมีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิผลต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น วิธีการแผ่รังสีเป็นช่วงๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ช่วยทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นความหนาที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลแพร่ออกมายังความลึกประสิทธิผลและส่งผลให้สามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น หรืออาจใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทางเป็นต้น (Sandu, 1986) ตารางที่ 2.5 อธิบายถึงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีการดูดซับพลังงานได้มากที่สุด และความสามารถในการทะลุทะลวงผลิตภัณฑ์ ณ ความยาวคลื่นนั้น



รูปที่ 2.12 การลดลงของการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิววัสดุ (Sandu, 1986)



รูปที่ 2.13 การอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยการแผ่รังสี (Sandu, 1986)

รูปที่ 2.14 โปรไฟล์อุณหภูมิ (a) และโปรไฟล์ความชื้น (b) ระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นของแข็งชั้นในรูปที่ 2 เมื่อ 1 คือเงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือสถานะไม่สม่ำเสมอ (Sandu, 1986)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ความลึกของการทะลุทะลวงอาหารชนิดต่างๆ ต่อฟลักซ์ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของอุปกรณ์แผ่รังสี (Ginzberg, 1969)

Products	Spectral peak, μm	Depth of penetration (mm)
Dough, wheat	1	4-6
Bread, wheat	1	11-12
Biscuit	1	4
	0.88	12
Grain, wheat	1	2
Carrot	1	1.5
Tomato paste, 70%- 85% MC	1	1
Potatoes, raw	1	6
Potatoes, dry	0.88	15-18
Apples, raw	1.16	4.1

2.8 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ปัจจุบันมีนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการออกแบบการทดลองเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนอง และประเมินความเหมาะสมในสภาวะของการทดลอง การออกแบบนี้เรียกว่า Response Surface Design (RSD) และการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาค่าตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมของการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งทำให้สามารถพบการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด การตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะ คือ การตอบสนองที่มากที่สุด (Maximum) และ การตอบสนองที่ต่ำที่สุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการทดลอง วิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกและอธิบายโดย Box and Wilson (1951) ต่อมา Bradley (1958) ได้เขียนบทความที่อธิบายในเชิงคณิตศาสตร์และสถิติ ที่ใช้ในการกำหนดวิธีการของพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology)

2.8.1 แนวความคิดและหลักการทั่วไป

พิจารณาสมการ

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \epsilon \quad (2.26)$$

เมื่อ Y = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ (ตัวแปรตาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f = ฟังก์ชันของการตอบสนองของ X_1, X_2, \dots, X_n ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (ตัวแปรอิสระ)
 ε = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

แม้ว่ารูปแบบความเที่ยงตรงของฟังก์ชันการตอบสนอง f มักไม่ทราบค่า แต่โดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าสามารถประมาณได้โดยฟังก์ชันเชิงเส้นตรงหรือเส้นโค้งของตัวแปรเชิงปริมาณความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression relationship) เป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.27)$$

สมการ (2.30) เป็นสมการพื้นฐานอย่างง่ายที่เรียกว่า รูปแบบหรือสมการลำดับที่หนึ่ง (First-order model or equation) ส่วนสมการลำดับที่สอง (Second-order equation) เป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Quadratic regression relationship) ดังสมการที่ (2.31)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{11} X_1^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n + \varepsilon \quad (2.28)$$

พารามิเตอร์ของสมการนี้มักไม่ทราบค่า ดังนั้นต้องถูกประมาณจากการทดลอง ความหมายในเชิงกายภาพของพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นดังนี้

β_0 = จุดตัด (Intercept) และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น b_0

β_i = เป็นผลเชิงเส้นตรง (Linear effect) ของ X_i และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น b_i แทน เมื่อ $i = 1, \dots, n$

β_{ii} = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic effect) ของ X_i และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น b_{ii} แทน เมื่อ $i = 1, \dots, n$

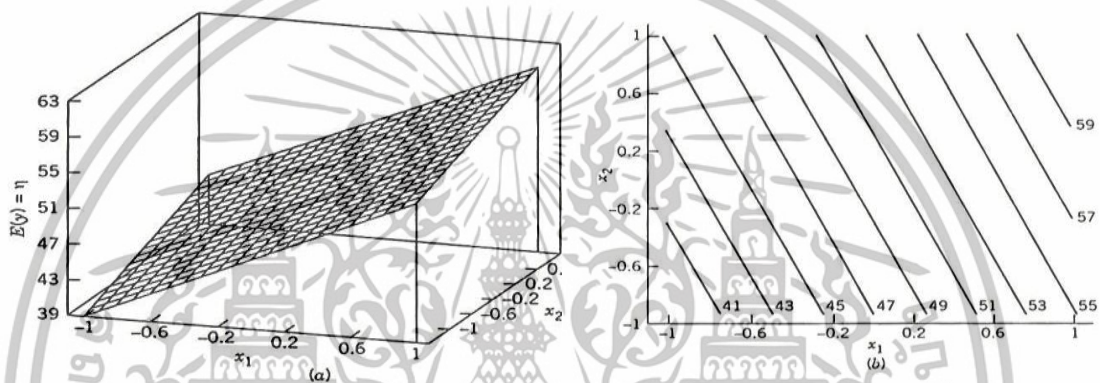
β_{ij} = เป็นผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) ของ X_i และ X_j และการประมาณพารามิเตอร์นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น b_{ij} แทน เมื่อ $i < j$ และ $i = 1, \dots, n-1$ ส่วน $j = 1, \dots, n$

หลักการทางสถิติของกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) ถูกนำมาใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองของสมการถดถอยที่สมมุติฐานขึ้น เมื่อพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองที่สมมุติฐานขึ้นถูกแทนที่ด้วยค่าประมาณ ผลลัพธ์ฟังก์ชันของการตอบสนองถูกทำให้สอดคล้องขึ้น และค่า \hat{Y} ได้เป็น

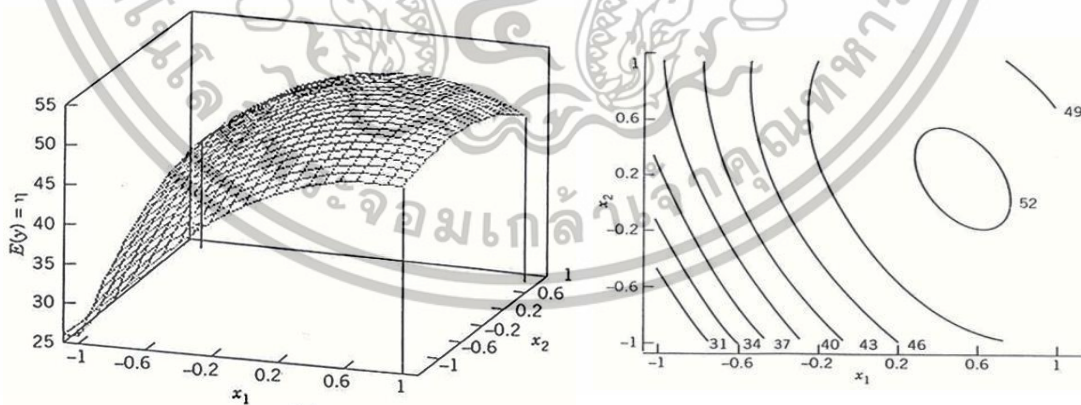
$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n \quad (2.29)$$

สมการ (2.32) เป็นฟังก์ชันการตอบสนองเชิงเส้นตรงที่ถูกทำให้สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนการตอบสนองสำหรับค่าที่ต้องการของตัวแปรเชิงปริมาณ (Independent variables) เมื่อนำฟังก์ชันการตอบสนองที่ถูกทำให้สอดคล้อง (\hat{Y}) มาสร้างกราฟในลักษณะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงปริมาณ ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า Response surface plots หรือ Contour maps

Contour maps ของการตอบสนองมีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นที่ของการตอบสนอง ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สอดคล้องในรูปสมการลำดับที่หนึ่งและรูปแบบสมการลำดับที่สอง จากรูปที่ 2.17 เป็นพื้นที่การตอบสนองของสมการลำดับที่หนึ่ง ส่วนรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นพื้นที่การตอบสนองที่ถูกกำหนดด้วยรูปแบบสมการลำดับที่สอง



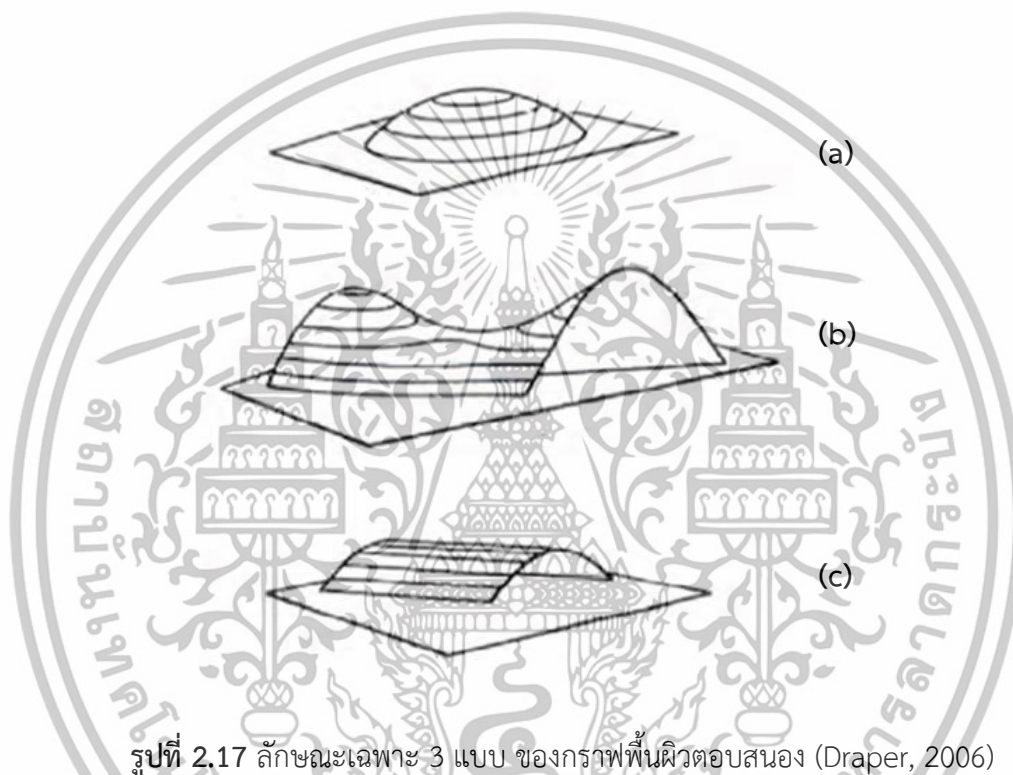
รูปที่ 2.15 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่หนึ่ง (Myers and Montgomery, 1995)



รูปที่ 2.16 เส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองรูปแบบสมการลำดับที่สอง (Myers and Montgomery, 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของกราฟพื้นผิวตอบสนอง สามารถพบลักษณะเฉพาะได้ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ได้แก่ กราฟที่มีจุดให้ค่าสูงสุด (Maximum point) (รูปที่ 2.19a) ซึ่งสามารถทราบจุดตอบสนองสูงสุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองมีสูงสุด กราฟที่เกิดจุดแบบอานม้า (Saddle point) (รูปที่ 2.19b) กราฟลักษณะนี้มีจุดตอบสนองสูงสุดหลายจุด ทำให้ไม่สามารถทราบจุดที่ดีที่สุดต่อการตอบสนองที่ต้องการ และกราฟที่เกิดจุดแบบคงที่ (Stationary ridge) (รูปที่ 2.19c) แสดงว่าค่าที่ใช้มีปริมาณของปัจจัยหนึ่งเหมาะสมในช่วงกว้างที่คงที่ และอีกปัจจัยปริมาณที่เหมาะสมกับค่าการตอบสนอง (Montgomery, 1991; Draper, 2006)

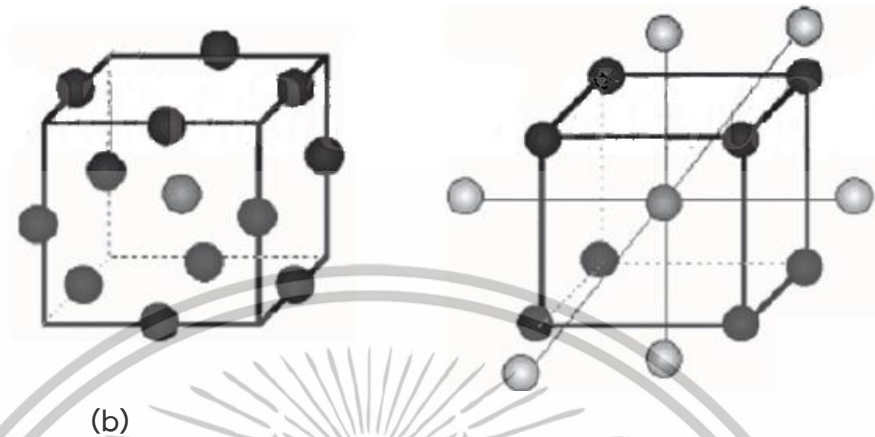


2.8.2 การออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

เป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์เพื่อพัฒนา และหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ หรือใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์เดิม เพื่อหา ลักษณะของคุณภาพ (Quality characteristic) ของผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response) หรือผลลัพธ์ โดยในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์กับปัจจัยการทดลองต้องมีการวางแผน และออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลด้วย (Box et al., 1978)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี full fractional factorial ที่อาศัยค่ากลางของข้อมูลจากระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุดได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีคือ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken

Design (BBD) โดยใช้การกระจายระดับของข้อมูลออกจากศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เพื่อศึกษาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด



รูปที่ 2.18 โมเดลแสดงการกระจายของปัจจัยด้วยแผนการทดลอง Box-Behnken Design (a) และแผนการทดลอง Central Composite Design (b) (Draper, 2006)

2.8.2.1 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) การกำหนดสถานะการทดลองที่ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร ว่าควรมีจำนวนการทดลองกี่การทดลองจึงเหมาะสม และครอบคลุม เช่น ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 3 ตัว จำนวนการทดลองคือ $3^3 = 27$ การทดลอง ดังนั้นหากมีการศึกษาตัวแปร 5 ตัวแปร จำนวนการทดลองคือ $3^5 = 243$ การทดลอง ซึ่งไม่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบันที่มีทรัพยากรจำกัด ทางออกของการแก้ปัญหาคือ การใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ซึ่งเป็นการออกแบบแผนการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงเส้นโค้ง แต่ใช้จำนวนการทดลองไม่มาก โดยทำการเลือกสถานะการทดลองบางการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ รูปแบบที่ได้ยังคงมีผลของตัวแปรหลัก (Main effect) ความสัมพันธ์ของตัวแปร (Interaction) และสมการกำลังสอง (Quadratic terms)

ในการกำหนดค่ารหัส (Code value) ของระดับปัจจัย กำหนดให้ 0 แทนค่ากลาง (Center point) ถ้าทำการทดลองที่ 2 ปัจจัยการทดลองเป็น 2^k คือ 4 ในแต่ละชนิดของปัจจัย ค่ามุม (Factorial point) มีอยู่ 4 จุด ให้ค่า +1 สำหรับค่าสูงสุด และ -1 สำหรับค่าต่ำ และค่าแกน (Axial point) มีอยู่ 4 จุด ให้ค่าเป็น $+\alpha$ และ $-\alpha$ แทนค่าสูงและต่ำตามลำดับ โดยค่า α สามารถหาได้จากรากที่ 4 ของ 2^k เมื่อ k คือจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยค่า α ที่ได้ต้องนำไปคูณกับค่าคงที่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างช่วงการแปรของระดับปัจจัย ดังนั้นการทดลองแบบ CCD จึงมี 5 ระดับ คือ $-\alpha$, -1 , 0 , 1 และ $+\alpha$ ตามลำดับจากค่ามากไปน้อย (Montgomery, 1991)

2.8.2.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวผลตอบสนอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ ข้อดีคือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effect) ผลกระทบกำลังสอง (Quadratic effect) และอันตรกิริยาหรือผลรวม 2 ปัจจัยได้

เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่ทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ และการออกแบบการทดลองแบบ

Box-Behnken มีจำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลง รวมถึงมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) จากรายงานการวิจัยจึงพบว่ามีการใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กับงานด้านอบแห้งจำนวนมาก (สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ภูมินทร์ แจ่มเชื้อ, 2554; Lee et al., 2006; Perez-Francisco et al., 2008)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การอบแห้งอินฟราเรดและการอบแห้งอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

มีงานวิจัยหลายงานที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งให้อัตราการอบแห้งที่สูง และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ Swasdisevi et al. (2007) ทำการอบแห้งกล้วยด้วยรังสีอินฟราเรดแบบสุญญากาศ โดยใช้ความดันสุญญากาศ 5, 10 และ 15 kPa อุณหภูมิ 50, 55 และ 60°C และความหนาของชิ้นวัสดุ 2, 3 และ 4 mm ผลการศึกษาพบว่าความดันสุญญากาศ อุณหภูมิ และความหนาของชิ้นวัสดุมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยอบแห้ง โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ การอบแห้งด้วยความดันสุญญากาศ 5 kPa อุณหภูมิ 50°C และความหนา 2 mm Das et al. (2009) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 5 ระดับ (1509, 2520, 3510, 4520 และ 5514 W/m²) ความหนาของชิ้นวัสดุ 4 ระดับ (3, 6, 12 และ 25 mm) พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีและความหนาของชิ้นวัสดุสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นอยู่ระหว่าง 0.778×10^{-10} ถึง 3.884×10^{-10} m²/s และที่ความเข้มรังสี

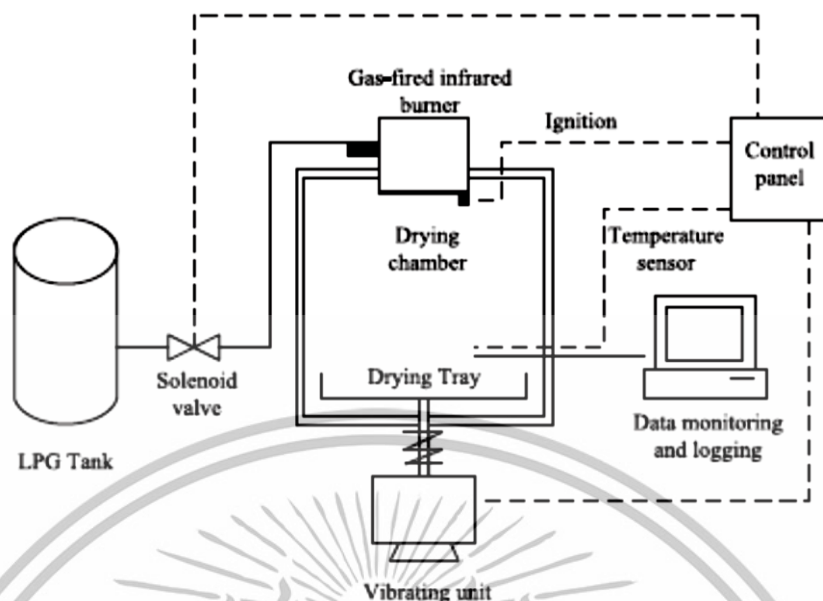
อินฟราเรด 5514 W/m² ความหนาของชิ้นวัสดุ 3 mm มีอัตราการอบแห้งสูงสุด แต่เมื่อใช้วิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งด้วย พบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอินฟราเรด แต่ความหนาของชั้นวัสดุไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง Das et al. (2004) สำหรับการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ (Afzal et al., 1999) โดยที่ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด 0.167, 0.333 และ 0.5 W/cm² พบว่าการเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรด ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง แต่สิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวบาร์เลย์ลดลง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบแห้งที่ความเข้มของรังสี 0.333 W/cm² ทั้งนี้ได้มีการรายงานว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดการระบายความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ออกไป

2.9.2 อิทธิพลของการอบแห้งต่อคุณภาพและสารสำคัญในวัสดุ

นอกจากผลของรังสีอินฟราเรดต่อลักษณะการอบแห้งแล้ว รังสีอินฟราเรดยังมีข้อดีประการสำคัญในแง่ของการเพิ่มปริมาณสารสำคัญในวัสดุที่อบแห้งด้วย มีงานวิจัยหลายงานพบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถกระตุ้นและทำให้สารสำคัญในพืชสมุนไพรและผลไม้มีปริมาณเพิ่มขึ้นได้ Niamnuy et al. (2011) ได้ศึกษาผลกระทบของวิธีการและสภาวะการอบแห้งต่อสารต้านอนุมูลอิสระ และ α -glucosidase ของถั่วเหลือง โดยวิธีการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับลมร้อน ฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไอร้อนยิ่งยวด และอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้ง ดังรูปที่ 2.21 พบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้งทำให้สารต้านอนุมูลอิสระ และ α -glucosidase ของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยวิธีการอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 2.6 อีกทั้งวิธีการอบแห้งนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดด้วย Lee et al. (2006) ศึกษาการให้รังสีอินฟราเรดไกลที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 40 และ 60 min เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 60 min สามารถเพิ่มปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำสกัดจากเปลือกถั่วลิสงได้ถึง 48.83% เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยลมร้อน



รูปที่ 2.19 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการสั่นสะเทือนของถาดอบแห้ง (Niamnuy et al., 2011)

ตารางที่ 2.6 ผลจากการอบแห้งต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและ α -glucosidase ของถั่วเหลือง (Niamnuy et al., 2011)

Sample	Moisture content (% d.b.)	Antioxidant activity		α -glucosidase inhibitory activity (mg acarbose/g dry sample)
		DPPH (μ M Trolox/g dry sample)	FRAP (μ M FeSO ₄ /g dry sample)	
Raw soybean	20.38 \pm 0.11 ^b	11.67 \pm 0.91 ^a	66.70 \pm 2.73 ^a	n.d.
HAFBD 50°C	10.06 \pm 0.12 ^a	12.52 \pm 0.94 ^a	69.32 \pm 3.12 ^a	n.d.
HAFBD 70°C	9.96 \pm 0.10 ^a	14.33 \pm 0.96 ^b	75.43 \pm 2.94 ^b	n.d.
HAFBD 130°C	9.82 \pm 0.07 ^a	15.92 \pm 0.72 ^{cd}	88.34 \pm 5.09 ^c	4.94 \pm 0.50 ^c
HAFBD 150°C	10.04 \pm 0.14 ^a	16.73 \pm 0.57 ^{de}	101.15 \pm 3.97 ^d	1.71 \pm 0.35 ^a
GFIR-HAVD 50°C	9.87 \pm 0.12 ^a	14.55 \pm 0.63 ^b	76.77 \pm 4.01 ^b	n.d.
GFIR-HAVD 70°C	9.85 \pm 0.05 ^a	15.15 \pm 0.52 ^{bc}	75.43 \pm 2.94 ^b	n.d.
GFIR-HAVD 130°C	9.87 \pm 0.10 ^a	16.92 \pm 0.26 ^{de}	117.39 \pm 5.07 ^e	11.87 \pm 0.79 ^e
GFIR-HAVD 150°C	9.97 \pm 0.10 ^a	17.80 \pm 0.54 ^e	126.49 \pm 4.41 ^f	8.59 \pm 0.64 ^d
SSFBD 130°C	9.83 \pm 0.11 ^a	16.20 \pm 0.47 ^d	104.90 \pm 3.19 ^d	7.73 \pm 0.71 ^d
SSFBD 150°C	9.71 \pm 0.15 ^a	17.02 \pm 0.65 ^{de}	113.54 \pm 2.25 ^e	3.68 \pm 0.43 ^b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ Park et al. (2009) พบว่าในระหว่างกระบวนการทำแห้งชาเขียว เมื่อใช้ความร้อนจากอินฟราเรดไกลช่วยเพิ่มปริมาณฟีนอลิก จาก 116.30 เป็น 171.77 mg/g, ฟลาโวนอล จาก 17.54 เป็น 24.76 mg/g และกรดแอสคอร์บิก จาก 3.07 เป็น 4.20 mg/g เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนด้วยลมร้อน อีกทั้งยังสามารถรักษากลิ่นหอมและรสชาติได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2007) ซึ่งใช้วิธีการฉายรังสีอินฟราเรดในโสม ที่อุณหภูมิ 90, 100 และ 110°C เวลาในการฉายรังสี 0, 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่า การฉายรังสีอินฟราเรดสามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากโสมได้ โดยที่การฉายรังสีที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 40 นาที ค่าของ Total phenolic contents (TPC) และ Puerarin เพิ่มขึ้นจาก 0.096 เป็น 0.148 g/mL และ 66.0 เป็น 77.8 ppm ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ฉายรังสี

2.9.3 เพชรสังฆาต

เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.) ประกอบด้วยสารประกอบทางเคมีหลายชนิด เช่น วิตามินเอ วิตามินซี แคลเซียมออกซาเลต ไตรเทอร์พีน ไตรเทอร์พีนอยด์ ฟลาโวนอล ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สารประกอบทางเคมีของเพชรสังฆาต (Thiangtham, 2003)

Type of compound	Compounds	Part of the plant	% Content found
Triterpene	δ-amyrin	Whole plant	0.14000%
	δ-amyrone	Whole plant	0.10000%
	Epi-friedelinol	Whole plant	0.00024%
	Lupenone	Whole plant	0.00022%
	Onocer-7-ene-3-	Whole plant	0.00600%
	alpha-21-beta-diol		
	Onocer-7-ene-3-	Whole plant	0.00300%
	beta-21-alpha-diol		
	Onocer-8-ene-3-	Whole plant	0.00225%
	beta-21-alpha-diol		
Flavonol	Epi-friedelinol	Whole plant	0.00024%
	Kaemferol	Stem	0.00030%
	Quercetin	Stem	0.00210%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาพิษเคมีของเพชรสังฆาตแห้งที่ความชื้น 10% พบว่ามีไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เถ้า ไฟเบอร์ 0.58, 0.17, 1.16, 10, 0.1% ตามลำดับและมีพลังงาน 3.43 kcal/100 g (Singhania et al., 2007) ในส่วนของการศึกษาเพื่อแยกสารในกลุ่ม flavonoid ที่เป็นสาร Quercetin โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Quercetin ได้มีการศึกษาโดยใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย Column C-18 ตัวทำละลายเคลื่อนที่คือ 0.05% Ortho-phosphoric acid และ Acetonitrile อัตราส่วน (65 : 35) UV detector ที่ 260 nm พบ peak ของสาร Quercetin ปรากฏที่ 10.68 นาที และสาร Ethyl paraben ซึ่งถูกใช้เป็น Internal standard ปรากฏที่ 13.68 นาที ความจำเพาะเจาะจง ภาวะเชิงเส้น ความแม่นยำ ความถูกต้อง และความเหมาะสมของระบบ พบว่า ภาวะเชิงเส้นของสาร Quercetin ในระหว่างความเข้มข้น 0.3-1.5 $\mu\text{g/ml}$ มีค่า $R^2 = 0.9996$ (Thiangtham, 2003)

ในตำรายาไทยได้บอกถึงสรรพคุณของเพชรสังฆาตโดยใช้ส่วนรากรักษากระดูกแตกหัก ส่วนลำต้นมีสรรพคุณแก้หูดน้ำหนวก ประจำเดือนไม่ปกติ และริดสีดวงทวาร ส่วนเถาสดของเพชรสังฆาตมีสรรพคุณขับลมในลำไส้ แก้จุกเสียด ท้องอืดท้องเฟ้อ และริดสีดวงทวาร (อังคณา หิรัญสาตี และคณะ, 2551) ปัจจุบันมีการรับประทานเพชรสังฆาตโดยใช้เป็นรูปแบบผงบดแห้งและบรรจุอยู่ในแคปซูล เพื่อใช้เป็นยารักษาโรคริดสีดวงกันเป็นจำนวนมาก จากการศึกษาประสิทธิผลและผลข้างเคียงของการใช้สมุนไพรเพชรสังฆาตในผู้ป่วยโรคริดสีดวงทวารระยะเฉียบพลัน จำนวน 570 คน โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ได้รับยาที่มีส่วนผสมของฟลาวานอยด์ (Daflon 500 mg/เม็ด) กลุ่มที่ได้รับสมุนไพรเพชรสังฆาต (500 mg/เม็ด) และกลุ่มที่ได้รับยาหลอก ผลการศึกษาพบว่าผู้ป่วยในทุกกลุ่มส่วนใหญ่ อาการดีขึ้นหลังการให้ยาครบ 7 วัน ประสิทธิภาพของการรักษาในผู้ป่วยทุกกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน และไม่มีผลข้างเคียงเกิดขึ้น สรุปได้ว่าเพชรสังฆาตให้ผลในการรักษาโรคริดสีดวงทวารในระยะเฉียบพลัน ไม่แตกต่างจากยาที่มีส่วนผสมของฟลาวานอยด์ (Panpimanmas et al., 2010)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรด ร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-VIR) การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นด้วยการ ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง VC-VIR ขนาดห้องปฏิบัติการจากนั้นแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัย ออกเป็น 2 หัวข้อหลักได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบด สภาวะสุญญากาศ และ ความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบ อินฟราเรด และการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VC-VIR โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยมีรายละเอียดในการ ดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้ สภาวะสุญญากาศ

กำหนดสมบัติสำหรับการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งโดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

- ความชื้นเริ่มต้นของเพชรสังฆาต (MC_i) 10 g water/g dry matter
- ความชื้นสุดท้ายของเพชรสังฆาต (MC_f) 0.1 g water/g dry matter
- น้ำหนักเพชรสังฆาตที่ใช้ในการอบแห้ง 270 g
- อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง 100°C
- อุณหภูมิเพชรสังฆาต 30°C

3.1.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย

จากข้อมูลเบื้องต้นเพชรสังฆาตมีความชื้นเริ่มต้น 10 g water/g dry matter นั่นคือใน เพชรสังฆาต 11 g มีน้ำ 10 g และมีน้ำหนักแห้ง 1 g ดังนั้นปริมาณน้ำเริ่มต้นคำนวณได้จาก

$$\text{น้ำเริ่มต้น} = \frac{10}{11} \text{ g}$$

ถ้า Whole weight 270 g

$$\text{น้ำที่มีอยู่ในเพชรสังฆาต} = \frac{10}{11} \times 270$$

$$\text{น้ำที่มีอยู่ในเพชรสังฆาต} = 245.45 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักแห้ง} &= 270-245.45 \text{ g} \\ &= 24.55 \text{ g} \end{aligned}$$

หลังการอบแห้งเพอร์สัฆาตมีความชื้น 0.1 g water/g dry matter ดังนั้นปริมาณน้ำคงเหลือคำนวณได้จาก

$$\text{น้ำคงเหลือ} = \frac{0.1}{1} \text{ g}$$

$$\text{ถ้าน้ำหนักแห้ง } 24.55 \text{ g}$$

$$\text{น้ำคงเหลือในเพอร์สัฆาต} = \frac{0.1}{1} \times 245.55$$

$$\text{น้ำคงเหลือในเพอร์สัฆาต} = 2.45 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้นน้ำที่ต้องระเหยออก} = 245.45-2.45 \text{ g}$$

$$\text{น้ำที่ต้องระเหยออก} = 243 \text{ g}$$

3.1.2 พลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้ง

ในการศึกษาความต้องการพลังงานสำหรับการอบแห้งเพอร์สัฆาต ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของเพอร์สัฆาตโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (DSC 3, Mettler-Toledo Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ค่าที่ได้เท่ากับ 3.89 kJ/kg.°C ดังนั้นพลังงานขั้นต่ำที่ต้องใช้สำหรับการอบแห้งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ต้องการ} &= \text{ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)} + \text{ความร้อนแฝง (Latent Heat)} \\ &= mC_p \Delta t + mL \\ &= [(0.27 \text{ kg}) \times (3.89 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}) \times (100-30^\circ\text{C})] + [(0.243 \text{ kg}) \times (2257.2 \text{ kJ/kg})] \\ &= 73.52 + 548.49 \text{ kJ} \\ &= 622.02 \text{ kJ} \end{aligned}$$

กำหนดค่าสูญเสียความร้อนเนื่องจากการทำงานของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 30% ของค่าพลังงานที่คำนวณได้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นพลังงานที่ต้องการ} &= 622.02+186.60 \text{ kJ} \\ &= 808.62 \text{ kJ} \end{aligned}$$

กำหนดให้เวลาที่ต้องการอย่างน้อยที่สุดในการอบแห้งเพอร์สัฆาตเท่ากับ 30 min

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นพลังงานขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการอบแห้ง} &= 808.62 \text{ kJ} / 1800 \text{ s} \\ &= 0.449 \text{ kJ/s หรือ } 449 \text{ W} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากในการทำการวิจัยนี้มีการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิความร้อนในหลายระดับ ซึ่งมีความจำเป็นต้องเลือกใช้ขนาดกำลังไฟฟ้าของแท่งรังสีอินฟราเรดและขดลวดความร้อนที่สูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขการทดลองที่ต้องการ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้แท่งรังสีอินฟราเรดขนาดกำลังไฟฟ้า 800 W เส้นผ่าศูนย์กลาง 17 mm ยาว 0.3 m อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณพื้นผิว 750°C (CF Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) จำนวน 2 หลอด เพื่อใช้เป็นต้นกำเนิดรังสีอินฟราเรดของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศและเลือกใช้แท่งขดลวดความร้อนแบบครีบน้ำตาลกำลังไฟฟ้า 1000 W เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm ยาว 0.4 m (FU-04100, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) จำนวน 2 แท่ง เพื่อใช้สำหรับเครื่องอบแห้งสำหรับการทดลองวิจัยนี้

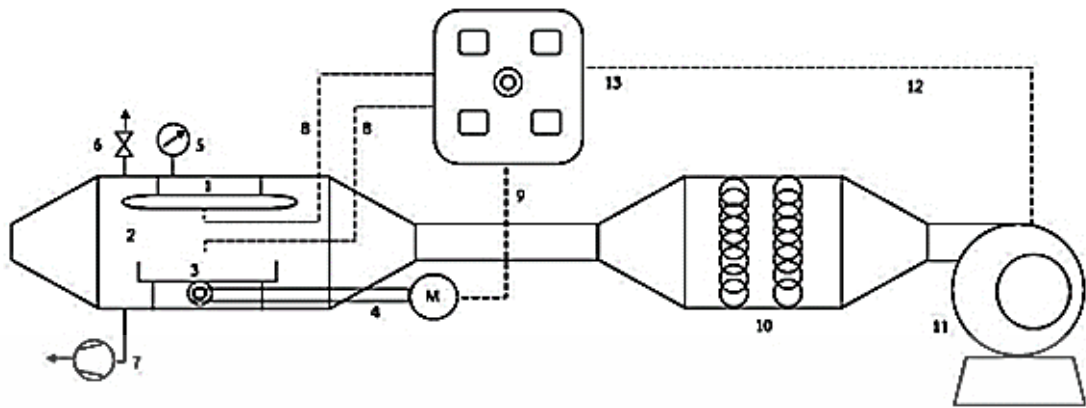
3.1.3 ส่วนประกอบและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งมีความยาวตลอดตัวเครื่อง 2.35 m ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ห้องอบแห้ง (Drying chamber) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 m ยาว 0.6 m มีฝาสำหรับนำวัสดุเข้า-ออก จากห้องอบแห้ง ถาดวางวัสดุอบแห้งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.20 m ยาว 0.40 m สูง 0.05 m และแบ่งเป็นช่องเล็กๆ 8 ช่อง แต่ละช่องมีขนาดกว้าง 0.10 m ยาว 0.10 m สามารถวางวัสดุที่ใช้ทดลองอบแห้งแบบชั้นบางได้ครั้งละประมาณ 270 g โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทั้งหมดทำมาจาก Stainless steel ซึ่งประกอบไปด้วยชุดการทำงานที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง 4 ชุดการทำงาน

3.1.4 ชุดควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้า

เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าทั้งหมดของเครื่องอบแห้ง ซึ่งประกอบไปด้วย

1. สวิตช์นิรภัย (Emergency Switch) ทำหน้าที่ตัด-ต่อ กระแสไฟฟ้าในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉิน
2. ตัวควบคุมอุณหภูมิ และควบคุม Process (Temperature and Process Controllers) มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิผิวของหลอดอินฟราเรด อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ความเร็วรอบของการสั่นสะเทือน และความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม
3. ชุดควบคุมระดับอุณหภูมิแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative Controller)
4. สวิตช์ ปิด-เปิดการทำงานของลมร้อน และอินฟราเรด



(1) หลอดรังสีอินฟราเรด; (2) ห้องอบแห้ง; (3) ถาดอบแห้ง; (4) ชุดกลไกการสร้างการสั่นสะเทือน; (5) มาตรวัดความดันสุญญากาศ; (6) วาล์วควบคุมความดันสุญญากาศ; (7) ปั๊มสุญญากาศ; (8) เทอร์โมคัปเปิ้ล; (9) สายส่งสัญญาณควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของชุดการสั่นสะเทือน; (10) ชุดขดลวดความร้อน; (11) พัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง; (12) สายส่งสัญญาณควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของชุดมอเตอร์พัดลม; (13) ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน

รูปที่ 3.1 ระบบอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vibration assisted infrared drying under vacuum, VC-VIR)



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.1 ชุดการทำงานอินฟราเรด

ชุดการทำงานอินฟราเรด ประกอบไปด้วยหลอดอินฟราเรด (CF Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ขนาด 800 W จำนวน 2 หลอด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 cm ยาว 70 cm ค่าการแผ่รังสี (ϵ) เท่ากับ 0.9 ติดตั้งอยู่บนเรือลาดอบแห้งโดยมีระยะห่าง 20 cm มีเทอร์โมคัปเปิ้ล (type K, Lega model AK-01, Lega Cooperation Co., Ltd., Bangkok, Thailand) ติดตั้งที่ผิวของหลอดอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิผิวหลอดขณะทำงาน

3.1.4.2 ชุดกลไกสร้างการสั่นสะเทือนของวัสดุ

ชุดกลไกการสร้างการสั่นสะเทือนของวัสดุ ประกอบไปด้วยเพลลาซึ่งส่วนปลายของเพลลาต้านหนึ่งจะติดตั้งลูกเบี้ยว แอมพลิจูด 5 mm ส่วนปลายอีกด้านจะต่อเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง การทำงานของการสั่นสะเทือนเกิดจากการหมุนของเพลลาซึ่งรับกำลังจากมอเตอร์จากนั้นส่งถ่ายกำลังไปขับลูกเบี้ยวซึ่งจะทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงไปยังลาดอบแห้งซึ่งมีขดลวดสปริงทำรองรับอยู่ให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง วัสดุจึงสามารถเกิดการสั่นสะเทือนได้ โดยสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้รอบของการสั่นสะเทือน 800 rpm

3.1.4.3 ชุดขดลวดความร้อนแบบครีป

ลมร้อนเกิดจากการทำงานของขดลวดความร้อนแบบครีป ขนาด 4 kW (Sangi Electric model FU Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) โดยมีพัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง ขนาด 0.5 hp เป่าผ่านขดลวดเพื่อทำให้เกิดการไหลของอากาศร้อนไปยังห้องอบแห้ง สามารถทำความเร็วลมสูงสุดในห้องอบแห้งได้ 14.38 m/s

3.1.4.4 ชุดควบคุมความดันภายในห้องอบแห้ง

ปั๊มสุญญากาศที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปั๊มสุญญากาศแบบ water ring (ENWA 1EN-030-01, Norta MIT GmbH, Hamburg, Germany) มีอัตราการไหล 108 m³/h สามารถดูดอากาศออกได้ต่ำสุด 33 mbar ความเร็วรอบ 1450 rpm ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 Phase 220 V 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ระบบสุญญากาศที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการดูดเอาอากาศออกจากห้องอบแห้ง โดยใช้วาล์วควบคุมระดับสุญญากาศให้ได้ตามที่ต้องการ โดยในขณะทำการทดลองจะต้องเปิดการทำงานของปั๊มสุญญากาศตลอดเวลาเพื่อรักษาระดับของความดันสุญญากาศให้คงที่ตลอดการทดลอง และเป็นการดูความชื้นที่ระเหยจากวัสดุอบแห้งออกจากห้องอบแห้ง

3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

เพชรสังฆาต (*Cissus quadrangularis* Linn.) จากสวนสมุนไพร จ.ปราจีนบุรี นำมาล้างด้วยน้ำ เพื่อเอาสิ่งเจือปนออก วางไว้ที่แห้งที่อุณหภูมิห้อง หั่นส่วนหัว และทำยอกเพื่อให้มีขนาดความหนา เท่ากันตลอดแนว แล้วจึงตัดให้มีขนาดความหนาตามที่ต้องการศึกษาได้แก่ 5, 10 และ 15 mm ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ขนาดถุงละ 1 kg นำไปเก็บรักษาในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ $4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h เพื่อให้เพชรสังฆาตเกิดการถ่ายเทความชื้นเข้าสู่ภาวะสมดุล (Ozbek and Dadali, 2007) เมื่อจะทำการทดลองนำเพชรสังฆาตออกจากตู้เย็น และวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 h



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเพชรสังฆาตที่ใช้ในการศึกษาที่ตัดส่วนหัว และทำยอก และหั่นให้มีขนาดความหนา 5, 10 และ 15 mm

3.3 แผนการทดลอง

จากรูปที่ 3.5 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อหลักดังแสดงในหัวข้อวัตถุประสงค์คือ การศึกษาอิทธิพลของการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VC-VIR อย่างไรก็ตามเพื่อแสดงถึงการพัฒนาเทคนิคและกระบวนการอบแห้งเพชรสังฆาตที่จะเกิดขึ้นในงานวิจัยจึงได้มีการทดลองเบื้องต้น (Preliminary experiment) เพื่ออบแห้งเพชรสังฆาตด้วยเทคนิคที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ การอบแห้งแบบลมร้อน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้วิธีการและสภาวะในการอบแห้งแบบลมร้อนที่เหมาะสมสำหรับเป็นสิ่งทดลองอ้างอิง (Reference treatment) โดยรายละเอียดในการทดลองเบื้องต้นแสดงในหัวข้อ 3.3.1 สำหรับแผนการทดลองตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย คือ วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด และวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อศึกษาสภาวะที่

เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VC-VIR โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ
พินผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งแสดงในหัวข้อ 3.3.2 และ 3.3.3 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาตแห้งสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง

การทดลองเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อจำลองการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการทดลองที่อุตสาหกรรมใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการซึ่งผลิตวัตถุดิบให้กับโรงพยาบาลอภัยภูเบศรพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ประมาณ 40-60°C อย่างไรก็ตามเพื่อลดความมือคุดในการเตรียมตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิลมร้อนที่ส่งผลดีที่สุดต่อคุณภาพของเพชรสังฆาตที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อนโดยมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองคือ

นำเพชรสังฆาตความหนา 5 mm มาอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้เครื่องอบแห้ง VC-VIR ที่ทำงานในโหมดลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100°C ความเร็วของลมร้อน 1 m/s โดยนำเพชรสังฆาตจำนวน 270 g วางในถาดอบแห้งในลักษณะเป็นชั้นเดียว (Single layer) ในระหว่างการอบแห้ง เพชรสังฆาตจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความชื้นที่ลดลงในระหว่างกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity, D_{eff}) และลักษณะการอบแห้งดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 g water/g dry matter เมื่อได้เวลาที่เหมาะสมซึ่งประเมินจากคุณภาพของเพชรสังฆาตได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสี ความหนาแน่นมวลรวม การวิเคราะห์การหดตัว ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารเคอซีทิน รวมทั้งอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากการทดลองนี้ผู้วิจัยสามารถคัดเลือกตัวอย่างเพชรสังฆาตที่อบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิงได้

3.3.1.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ นำเสนอข้อมูลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบด สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด

ภายใต้การศึกษานี้เป็นการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง 4 วิธีการได้แก่ 1) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) 2) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่น (Vibratory bed assisted infrared, VIR) 3) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum infrared, VC-IR) 4) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vibratory bed assisted vacuum infrared, VC-VIR) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบดและสภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งต่อการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรด โดยกำหนดความหนาของชั้นวัสดุที่ 5, 10 และ 15 mm และกำหนดความเข้มของรังสีอินฟราเรด 7496 W/m^2 สำหรับการอบแห้งในทุกระดับการทดลอง โดยที่การอบแห้งแบบ IR และ VIR ซึ่งภายในห้องอบแห้งไม่ได้อยู่ในสภาวะสุญญากาศแต่จะใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์ในการระบายอากาศ โดยกำหนดความเร็วลมที่ 1 m/s สำหรับการอบแห้งแบบ VC-IR และ VC-VIR จะเป็นการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งจะควบคุมความดันที่ 5 kPa abs . ในวิธีการทดลองที่ใช้การสะท้อนของเบตรุ่ม (VIR และ VC-VIR) จะกำหนดความเร็วรอบการสั่นสะท้อนของมอเตอร์ที่ 800 rpm โดยสภาวะในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองสำหรับสิ่งทดลองต่างๆ

สิ่งทดลอง	การสั่นสะท้อนของเบต	สภาวะสุญญากาศ	ความหนาของวัสดุ
IR	×	×	5, 10 และ 15 mm
VIR	✓	×	
VC-IR	×	✓	
VC-VIR	✓	✓	

ทำการทดลองโดยการนำเพชรสังฆาตซึ่งตัดให้มีขนาดตามที่กำหนดคือ 5, 10 และ 15 mm โดยวางเพชรสังฆาต 270 g ในถาดอบแห้งให้อยู่ในลักษณะเป็นชั้นเดียว (Single layer) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเพชรสังฆาตจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity, D_{eff}) และลักษณะการอบแห้งดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.10 \text{ g water/g dry matter}$ จากนั้นทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของเพชรสังฆาตได้แก่ ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารเคอซิทิน รวมทั้งอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

3.3.2.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ นำเสนอข้อมูลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะท้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-VIR)

วิธีพินิจพิเคราะห์ เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

หาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศต่อปริมาณพิกษเคมีของเพชรสังฆาตแห้ง โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกทำการวิเคราะห์ปริมาณสารเคอควิตินซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีอยู่ในเพชรสังฆาตซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพทางเคมีได้เป็นอย่างดีเป็นตัวแปรตอบสนอง (Quercetin, Y) โดยใช้โปรแกรม Unscrambler X 10.3 นอกจากนี้ ยังมีกรวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง (หัวข้อ 3.4) สำหรับสิ่งทดลองต่างๆ ด้วย

3.3.3.1 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลองเป็นแบบ Box Behnken design แบบ 3 ปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 3.1 แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มรังสีอินฟราเรด (X_1) ความดันสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง (X_2) และความหนาของเพชรสังฆาต (X_3) โปรแกรมจะทำการประมวลผล ทำให้ได้สิ่งทดลองจำนวน 15 สิ่งทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 เป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 สิ่งทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแสดงดังสมการ (3.1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.1)$$

เมื่อ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ X_i คือ ตัวแปรอิสระปัจจัยที่ต้องการศึกษาในการอบแห้ง

ตารางที่ 3.2 ปัจจัย ระดับและขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ตัวแปร	รหัส	ระดับค่าตัวแปร		
		-1	0	1
IR (W/m ²)	X_1	4576	6036	7496
Pressure (kPa abs.)	X_2	5	15	25
Thickness (mm)	X_3	5	10	15

ตารางที่ 3.3 สิ่งทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

สิ่งทดลอง	ความเข้มรังสีอินฟราเรด (W/m ²)	ความดันภายในห้องอบแห้ง (kPa abs)	ความหนาวัสดุ (mm)
12	4576 (-1)	5 (-1)	10 (0)
8	7496 (1)	5 (-1)	10 (0)
13	4576 (-1)	25 (1)	10 (0)
3	7496 (1)	25 (1)	10 (0)
1	4576 (-1)	15 (0)	5 (-1)
7	7496 (1)	15 (0)	5 (-1)
2	4576 (-1)	15 (0)	15 (1)
4	7496 (1)	15 (0)	15 (1)
11	6036 (0)	5 (-1)	5 (-1)
15	6036 (0)	25 (1)	5 (-1)
5	6036 (0)	5 (-1)	15 (1)
10	6036 (0)	25 (1)	15 (1)
6	6036 (0)	15 (0)	10 (0)
9	6036 (0)	15 (0)	10 (0)
14	6036 (0)	15 (0)	10 (0)

3.3.3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อตรวจสอบความผันแปรที่ได้จากแบบจำลองจะใช้วิธี Analysis of variance (ANOVA) การทดสอบนี้ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จากค่า p-value ค่าการทดสอบ Lack of Fit และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y ที่สามารถอธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไรถ้า R^2 มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น

ในการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณสารเคอซิทีนระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลอง. ใช้วิธีการทดสอบสมมุติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างหนึ่งกลุ่มกับค่ามาตรฐานโดยมีสมมุติฐานคือ $H_0 : \mu =$ ค่ามาตรฐาน และ $H_0 : \mu \neq$ ค่ามาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

การคำนวณหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเพชรสังฆาต โดยการนำเพชรสังฆาตจำนวน 5 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 29.57 ml นำไปอบด้วยตู้อบแห้งลมร้อน (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2005) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาความชื้นโดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการที่ (3.2)

$$M = \frac{M_w - M_d}{M_d} \quad (3.2)$$

เมื่อ M , M_w และ M_d คือ ความชื้นของเพชรสังฆาต, น้ำหนักเริ่มต้น (g) และ น้ำหนักสุดท้ายของเพชรสังฆาต (g) ตามลำดับ

นำข้อมูลค่าความชื้นจากการทดลองหาที่เวลาใดๆ มาคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น และ อัตราการอบแห้งได้ จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.3)$$

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

เมื่อ M_i , M_t , M_e และ $M_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นเริ่มต้น (g water/g dry matter), ความชื้นที่เวลาใดๆ (g water/g dry matter), ความชื้นสมดุลของวัสดุ (g water/g dry matter), ความชื้นที่เวลา $t+\Delta t$ และ เวลาในการอบแห้ง (min) ตามลำดับ ในการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตนี้เป็นการทดลองอบแห้งโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถกำหนดให้ค่า $M_e = 0$ เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถลดความชื้นได้จนเพชรสังฆาตมีความชื้นสมดุลที่ต่ำมาก (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011)

3.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุชีวภาพในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเกิดขึ้นตามลักษณะการแพร่กระจายความชื้นตามที่อธิบายโดยกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's second law) การแพร่กระจายความชื้นที่ได้จากกฎของฟิกส์แสดงดังสมการ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.5)$$

สมการ 3.5 ได้มีการพัฒนาโดย Crank (1975) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะสมมาตร จากสมมติฐานที่ว่าซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การแพร่ความชื้นไปในทิศทางมิติเดียว ไม่เกิดการหดตัวระหว่างกรอบแห้ง อุณหภูมิและค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ และไม่คิดความต้านทานภายนอกวัสดุ ชี้นของเพชรสังฆาตที่ตัดออกมีลักษณะเป็นระนาบยาวอนันต์จะได้ดังสมการ 3.6 (Deng et al., 2018)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งหมายถึงเทอมของกลไกการส่งผ่านความชื้นทั้งหมดในวัสดุตัวอย่างที่อบแห้ง (m^2/s) และ L คือ ครึ่งของความหนาวัสดุ (m)

จากสมการ (3.6) มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้ายๆ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ดังนั้นสามารถตัดเทอมท้ายๆ ออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก ($n = 0$) ซึ่งคำตอบที่ได้ อาจจะไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก จึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุแผ่นระนาบได้ดังสมการ 3.7

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.7)$$

สมการ 3.7 สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายโดยเขียนให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติได้ดังดังนี้

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (3.8)$$

ค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผลโดยทั่วไปสามารถหาได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ ได้จากการทดลองในรูปของลอการิทึมของตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) เปรียบเทียบกับเวลา (t) จะได้ความชันของเส้นกราฟซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการแพร่ความชื้นประสิทธิผล ดังต่อไปนี้

$$D_{\text{eff}} = -\frac{\text{Slope}4L^2}{\pi^2} \quad (3.9)$$

3.6 การวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน

พลังงานทั้งหมดที่ใช้สำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาตของแต่ละการทดลองทำการทดลองโดยการวัดค่าการใช้พลังงานด้วยเครื่องวัดพลังงานมัลติฟังก์ชัน (KM-06-N, Primus Company Limited, Bangkok, Thailand) ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ที่รายงานในงานวิจัยนี้เป็นพลังงานที่ต้องการในการระเหยน้ำจำนวน 1 kg ออกจากวัสดุ ดังนั้นหน่วยของการใช้พลังงานจำเพาะจึงแสดงเป็น kWh/kg ดังแสดงสมการ

$$\text{SEC} = E_t / W_0 \quad (3.10)$$

เมื่อ E_t คือ ความต้องการพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kWh) และ W_0 คือ น้ำหนักของน้ำที่ระเหยออก (kg)

3.7 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง

3.7.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างสีโดยรวม

ในงานวิจัยนี้ทำการวัดสีของเพชรสังฆาตอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Spectrophotometer (ColorFlex, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) โดยทำการวัดค่าสีในระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $L^*(100)$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $L^*(0)$ แสดงถึงสีดำ ในแกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีเขียวจาก $a^*(-60)$ ไปจนถึงสีแดง $a^*(+60)$ ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน $b^*(-60)$ ไปจนถึงสีเหลือง $b^*(+60)$ และคำนวณค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total color difference, ΔE) สำหรับงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยทำการทดลองเพื่อหาความแตกต่างสีโดยรวมเปรียบเทียบกับเพชรสังฆาตสด โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ (3.11)

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3.11)$$

3.7.2 การวิเคราะห์ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวม

เพชรสังฆาตที่ผ่านการอบแห้งสามารถหาได้โดยอาศัยหลักการแทนที่ในของเหลว โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ Toluene ซึ่งมีความหนาแน่น 0.8669 g/cm^3 ปริมาตรและความหนาแน่นมวลรวมของเพชรสังฆาตหลังการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.12) และสมการที่ (3.13) ตามลำดับ

$$V = \frac{m_{hs} - m_h}{\rho_h} \quad (3.12)$$

$$\rho_h = \frac{m_s}{V} \quad (3.13)$$

เมื่อ m_h , m_{hs} , m_s และ ρ_h คือ มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย Toluene (g), มวลของภาชนะที่บรรจุด้วย Toluene และตัวอย่างเพชรสังฆาต (g), มวลของเพชรสังฆาต (g) และ ความหนาแน่นของ Toluene (g/cm^3)

3.7.3 การวิเคราะห์การหดตัว

การหดตัวของเพชรสังฆาตอบแห้งแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเพชรสังฆาตหลังการอบแห้งเปรียบเทียบกับเพชรสังฆาตสด โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.14)

$$\% \text{Shrinkage} = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \quad (3.14)$$

เมื่อ V_i , V คือ ปริมาตรของเพชรสังฆาตสด (cm^3) และ ปริมาตรของเพชรสังฆาตหลังอบแห้ง (cm^3)

3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเพชรสังฆาตอบแห้ง

3.8.1 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Contents, TPC) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent (Chen et al. 2017) โดยนำเพชรสังฆาตแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆมาบด และร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 180 จากนั้นนำผงเพชรสังฆาตแห้งน้ำหนัก 0.2 g มาสกัดด้วย Methanol 70% ปริมาตร 5 ml ที่มีอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 h ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture (G-560 E, Scientific Industries, Inc., Bohemia, NY, USA) เป็นเวลา 5 min และนำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 3500 rpm เป็นเวลา 10 min นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan) ที่ความยาวคลื่น 765 nm และรายงานค่าปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดโดยแสดงผลเป็นค่า มิลลิกรัมของกรดแกลลิกในตัวอย่างน้ำหนักแห้ง 1 กรัม (mg GAE/g dry matter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 ปริมาณเคอวซีทิน

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณเคอวซีทินโดยใช้เครื่องมือ High Performance Liquid Chromatography, HPLC (SPD-10A, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Thiangtham (2003) โดยกระบวนการแยกสารประกอบที่สนใจจะเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) หรือ คอลัมน์ (Column) กับเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ซึ่งจะถูกแยกออกมาในเวลาที่แตกต่างกัน สารผสมที่อยู่ในตัวอย่างสามารถถูกแยกออกจากกันได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้ดีของสารนั้น กับเฟสที่เคลื่อนที่ หรือ เฟสที่อยู่กับที่โดยสารประกอบตัวไหนที่สามารถเข้ากันได้ดี กับเฟสที่เคลื่อนที่ โดยสารที่ถูกแยกออกมาได้นี้จะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) และสัญญาณที่บันทึกได้จากตัวตรวจวัดจะมีลักษณะเป็นพีค ซึ่งจะเรียกว่าโครมาโตแกรม (Chromatogram) ตัวอย่างที่เตรียมได้จะนำมาวิเคราะห์ปริมาณเคอวซีทินโดยใช้คอลัมน์ 18 ที่ความยาว \times เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $4.6 \times 250 \text{ mm}^2$ ขนาดอนุภาค $5 \mu\text{m}$ โดยใช้ Ortho-phosphoric acid: acetonitrile 0.05% เป็นตัวทำละลายหรือเฟสเคลื่อนที่สัดส่วน 65:35 (v/v) ที่อัตราการไหล 1 mL/min



บทที่ 4

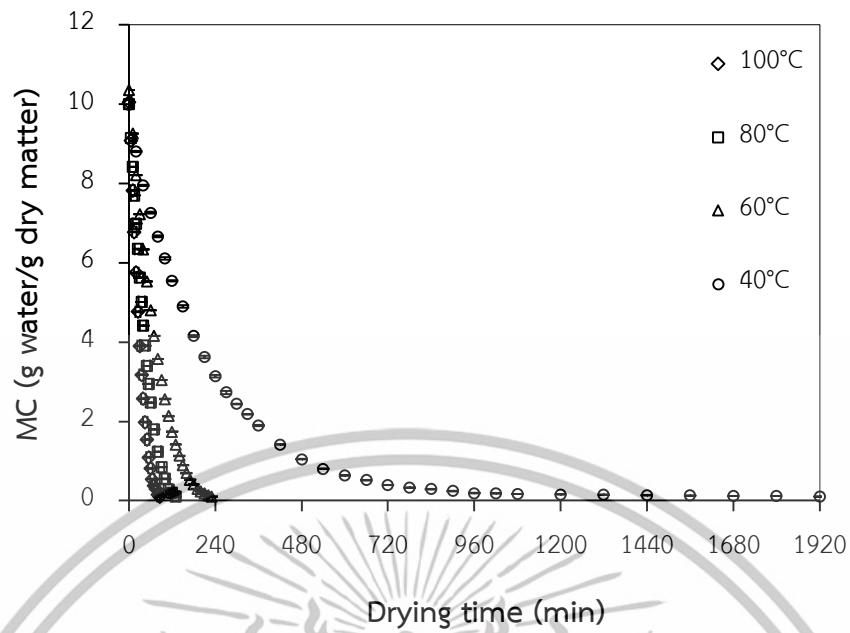
ผลการทดลอง

4.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง

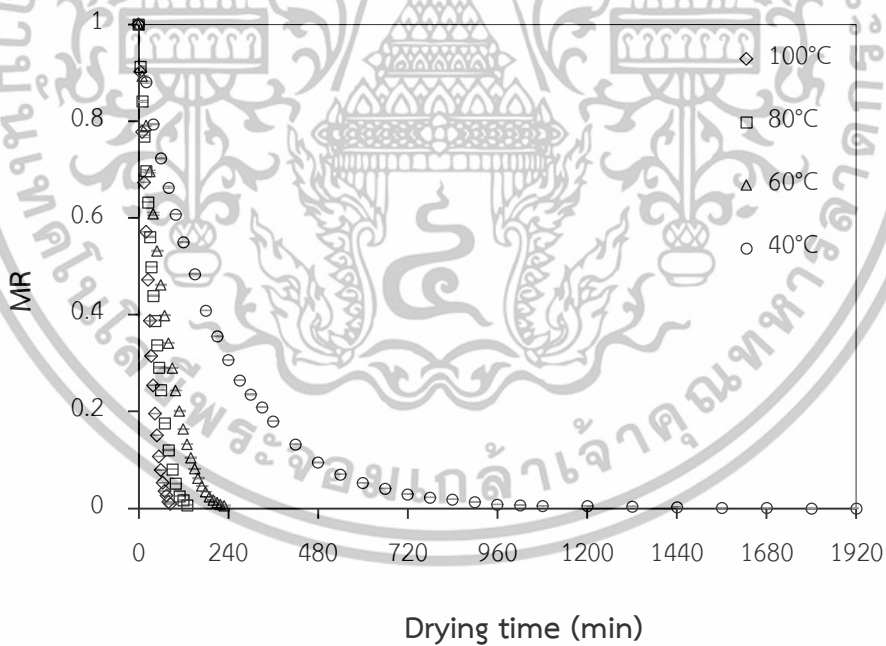
4.1.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต

เพชรสังฆาตที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.10 ± 0.15 g water/g dry matter ทำการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.10 ± 0.02 g water/g dry matter อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100°C ที่ระดับความเร็วลมคงที่ 1 ± 0.2 m/s พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เท่ากับ 1920, 230, 130 และ 85 min ตามลำดับ ที่ระดับอุณหภูมิ 100°C ซึ่งเป็นระดับที่มีความร้อนสูงสุดใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากระดับพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการถ่ายเทมวลสารหรือความชื้นได้ดีกว่าที่ระดับอุณหภูมิต่ำ ดังเส้นโค้งการอบแห้งที่แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเป็นหลัก โดยมีช่วงปรับสภาวะเบื้องต้นของวัสดุในช่วงเริ่มต้นกระบวนการเป็นระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น อัตราการสูญเสียความชื้นของเพชรสังฆาตในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าในช่วงปลายของกระบวนการ ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยวิธีการอบแห้งแบบขึ้นบาง (Doymaz and Pala, 2003) จากการวิเคราะห์อัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 0.0059, 0.0107, 0.0173 และ 0.0248 g water/g dry matter·min เมื่ออบแห้งเพชรสังฆาตแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100°C ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 40°C อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 81, 193 และ 320% สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100°C

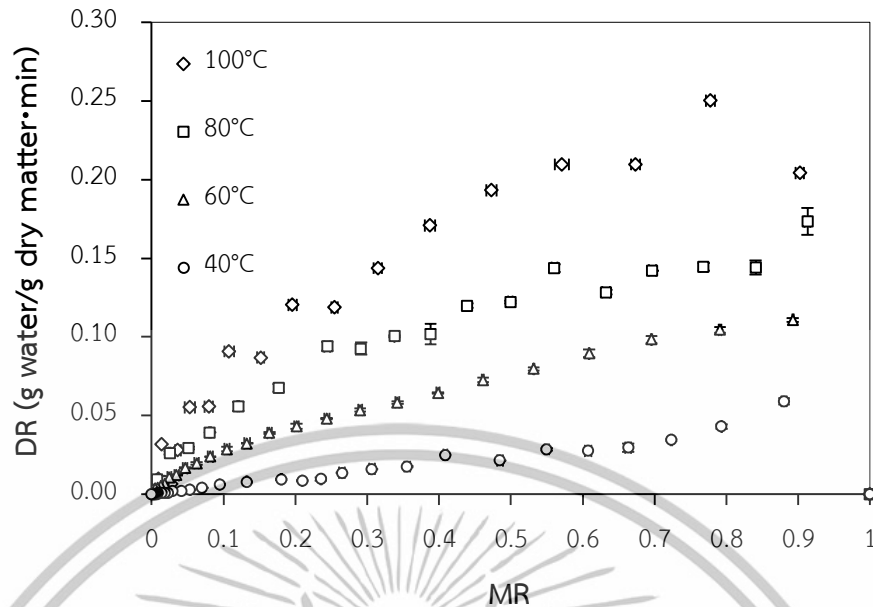


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

4.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

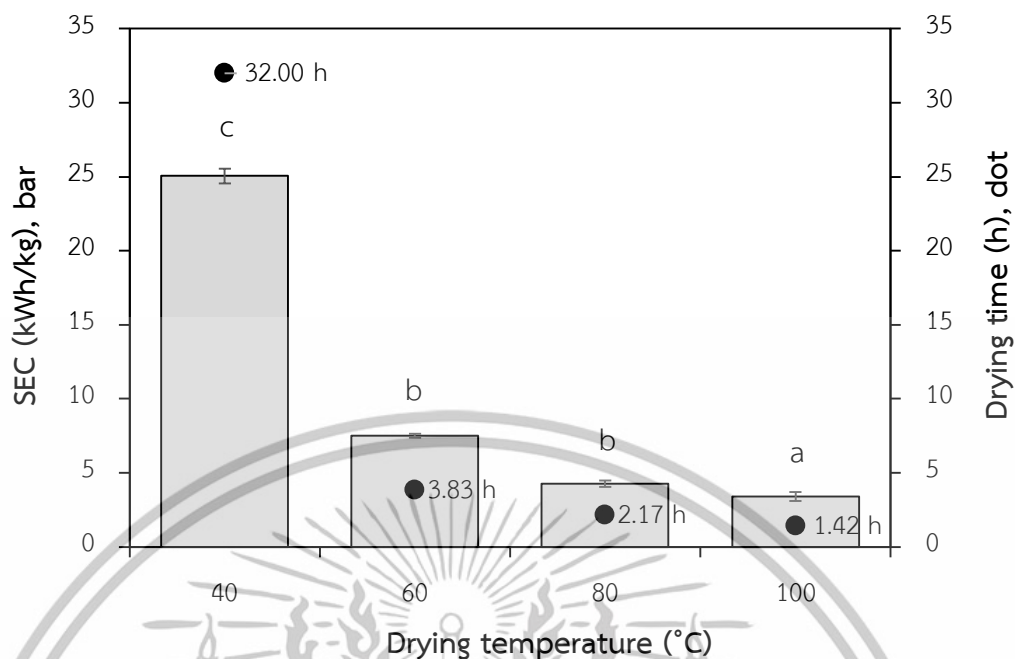
จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity, D_{eff}) ของเพชรสังฆาต ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100 °C พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.7302×10^{-9} ถึง 9.1281×10^{-9} m^2/s โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับการอบแห้งแอปเปิ้ลด้วยลมร้อน (Wang et al., 2007) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 7.0587×10^{-9} ถึง 12.8170×10^{-9} m^2/s ที่อุณหภูมิลมร้อน 85 ถึง 105 °C และการอบแห้ง Olive cake (Akgun and Doymaz, 2005) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 100 °C ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 4.846×10^{-9} ถึง 8.818×10^{-9} m^2/s ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของวัสดุชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-9} m^2/s (Wang et al., 2007)

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)	R ²
40	0.7302×10^{-9}	0.978
60	3.6918×10^{-9}	0.963
80	6.0043×10^{-9}	0.958
100	9.1281×10^{-9}	0.959

4.1.3 พลังงานจำเพาะ

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน การทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานที่ต้องการในการอบแห้งด้วยลมร้อนของเพชรสังฆาตในรูปแบบของพลังงานที่ต้องการใช้เพื่อระเหยน้ำ 1 kg ออกจากเพชรสังฆาตหรืออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการทดลองนี้พบว่าเมื่อระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกันความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเมื่อทำการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (40°C) จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดโดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุณหภูมิต่ำที่ระดับสูง (100°C) ซึ่งพบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด ในขณะที่การอบแห้งในระดับอุณหภูมิปานกลาง (60 และ 80°C) มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะพบว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงลบ นั่นก็คือเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามจะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง กล่าวคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดน้อยลงตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่น้อยลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งผลการทดลองที่ได้เช่นเดียวกันกับงานวิจัยอื่นๆ (Aghbashlo et al., 2008; Motevali et al., 2011)



รูปที่ 4.4 พลังงานจำเพาะ และเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน

4.1.4 คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ค่าสี ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัว

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองด้านสมบัติทางด้านคุณภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นสีเขียว ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่างกันสมบัติทางกายภาพที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยที่เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเป็นสีเขียว (a^*) จะลดลง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (Honma and Murata, 2011) แต่ในทางกลับกันค่าความหนาแน่นมวลรวมและการหดตัวกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดความเค้นภายในวัสดุในระหว่างทำการอบแห้งจึงทำให้ส่งผลต่อการหดตัวภายในของวัสดุ (Pan et al., 2008) จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิต่ำดีว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงเมื่อพิจารณาจากคุณภาพทางกายภาพดังที่ได้กล่าวมา

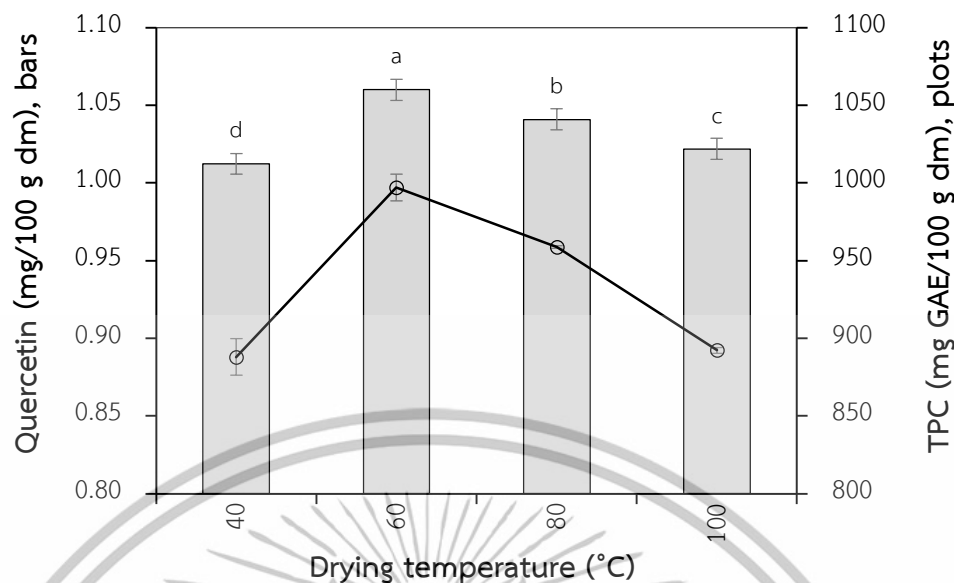
ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นสีเขียว ความหนาแน่นมวลรวม และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเพชรสังฆาต ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	ค่าความเป็นสีเขียว a*	ความหนาแน่นมวลรวม (g/cm ³)	การหดตัว (%)
40	-2.2633±0.13 ^d	0.1817±0.002 ^c	88.4799±0.51 ^c
60	-1.1200±0.01 ^c	0.1843± 0.010 ^c	89.6286±2.94 ^b
80	4.4967±0.08 ^b	0.2110±0.001 ^b	89.6335±0.55 ^b
100	4.7533±0.08 ^a	0.2332±0.002 ^a	92.4747±0.32 ^a

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.1.5 คุณภาพทางเคมีของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณสารเคออสิติน

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นผลของการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคออสิตินของเพชรสังฆาตอบแห้งซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่างกันสมบัติทางเคมีที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณสารที่ทำการวิเคราะห์ทั้งสองชนิดนั้นมีค่าสูงสุดเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ซึ่งจากผลการวิจัยของ Chan et al. (2009) ได้รายงานว่ปฏิกิริยาการเกิดน้ำตาลที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งนั้นจะทำให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) สูงขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้การทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคออสิตินน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอื่นๆซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงนั้นอาจทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายทำให้เกิดเอนไซม์ Oxidative และ Hydrolytic และไปทำลายสารสำคัญทางเคมีที่มีอยู่ (Chen et al., 2017) ดังนั้นการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคออสิตินของเพชรสังฆาตอบแห้งจึงลดลง



รูปที่ 4.5 ปริมาณสารเคอควิทิน (แผนภูมิแท่ง) และปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (แผนภูมิเส้น) ของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

4.1.6 การตัดสินใจเลือกเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง

จากการอบแห้งเพชรสังฆาตแบบลมร้อนข้างต้น ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์ในการคัดเลือกสิ่งทดลองอ้างอิงโดยใช้คุณภาพทางเคมี ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณสาระสำคัญที่มีอยู่ในเพชรสังฆาตอบแห้งได้เป็นเกณฑ์หลัก ดังนั้น ตัวอย่างเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ซึ่งมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอควิทินสูงที่สุด จึงเป็นตัวอย่างที่นำไปใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิงสำหรับการศึกษาต่อไป

4.2 อิทธิพลของการสั่นสะเทือนของเบด สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุ ต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด

จากการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตในหัวข้อนี้ด้วยวิธีการอบแห้ง 4 วิธีการ ได้แก่ 1) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) 2) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือน (Vibratory bed assisted infrared, VIR) 3) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum infrared, VC-IR) 4) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vibratory bed assisted vacuum infrared, VC-VIR) ให้ผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต

จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งทั้ง 4 วิธีการได้แก่ IR, VIR, VC-IR และ VC-VIR ที่มีความหนาของชิ้นวัสดุต่างกัน พบว่าการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VC-VIR ที่ความหนาของชิ้นวัสดุน้อยที่สุด 5 mm ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 70 min และมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดมากที่สุดคือ 0.258 g water/g dry matter·min สำหรับการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง IR ที่ความหนาของเพชรสังฆาตมากที่สุดคือ 15 mm ใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุดคือ 180 min และมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดต่ำที่สุดคือ 0.107 g water/g dry matter·min ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งจากผลการทดลองนี้เป็นการสนับสนุนแนวความคิดที่ว่า การสั่นสะเทือนของเบต สภาวะสุญญากาศ ในการอบแห้ง และความหนาของชิ้นวัสดุมีผลต่อลักษณะการอบแห้งเพชรสังฆาต ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Jongyingcharoen et al. (2015) ที่แสดงให้เห็นถึงผลดีของการใช้เทคนิคการสั่นสะเทือนและสภาวะการอบแห้งแบบสุญญากาศที่มีต่อลักษณะการอบแห้ง นอกจากนี้แล้ว งานวิจัยของ Das et al. (2009) ยังพบว่าอัตราการอบแห้งสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่อใช้เทคนิคการสั่นสะเทือนของเบตหรือการลดความหนาของชิ้นวัสดุให้น้อยลง

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

วิธีการอบแห้ง	ความหนาของวัสดุ (mm)	เวลาในการอบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้งสูงสุด (g water/g dry matter·min)	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (g water/g dry matter·min)
IR	5	110	0.147±0.001	0.125
	10	140	0.121±0.005	
	15	180	0.107±0.002	
VIR	5	95	0.160±0.003	0.134
	10	120	0.130±0.002	
	15	160	0.112±0.001	
VC-IR	5	75	0.238±0.001	0.210
	10	90	0.200±0.001	
	15	100	0.193±0.001	
VC-VIR	5	70	0.258±0.001	0.219
	10	85	0.202±0.001	
	15	90	0.197±0.010	

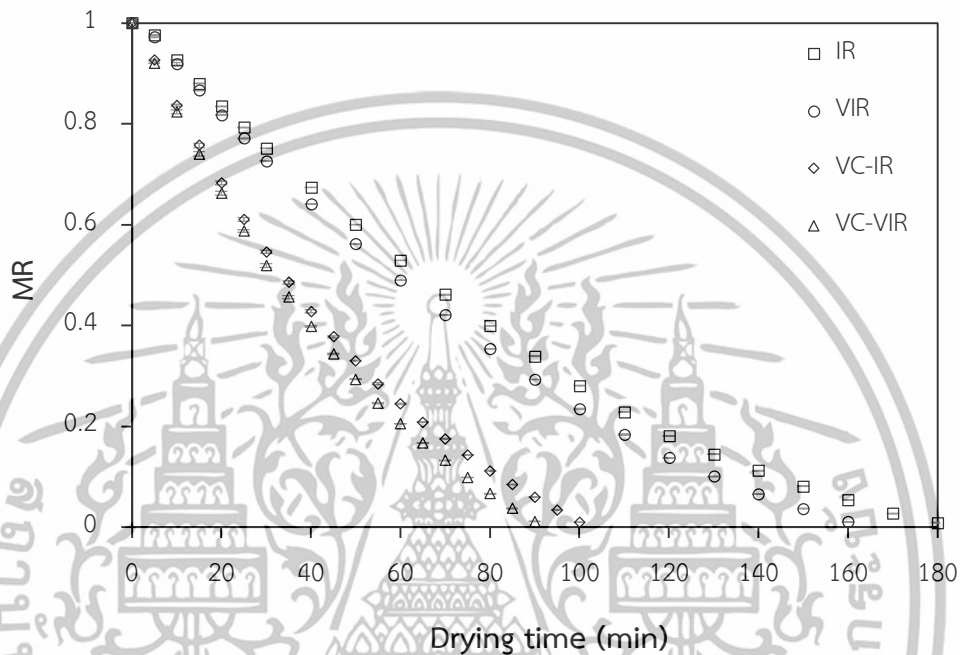
รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้ง และรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรด ซึ่งผลจากการสันสเทือนของเบตและสภาวะสุญญากาศในการอบแห้งเพชรสังฆาตสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.7 และ 4.9 ซึ่งเป็นข้อมูลตัวแทนผลการทดลองอบแห้งที่ความหนา 15 mm โดยใช้วิธีการอบแห้ง IR, VIR, VC-IR และ VC-VIR สำหรับผลของความหนาของชิ้นวัสดุที่มีต่อลักษณะการอบแห้งเพชรสังฆาตสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งเป็นข้อมูลตัวแทนผลการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความหนาของชิ้นวัสดุ 5, 10 และ 15 mm

จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้น (รูปที่ 4.8 และ 4.9) พบว่ามีช่วงอัตราการอบแห้งที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง 2 ช่วงคือ จากจุดเริ่มต้นของการอบแห้งจนถึงจุดที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุด (Heating-up) และช่วงที่สองคือจากจุดที่อัตราการอบแห้งเริ่มลดต่ำลง (Falling rate period) โดยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) เช่นเดียวกับผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ซึ่งไม่พบการเกิดช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เช่นเดียวกัน (Das et al., 2009)

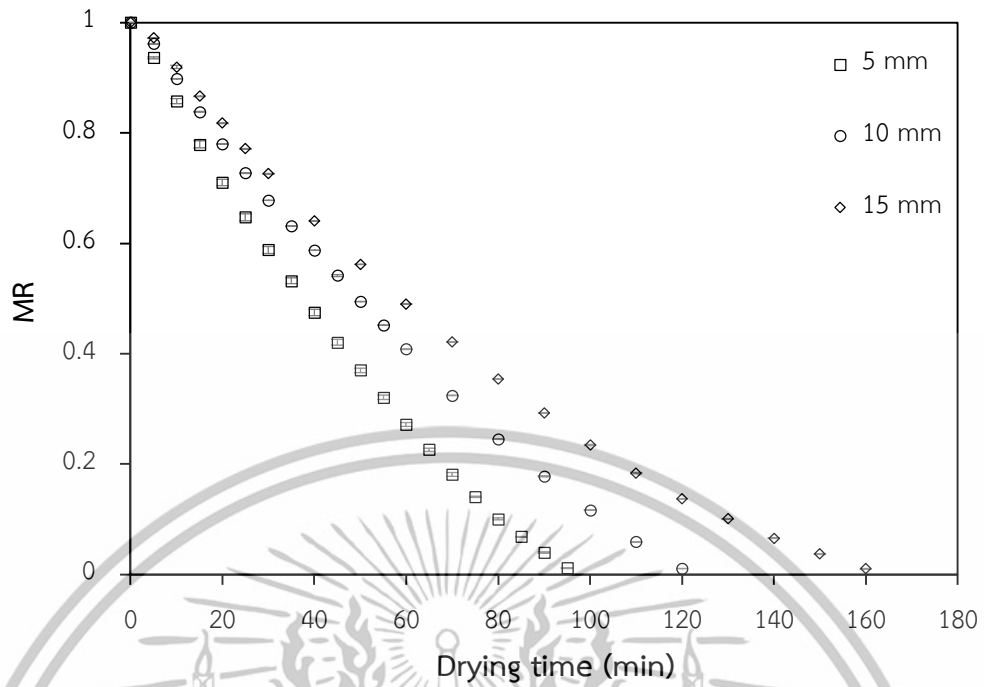
ทั้งนี้ จากผลการทดลอง สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้สภาวะสุญญากาศมีอิทธิพลต่อเวลาในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งมากกว่าการใช้การสันสเทือนของเบต นั่นคือ เมื่อใช้สภาวะสุญญากาศร่วมในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นประมาณ 80% สำหรับการอบแห้ง VC-IR เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้ง IR เช่นเดียวกัน อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นประมาณ 76% สำหรับการอบแห้ง VC-VIR เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้ง VIR ในขณะที่ เมื่อมีการสันสเทือนของเบต อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเพียง 5% สำหรับการอบแห้ง VIR เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้ง IR และอัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเพียง 2% สำหรับการอบแห้ง VC-VIR เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้ง VC-IR ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วย IR และ VIR ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งโดยไม่มีสภาวะสุญญากาศร่วมด้วยนั้น การลดลงของความชื้นจะน้อยกว่าวิธีการอบแห้งที่มีสภาวะสุญญากาศในการอบแห้งร่วมด้วยเมื่อเปรียบเทียบที่ช่วงเวลาการอบแห้งเดียวกัน นั่นก็เป็นเพราะว่าการถ่ายเทความชื้นภายในวัสดุจะเกิดขึ้นทันทีตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการอบแห้งเนื่องจากในสภาวะสุญญากาศนั้นน้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำและสภาวะสุญญากาศยังทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอกายในวัสดุซึ่งเมื่อรวมเข้ากับลักษณะเด่นของรังสีอินฟราเรดที่เป็นการให้ความร้อนแบบการแผ่รังสีเข้าไปในเนื้อวัสดุทำให้เกิดความดันไอก่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดการแพร่ของความชื้นอย่างรวดเร็ว (Salehi and Kashaninejad, 2018)

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งของเพชรสังฆาตที่มีความหนาของชิ้นวัสดุเท่ากับ 5, 10 และ 15 mm ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความหนาของชิ้นวัสดุ 5 mm ซึ่งเป็นความหนาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดลองอบแห้งจะมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด และจะลดน้อยลงเมื่อความหนาของชิ้นวัสดุมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากชิ้นวัสดุที่มี

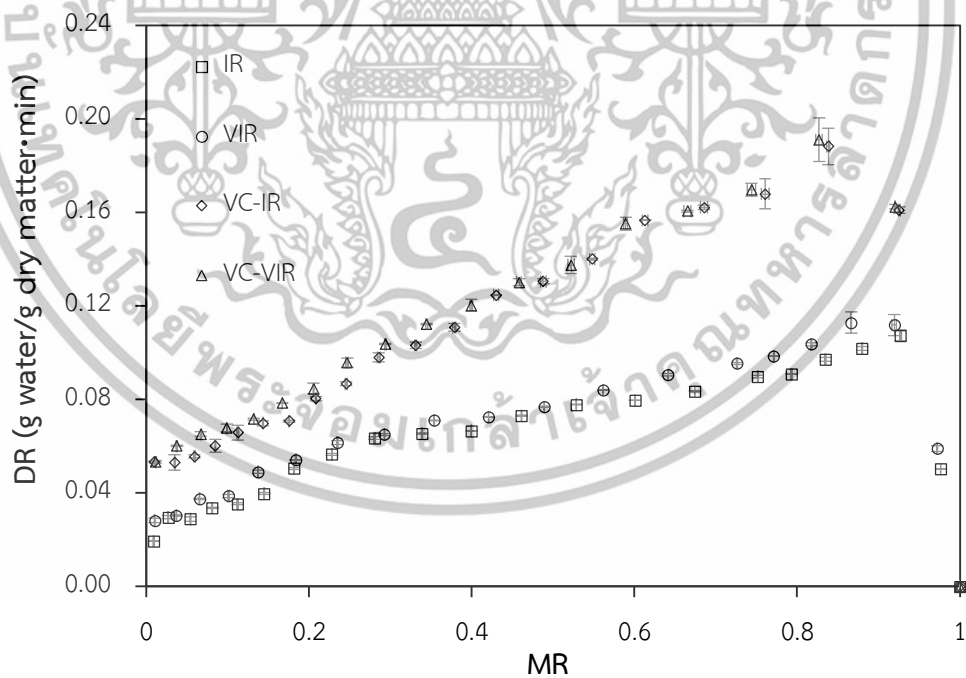
ความหนาแน่นน้อยกว่า พลังงานจากการแผ่รังสีของรังสีอินฟราเรดสามารถเข้าไปภายในวัสดุได้ดีกว่า นอกจากนี้ชั้นวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่านั้น ทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในมาสู่ผิวของวัสดุสั้นลงจึงทำให้อัตราการลดลงของความชื้นสูงกว่าการอบแห้งชั้นวัสดุที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับอบแห้งข้าวเปลือกด้วย VIR (Das et al., 2009) และการอบแห้งกล้วยด้วย VC-IR (Swasdisevi et al., 2009)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งต่างกันที่มีความหนาแน่นของชั้นวัสดุเท่ากับ 15 mm

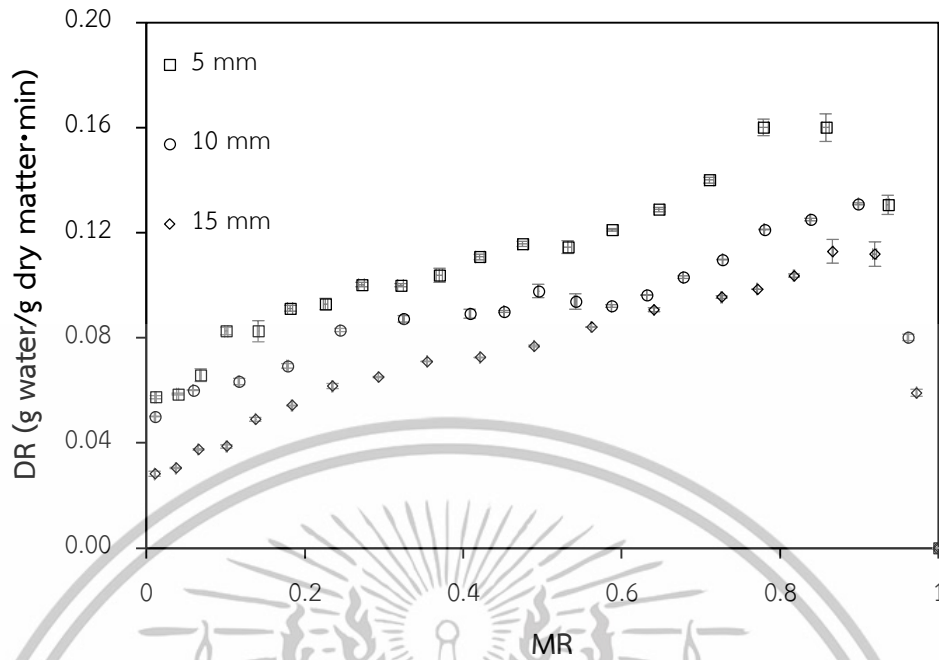


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 5, 10 และ 15 mm



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งต่างกันที่มีความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



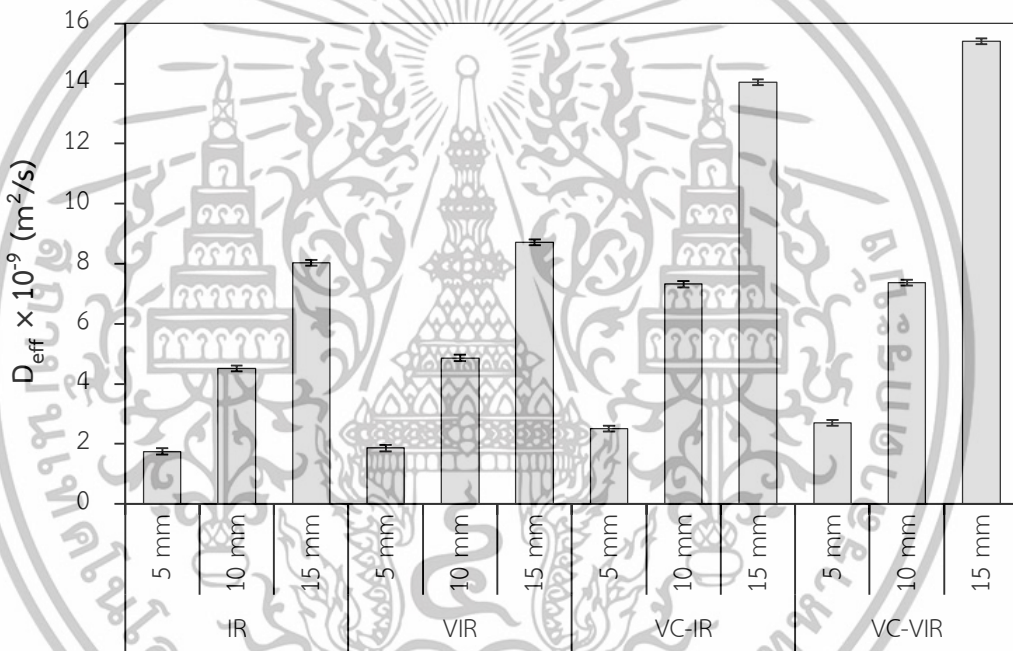
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอัตราส่วนความชื้นของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้ง VIR ที่ความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 5, 10 และ 15 mm

4.2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นการแสดงถึงการถ่ายเทความชื้นที่เกิดขึ้นจริงภายในวัสดุ จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการสันสะท้อนของเบต สภาวะสูญญากาศภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งค่า D_{eff} ที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-11} ถึง 10^{-9} m^2/s ซึ่งจะพบได้ทั่วไปสำหรับการอบแห้งอาหารและวัสดุทางการเกษตร (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011) จากวิธีการทดลองอบแห้งในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นประเด็นที่น่าสนใจคือค่า D_{eff} จะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มความหนาของเพชรสังฆาต โดยค่า D_{eff} จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อความหนาของเพชรสังฆาตเพิ่มขึ้นจาก 5 mm เป็นความหนา 10 mm และเกือบ 4 เท่า เมื่อเพชรสังฆาตที่ใช้ทดลองอบแห้งมีค่าความหนา 15 mm ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของวัสดุอบแห้งที่มากขึ้นส่งผลต่อทำให้ค่า D_{eff} มีค่าสูงขึ้น (Sadin et al., 2014; Das and Arora, 2018; Cuevas et al., 2019) และจากแบบจำลองการแพร่ของฟิคส์ (Fick's diffusion model) มีสมมุติฐานว่าในวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ การแพร่จะเกิดขึ้นจากภายในสู่พื้นผิวภายนอกในทิศทางเดียวเท่านั้นการแพร่ในทิศทางด้านข้างของวัสดุจะมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุที่ใช้ในกาอบแห้งมีความหนามากขึ้น การแพร่ของความชื้นที่เกิดขึ้นในทิศทางด้านข้างของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ D_{eff} มีค่าสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการทดลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้สภาวะสุญญากาศร่วมในการอบแห้งส่งผลทำให้ค่า D_{eff} มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย โดยการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วย VC-IR และ VC-VIR จะมีค่า D_{eff} สูงกว่าการอบแห้งด้วย IR และ VIR ประมาณ 50% ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้ความชื้นที่ผิวของเพชรสังฆาตระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศยังทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอที่สูงทำให้เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความชื้นออกจากเพชรสังฆาต

สำหรับอิทธิพลของการใช้การสั่นสะเทือนของเบตร่วมในการอบแห้งเพชรสังฆาตที่มีความหนาของชิ้นวัสดุที่ต่างกันนั้นพบว่าทำให้ค่า D_{eff} เพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีช่วงความแตกต่างของค่า D_{eff} จากการใช้การสั่นสะเทือนของเบตและไม่ใช้ร่วมในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.05×10^{-9} ถึง 1.47×10^{-9} m^2/s



รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ($\times 10^{-9}$) ของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

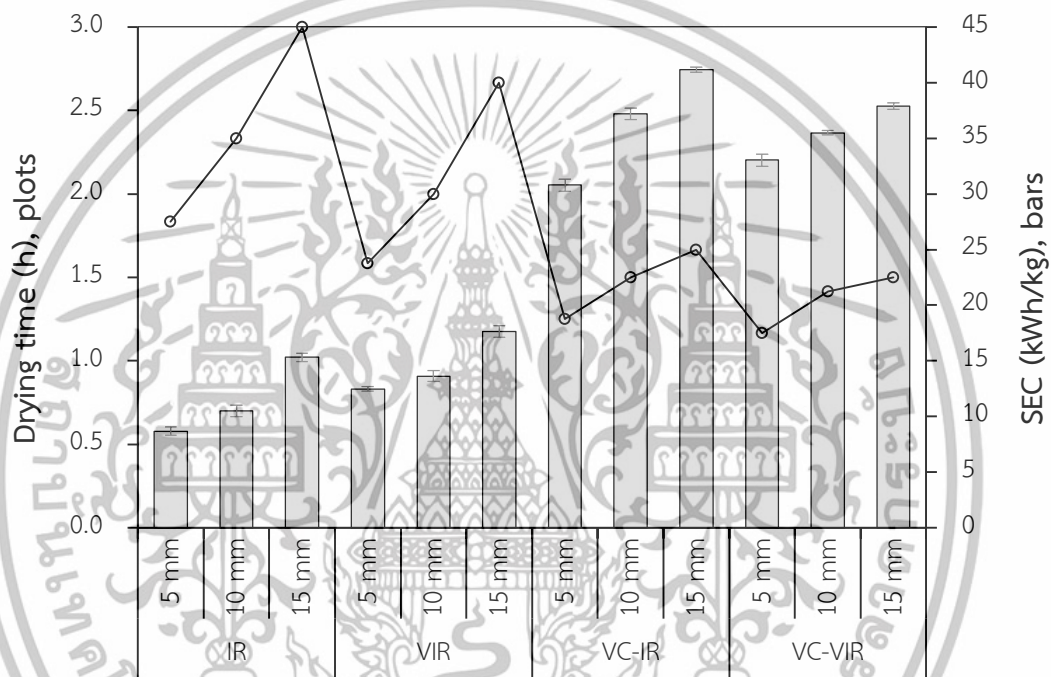
4.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้องการพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ออกจากวัสดุ (Specific energy consumption, SEC) ด้วยวิธีการอบแบบ IR, VIR, VC-IR และ VC-VIR ซึ่งจากการทดลองสามารถแบ่งวิธีการอบแห้งที่ทำการทดลองออกได้เป็น 2 กลุ่มตามค่าความต้องการพลังงานที่ต้องการใช้ในการอบแห้งเพชรสังฆาต คือ กลุ่มที่ต้องการใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำและกลุ่มที่ต้องการใช้พลังงานในการอบแห้งสูง ซึ่งผลการทดลองพบว่าวิธีการอบแห้งที่มีการใช้สภาวะสุญญากาศร่วมจะมีค่า SEC ที่สูง ดังนั้นการอบแห้งด้วยวิธี VC-IR และ VC-VIR จะอยู่ในกลุ่มของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการอบแห้งที่ต้องการใช้พลังงานในการอบแห้งสูง เช่นเดียวกับผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดทับทิมภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่า SEC สูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 4 เท่า (Motevali et al., 2011) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการอบแห้งเพชรสังฆาตภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีค่า SEC ที่สูง แต่ก็มีข้อได้เปรียบในเรื่องการใช้เวลาอบแห้งที่สั้นลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าวิธีการอบแห้งที่มีการสิ้นสละเทือนของเบตร่วมด้วยนั้นไม่มีผลต่อค่า SEC แม้ว่าความหนาของเพชรสังฆาตจะเปลี่ยนไปก็ตาม

จากรูปที่กล่าวมาแสดงให้เห็นค่า SEC มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับเวลาในการอบแห้งนั่นคือค่า SEC ที่มากขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการอบแห้งเพชรสังฆาตน้อยลง



รูปที่ 4.11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (แผนภูมิแท่ง) และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (แผนภูมิเส้น) ของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

4.2.4 คุณภาพทางกายภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ความแตกต่างสีรวม

จากตารางที่ 4.4 ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) ของเพชรสังฆาตแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับเพชรสังฆาตสดมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 13.69 ถึง 16.40 โดยที่วิธีการอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าในการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งเดียวกัน เมื่อความหนาของชั้นวัสดุต่างกัน การเปลี่ยนแปลงสีรวมมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ผลจากความหนาของชั้นวัสดุหรือวิธีการอบแห้งยังไม่สามารถบ่งบอกความชัดเจนของแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสีรวมที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งเห็ดของ Das and Arora (2018) ที่ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นเห็ดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่าทุกวิธีการอบแห้งที่มีการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงซึ่งอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

ตารางที่ 4.4 ผลของการสั้นสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชิ้นวัสดุต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

Drying method	Material thickness (mm)		
	5	10	15
IR	14.83±0.02 ^{b,d}	14.41±0.03 ^{c,b}	15.23±0.03 ^{a,c}
VIR	14.98±0.02 ^{a,c}	14.05±0.01 ^{b,d}	13.69±0.03 ^{c,d}
VC-IR	16.40±0.01 ^{a,a}	14.55±0.03 ^{c,a}	15.40±0.03 ^{b,b}
VC-VIR	15.55±0.02 ^{b,b}	14.23±0.02 ^{c,c}	15.81±0.02 ^{a,a}
HA	17.71±0.11		

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแรกที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวที่สองที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.5 คุณภาพทางเคมีของเพชรสังฆาตอบแห้ง: ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณสารเคอควิทิน

วัสดุที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยได้มาจากส่วนของลำต้นซึ่งจากรายงานวิจัยพบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ส่วนคือ 1) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดซึ่งจากข้อมูลผลการวิจัยพบว่าวิจัยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Lekshmi et al., 2015) และ 2) ฟลาโวนอยด์ ซึ่งงานวิจัยพบว่าลำต้นของเพชรสังฆาตมีสารสำคัญที่อยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์คือสารเคอควิทิน (Quercetin) ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระสูง (Thiangtham, 2003).

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลของการสั้นสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชิ้นวัสดุต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคอควิทินของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างวิธีการอบแห้งและความหนาของวัสดุต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคอควิทิน ($p < 0.05$) การอบแห้งโดยมีการสั้นสะท้อนของเบตร่วมทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอควิทินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศร่วมนั้นทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอควิทินมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าความหนาของชิ้นวัสดุที่มากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคอควิทินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่แท้จริงของการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคออสตินของเพชรสังฆาตที่อบแห้งด้วยการใช้การสั่นสะเทือนร่วมนั้นอาจเกิดจากการสั่นสะเทือนของเบตทำให้ชั้นวัสดุสามารถรับรังสีอินฟราเรดได้อย่างทั่วถึงในระหว่างทำการอบแห้ง และเนื่องจากอินฟราเรดมีความสามารถในการแยกพันธะโควาเลนต์ทำให้เกิดสารต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในกลุ่ม Low molecular weight เช่น Flavonoids, Carotene หรือ Polyphenols (Rho et al., 2010) ในขณะที่การลดลงของสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคออสตินที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศร่วมนั้นมีผลเช่นเดียวกับรายงานผลการวิจัยของ Zheng et al. (2015) ซึ่งทำการอบแห้งดอกโลควอท (Loquat) และรายงานวิจัยของ Uribe et al. (2016) ซึ่งทำการอบแห้งเปเปอร์มินท์ (Peppermint) ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากวัสดุที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ในระดับที่อ่อนกว่าส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำลง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ว่าผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีขึ้น (Chan et al., 2009; Samoticha et al., 2016)

สำหรับเหตุผลที่ปริมาณสารสำคัญมีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มขึ้นอาจเกิดมาจากชั้นวัสดุที่มีความหนามากมีโอกาสนิ่งเซลล์จะถูกทำลายในระหว่างการอบแห้งน้อยกว่า ซึ่งการที่ผนังเซลล์ถูกทำลายน้อยกว่าในระหว่างการอบแห้งนั้นจะทำให้การปลดปล่อยเอนไซม์สำหรับกระบวนการออกซิเดชันและไฮโดรไลเซชันลดลงและยังลดการสลายตัวของสารฟลักซ์เคมีที่สำคัญต่าง ๆ ด้วย (Wojdyło et al., 2009; Chen et al., 2017) นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการอบแห้งการสลายตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระในบริเวณที่ของเหลวของวัสดุสัมผัสกับบรรยากาศแวดล้อม (Ren et al., 2018) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะเกิดได้มากขึ้นในตัวอย่างที่มีชั้นบางเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก

ตารางที่ 4.6 ยังแสดงให้เห็นว่าเพชรสังฆาตแห้งทุกตัวอย่างมีปริมาณสารเคออสตินมากกว่าเพชรสังฆาตสด การอบแห้งแบบ VIR ที่ความหนาชั้นวัสดุ 15 mm มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและเคออสตินสูงที่สุดคือ 1,083.625 mg GAE/100 g dry matter และ 3.472 mg/100 g dry matter ตามลำดับ และที่สำคัญคือเพชรสังฆาตแห้งที่อบแห้งแบบ VIR มีปริมาณเคออสตินสูงกว่าเพชรสังฆาตแห้งที่อบแห้งแบบลมร้อนถึง 3.5 เท่า และสูงชันกว่าถึง 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเพชรสังฆาตสด (เพิ่มขึ้น 290.99%) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ren et al. (2018) ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าเคออสตินในหัวหอมด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบแช่เยือกซึ่งพบว่าค่าเคออสตินเพิ่มขึ้น 70.5-115.3% และ 76.0-154.9% ตามลำดับ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคการอบแห้งในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มปริมาณสารเคออสตินในเพชรสังฆาตได้

ตารางที่ 4.5 ผลของการสั้นสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100 g dry matter) ของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

Drying method	Material thickness (mm)		
	5	10	15
IR	870.82±14.14 ^{ns,b}	873.72±8.67 ^{ns,b}	868.93±8.42 ^{ns,d}
VIR	912.44±9.83 ^{c,a}	964.94±11.37 ^{b,a}	1083.62±6.84 ^{a,a}
VC-IR	832.72±7.31 ^{b,c}	835.50±11.02 ^{b,c}	962.20±8.55 ^{a,c}
VC-VIR	839.91±11.43 ^{c,c}	873.06±10.86 ^{b,b}	1046.92±9.04 ^{a,b}
HA	1060.25±6.73		
Fresh	1012.38±6.73		

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแรกที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวที่สองที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ผลของการสั้นสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคอเวอซิทิน (mg/100 g dry matter) ของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยรังสีอินฟราเรด

Drying method	Thickness (mm)		
	5	10	15
IR	1.477±0.044 ^{ns,b}	1.596±0.115 ^{ns,b}	1.651±0.088 ^{ns,c}
VIR	1.647±0.036 ^{c,a}	2.627±0.108 ^{b,a}	3.472±0.353 ^{a,a}
VC-IR	0.921±0.021 ^{b,c}	0.903±0.023 ^{b,d}	1.273±0.121 ^{a,c}
VC-VIR	0.897±0.029 ^{c,c}	1.166±0.015 ^{b,c}	2.312±0.145 ^{a,b}
HA	0.997±0.009		
Fresh	0.888±0.004		

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแรกที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวที่สองที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด ร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การทดลองในหัวข้อนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แบบ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับคือ -1, 0 และ 1 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลในการอบแห้งจำนวน 3 ปัจจัยคือ ความเข้มรังสีอินฟราเรด (X_1) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 4576(-1), 6036(0) และ 7496(1) W/m² ความดันภายในห้องอบแห้ง (X_2) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 5(-1), 15(0) และ 25(1) kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ (X_3) มีระดับของปัจจัยเท่ากับ 5(-1), 10(0) และ 15(1) mm ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ค่าตอบสนองคือปริมาณสารเคอซิทิน (Y) มีสิ่งทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 สิ่งทดลองโดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง 3 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งเรียงสิ่งทดลองตามลำดับในการทดลองจากการสุ่มด้วยโปรแกรม Unscramble

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ตัวแปร	รหัส	ระดับค่าตัวแปร		
		-1	0	1
ความเข้มรังสีอินฟราเรด (W/m ²)	X_1	4576	6036	7496
ความดันภายในห้องอบแห้ง (kPa abs.)	X_2	5	15	25
ความหนาของชั้นวัสดุ (mm)	X_3	5	10	15

4.3.1 ลักษณะการอบแห้งของเพชรสังฆาต

จากการทดลองอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั่นสะเทือนภายใต้สภาวะสุญญากาศ (VC-VIR) ตามรูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่าความเข้มรังสี ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุส่งผลต่อลักษณะการอบแห้ง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งสูงสุด พบว่าสิ่งทดลองที่ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดที่มีค่าสูงอย่างไม่แตกต่างกันทางสถิติ ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 7, 8 และ 11 โดยมีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.190-0.213 g water/g dry matter·min และเวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 85-100 min ซึ่งสิ่งทดลองที่ 7 และ 8 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรดสูง และสิ่งทดลองที่ 11 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้สภาวะสุญญากาศสูง (ความดันในห้องอบแห้งต่ำ) และความหนาวัสดุน้อย จากการเปรียบเทียบค่าต่ำสุด (-1) และค่าสูงสุด (1) ของแต่ละปัจจัย จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาในการอบแห้งมากที่สุด คือ ความเข้มรังสีอินฟราเรด โดยการเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดจาก 4576 W/m² เป็น 7496 W/m² ที่ความดันภายในห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุเดียวกัน (สิ่งทดลองที่ 3 และ 13) ทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงกว่า 2 เท่า และอัตราการอบแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เวลาในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของเพชรสังฆาตที่สิ่งทดลองต่างๆ

สิ่งทดลอง	X ₁ (W/m ²)	X ₂ (kPa abs)	X ₃ (mm)	เวลาในการ อบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้ง สูงสุด (g water/g dry matter-min)	อัตราการอบแห้ง เฉลี่ย (g water/g dry matter-min)
12	4576 (-1)	5 (-1)	10 (0)	180	0.126±0.001 ^{defg}	
8	7496 (1)	5 (-1)	10 (0)	85	0.190±0.002 ^{ab}	
13	4576 (-1)	25 (1)	10 (0)	210	0.097±0.001 ^s	
3	7496 (1)	25 (1)	10 (0)	100	0.153±0.001 ^{bcd}	
1	4576 (-1)	15 (0)	5 (-1)	140	0.123±0.003 ^{bcd}	
7	7496 (1)	15 (0)	5 (-1)	100	0.213±0.008 ^a	
2	4576 (-1)	15 (0)	15 (1)	220	0.111±0.004 ^{efg}	0.1516
4	7496 (1)	15 (0)	15 (1)	120	0.144±0.003 ^{cde}	
11	6036 (0)	5 (-1)	5 (-1)	95	0.201±0.006 ^a	
15	6036 (0)	25 (1)	5 (-1)	110	0.188±0.003 ^{bc}	
5	6036 (0)	5 (-1)	15 (1)	120	0.139±0.001 ^{cdef}	
10	6036 (0)	25 (1)	15 (1)	180	0.107±0.001 ^{fg}	
6	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	130	0.164±0.003 ^{bcd}	
9	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	130	0.158±0.002 ^{bcd}	
14	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	130	0.160±0.002 ^{bcd}	

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.3.2 การวิเคราะห์สมการการถดถอยกำลังสอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance; one-way ANOVA) ใช้สำหรับศึกษาความเหมาะสมของสมการและปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันค่า F-value ที่สูงและค่า p-value ที่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าสมการและปัจจัยมีความสำคัญ จากผลการวิเคราะห์ในตารางสามารถสรุปได้ว่าสมการแบบ Quadratic เข้ากันได้กับผลของค่าเคออสตินจากการทดลอง เนื่องจากมีค่า p-value = 0.009 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หมายความว่า ความเข้มข้นสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณสารเคออสตินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Model	9	0.690358	0.076706	10.75	0.009
X ₁	1	0.315615	0.315615	44.21	0.001
X ₂	1	0.152076	0.152076	21.30	0.006
X ₃	1	0.063013	0.0630	8.83	0.031
X ₁ X ₂	1	0.000000	0.0000	0.00	1.000
X ₁ X ₃	1	0.047760	0.047760	6.69	0.049
X ₂ X ₃	1	0.003660	0.003660	0.51	0.506
X ₁ ²	1	0.000011	0.000011	0.00	0.970
X ₂ ²	1	0.105768	0.105768	14.82	0.012
X ₃ ²	1	0.000447	0.000447	0.06	0.812
Residual	5	0.035693	0.007139		
Lack - of- Fit	3	0.034967	0.011656	32.11	0.030
Total	14	0.726051			

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่า R² และค่า adjusted R² เท่ากับ 0.95 และ 0.86 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารเคอซิทินของเพชรสังฆาตอย่างมีนัยสำคัญสามารถประเมินโดยค่า F-value และค่า p-value โดยที่ค่า F-value สูงขึ้นและค่า p-value น้อยลงตัวแปรหรือปัจจัยนั้นก็ยิ่งมีความสำคัญมากขึ้น จากตารางที่ได้กล่าวมา ความเข้มของรังสีอินฟราเรด (X₁) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อปริมาณสารเคอซิทินของเพชรสังฆาตเนื่องจากค่า F-value สูงสุดและ p-value ที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	SE Coef	T-Value	p-Value
Constant	1.8530	0.0488	37.99	0.000
X ₁	0.1986	0.0299	6.65	0.001
X ₂	0.1379	0.0299	4.62	0.006
X ₃	-0.0887	0.0299	-2.97	0.031
X ₁ X ₁	-0.0018	0.0440	-0.04	0.970
X ₂ X ₂	-0.1692	0.0440	-3.85	0.012
X ₃ X ₃	0.0110	0.0440	0.25	0.812
X ₁ X ₂	-0.00002	0.0422	-0.00	1.000
X ₁ X ₃	0.1093	0.0422	2.59	0.049
X ₂ X ₃	0.0302	0.0422	0.72	0.506
R ²		0.95		

จากผลการวิเคราะห์หารูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองคือปริมาณสารเคอควิทีน (Y) กับปัจจัยของการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีอบแห้งแบบ VC-VIR ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นสื่อน้ำปราศในการอบแห้ง (X₁) ความดันภายในห้องอบแห้ง (X₂) และความหนาของชั้นวัสดุ (X₃) มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Quercetin} = 0.1986X_1 + 0.1379X_2 - 0.0887X_3 - 0.0018X_1^2 - 0.1692X_2^2 + 0.0110X_3^2 - 0.0000002X_1X_2 + 0.1093X_1X_3 + 0.0302X_2X_3 + 1.853 \quad (4.1)$$

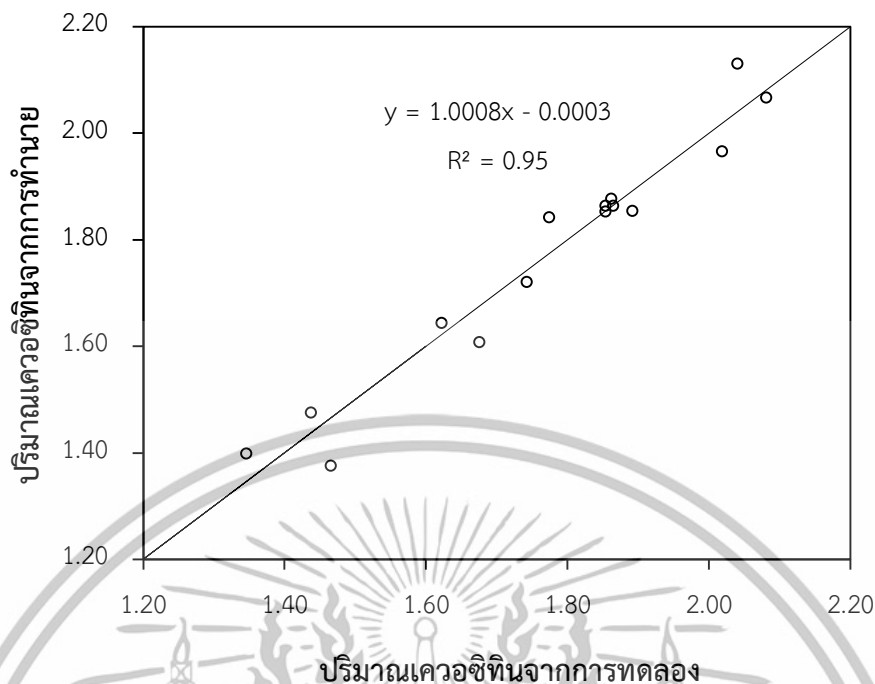
นอกจากนี้ค่า R² ที่สูงยังสามารถระบุถึงความเหมือนกันของค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (Swamy et al., 2017) ซึ่งสามารถดูปริมาณสารเคอควิทีนจากการทดลอง (Y) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง (Ŷ) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำหรือเส้นตรงที่ความชัน 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ปริมาณสารเคอซิทินของเพชรสังฆาตแห้งที่ได้จากการทดลองอบแห้ง (Y) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย (\hat{Y})

สิ่งทดลอง	X_1	X_2	X_3	Y	\hat{Y}
	(W/m ²)	(kPa abs)	(mm)	(mg/100 g dry matter)	
12	4576 (-1)	5 (-1)	10 (0)	1.398±0.052	1.345
8	7496 (1)	5 (-1)	10 (0)	1.721±0.021	1.742
13	4576 (-1)	25 (1)	10 (0)	1.643±0.021	1.621
3	7496 (1)	25 (1)	10 (0)	1.966±0.015	2.018
1	4576 (-1)	15 (0)	5 (-1)	1.877±0.015	1.861
7	7496 (1)	15 (0)	5 (-1)	2.130±0.089	2.040
2	4576 (-1)	15 (0)	15 (1)	1.376±0.031	1.465
4	7496 (1)	15 (0)	15 (1)	2.066±0.015	2.081
11	6036 (0)	5 (-1)	5 (-1)	1.608±0.067	1.675
15	6036 (0)	25 (1)	5 (-1)	1.854±0.037	1.891
5	6036 (0)	5 (-1)	15 (1)	1.475±0.037	1.437
10	6036 (0)	25 (1)	15 (1)	1.842±0.023	1.774
6	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.864±0.011	1.863
9	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.864±0.013	1.853
14	6036 (0)	15 (0)	10 (0)	1.831±0.022	1.853

หมายเหตุ:

X_1 = ความเข้มรังสีอินฟราเรด, X_2 = ความดันภายในห้องอบแห้ง, X_3 = ความหนาวัสดุ, Y = ปริมาณสารเคอซิทินจากการทดลอง และ \hat{Y} = ปริมาณสารเคอซิทินจากการทำนาย



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารเคอไจตินที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย

4.3.3 อิทธิพลของปัจจัยของการอบแห้งเพอร์สัชชาติด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VC-VIR ต่อปริมาณสารเคอไจติน

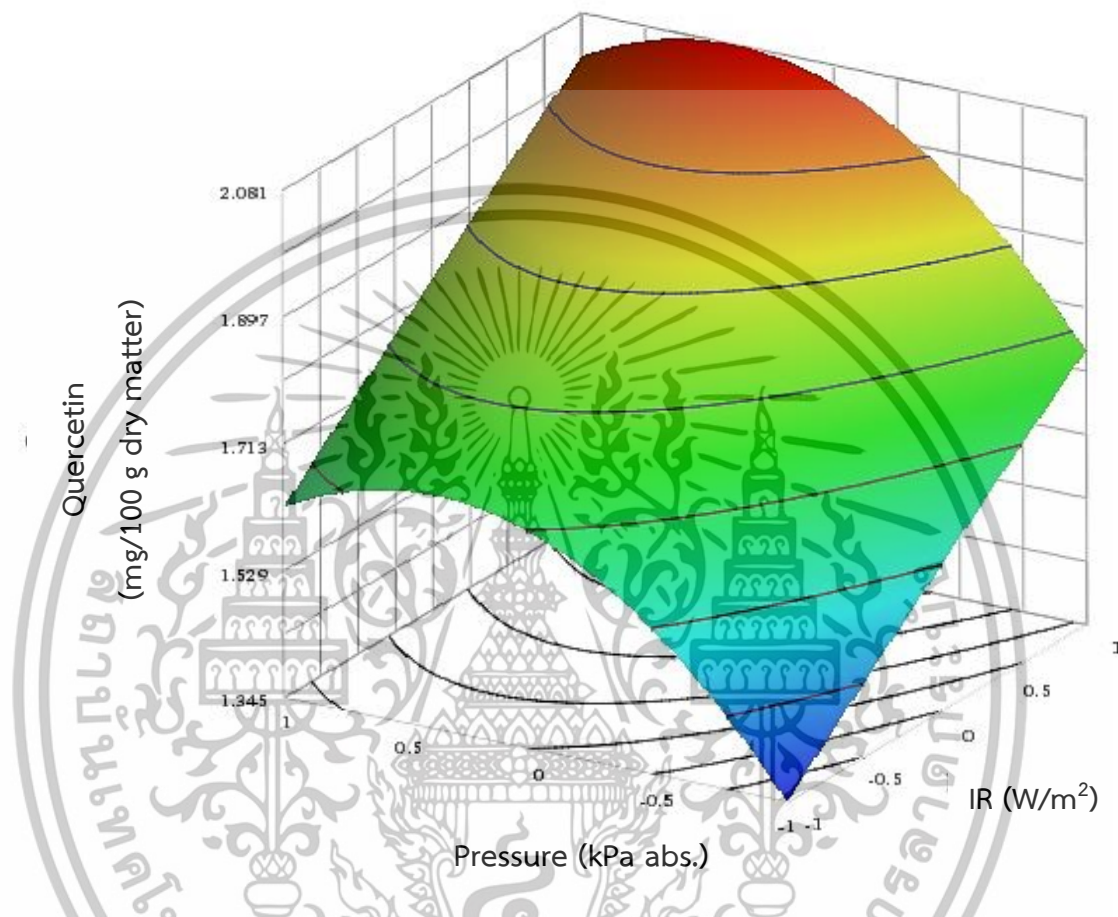
สมการความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1) สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัยด้วยพื้นผิวตอบสนองและ Contour plots โดยกำหนดให้ค่าของอีกปัจจัยหนึ่งอยู่ที่ระดับ 0 หรือกลาง (ตารางที่ 4.7) ปริมาณเคอไจตินกับความเข้มข้นสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุแสดงดังในรูปที่ 4.13-4.15

4.3.3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นสีอินฟราเรดและความดันภายในห้องอบแห้งต่อปริมาณสารเคอไจตินในเพอร์สัชชาติอบแห้ง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีอินฟราเรดกับความดันภายในห้องอบแห้ง โดยกำหนดให้ความหนาของชั้นวัสดุมีค่าเท่ากับ 10 mm แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าสารเคอไจตินมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ความเข้มข้นสีอินฟราเรดและความดันภายในห้องอบแห้งที่สูงขึ้นโดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 2.077 mg/100 g dry matter เมื่อใช้ความเข้มข้นสีอินฟราเรด 7496 W/m² ในสภาวะความดันภายในห้องอบแห้งประมาณ 18-20 kPa abs. และจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 20 kPa abs. อิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งต่อปริมาณสารเคอไจตินสอดคล้องกับที่รายงานโดย Zheng et al. (2015) และ Uribe et al. (2016) ว่าเมื่อความดันภายในห้องอบแห้งลดลง (มีสภาวะสุญญากาศในการอบแห้ง) ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลน้อยลง เมื่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลน้อยลงทำให้สารต้านอนุมูลอิสระเกิดขึ้นน้อยลงด้วย สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นสีอินฟราเรดซึ่งส่งผลให้ปริมาณสารเคอไจตินมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสีสูงขึ้นสอดคล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับงานวิจัย Rho et al. (2010) เนื่องจากอินฟราเรดมีความสามารถในการแยก พันธะโควาเลนต์ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเกิดสารออกฤทธิ์ที่อยู่ในกลุ่ม Flavonoids, Carotene หรือ Polyphenols



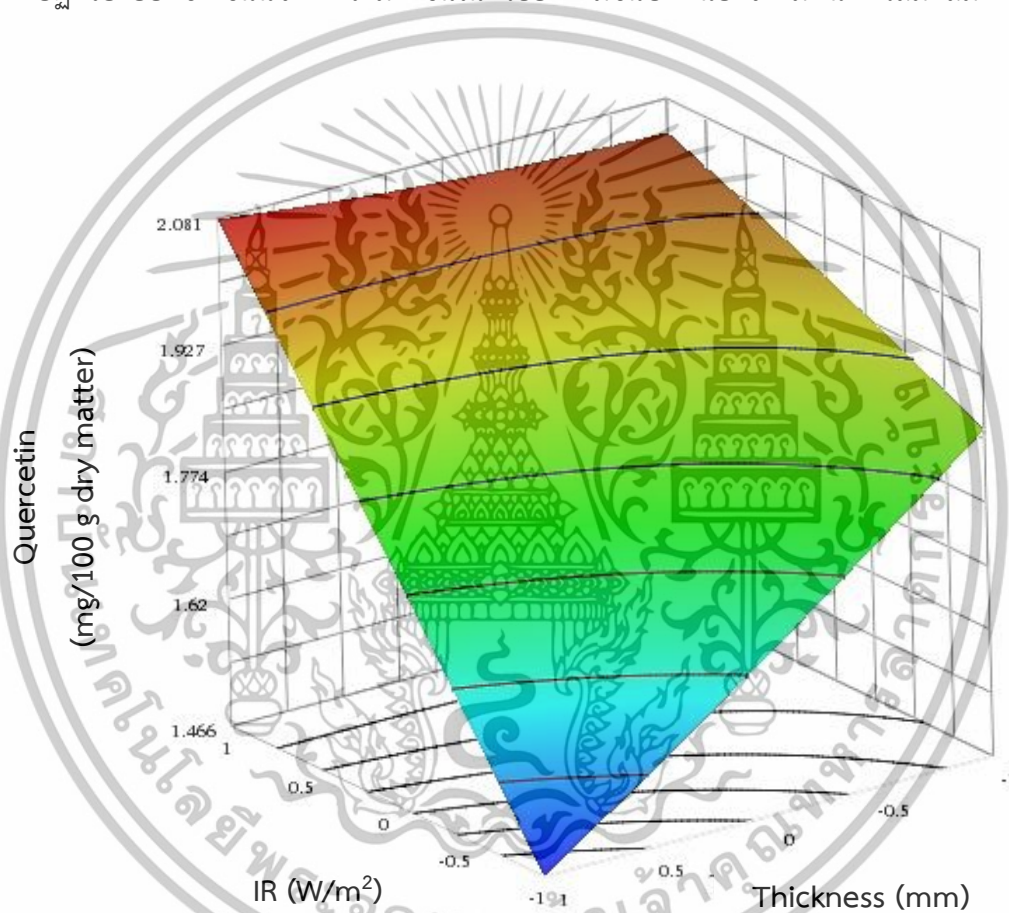
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความดันในห้องอบแห้งต่อปริมาณสารเคอควิทิน

4.3.3.2 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอินฟราเรดกับความหนาของชั้นวัสดุโดยกำหนดให้ความดันภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 15 kPa abs. ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณเคอควิทินเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งด้วยความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุมากที่สุดคือเท่ากับ 7496 W/m² และ 15 mm ตามลำดับ ปริมาณเคอควิทินจะมีค่าสูงที่สุดคือ 2.081 mg/100 g dry matter เป็นที่น่าสนใจว่าความหนาของชั้นวัสดุที่มากขึ้นเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วง 4576 - 7266 w/m² มีผลทำให้ปริมาณเคอควิทินลดลง แต่จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงตั้งแต่ 7266 W/m² การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้ปริมาณค่าเคอควิทินเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในหัวข้อ 4.2 ซึ่งการอบแห้งอยู่ภายใต้

สภาวะความเข้มรังสีที่สูงคือ 7496 W/m^2 ดังนั้นเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจึงส่งผลให้ปริมาณ เควอซิทินสูงขึ้น

ชั้นวัสดุที่มีความหนามากผนังเซลล์จะถูกทำลายในระหว่างการอบแห้งน้อยกว่า ทำให้การปลดปล่อยเอนไซม์สำหรับกระบวนการออกซิเดชันและไฮโดรไลเซชันน้อยและยังลดการสลายตัวของสารพฤกษเคมีด้วย (Wojdyto et al., 2009; Chen et al., 2017) นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง การสลายตัวที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระในบริเวณที่ของเหลวของวัสดุสัมผัสกับบรรยากาศแวดล้อม (Ren et al., 2018) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะเกิดได้มากขึ้นในตัวอย่างที่มีชั้นบางเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก

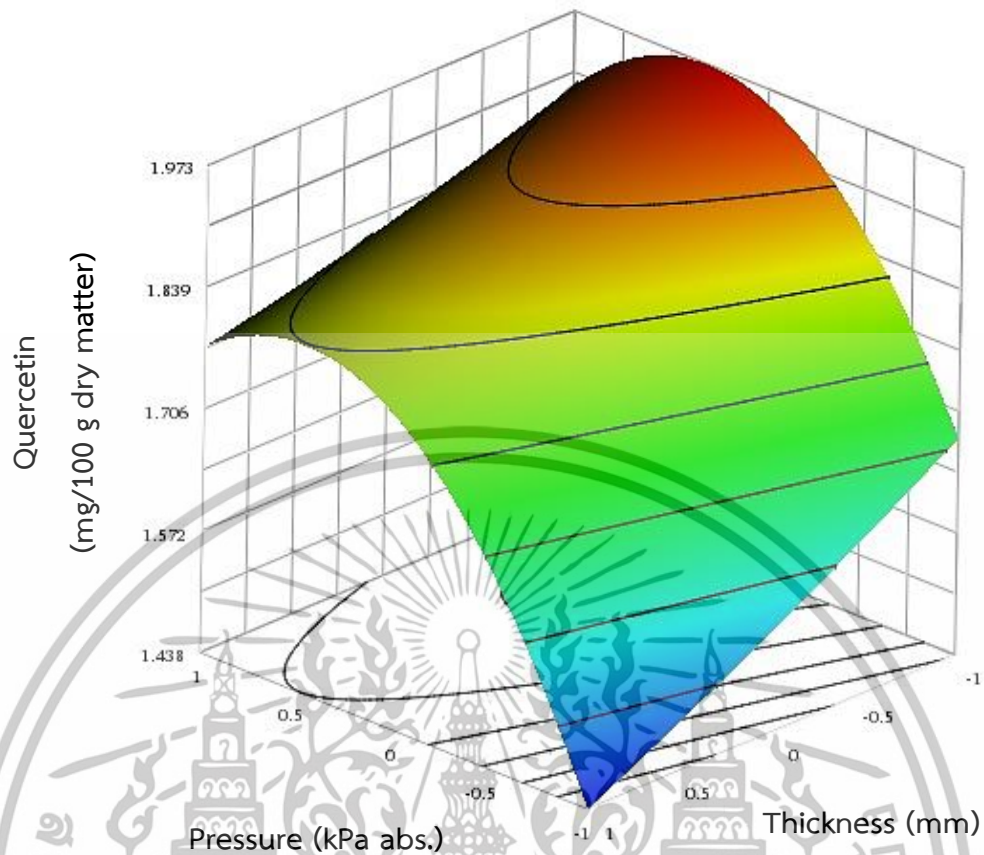


รูปที่ 4.14 อิทธิพลของความเข้มรังสีอินฟราเรดและความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเควอซิทิน

4.3.3.3 อิทธิพลของความดันภายในห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในห้องอบแห้งกับความหนาของชั้นวัสดุโดยกำหนดให้ความเข้มรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 6036 W/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าสารเควอซิทินมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ความดันภายในห้องอบแห้งที่สูงขึ้นโดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ $1.969 \text{ mg/100 g dry matter}$ ในสภาวะความดันภายในห้องอบแห้งประมาณ $18 - 20 \text{ kPa abs.}$ ความหนาของชั้นวัสดุ 5 mm และจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นวัสดุเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความดันในห้องอบแห้งและความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคอควิซิน

4.3.4 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม

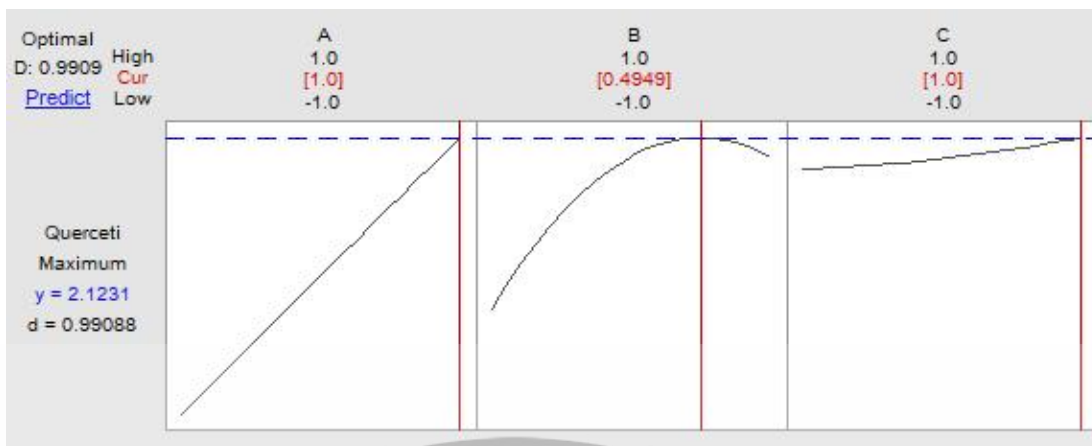
เมื่อนำสมการที่ (4.1) ศึกษาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR จะได้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่ได้ปริมาณเคอควิซินสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.16 เป็นดังนี้

ความเข้มรังสีอินฟราเรด (X_1) = 7496 W/m²

ความดันภายในห้องอบแห้ง (X_2) = 19.94 kPa abs.

ความหนาของชั้นวัสดุ = 15 mm

โดยมีปริมาณเคอควิซินที่ทำนายได้ = 2.123 mg/100 g dry matter



รูปที่ 4.16 สภาวะที่เหมาะสม (Optimization plot) ของความเข้มข้นสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุต่อปริมาณสารเคอซิทีน

4.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณสารเคอซิทีนระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลอง

เพื่อทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยวิธี VC-VIR ที่จะมีปริมาณเคอซิทีนสูงสุด โดยจากการทดลองอบแห้งจริงซึ่งทำการทดลองภายใต้ข้อจำกัดของความสามารถในการทำงานของเครื่องอบแห้งสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR คือความเข้มข้นสีอินฟราเรด 7496 W/m^2 ความดันภายในห้องแห้ง 5 kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ทำการทดลองอบแห้งตามสภาวะดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำเพื่อทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ย (One-Sample t-test) แสดงดังตารางที่ (4.11) $H_0 : \mu = 2.123$ และ $H_0 : \mu \neq 2.123$ โดยจะได้ค่าสถิติ $T = 2.26$ และ $T_{\alpha/2} = 4.303$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายอมรับสมมติฐานหลักได้ ($H_0 : \mu = 2.123$) นั่นคือค่าเฉลี่ยของปริมาณเคอซิทีนคือ $2.123 \text{ mg/100 g dry matter}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยในการทดลองเพื่อยืนยันสภาวะที่เหมาะสมพบว่าที่ระดับความเชื่อมั่นนี้มีช่วงของค่าเฉลี่ยปริมาณเคอซิทีนเท่ากับ 1.951 ถึง 2.672

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยการทดสอบค่าเฉลี่ย

Variable	N	Mean	St Dev	SE Mean	P
experiment	3	2.312	0.145	0.0837	0.153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 การทดลองเบื้องต้น: การอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อผลิตเพชรสังฆาตอบแห้งแบบลมร้อน สำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิง

การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมเพื่ออบแห้งเพชรสังฆาต การทดลองเบื้องต้นจึงดำเนินการเพื่อคัดเลือกเพชรสังฆาตที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนสำหรับใช้เป็นสิ่งทดลองอ้างอิงในงานวิจัยนี้ จากการทดลองอุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น DR และ D_{eff} เพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิอบแห้งสูงสุด คือ 100°C ทำให้ค่า DR สูงสุดและ D_{eff} มีค่ามากที่สุด คือ $0.0248 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ และ $9.1281 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอบแห้งนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 85 min อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้คุณภาพของเพชรสังฆาตแห้งดีขึ้น โดยปริมาณสารฟีนอลิกและเคอซิทินที่สูงที่สุดได้จากการอบแห้งเพชรสังฆาตแบบลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60°C

5.2 อิทธิพลของการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด

ในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วย IR นั้นการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุมีผลอย่างมากต่อลักษณะการอบแห้ง การใช้พลังงานในระหว่างการอบแห้ง และปริมาณของสารสำคัญที่คงอยู่ของเพชรสังฆาตแห้ง การอบแห้งโดยการใช้เทคนิคการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง และการลดความหนาของชั้นวัสดุช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลงได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของการอบแห้งเพชรสังฆาตมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอิทธิพลของการสันสะท้อนของเบต สภาวะสุญญากาศ และความหนาของชั้นวัสดุ ในหัวข้อการใช้พลังงานนั้น ระบบที่มีการใช้สภาวะสุญญากาศในการอบแห้งแบบอินฟราเรดมีความต้องการใช้พลังงานในระหว่างการอบแห้งสูงสุด สำหรับการสันสะท้อนของเบตมีผลในเชิงบวกต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอซิทินของเพชรสังฆาตแห้ง ในขณะที่การใช้สภาวะสุญญากาศในการอบแห้งกลับทำให้ปริมาณสารสำคัญนั้นลดลง โดยชั้นส่วนของวัสดุที่มีความหนาจะสามารถรักษาปริมาณของสารสำคัญได้ดี

โดยสรุปการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VC-VIR มีผลเชิงบวกต่อลักษณะการอบแห้งของการอบแห้งเพชรสังฆาต อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบ VIR เป็นเทคนิคการอบแห้งที่มีแนวโน้มที่ดีในแง่ของการคงไว้ซึ่งปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเคอซิทิน รวมถึงการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบ VIR นั้นมีความต้องการใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบ VC-VIR อีกประการหนึ่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับการสั้นสะท้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองโดยมีค่าตอบสนองคือปริมาณสารเคอซีทิน ทำการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken Design ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มรังสีอินฟราเรด (4576, 6036 และ 7496 W/m²) ความดันภายในห้องอบแห้ง (5, 15 และ 25 kPa abs.) และความหนาของชั้นวัสดุ (5, 10 และ 15 mm) จากรูปแบบสมการที่ได้พบว่า ความเข้มรังสีอินฟราเรด ความดันภายในห้องอบแห้ง และความหนาของชั้นวัสดุมีผลต่อค่าเคอซีทินอย่างมีนัยสำคัญ สมการการถดถอยกำลังสองมีค่า R² = 0.95 การทำนายปริมาณสารเคอซีทินจากสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งซึ่งมีความเข้มรังสีอินฟราเรด 7496 W/m² ความดันภายในห้องอบแห้ง 19.94 kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ได้ปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายเป็น 2.123 mg/100 g dry matter จากการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายกับปริมาณสารเคอซีทินจากการทดลองโดยการทดลองอบแห้งเพชรสังฆาตด้วยวิธี VC-VIR ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 7496 W/m² ความดันภายในห้องอบแห้ง 20 kPa abs. และความหนาของชั้นวัสดุ 15 mm ซึ่งได้ปริมาณสารเคอซีทินจากการทดลอง 2.312 mg/100 g dry matter จากการทดสอบทางสถิติได้ผลว่าปริมาณสารเคอซีทินจากการทำนายและการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

บรรณานุกรม

- กมล พลคำ. 2553. “การอบแห้งสับปะรดโดยใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวร่วมกับการพาอากาศร้อน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- คณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ. “บัญชียาหลักแห่งชาติ พ.ศ.2556.” [online]. Available : <http://kpo.moph.go.th/webkpo/tool/Thaimed2555.pdf>. 2556.
- นันทวัน บุญยประภัสร์ และอรนุช โชคชัยเจริญพร. 2542. สมุนไพร : ไม้พื้นบ้าน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักงานข้อมูลสมุนไพร มหาวิทยาลัยมหิดล : ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ.
- สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และภูมินทร์ แจ่มเชื้อ. 2554. “การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมชาติ โสภณธรรณฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อังคณา หิรัญสาลี, สุพรรณ ภัทรพรชัยวัฒน์, รัตติมา จีนาพงษา, ญัตตรา จันทร์สุวานิชย์ และศรัณยาธาราแสง. 2551. “ยารักษาโรคริดสีดวงทวารจากเพชรสังฆาต.” วารสารวิชาการสาธารณสุข, ปีที่ 17, ฉบับที่ 6, หน้า 1578-1588.
- อัญชลี จุฑะพุทธิ และเกสร อังศุสิงห์. 2549. คู่มือการขยายจากสมุนไพรสำหรับสถานบริการสาธารณสุขของรัฐ. กรุงเทพฯ : วังทองกราฟฟิคอาร์ต.
- Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida, Y. 1999. “Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley.” *Journal of Food Engineering*. 42 : 177-182.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Samimi-Akhijahani, H. 2008. “Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae).” *Energy Conversion and Management*. 49(10) : 2865-2871.
- Aimmanas, A., Pranee, P., Chivapat, S., Chuthaputti, A. 2002. “Subchronic toxicity of *Cissus quadrangularis* Linn”. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 24(1) : 39-51.
- Akgun, N.A. and Doymaz, I. 2005. “Modelling of olive cake thin-layer drying process”. [online]. Available: <http://doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.06.023>

- AOAC. 2005. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18th ed. AOAC International. Arlington, VA, USA.
- Balasundram, N., Sundram, K. and Samman, S. 2006. "Phenolic compound in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence and potential uses." **Food Chemistry**. 99 : 191-203.
- Box, G.E.P. and Wilson, K.B. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**. 13(1) : 1-45.
- Box, G.E.P., William, G.H. and Hunter, J.S. 1978. **Statistics for experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**. New York: Wiley.
- Bradley, R.A. 1958. "Determination of optimum operating conditions by experimental methods. Part I. Mathematics and statistics fundamental to the fitting of response surfaces." **Industrial Quality Control**. 15(1) : 16-20.
- Brenda, W.S. 2002. "Biosynthesis of flavonoids and effects of stress." **Current Opinion in Plant Biology**. 5 : 218-223.
- Cakmak, G. and Yildiz, C. 2011. "The prediction of seedy grape drying rate using a neural network method." **Computers and Electronics in Agriculture**. 75 : 132-138.
- Chan, E. W. C., Lim, Y. Y., Wong, S. K., Lim, K. K., Tan, S. P., Lianto, F. S., Yong, M.Y. 2009. "Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species." **Food Chemistry**. 113 : 166-172.
- Chen, Q., Li, Z., Bi, J., Zhou, L., Yi, J., Wu, X. 2017. "Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry." **LWT-Food Science and Technology**. 80 : 178-184.
- Chidambara Murthy KN, Vanitha A, Mahadeva Swamy M, Ravishankar GA. 2003. "Antioxidant and antimicrobial activity of *cissus quadrangularis* L." **Journal of Medicinal Food**. 6 : 99-105.
- Chopra, R.N., Bahdwar, R.L. and Ghosh S. 1965. **Poisonous plants of India. Vol. II**. Indian Council of Agricultural Reseach. New Delhi, India.
- Crank, J., 1975. **The Mathematics of Diffusion** 2^{ed}. Oxford University Press, London.

- Cuevas, M., Martínez-Cartas, M.L., P_erez-Villarejo, L., Hern_andez, L., García-Martín, J.F., S_anchez, S. 2019. "Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. Renew." **Energy**. 132 : 911–920.
- Daduang, J., Vichitphan, S., Daduang, S., Hongsprabhas, P. & Boonsiri, P. 2011. "High phenolics and antioxidants of some tropical vegetables related to antibacterial and anticancer activities." **African Journal of Pharmacy and Pharmacology**. 5(5) : 608-615.
- Das., S.K, Das. and Satish, Bal. 2004. "Drying performance of a batch type vibration aided infrared dryer." **Journal of Food Engineering**. 64 : 129–133.
- Das I., Das, S.K. and Satish, Bal. 2009. "Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying." **Journal of Food Engineering**. 95 : 166–171.
- Das, I., Arora, A. 2018. "Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying." **Journal of Food Engineering**. 223 : 208–219.
- Demiray, E., Tulek, Y. and Yilmaz, Y. 2013. "Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying." **LWT - Food Science and Technology**. 50 : 172-176.
- Deng, L.Z., Yang, X.H., Mujumdar, A.S., Zhao, J.H., Wang, D., Zhang, Q., et al. 2018. "Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure." **Drying Technology**. 36 : 893-907.
- Doymaz I, Pala M. 2003. "The thin-layer drying characteristics of corn." **Journal of Food Engineering**. 60 : 125–130.
- Doymaz, I. 2005. "Drying behaviour of green beans." **Journal of Food Engineering**. 69 : 161-165.
- Draper, N.R. 2006. **Response surface design**. Encyclopedia of Statistical Sciences, 2nd ed. Edited by Samuel Kotz. Wiley Press, New York. 11: 7232-7243.
- Drouzas, A.E., Tsami, E., Saravacos, G.D. 1999. "Microwave/vacuum drying of model fruit gels." **Journal of Food Engineering**. 39 : 117-122.
- Enechi, O. Odonwodo, I. 2003. "An assessment of the phytochemical and nutrient composition of the pulverized root of *Cissus quadrangularis*." **Bio-Research**. 1 : 63-8.

- Erich, G. 2006. **The Science of Flavonoids**. Springer Science + Business Media, Inc. USA.
- Fortes. M. and Okos, M.R. 1980. **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grain**. In : Mujumder, A.S., Ed., *Advances in Drying*, 1, Hemisphere, Washington DC, 119-154.
- Gachovska, T. K., A.A. Adedeji, M. Ngadi and G.V.S. Raghavan. 2008. "Drying characteristics of pulsed electric field-treated carrot." **Drying Technology**. 26(10) : 1244-1250.
- Ginzburg, A.S. 1969. **Application of infrared radiation in food processing**. Chemical and Process Engineering Series. Leonard Hill, London.
- Hamalainen, M., Nieminen, R., Vuorela, P., Heinonen, M. and Moilanen, E. 2007. "Anti-inflammatory effects of flavonoids: genistein, kaempferol, quercetin, and daidzein inhibit STAT-1 and NF-kappaB activations, whereas flavone, isorhamnetin, naringenin, and pelargonidin inhibit only NF-kappaB activation along with their inhibitory effect on iNOS expression and NO production in activated macrophages." **Mediators of Inflammation**. 4 : 1-10. [online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2007/45673>
- Hebber, H.U. and Rostogi. 2001. "Mass transfer during infrared drying of cashew kernel." **Journal of Food Engineering**. 47 : 1-5.
- Henderson, S.M. and S. Pabis. 1961. "Grain drying theory I: Temperature effects on drying coefficients." **Journal of Agricultural Engineering Research**. 6(3) : 169-174.
- Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC*. 17(6) : 1167-1172.
- Heat-tech Co.,Ltd.. 2015. "The phase shift of the ustulation." [online]. Available: <http://heater.heat-tech.biz/air-blow-heater/science-of-the-drying/basic-knowledge-of-the-drying/how-does-the-drying-progress/6996.html>.
- Honma, S., Murata, M. 2011. **Food preservation and processing study**. Tokyo kagaku dojin, Tokyo, Japan.
- Jamieson, J.A., Mcfee, R.H., Plass, G.N., Grube, R.H., and Richards, R.G. 1963. **Infrared Physics and Engineering**. New York, USA.
- Jaya, S. and Das, H. 2003. "A vacuum drying model for mango pulp." **Drying Technology**. 21(7) : 1215-1234.

- Jongyingcharoen, J.S., Thanimkarn, S., Vichaiya, P. "Paddy drying in a vibrationassisted vacuum infrared dryer." In **Proceedings of the 8th TSAE International Conference. Thai Society of Agricultural Engineering, 2015.** Bangkok, Thailand.
- Kim Jong-Wan., Bae Hwang-Chan., Kim Min-Chul., Lee Seung-Cheol. 2007. "Effect of far-Infrared Irradiation on the antioxidant activity of puerarlate radix extract." **Journal of Food Biochemistry.** 32 : 85-95.
- King, A. and Young, G. 1999. "Characteristics and occurrence of phenolic phytochemicals." **Journal of the American Dietetic Association.** 99 : 213-218.
- Khazaei, J., A. Arabhosseini and Z. Khosrobeygi. 2008. "Application of superposition technique for modeling behavior of a avishan (*Zataria multiflora*) Leaves." **Transactions of the ASABE.** 51(4) : 1383-1393.
- Khair, R., Pan, Z. and Salim, A. 2006. "Drying rates of thin layer rough rice drying using infrared radiation." In **Proceedings of the 2006 ASABE. Annual International Meeting,** Portland, Oregon, USA.
- Kothan, S., Dechsupa, S., Leger, G., Moretti, JL., Vergote, J. and Mankhetkorn, S. 2004). "Spontaneous mitochondrial membrane potential change during apoptotic induction by quercetin in K562 and K562/adr cells." **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology.** 82(12) : 1084-1090.
- Lee, G., W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. "Thin-layer drying characteristics of chicory root slices." **Transactions of the ASAE.** 47(5) : 1619-1624.
- Lee, S C., Jeong, Seok-Moon., Kim, So-Young., Park, Hae-Ryong., Nam, K.C. and Ahn, D.U. 2006. "Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls." **Food Chemistry.** 94 : 489-493.
- Lee, W.C., S. Yusof, N.S.A. Hamid and B.S. Baharin. 2006. "Optimizing conditions for hot water extraction of banana juice." **Journal of Food Engineering.** 75 : 473-479.
- Lekshmi, K.R., Rajesh, R., Mini, S., 2015. "Ethyl acetate fraction of *Cissus quadrangularis* stem ameliorates hyperglycaemia-mediated oxidative stress and suppresses inflammatory response in nicotinamide/streptozotocin induced type 2 diabetic rats." **Phytomedicine.** 22 : 952-960.
- Lewis, W. K. 1921. "The rate of drying of solid materials." **Journal of Industrial Engineering Chemistry.** 13(5) : 427-432.
- Luikov, A.V. 1966. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies.** Oxford : Pergamon Press.

- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. A. 2002. "New model for single-layer drying. **Drying Technology.**" 20(7) : 1503-1513.
- Montgomery, D.C. 1991. **Design and Analysis of Experiments.** 3rd ed. New York: Wiley.
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtagaza, M.H. 2011. "Evaluation of energy consumption in different drying methods." **Energy Conversion and Management.** 52(2) : 1192-1199.
- Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 1995. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments.** New York: Wiley.
- Naczki, M. and Shahidi, F. 2004. "Extraction and analysis of phenolics in food." **Journal of Chromatography A.** 1054 : 95-111.
- Niamnuy, C., Nachaisin, M., Laohavanich, J. and Devahastin, S. 2011. "Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions." **Food Chemistry.** 129 : 899-906.
- Nowak, D. and Lewicki, P.P. 2004. "Infrared drying of apple slices." **Innovative Food Science and Emerging Technology.** 5 : 353-360.
- Ozbek, B. and Dadali, G. 2007. "Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave." **Journal of Food Engineering.** 83(4) : 541-549.
- Ozdemir, M., and Devres O. Y. 1999. "The thin layer characteristics of hazelnuts during roasting." **Journal of Food Engineering.** 42 : 225-233.
- Ozisik M.N. 1985. **Heat transfer: a basic approach.** New York, McGraw-Hill.
- Page, G.E. 1949. "Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers." Master's thesis in Mechanical Engineering Department, Purdue University.
- Panpimanmas, S., Sithipongsri, S., Sukdanon, C. and Manmee, C. 2010. "Experimental comparative study of the efficacy and side effects of *Cissus quadrangularis* L. (Vitaceae) to Daflon (Servier) and placebo in the treatment of acute hemorrhoids." **Journal of The Medical Association of thailand.** 93(12) : 1360-1367.
- Pan, Z., Shih, C., Mchugh, T.H. and Hirschberg, E. 2008. "Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying." **LWT-Food Science and Technology.** 41 : 1944-1951.
- Park, J.H., Lee, J.M., Cho, Y.L., Kim, C.T., Kim, C.J., Nam, K.C. and Lee, S.C. 2009. "Effect of Far- infrared heater on the physicochemical characteristics of green tea during processing." **Journal of Food Biochemistry.** 33 : 149-162.

- Perez-Francisco, J.M., R. Cerecero-Enrriquez, I. Andrade-González, J.A. Ragazzo-Sánchez and G. Luna-Solano. 2008. "Optimization of vegetal pear drying using response surface ethodology." **Drying Technology**. 26 : 1401-1405.
- Ren, F., Perussello, A.C., Zhang, Z., Kerry, P.J., Tiwari, K.B., 2018. "Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions." **LWT-Food Science and Technology**. 87 : 102-111.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J. and Paganga, G. 1997. "Antioxidant properties of phenolic compounds." **Trends in Plant Science**. 2 : 152-159.
- Rho, H.S., Ahn, S.M., Lee, B.C., Kim, M.K., Ghimeray, A.M., Jin, C.W., Cho, D.H., 2010. "Changes in flavonoid content and tyrosinase inhibitory activity in kenaf leaf extract after far-infrared treatment." **Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters**. 20 : 7534-7536.
- Sakai Noboru, and Hanzawa Tamotsu. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan." **Trends in Food Science & Technology**. 5(1) : 357-362.
- Sadin, R., Chegini, G.-R., Sadin, H. 2014. "The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer." **Heat and Mass Transfer**. 50 : 501-507.
- Sakai Noboru, and Hanzawa Tamotsu. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan." **Trends in Food Science & Technology**. 5(1) : 357-362.
- Salehi, F. and Kashaninejad, M. 2018. "Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying." **Information Processing in Agriculture**. 5(4) : 516-253.
- Samoticha, J., Wojdyło, A., Lech, K., 2016. "The influence of different the drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries." **LWT-Food Science and Technology**. 66 : 484-489.
- Sandu, C. 1986. "Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis." **Biotechnology Progress**. 2 : 109-119.
- Saprow, E.M.and Cess, R.D. 1970. **Radiation Heat Transfer**. California.
- Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G. and Wijesinghe, B. 2003. "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics durings fluidized bed drying." **Journal of Food Engineering**. 58 : 277-283.

- Shih, C., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D. and Hirschberg, E. 2008. "Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries." **Transactions of ASABE**. 51 : 205-216.
- Singhania, R.R., Rajeev, K.S. and Ashok, P. 2007. "Improved Cellulase Production by *Trichoderma reesei* RUT C30 under SSF Through Process Optimization". **Applied Biochemistry and Biotechnology**. 142 : 60-70.
- Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. 2011. "A New Model and Quality of Unfrozen and Frozen Cooked Rice Dried in a Microwave Vibro-Fluidized Bed Dryer." **Drying Technology**. 29(7) : 735-748.
- Suttana, W., Mankhetkorn, S., Poompimon, W., Palagani, A., Zhokhov, S. and Gerlo, S. 2010. "Differential chemosensitization of P-glycoprotein overexpressing K562/Adr cells by withaferin A and Siamois polyphenols. Molecular cancer." [Online]. Available : <http://www.doi.org/10.1186/1476-4598-9-99>.
- Swamy, G. J. & Muthukumarappan, K. 2017. "Optimization of continuous and intermittent microwave extraction of pectin from banana peels." **Food Chemistry**. 220 : 108-114.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R. and Soponronnarit, S. 2007. "Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices." **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. 29(3) : 809-816.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., Soponronnarit, S. 2009. "Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice." **Journal of Food Engineering**. 92 : 100-106.
- Thiangtham, J. 2003. **Determination of Antioxidant Constituents in the Medicinal Plant *Cissus quadrangularis* Linn.** Master's thesis in Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University. [Online] Available : <http://www.cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/2048>.
- Thompson, T. L., Peart, R. M. and Foster, G. H. 1968. "Mathematical simulation of corn drying-a new model." **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. 11 : 582-586.
- Uribe, E., Marín, D., Gálvez, V.A., Fuentes, Q.I., Rodríguez, A. 2016. "Assessment of vacuum-dried peppermint (*Mentha piperita* L.) as a source of natural antioxidants." **Food Chemistry**. 190 : 559-565.

- Vega-Galvez, A., A. Ayala-Aponte, E. Notte, L. de la Fuente and R. Lemus-Mondaca. 2008. "Mathematical modeling of mass transfer during convective dehydration of brown algae *macrocystis pyrifera*." **Drying Technology**. 26(12) : 1610-1616.
- Vermerris, W. and Nicholson, R. 2006. **Phenolic Compound Biochemistry**. Springer: Netherlands.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G, Wu, J. and Hu, X. 2007. "Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace." **Food Research International**. 40 : 39-46.
- Wankhadea, P.K., Sapkala, R.S. and Sapkal, V.S. 2013. "Drying Characteristics of Okra slices on drying in Hot Air Dryer." **Procedia Engineering**. 51 : 371-374.
- Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying." **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. 11 : 668-672.
- Wojdyto, A., Figiel, A., Legua, P., Lech, K., Carbonell-Barrachina, A.A., Hernandez, F., 2016. "Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method." **Food Chemistry**. 207 : 170-179.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H. I. 2001. "Mathematical modeling of thin layer solar drying model of sultana grapes." **Energy**. 26 : 457-465.
- Zare, D., Naderi, H. and Jafari, A.A. 2012. "Experimental and theoretical investigation of rough rice drying in infrared-assisted hot air dryer using artificial neural network." **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 69 : 286-290.
- Zheng, M., Xia, Q., Lu, S., 2015. "Study on drying methods and their influences on effective components of loquat flower tea." **LWT-Food Science and Technology**. 63 : 14-20.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THIN-LAYER DRYING CHARACTERISTICS OF *Cissus Quadrangularis* Linn. AND SELECTION OF SUITABLE DRYING MODELS

*Setthawat THANIMKARN, Jiraporn Sripinyowanich JONGYINGCHAROEN
Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Corresponding author: Setthawat THANIMKARN. E-mail: satthawat23@hotmail.com

Keywords: *Cissus Quadrangularis*; Drying model; Hot air drying

ABSTRACT

The thin-layer drying characteristics of *Cissus quadrangularis* Linn (CQ) undergoing hot air drying at the temperatures of 40, 60, 80 and 100°C were evaluated. The results showed that increasing drying temperature increased the drying rate and consequently decreased the drying time. The drying times were 600, 260, 75 and 45 min and the maximum drying rate were 0.009, 0.027, 0.030 and 0.064 g water/g dry matter·min when drying at 40, 60, 80 and 100°C, respectively. The falling rate period was observed for every drying condition. The linear-plus-exponential-type model ($MR = \exp(-kt^n + bt + c)$) was the best descriptive model for hot air drying of CQ in the temperature range of 40-100°C. R^2 , χ^2 and RMSE values were varied between 0.9975-0.9997, 0.00003-0.00028 and 0.00507-0.01427, respectively.

INTRODUCTION

CQ, also known as “Phet-Cha-Sung-Khaat” in Thai, is a climber of Vitaceae family. The studies on phytochemical components of CQ indicated that ascorbic acid, triterpene, β -sitosterol, ketosteroid, two asymmetrical tetracyclic triterpenoids and calcium are the major constituents of this herbal plant [1,2]. The stout fleshy quadrangular stem of CQ is used for treatments of various conditions such as hemorrhoid and irregular menstruation. It also accelerates bone fracture healing [3-4].

In general, CQ is not consumed as a raw or fresh form as it comprises calcium oxalate which leads to throat irritation. As same as most herbal plants, it must be dried, ground and encapsulated in capsules for consumption. However, one of the challenges for CQ drying is due to its structure and moisture content; CQ is stout and has very thick wall and very high moisture content. Hence, the study on drying characteristics of CQ would be beneficial.

Drying of moist materials is a complicated process involving simultaneous heat and mass transfer. Thin-layer drying is the process of drying in one layer of sample particles or slices. Currently, there are three types of thin-layer drying models used to describe the drying phenomenon, namely, theoretical model, which considers only the internal resistance to moisture transfer between product and heating air. Theoretical model needs assumptions of geometry of a typical food, its mass diffusivity and conductivity [5-6]; semi-theoretical and empirical models which consider only the external resistance, semi-theoretical model is a tradeoff between the theoretical and empirical ones, derived from simplification of Fick's second law of diffusion or modification of the simplified model and empirical model neglects the fundamentals of drying process and presents a

direct relationship between average moisture and drying time by means of regression analysis [7-8].

In this study; therefore, attention is focused on the investigation of the thin-layer drying characteristics of CQ in a hot air dryer and on modeling the drying process of CQ based on semi-theoretical and empirical models over a wide temperature range.

MATERIALS AND METHODS

Experimental material

Fresh CQ was purchased from the herbal farm in Prachin Buri Province, Thailand and stored at 4°C for one day for equilibration of moisture prior to using. The Sample was washed and cut at the thickness of 5 mm, of which the top and bottom portions were excluded. The initial moisture content was 8.8 ± 0.1 g water/g dry matter

Experimental procedure

An electric thermal blast dryer (KNT.Experimental Apparatus Co., Ltd., Thailand) was used for drying CQ. The air velocity was kept at a constant value of 1.20 ± 0.03 m/s at 3 cm just above the tray surface. The hot air drying experiments were conducted at the temperatures of 40, 60, 80 and 100°C. During the process of drying, the sample was collected for moisture content determination at each predetermined interval. Drying was performed until the moisture content of the dried QC reached about 0.10 g water/g dry matter. The moisture content was determined by drying in a hot air oven at 105°C for 24 h [9]. The experiment was conducted in triplicate.

Drying modeling

The experimental drying data of CQ at the different temperatures were fitted into 8 thin-layer drying models listed in Table 1. In these models, moisture ratio (MR) and drying rate (DR) were calculated using the following equations:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

where M_i , M_t , M_e , and $M_{t+\Delta t}$ are moisture content (g water/g dry matter) at initial, specific time, equilibrium, and $t+\Delta t$, respectively; t is drying time (min).

The goodness of fit of the tested mathematical models to the experimental data was evaluated using three statistical criteria, including coefficient of determination (R^2), reduced chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE). The higher the R^2 values and the lower the χ^2 and RMSE values obtained, the better the model fit

[7,10,11]. These statistical criteria were calculated as follows:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n MR_{\text{exp},i} \times MR_{\text{pre},i}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n MR_{\text{exp},i}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n MR_{\text{pre},i}^2\right)}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - n_p} \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2} \quad (5)$$

where $MR_{\text{exp},i}$ and $MR_{\text{pre},i}$ are the i th experimental and predicted moisture ratios, respectively; N is the number of observations; and n_p is the number of constants in regression model.

RESULTS AND DISCUSSION

Drying characteristics of CQ

The drying results showed that increasing drying temperature increased the drying rate and consequently decreased the drying time. It took only 45 min to dry CQ at 100°C while the drying times were 600, 260 and 75 min when drying at 40, 60 and 80°C, respectively (Fig. 1).

As can be seen from Fig. 2, the constant rate drying period was not observed in hot air drying of CQ; the drying process took place in the falling rate period except a very short accelerating period at the beginning. The moisture loss rate of CQ was faster at the beginning than that at the end. This observation is in agreement with previous results on thin-layer drying of biological products [12-13]. Because, it is difficult for the biological products to be saturated with water during convection drying, the constant rate period was absent.

The maximum drying rate obtained from each drying condition was determined. It was found that the maximum drying rates were 0.009, 0.027, 0.030 and 0.064 g water/g dry matter·min when drying CQ at 40, 60, 80 and 100°C, respectively. Unexpectedly, the maximum drying rates of CQ at the temperatures of 60 and 80°C were very close and only half of the maximum drying rate obtained from drying at 100°C. As compared to the lowest drying temperature of 40°C, the maximum drying rate increased by 200, 233 and 610% when drying at 60, 80, 100°C, respectively. The apparent result is possibly due to temperature range set in the experimental. As indicated previously, low temperature range is set below 40°C, medium temperature range is set in the range of 60-80°C and high temperature range is set to 100°C. For this reason, the resultant data is showed accordingly.

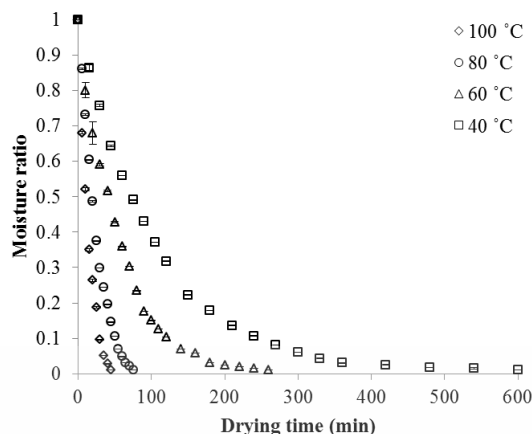


Fig. 1 Drying curves of hot air drying of CQ at different drying temperatures

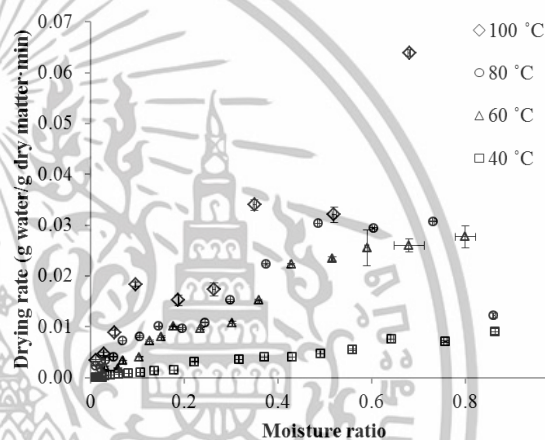


Fig. 2 Drying rate curves of hot air drying of CQ at different drying temperatures

Mathematical drying models

The results of drying models constants and coefficients and the statistical criteria used to evaluate goodness of fit of the models, namely R^2 , χ^2 and RMSE, are listed in Table 2. In all cases, R^2 values were higher than 0.92, χ^2 and RMSE values were lower than 0.01114 and 0.10041, respectively. The R^2 values of the Page, Henderson and Pabis, Two term, Midilli et al. and the linear-plus-exponential-type models were higher than 0.99. The corresponding χ^2 and RMSE values were also lower than 0.00102 and 0.02990, respectively. This indicated that the five models were fitted very well to the experimental data of CQ drying. However, the linear-plus-exponential-type model was the best descriptive model for hot air drying of CQ in the temperature range of 40-100°C; the models are as follows:

At 40 °C,
 $MR = \exp(-0.0093t^{1.0070}) + 1.6 \times 10^{-5}t - 0.0009$

At 60 °C,
 $MR = \exp(-0.0150t^{1.0300}) + 8.1 \times 10^{-5}t - 0.0230$

At 80 °C,
 $MR = \exp(-0.0205t^{1.1830}) + 32.2 \times 10^{-5}t - 0.0019$

At 100 °C,
 $MR = \exp(-0.0793t^{0.9157}) + 165.2 \times 10^{-5}t - 0.0034$

Table 1 Thin layer drying models applied for hot air drying of CQ

Model no.	Model name	Model	References
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[14]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[15]
3	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	[16]
4	Two term	$MR = a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$	[17]
5	Approximation of diffusion	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[18]
6	Midilli et al.	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	[19]
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[8]
8	The linear-plus-exponential-type model	$MR = \exp(-kt^n) + bt + c$	[11]

Table 2 Constant and coefficients and statistical analysis for the thin-layer drying models of CQ hot air drying

No.	T °C)	Constants				R ²	χ ²	RMSE
1	40	$k = 0.009541$				0.9995	0.00004	0.00611
	60	$k = 0.017950$				0.9971	0.00025	0.01551
	80	$k = 0.039980$				0.9846	0.00131	0.03506
	100	$k = 0.071140$				0.9940	0.00060	0.02330
2	40	$k = 0.009832$	$n = 0.993600$			0.9996	0.00004	0.00604
	60	$k = 0.017270$	$n = 1.009000$			0.9971	0.00027	0.01546
	80	$k = 0.018060$	$n = 1.234000$			0.9991	0.00010	0.00943
	100	$k = 0.061090$	$n = 1.053000$			0.9949	0.00060	0.02192
3	40	$k = 0.009528$	$a = 0.998900$			0.9995	0.00004	0.00610
	60	$k = 0.017780$	$a = 0.990800$			0.9971	0.00026	0.01525
	80	$k = 0.042040$	$a = 1.054000$			0.9900	0.00102	0.02990
	100	$k = 0.071290$	$a = 1.002000$			0.9941	0.00068	0.02329
4	40	$k_0 = 2.163000$	$k_1 = 0.009516$	$a = 0.002180$	$b = 0.997800$	0.9995	0.00005	0.00609
	60	$k_0 = 0.017590$	$k_1 = 4.034000$	$a = 0.981000$	$b = 0.019060$	0.9972	0.00028	0.01496
	80	$k_0 = 0.066410$	$k_1 = 0.071670$	$a = 9.220000$	$b = -8.219000$	0.9991	0.00012	0.00940
	100	$k_0 = 0.085620$	$k_1 = 0.089210$	$a = 5.995000$	$b = -4.998000$	0.9950	0.00076	0.02142
5	40	$k = 0.009750$	$a = 0.364200$	$b = 0.966500$		0.9995	0.00004	0.00611
	60	$k = 0.713500$	$a = 0.031590$	$b = 0.024320$		0.9743	0.00241	0.04523
	80	$k = 0.069350$	$a = -51.950000$	$b = 0.987400$		0.9991	0.00011	0.00934
	100	$k = 0.087380$	$a = -0.988700$	$b = 0.898800$		0.9946	0.00071	0.02231
6	40	$k = 0.009267$	$n = 1.008000$	$a = 0.999000$	$b = 0.000015$	0.9989	0.00013	0.01013
	60	$k = 0.015200$	$n = 1.034000$	$a = 0.980200$	$b = -0.000008$	0.9974	0.00027	0.01465
	80	$k = 0.020450$	$n = 1.184000$	$a = 0.998200$	$b = -0.000344$	0.9996	0.00005	0.00606
	100	$k = 0.079790$	$n = 0.915300$	$a = 0.997300$	$b = -0.001709$	0.9982	0.00028	0.01306
7	40	$a = -0.005482$	$b = 0.000006$			0.9209	0.01114	0.10041
	60	$a = -0.011520$	$b = 0.000031$			0.9570	0.00506	0.06746
	80	$a = -0.029150$	$b = 0.000217$			0.9975	0.00028	0.01569
	100	$a = -0.050540$	$b = 0.000652$			0.9865	0.00180	0.03795
8	40	$k = 0.009286$	$n = 1.007000$	$b = 0.000016$	$c = -0.000910$	0.9997	0.00003	0.00507
	60	$k = 0.014990$	$n = 1.030000$	$b = 0.000081$	$c = -0.023020$	0.9975	0.00025	0.01427
	80	$k = 0.020450$	$n = 1.183000$	$b = -0.000322$	$c = -0.001854$	0.9996	0.00005	0.00606
	100	$k = 0.079340$	$n = 0.915700$	$b = -0.001652$	$c = -0.003397$	0.9982	0.00028	0.01304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The comparison of the experimental moisture ratio with the moisture ratio predicted by the linear-plus-exponential-type models is given in Fig. 3. The data points of the plot between the experimental and predicted values banded around the 45° straight line. This indicated that the linear-plus-exponential-type models described the data of hot air drying of CQ satisfactorily.

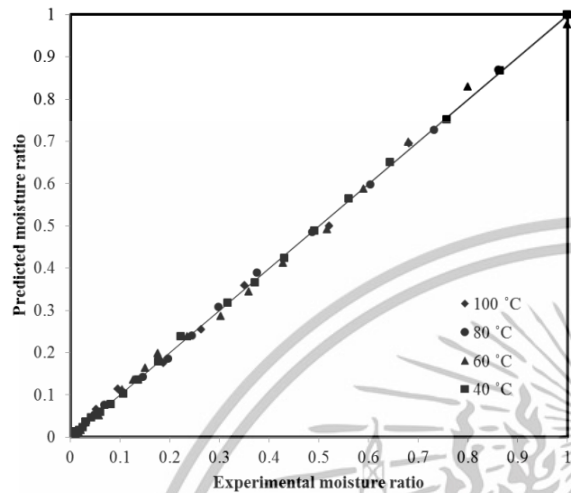


Fig. 3 Comparisons of experimental and predicted moisture ratio of CQ at different drying temperatures by the linear-plus-exponential-type model.

CONCLUSION

CQ was dried from the moisture content of 8.8 ± 0.1 g water/g dry matter to 0.1 g water/g dry matter for 600, 260, 75 and 45 min at 40, 60, 80 and 100 °C. The maximum drying rates were 0.009, 0.027, 0.030 and 0.064 g water/g dry matter·min, respectively. For the drying conditions of this study, the linear-plus-exponential-type model ($MR = \exp(-kt^n + bt + c)$) could describe the drying data of CQ most satisfactorily.

REFERENCES

- Enechi, O.C. and Odonwodo, I. An assessment of the Phytochemical and Nutrient composition of the pulverized root of *Cissus quadrangularis*. *Bio-Research*. 1(1): 63-68. (2003)
- Shirley, D.A. and Sen, S.P. High-resolution X-ray photoemission Studies on the active constituents of *Cissus quadrangularis*. *Current Sci*. 35: 317 (1966)
- Chopra, S.S., Patel, M.R., Gupa, L.P. and Datta, I.C. Studies on *Cissus quadrangularis* in experimental fracture repair: effect on chemical parameters in blood. *Ind J Med Res*. 63: 824-8 (1975)
- Chopra, S.S., Patel, M.R. and Awadhiya, R.P. Studies of *Cissus quadrangularis* in experimental fracture repair: a histopathological study. *Ind J Med Res*. 64: 1365-8 (1976)
- Demirtas, C., Ayhan, T. and Kaygusuz, K. Drying behavior of hazelnuts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 76: 559-564 (1998)
- Ece, M.C. and Cihan, A. A liquid diffusion model for drying rough rice. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 36: 837-840 (1993)
- Özdemir, M. and Devres, Y.O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*. 42: 225-233(1999)
- Wang, C.Y. and Singh, R.P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 11: 668-672 (1978)
- Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis*, 18th ed.; AOAC: Washington, DC (2005)
- Ertekin, C. and Yaldiz, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*. 63: 349-359 (2004)
- Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. A New Model and Quality of Unfrozen and Frozen Cooked Rice Dried in a Microwave Vibro-Fluidized Bed Dryer. *Drying Technology*. 29: 7, 735-748 (2011)
- Diamante, L.M. and Munro, P. A. Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*. 26: 99 (1991)
- Doymaz, I. and Pala, M. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*. 60: 125-130 (2003)
- Bruce, D.M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 32: 337-347 (1985)
- Page, G.E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA (1949)
- Henderson, S.M. and Pabis, S. Grain drying theory II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6: 169-174 (1961)
- Henderson, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC*, 17, 1167-1172 (1974)
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying model of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465 (2001)
- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*. 20(7): 1503-1513 (2002)



Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn.



Setthawat Thanimkarn^a, Ekkapong Cheevitsopon^b,
Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{a,*}

^a Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

^b Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Food science
Food technology
Infrared drying
Vibration
Vacuum drying
Cissus quadrangularis Linn.
Quercetin

ABSTRACT

Infrared (IR), vibratory bed assisted infrared (VIR), vacuum infrared (VC-IR), and vibratory bed assisted vacuum infrared (VC-VIR) drying of *Cissus quadrangularis* Linn. (CQ) were conducted. The objective was to investigate the effects of vibration, vacuum, and material thickness on IR drying of CQ. VC-VIR drying of 5-mm CQ provided the highest maximum drying rate (DR) of 0.258 g water/g dry matter·min. Although the vacuum operation contributed to improved effective moisture diffusivity (D_{eff}), it consumed high energy and degraded active compounds of CQ. VIR drying could be a more promising technique. VIR drying of 15-mm CQ produced the greatest total phenolic content (TPC) and quercetin content of 1083.62 mg GAE/100 g dry matter and 3.472 mg/100 g dry matter, respectively. The lowest total color difference (ΔE) of 13.69 was also obtained. It required low specific energy consumption (SEC) of 17.62 kWh/kg and provided maximum DR of 0.112 g water/g dry matter·min.

1. Introduction

Cissus quadrangularis Linn. (CQ) is one of the most frequently used medicinal plants in Thailand and many countries in Asia and Africa (Thiangtham, 2003). The stout fleshy quadrangular stem of CQ has been used for treating diverse physical conditions such as rheumatic disease, allergies, skin diseases, piles, hemorrhoid and irregular menstruation (Bhujade et al., 2012; Vijayalakshmi et al., 2013). It also accelerates bone fracture healing (Lekshmi et al., 2015). It is rich in phenolic compounds and flavonoids such as kaempferol and quercetin (Kumar et al., 2015; Lekshmi et al., 2015). CQ however cannot be consumed raw as it contains calcium oxalate that causes throat irritation. Like most herbal plants, it must be dried, ground and encapsulated in capsules for consumption. Therefore, calcium oxalate would have no effect on throat irritation.

Drying is a critical process in CQ manufacturing because this process may affect the pharmacological properties of dried CQ. The traditional drying process for most herbal plants is sun dry. It is time-consuming and weather-dependent. Hot air (HA) drying has been alternatively used in commercial manufacturing; however, long drying period causes very high degradation of the product (Kumar et al., 2006; Siriamornpun et al., 2012). Alternatively, infrared (IR) has been reported to be successfully

applied in drying of foods and agricultural products. IR has been shown to cleave covalent bonds and liberate antioxidant compounds such as flavonoids, carotene, tannin, ascorbate, flavoprotein, and polyphenols in repeating polymers (Rho et al., 2010).

Unfortunately, IR does not penetrate deeply into materials and it has been considered for surface heating only. Mechanical system like vibration would be useful for allowing the material to be irradiated by IR uniformly. It has been reported that there was no significant effect of material bed depth on drying rate when drying paddy by vibration-aided IR drying (Das et al., 2004). In addition, drying in vacuum has been proved favorable for heat-sensitive material. Lower pressure leads to lower boiling point of water; hence, drying could be achieved at lower temperature. As a result, heat damage during drying is minimal.

Up to date, research on vibration-aided vacuum IR drying is very rare. This technique is expected to be a promising technique for drying herbal plants as IR radiation has been renowned for the enhancement of many active compounds in biological materials (Rho et al., 2010; Azad et al., 2018). IR also has many further intrinsic advantages such as simplicity of equipment set up, fast transient response, and energy saving (Rastogi, 2012). In this study, vibration and vacuum systems were added to IR drying to improve its limited surface heating.

* Corresponding author.

E-mail address: jiraporn.jo@kmitl.ac.th (J.S. Jongyingcharoen).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01999>

Received 11 September 2018; Received in revised form 23 May 2019; Accepted 20 June 2019

2405-8440/© 2019 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Therefore, the aim of this study was to conduct vibratory bed assisted vacuum infrared (VC-VIR) drying of CQ. The effects of vibration, vacuum, and material thickness on drying characteristics, energy consumption during drying, and physicochemical properties of dried CQ were investigated. The promising technique for improving drying characteristic and quality of dried CQ would be reported. It should be good for energy saving and for application in industrial processes as well.

2. Materials and methods

2.1. Sample

Fresh CQ (Fig. 1) was purchased from an herbal supplier in Prachin Buri province, Thailand. The whole plant was cleaned with tap water, air dried, packed in a polyethylene zip lock bag, and stored at 4 °C. It was allowed to equilibrate to room temperature prior to experiments. Top and bottom portions of the CQ aerial part were excluded in this study. The initial moisture content of the samples was 10.10 ± 0.15 g water/g dry matter.

2.2. Schematic of a vibratory bed assisted vacuum infrared dryer

Schematic of the VC-VIR dryer is shown in Fig. 2. It consisted of four main components: an IR heating unit, a vibratory bed, a vacuum system, and a control system. A drying chamber was cylindrical with a diameter and length of 30 and 60 cm, respectively. Two 800-W IR (far infrared rays) heaters (CF Series, Sang Chai Meter Co., Ltd., Bangkok, Thailand) were fixed on the inside at the top of the chamber. The distance between the heater and the drying tray was fixed at 20 cm. The drying tray was made of perforated stainless steel with dimensions of 40 cm×20 cm×5 cm. It was mounted on the vibratory bed. A variable speed motor was attached to an eccentric joint to transmit vertical vibration to the drying tray. A vacuum pump (ENWA 1EN-030-01, Norta MIT GmbH, Hamburg, Germany) was used to maintain the vacuum condition of the system. A centrifugal fan was driven by a 0.5 kW motor to provide air ventilation in case no vacuum was required.

2.3. Experimental procedure

CQ stem pieces were dried by four drying techniques—infrared (IR), vibratory bed assisted infrared (VIR), vacuum infrared (VC-IR), and vibratory bed assisted vacuum infrared (VC-VIR) drying—in order to investigate the effects of vibration and vacuum on IR drying of CQ. The thickness of CQ stem pieces was also varied from 5, 10, to 15 mm. IR intensity of 7496 W/m^2 was selected based on previous work on the effect of IR intensity on the quality of CQ and used for all drying techniques. There are many works on IR drying using the same IR intensity (Eskandari et al., 2018; Wu et al., 2019; Lara et al., 2019). The driving motor of 800 rpm provided vibration for the drying tray for VIR and VC-VIR drying. When vacuum is not needed (IR and VIR drying), air velocity of 1 m/s, measured by a vane anemometer with a precision of ± 0.1 m/s (Wilh. Lambrecht GmbH, Göttingen, Germany), was applied for ventilation. An absolute air pressure of 5 kPa was maintained for VC-IR and VC-VIR drying condition. At the beginning of the experiment, two hundred and sixty grams of CQ was placed on the drying tray. The mass of this CQ was measured repeatedly at some intervals in order to determine its moisture content (see Section 2.4). Moisture ratio (MR), drying rate (DR), and effective moisture diffusivity (D_{eff}) were calculated



Fig. 1. Fresh CQ stems.

as respectively shown in Section 2.4 and 2.5 to present moisture transport properties of CQ during drying. Drying time to achieve the CQ final moisture content of 0.10 g water/g dry matter was determined. Energy consumption during the drying process was measured (Section 2.6). Physicochemical properties of the dried CQ as listed in Section 2.7 were also evaluated. In this regard, hot air (HA) drying of CQ with piece thickness of 5 mm was conducted at 60 °C to produce a reference treatment. Fresh CQ was also used as a control to compare the physicochemical properties.

2.4. Determination of drying characteristics

Moisture content of CQ was determined by drying 5 g of CQ in a HA oven (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) at 105 °C for 24 h (AOAC, 2005). Moisture content in dry basis was calculated as follows:

$$M = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (1)$$

where M , m_w , and m_d are moisture content (g water/g dry matter), wet mass of the material (g), and dry mass of the material (g), respectively.

The moisture content of the CQ was used to calculate MR and DR as follows (Xie et al., 2017):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

where M_i , M_t , M_e , and $M_{t+\Delta t}$ are moisture content (g water/g dry matter) at the initial time, at a specific time, at equilibrium, and at $t+\Delta t$, respectively; t is drying time (min). M_e was assumed to be zero for radiative drying (Sripinyowanich and Nookhorm, 2011).

2.5. Calculation of effective moisture diffusivity

Mechanism of moisture movement within a biological material during the falling rate period is dominated by a diffusion phenomenon as explained by Fick's second law of diffusion. The moisture diffusion derived from the Fick's law can be expressed as follows:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (4)$$

This equation was solved by Crank (1975) for various regular geometries with the application of several boundary conditions. Based on the assumption that mass transfer is symmetric and uniform and by diffusion only, diffusion coefficient and temperature are constant, shrinkage and external resistance is negligible, and CQ stem pieces are infinite slabs, the D_{eff} within the materials can be estimated by the following equation (Deng et al., 2018):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(- \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (5)$$

where D_{eff} is the effective moisture diffusivity (m^2/s) and L is the half-thickness of slab (m).

For long periods of CQ drying, only the first term ($n=0$) of the Eq. (5) was used (Sadin et al., 2014; Agnihotri et al., 2017). Hence, it becomes:

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

The above equation can be simplified to a straight-line equation by taking the natural logarithm of both sides as follows:

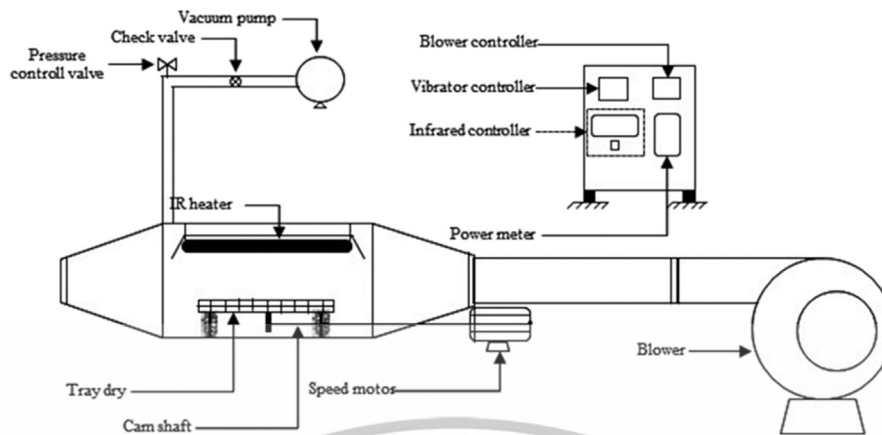


Fig. 2. A VC-VIR dryer.

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \right) \quad (7)$$

By plotting $\ln MR$ versus drying time (t) in second, the slope of the Eq. (7) can be used to determine D_{eff} using the following equation:

$$D_{eff} = -\frac{\text{Slope}4L^2}{\pi^2} \quad (8)$$

2.6. Analysis of specific energy consumption

Total energy required for CQ drying was measured by a multifunction energy meter (KM-06-N, Primus Company Limited, Bangkok, Thailand). The energy used in heating the system up was excluded. Specific energy consumption (SEC) reported in this research was defined as the energy required to remove 1 kg of water from the material and hence expressed as kWh/kg as follows:

$$SEC = E_t/W_0 \quad (9)$$

where E_t is the required total energy (kWh) and W_0 is the weight of water removed (kg).

2.7. Determination of physicochemical properties

2.7.1. Total phenolic content

Total phenolic content (TPC) of the dried CQ was determined by Folin-Ciocalteu method (Chen et al., 2017). Dried CQ was ground and passed through a 180 mesh screen. A sample of 0.2 g was put in a 10-ml round flask and mixed with 5 ml of 70% methanol. The mixture was under a reflux condenser and extracted at 70 °C for 2 h. The resulting extract was vigorously agitated with a vortex mixer (G-560E, Scientific Industries, Inc., Bohemia, NY, USA) for 5 min and centrifuged at 3500 rpm for 10 min. The supernatant was stored at 4 °C in darkness for subsequent TPC analysis. The TPC analysis was conducted with a UV-vis spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan) with an absorbance of 765 nm. Pure ethanol was used as a calibrating agent. TPC was reported as gallic acid equivalents (mg GAE/100 g dry matter).

2.7.2. Quercetin content

Quercetin content in the dried CQ was determined by using a quantitative HPLC method modified from a method reported by Thiangtham (2003). The HPLC system (SPD-10A, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) with C-18 reverse phase was connected to a 260-nm UV diode-array detector. A hydrosphere column (particle size = 5 μm and $L \times \text{I.D.} = 250 \times 4.6 \text{ mm}^2$) was used in conjunction with a mobile phase of 65:35 v/v of 0.05% ortho-phosphoric acid: acetonitrile at a flow rate of 1 mL/min. Trans-resveratrol was used as a standard agent. The retention time of

quercetin was 8.78 min.

2.7.3. Total color difference

Dried CQ was ground and sieved through a 180 mesh screen for color determination. Color of the dried CQ was measured in CIE L^* (lightness (100) to darkness(0)), a^* (redness (+60) to greenness (-60)), and b^* (yellowness (+60) to blueness (-60)) system using a spectrophotometer (ColorFlex, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA). These values were converted into ΔE according to Eq. (10). In this study, ΔE was calculated in relation to the fresh CQ.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (10)$$

2.8. Statistical analysis

All experiments were done in triplicates, unless otherwise specified. Data were presented as mean \pm standard deviation. Factorial experiments in completely randomized design were conducted to determine the effect of different drying methods and thickness of CQ pieces on the physicochemical properties of CQ. Two-way analysis of variance with Duncan's multiple range test was performed to determine significant differences between treatments among all treatments at 95% confident level.

3. Results and discussion

3.1. Drying characteristics

Drying time and maximum DR of IR, VIR, VC-IR, and VC-VIR drying of CQ with different piece thickness are presented in Table 1. The shortest

Table 1
Drying time and maximum DR of CQ drying.

Drying method	Thickness (mm)	Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter·min)
IR	5	110	0.147 \pm 0.001
	10	140	0.121 \pm 0.005
	15	180	0.107 \pm 0.002
VIR	5	95	0.160 \pm 0.003
	10	120	0.130 \pm 0.002
	15	160	0.112 \pm 0.001
VC-IR	5	75	0.238 \pm 0.001
	10	90	0.200 \pm 0.001
	15	100	0.193 \pm 0.001
VC-VIR	5	70	0.258 \pm 0.001
	10	85	0.202 \pm 0.001
	15	90	0.197 \pm 0.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

drying time of 70 min and the highest maximum DR of 0.258 g water/g dry matter·min were achieved by VC-VIR drying with the shortest thickness (5 mm) of CQ. As expected, IR drying of CQ with the thickest pieces of 15 mm, resulted in the longest drying time of 180 min and the lowest maximum DR of 0.107 g water/g dry matter·min. This result supported the idea that vibration, vacuum, and material size had an effect on drying characteristics of CQ. Positive effects of vibration and vacuum on IR drying characteristics were also reported by Jongyingcharoen et al. (2015). Das et al. (2009) also found that DR of IR drying could be improved by combining vibration in the system and decreasing material thickness.

MR and DR curves for IR, VIR, VC-IR, and VC-VIR drying of CQ with piece thickness of 15 mm are respectively shown in Figs. 3 and 4 which demonstrate the effects of vibration and vacuum on the drying characteristics of CQ. To illustrate the effect of material thickness on the drying characteristics of CQ, representative MR curves and DR curves for VIR drying of CQ with piece thickness of 5, 10, and 15 mm are presented in Figs. 5 and 6, respectively. From the DR curves, two DR periods were observed including a heating-up period from beginning to the peak DR, followed by a falling rate period which the DR decreased. Similar trend was also observed for the rest of the treatments. No constant rate period was also reported by Das et al. (2009) during VIR drying of paddy.

It can be clearly seen that vacuum exerted more effect on drying time and DR than vibration did. The maximum DRs were about 80% and 76% higher on average when using vacuum in IR drying and VIR drying, respectively. On the other hand, when the material was vibrated, the maximum DRs of VIR drying and VC-VIR drying were only about 5% and 2% higher than those of IR and VC-IR drying alone. As seen in Fig. 3, IR or VIR drying with vacuum operation led to considerably lower MR than those without vacuum operation for the same drying time. It is because evaporation of water under vacuum operation occurs at lower temperature; therefore, the onset of moisture transfer was at early stage. In combining with IR drying of which the penetration of IR into the materials causes a rapid increase in water vapor pressure, additional vacuum operation leads to extreme pressure gradient of water vapor and then substantially increased rate of moisture diffusion (Salehi and Kashani-nejad, 2018).

As expected, higher rate of moisture removal was observed for smaller pieces of CQ (Fig. 4). This result is similar to that of a study on VIR drying of paddy (Das et al., 2009) and a study on VC-IR drying of banana slice (Swasdisevi et al., 2009). The increased DR with decreased material thickness could be due to higher radiant energy input per unit mass of material and decreased distance over which the moisture had to travel inside the material before being removed from the material surface.

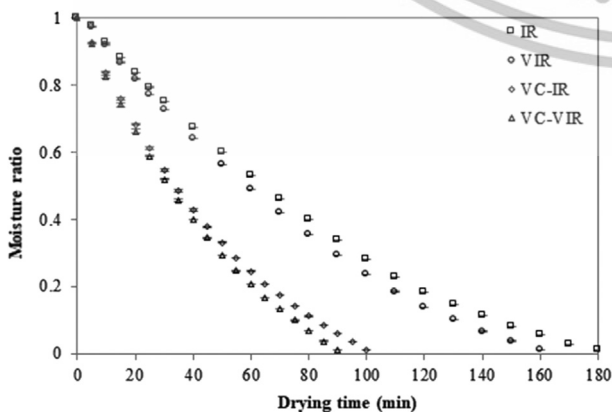


Fig. 3. MR curves of IR, VIR, VC-IR, and VC-VIR drying of CQ with the thickness of 15 mm.

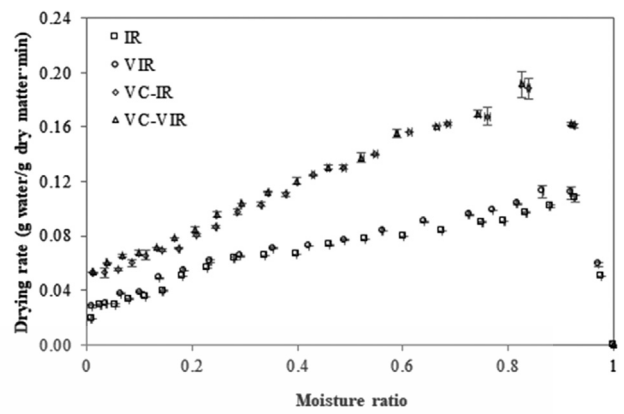


Fig. 4. DR curves of IR, VIR, VC-IR, and VC-VIR drying of CQ with the thickness of 15 mm.

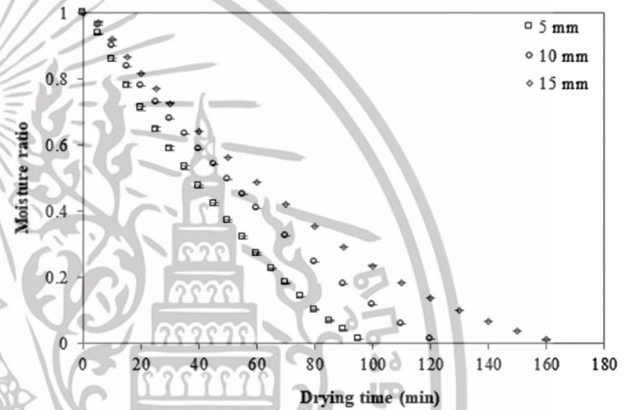


Fig. 5. MR curves of VIR drying of CQ of different material thicknesses.

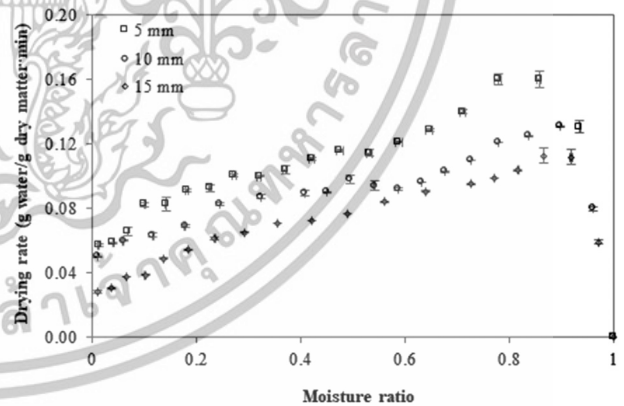


Fig. 6. DR curves of VIR drying of CQ of different material thicknesses.

3.2. Effective moisture diffusivity

D_{eff} characterizes intrinsic moisture transport property of a material subjected to drying. Fig. 7 shows the D_{eff} of CQ drying as affected by vibration, vacuum, and material thickness. The values of D_{eff} mostly conformed to the typical range of 10^{-11} to 10^{-9} m²/s for drying of food and agricultural materials (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011). For any particular drying method, the D_{eff} values were observed to substantial increase with an increase in material thickness. CQ with the thickness of 15 mm had almost double the D_{eff} of the 10 mm pieces and nearly quadruple the D_{eff} of the 5 mm pieces. Thickness dependence of D_{eff} were

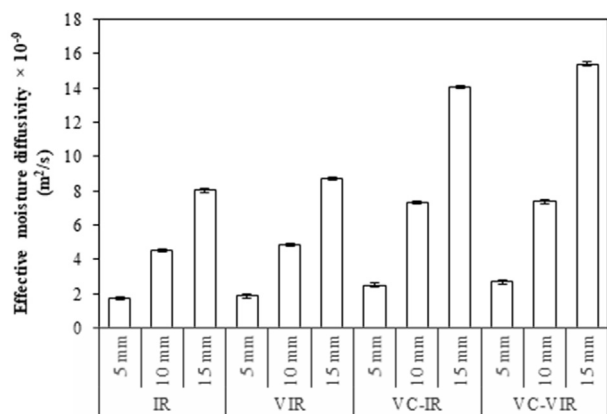


Fig. 7. Effective moisture diffusivity of CQ during the infrared drying process.

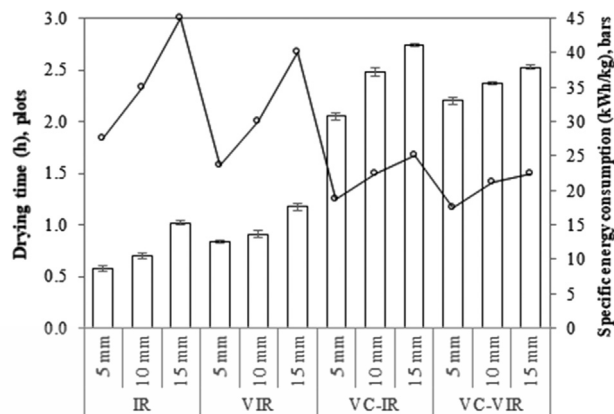


Fig. 8. Specific energy consumption (bars) vs. drying time (plots) of CQ drying.

reported for various agricultural materials in literatures (Sadin et al., 2014; Das and Arora, 2018; Cuevas et al., 2019). Based on the assumption of the Fick's diffusion model, diffusion takes place from inside to the surface of slabs only in one direction. This assumption is valid for thin slabs with negligible lateral diffusion. However, in thick slabs, lateral diffusion might occur and result in elevated value of D_{eff} .

In this study, the D_{eff} was also vacuum dependent. The D_{eff} values tended to be higher when drying CQ in vacuo. It can be clearly seen that the D_{eff} values for VC-IR and VC-VIR drying of CQ were about 50% higher than those for IR and VIR drying, respectively. This could be due to quicker evaporation of moisture from the material surface under vacuum condition. In addition, high water vapor pressure gradient during vacuum operation could enhance the removal of moisture from the material.

Although vibration led to an increase in the values of D_{eff} of CQ drying for any particular material thickness, the differences between the treatments with and without vibration were relatively small from 0.05×10^{-9} to $1.47 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.3. Specific energy consumption

Fig. 8 presents the energy required by IR, VIR, VC-IR, and VC-VIR drying to remove 1 kg water of CQ. Two groups of low SEC and high SEC were observed. The vacuum system consumed considerably high energy, hence SECs of VC-IR and VC-VIR drying of CQ were classified into the high SEC group. The results are similar to those reported by Motevali et al. (2011) for pomegranate aril drying; SEC of vacuum drying was four times higher than that of IR drying. It is interesting that vibration had no significant effect on SEC. Regarding the effect of material size, a reduction in SEC was obtained with smaller size. From the graph, inverse relationship between SEC and drying time was also observed. Although the vacuum system consumed high energy, it has the advantage of rapid drying.

3.4. Physicochemical properties of dried *Cissus quadrangularis* Linn.

3.4.1. Total phenolic and quercetin contents

Two important chemical constituents presented in CQ stem are phenolics and flavonoids. Its phenolic compounds were reported to possess potent antioxidant activity (Lekshmi et al., 2015). Regarding flavonoids, there has been a report that quercetin is the active component found in CQ stem (Kumar et al., 2015). Quercetin exhibits DPPH radical scavenging activity and high antioxidant capacity (Thiangtham, 2003).

Amounts of TPC and quercetin content of dried CQ are shown in Tables 2 and 3. From a statistical analysis, there was an interaction effect between drying method and material thickness on TPC and quercetin content ($p < 0.05$). Vibration tended to improve TPC and quercetin content while vacuum tended to degrade them. It is also significant that an increase in the thickness resulted in an increase in TPC and quercetin

Table 2

TPC (mg GAE/100 g dry matter) of dried CQ as affected by vibration, vacuum, and material thickness.

Drying method	Material thickness (mm)		
	5	10	15
IR	870.82 ± 14.14 ^{ns,b}	873.72 ± 8.67 ^{ns,b}	868.93 ± 8.42 ^{ns,d}
VIR	912.44 ± 9.83 ^{c,a}	964.94 ± 11.37 ^{b,a}	1083.62 ± 6.84 ^{a,a}
VC-IR	832.72 ± 7.31 ^{b,c}	835.50 ± 11.02 ^{b,c}	962.20 ± 8.55 ^{a,c}
VC-VIR	839.91 ± 11.43 ^{c,c}	873.06 ± 10.86 ^{b,b}	1046.92 ± 9.04 ^{a,b}
HA	1060.25 ± 6.73		
Fresh	1012.38 ± 6.73		

Note: The HA dried and fresh samples were not included in the two-way analysis of variance.

Same first superscript indicates no significant difference within the same row ($p < 0.05$).

Same second superscript indicates no significant difference within the same column ($p < 0.05$).

Table 3

Quercetin contents (mg/100 g dry matter) of dried CQ as affected by vibration, vacuum, and material thickness.

Drying method	Thickness (mm)		
	5	10	15
IR	1.477 ± 0.044 ^{ns,b}	1.596 ± 0.115 ^{ns,b}	1.651 ± 0.088 ^{ns,c}
VIR	1.647 ± 0.036 ^{c,a}	2.627 ± 0.108 ^{b,a}	3.472 ± 0.353 ^{a,a}
VC-IR	0.921 ± 0.021 ^{b,c}	0.903 ± 0.023 ^{b,d}	1.273 ± 0.121 ^{a,c}
VC-VIR	0.897 ± 0.029 ^{c,c}	1.166 ± 0.015 ^{b,c}	2.312 ± 0.145 ^{a,b}
HA	0.997 ± 0.009		
Fresh	0.888 ± 0.004		

Note: The HA dried and fresh samples were not included in the two-way analysis of variance.

Same first superscript indicates no significant difference within the same row ($p < 0.05$).

Same second superscript indicates no significant difference within the same column ($p < 0.05$).

content, except CQ dried by IR drying technique ($p < 0.05$). An increase in TPC and quercetin content of CQ undergoing vibration could be due to the main effect of thorough exposure to IR of the material. IR has a capability to cleave covalent bonds and liberate low molecular weight antioxidants such as flavonoids, carotene or polyphenols from repeating polymers (Rho et al., 2010). Lower phenolic and flavonoid contents of dried material undergoing vacuum operation were also reported by Zheng et al. (2015) for drying of loquat flower and Uribe et al. (2016) for drying of peppermint. This could be due to the weakened browning reaction of material under vacuum; however, there has also been a report that products of browning reaction formed during the process of drying

exhibit antioxidant activity (Chan et al., 2009; Samoticha et al., 2016). Regarding the effect of material thickness, thicker CQ piece is less prone for its cell walls to be disrupted during the drying process. Less disruption of cell walls leads to less release of oxidative and hydrolytic enzymes and less phytochemical degradation (Wojdyło et al., 2016; Chen et al., 2017). In addition, oxidative degradation of bioactive compounds could freely occur at the liquid-atmosphere interface during drying (Ren et al., 2018). This effect would be higher in the samples with thinner piece, i.e. higher exposure area.

Comparing to fresh CQ, all dried CQ had higher quercetin which is the most important active compound in CQ. The highest TPC and quercetin content were produced by VIR drying of CQ with the thickness of 15 mm. The highest contents were 1083.625 mg GAE/100 g dry matter and 3.472 mg/100 g dry matter, respectively. Considerably, the quercetin content of the VIR-dried CQ was about 3.5 times of the value obtained by HA drying of CQ. It was surprising that the quercetin content of the VIR-dried was almost quadruple (290.99% retention) than that of the fresh CQ. According to Ren et al. (2018), retention percentages of quercetin content in hot air dried and freeze dried onion were in the range of 70.5–115.3% and 76.0–154.9%, respectively. It is clear that the drying technique in this research enhanced retention of quercetin.

3.4.2. Total color difference

The magnitude of overall color change of dried CQ from fresh CQ was expressed by ΔE value. The dried CQ samples were found to have ΔE in the range of 13.69 and 16.40 as shown in Table 4. An interaction effect between drying method and material thickness was observed on the ΔE value of dried CQ ($p < 0.05$). There was also a significant difference in the ΔE value in response to the material thickness at a specific drying method, and vice versa ($p < 0.05$). However, there was no clear trend in a change in the ΔE value with the material thickness or drying method. This result was not coincident with the conclusion of Das and Arora (2018) that ΔE value increased with an increase in thickness of mushroom slice. It should be noted that convective air drying resulted in darker dried CQ. All of the IR dried samples had lower ΔE values as compared to the reference HA dried sample.

4. Conclusions

In IR drying of CQ, vibration, vacuum, and material thickness had considerably effect on drying characteristics, energy consumption during drying, and the amount of active compounds of dried product. Drying operation with vibration, vacuum, and reduced material thickness improved the drying rate and shortened the drying time. The D_{eff} of CQ was also positively related to these three drying factors of study. Vacuum system consumed the most energy during the process of drying. Vibration had a positive effect on TPC and quercetin content of dried CQ while vacuum degraded these contents. Thicker piece of CQ allowed these compounds to be better preserved. In conclusion, VC-VIR drying showed the best improvement of drying characteristics of CQ. However, VIR

Table 4
 ΔE of dried CQ as affected by vibration, vacuum, and material thickness.

Drying method	Material thickness (mm)		
	5	10	15
IR	14.83 ± 0.02 ^{b,d}	14.41 ± 0.03 ^{c,b}	15.23 ± 0.03 ^{a,c}
VIR	14.98 ± 0.02 ^{a,c}	14.05 ± 0.01 ^{b,d}	13.69 ± 0.03 ^{c,d}
VC-IR	16.40 ± 0.01 ^{a,a}	14.55 ± 0.03 ^{c,a}	15.40 ± 0.03 ^{b,b}
VC-VIR	15.55 ± 0.02 ^{b,b}	14.23 ± 0.02 ^{c,c}	15.81 ± 0.02 ^{a,a}
HA	17.71 ± 0.11		

Note: The HA dried sample was not included in the two-way analysis of variance. Same first superscript indicates no significant difference within the same row ($p < 0.05$).

Same second superscript indicates no significant difference within the same column ($p < 0.05$).

drying could be a promising drying technique in terms of best preservation of TPC and quercetin contents. A lower SEC was also observed during the operation without vacuum.

Declarations

Author contribution statement

Setthawat Thanimkarn, Ekkapong Cheevitsopon, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen: Conceived and designed the analysis; Analyzed and interpreted the data; Contributed analysis tools or data; Wrote the paper.

Funding statement

This work was supported by the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Competing interest statement

The authors declare no conflict of interest.

Additional information

No additional information is available for this paper.

References

- AOAC, 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International, eighteenth ed. AOAC International, Arlington, VA, USA.
- Agnihotri, V., Janwal, A., Joshi, R., 2017. Determination of effective moisture diffusivity, energy consumption and active ingredient concentration variation in *Inula racemosa* rhizomes during drying. *Ind. Crops Prod.* 106, 40–47.
- Azad, M.O.K., Piao, J.P., Park, C.H., Cho, D.H., 2018. Far infrared irradiation enhances nutraceutical compounds and antioxidant properties in *Angelica gigas* Nakai powder. *Antioxidants* 7, 189.
- Bhujade, M.A., Talmale, S., Kumar, N., Gupta, G., Reddanna, P., Das, K.S., et al., 2012. Evaluation of *Cissus quadrangularis* extracts as an inhibitor of COX, 5-LOX, and proinflammatory mediators. *J. Ethnopharmacol.* 141, 989–996.
- Chan, E.W.C., Lim, Y.Y., Wong, S.K., Lim, K.K., Tan, S.P., Lianto, F.S., et al., 2009. Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species. *Food Chem.* 113, 166–172.
- Chen, Q., Li, Z., Bi, J., Zhou, L., Yi, J., Wu, X., 2017. Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry. *LWT Food Sci. Technol.* 80, 178–184.
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*, second ed. Oxford University Press, London.
- Cuevas, M., Martínez-Cartas, M.L., Pérez-Villarejo, L., Hernández, L., García-Martín, J.F., Sánchez, S., 2019. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renew. Energy* 132, 911–920.
- Das, I., Arora, A., 2018. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *J. Food Eng.* 223, 208–219.
- Das, I., Das, S.K., Bal, S., 2004. Drying performance of a batch type vibration aided infrared dryer. *J. Food Eng.* 64, 129–133.
- Das, I., Das, S.K., Bal, S., 2009. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *J. Food Eng.* 95, 166–171.
- Deng, L.Z., Yang, X.H., Mujumdar, A.S., Zhao, J.H., Wang, D., Zhang, Q., et al., 2018. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Dry. Technol.* 36, 893–907.
- Eskandari, J., Kerami, A.M., Kouravand, S., Zarafshan, P., 2018. Design, fabrication, and evaluation a laboratory dry-peeling system for hazelnut using infrared radiation. *LWT Food Sci. Technol.* 90, 570–576.
- Jongyingcharoen, J.S., Thanimkarn, S., Vichaiya, P., 2015. Paddy drying in a vibration-assisted vacuum infrared dryer. In: Paper Presented at the Eighth TSAE International Conference. Thai Society of Agricultural Engineering, Bangkok, Thailand, pp. 265–269.
- Kumar, D.G.P., Hebbar, H.U., Ramesh, M.N., 2006. Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT* 39, 700–705.
- Kumar, R., Gupta, K.Y., Singh, S., Arunraja, S., 2015. *Cissus quadrangularis* attenuates the adjuvant induced arthritis by down regulating pro-inflammatory cytokine and inhibiting angiogenesis. *J. Ethnopharmacol.* 175, 346–355.
- Lara, L.M., Wilson, S.A., Chen, P., Atungulu, G.G., 2019. The effects of infrared treatment on physicochemical characteristics of vegetable soybean. *Heliyon* 5, e01148, 2019.
- Lekshmi, K.R., Rajesh, R., Mini, S., 2015. Ethyl acetate fraction of *Cissus quadrangularis* stem ameliorates hyperglycaemia-mediated oxidative stress and suppresses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- inflammatory response in nicotinamide/streptozotocin induced type 2 diabetic rats. *Phytomedicine* 22, 952–960.
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtagaza, M.H., 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Convers. Manag.* 52, 1192–1199.
- Rastogi, N.K., 2012. Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 52, 737–760.
- Ren, F., Perussello, A.C., Zhang, Z., Kerry, P.J., Tiwari, K.B., 2018. Impact of ultrasound and blanching on functional properties of hot-air dried and freeze dried onions. *LWT Food Sci. Technol.* 87, 102–111.
- Rho, H.S., Ahn, S.M., Lee, B.C., Kim, M.K., Ghimeray, A.M., Jin, C.W., Cho, D.H., 2010. Changes in flavonoid content and tyrosinase inhibitory activity in kenaf leaf extract after far-infrared treatment. *Bioorg. Med. Chem. Lett* 20, 7534–7536.
- Sadin, R., Chegini, G.-R., Sadin, H., 2014. The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat Mass Transf.* 50, 501–507.
- Salehi, F., Kashaninejad, M., 2018. Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Inf. Process. Agric.* 5, 516–523.
- Samoticha, J., Wojdylo, A., Lech, K., 2016. The influence of different the drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries. *LWT Food Sci. Technol.* 66, 484–489.
- Siriamornpun, S., Kaisoona, O., Meeso, N., 2012. Changes in colour, antioxidant activities and carotenoids (lycopene, β -carotene, lutein) of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) resulting from different drying processes. *J. Funct. Foods* 4, 757–766.
- Sripinyowanich, J., Noomhorm, A., 2011. A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. *Dry. Technol.* 29, 735–748.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., Soponronnarit, S., 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *J. Food Eng.* 92, 100–106.
- Thiangtham, J., 2003. Determination of Antioxidant Constituents in the Medicinal Plant *Cissus quadrangularis* Linn. Master's thesis. Chulalongkorn University. Available from the Chulalongkorn University Intellectual Repository.
- Uribe, E., Marín, D., Gálvez, V.A., Fuentes, Q.I., Rodríguez, A., 2016. Assessment of vacuum-dried peppermint (*Mentha piperita* L.) as a source of natural antioxidants. *Food Chem.* 190, 559–565.
- Vijayalakshmi, A., Kumar, P.R., Priyadarsini, S.S., Meenaxshi, C., 2013. In vitro antioxidant and anticancer activity of flavonoid fraction from the aerial parts of *Cissus quadrangularis* Linn. against human breast carcinoma cell lines. *J. Chem.* 2013, 150675.
- Wojdylo, A., Figiel, A., Legua, P., Lech, K., Carbonell-Barrachina, A.A., Hernández, F., 2016. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. *Food Chem.* 207, 170–179.
- Wu, X.-F., Zhang, M., Bhandari, B., 2019. A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris*. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 54, 34–42.
- Xie, L., Mujumdar, A.S., Fang, X.M., Wang, J., Dai, J.W., Du, Z.L., et al., 2017. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry: effects on drying kinetics and quality attributes. *Food Bioprod. Process.* 102, 320–331.
- Zheng, M., Xia, Q., Lu, S., 2015. Study on drying methods and their influences on effective components of loquat flower tea. *LWT Food Sci. Technol.* 63, 14–20.



Drying characteristics and quality evaluation in convective drying of *Cissus quadrangularis* Linn.

Setthawat Thanimkarn¹, Ekkapong Cheevitsopon², Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1,*}

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. This study aimed to investigate the effect of drying temperature (40, 60, 80, and 100°C) on drying characteristics of *Cissus quadrangularis* Linn. (CQ) undergoing convective drying. Physical properties and phytochemicals of the dried CQ were also evaluated. CQ with the thickness of 5 mm was dried from about 10 to 0.1 g water/g dry matter. The results showed that increasing drying temperature increased drying rate (DR) and effective moisture diffusivity (D_{eff}) and consequently decreased drying time. The drying time, maximum DR, and D_{eff} were in the ranges of 85-1920 min, 0.0059-0.0248 g water/g dry matter-min, and $0.7302-9.1281 \times 10^{-9}$ m²/s, respectively. Lower drying temperature could preserve quality of the dried CQ. Decreasing drying temperature resulted in greener and lower bulk density and shrinkage. The greatest total phenolic content (TPC) and quercetin content were obtained by drying the CQ at 60°C.

1 Introduction

CQ, a conventional medicinal plant, is used for treatment of various conditions such as hemorrhoid and irregular menstruation [1]. Normally, fresh CQ cannot be consumed as it contains calcium oxalate which leads to throat irritation. As same as most herbal plants, it must be dried, ground and capsulated for consumption [2]. Convective drying has been the most common way to produce the dried CQ.

Drying temperature is a crucial parameter required for dryer operation. This parameter can affect the moisture transport phenomena and stability of phytochemicals in material. Evaluation of the moisture diffusion mechanism and quality degradation as affected by different drying temperatures can help making decision in drying process design of convective drying of CQ and hence optimizing quality of the dried CQ.

However, little information is available in the literature on drying characteristics and product quality of CQ undergoing convective drying. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of drying temperatures on drying characteristics and moisture transport property of CQ during drying in a convective dryer. Quality of the dried CQ (greenness, shrinkage, bulk density, total phenolic content (TPC), and quercetin content) affected by drying temperature was evaluated.

2 Materials and methods

2.1 Sample and sample preparation

Fresh CQ was purchased from a herbal farm in Prachin Buri Province, Thailand. It was washed and cut at the thickness of 5 mm, of which the top and bottom portions were excluded. The initial moisture content was 10.10 ± 0.15 g water/g dry matter.

2.2 Architecture of experimental apparatus

The convective drying system was designed and fabricated at the Agricultural Engineering Workshop, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. A schematic diagram of the overall experimental setup is illustrated in Fig. 1. The dryer consisted of three main components, including heaters, a drying chamber, and a control system. A double-walled stainless steel drying chamber was cylindrical with a diameter and length of 30 and 60 cm. The perforated stainless steel drying tray ($0.20 \times 0.40 \times 0.05$ m³) was fitted in the chamber. Fin heaters of 4 kW and a blower of 0.5 HP were used for producing hot air. The hot air temperature was measured by thermocouples (type K, Lega model AK-01, Lega Cooperation Co., Ltd., Bangkok, Thailand) and controlled by PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) with an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$.

*Corresponding author: jiraporn.jo@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

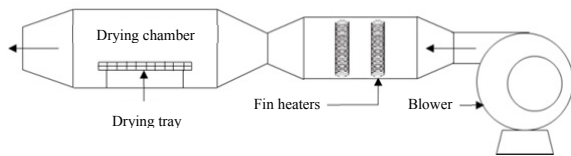


Fig. 1 Schematic view of the convective dryer.

2.3 Experimental Procedure

The experiments of convective drying of CQ were performed at the temperatures of 40, 60, 80, and 100°C. A fixed air velocity of 1 m/s was used. CQ (260 g) was placed on the drying tray in single layer. During the process of drying, the sample was weighed at each predetermined interval for determination of drying characteristics and D_{eff} as shown in 2.4 and 2.5. Drying was performed until the moisture content of QC reached 0.10 g water/g dry matter. Quality of the dried CQ was evaluated as listed in 2.6.

2.4 Drying characteristic determination

Moisture content was determined in a hot air oven at 105°C for 24 h [3]. The equation for calculation of the moisture content in dry basis is as follows:

$$M = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

where M , W_w , and W_d are moisture content (g water/g dry matter), wet weight of the material (g), and dry weight of the material (g), respectively.

Moisture ratio (MR) and DR were calculated as below:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

where M_i , M_t , M_e , and M_{t+dt} are moisture content (g water/g dry matter) at initial, specific time, equilibrium, and $t+dt$, respectively; and t is drying time (min).

2.5 Calculation of effective moisture diffusivity

To evaluate the moisture transport property, that is, diffusion mechanism of CQ during drying in a convective dryer, values of D_{eff} at different drying temperatures were determined. The diffusion mechanism can be explained by the Fick's second law. The solution of this equation developed by Crank [4], and the form of Eq. (4) is applicable for material with slab geometry by assuming uniform initial moisture distribution:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

where D_{eff} is the effective diffusivity (m^2/s), L is the half-thickness of slab (m), and n is the number of terms taken into consideration.

2.6 Quality evaluation

2.6.1 Greenness (negative a^*)

Color in CIE L^* , a^* , and b^* system of the dried CQ was measured by a spectrophotometer (ColorFlex, Hunter Associates Laboratory, Inc., Virginia, USA). As CQ is a plant, its main color was expressed by CIE a^* (redness/greenness) coordinate.

2.6.2 Shrinkage

Calculation of shrinkage was based on the concept of fluid replacement. In this work, n heptane was used as a fluid. Shrinkage was expressed in terms of the percentage of change in the volume of the dried CQ over the fresh CQ.

$$\% \text{ Shrinkage} = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

where V_i and V are respectively the volumes of material at the beginning and dried product.

2.6.3 Bulk Density

A 25-mL cylinder was filled with the dried CQ and tapped 5 times. Weight of the CQ inside the cylinder was measured. Bulk density was computed by dividing the weight of CQ by its volume.

2.6.4 Total phenolic content

TPC of the dried CQ was determined by Folin-Ciocalteu method [5]. Dried CQ was ground and sieved through a 180 mesh screen. Five millimeters of 70% methanol was used to extract a sample of 0.2 g. The mixture was extracted under reflux condenser at 70°C for 2 h. The extract was vigorously agitated using a vortex mixer for 5 min and centrifuged at 3500 rpm for 10 min. UV-vis spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan) was used for TPC analysis with an absorbance of 765 nm. A calibrating agent was pure ethanol. The content was expressed as gallic acid equivalents.

2.5.5 Quercetin content

The quantitative HPLC method for determining quercetin in the dried CQ was modified from Thiangtham, [6]. The HPLC system (SPD-10A, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) with C-18 reverse phase was used in this analysis. A mobile phase was 65:35 v/v of 0.05% ortho-phosphoric acid: acetonitrile. A standard agent was trans-resveratrol. The retention time of quercetin was 8.78.

2.6 Statistical analysis

The experimental data were analyzed using one-way ANOVA with the experimental design of a completely randomized design. Mean and standard deviation were used to present the experimental data. Duncan's multiple range test was used to determine the significance of differences between treatments at 95% confidence level.

3 Results and discussion

3.1 Drying characteristics

Drying curves of convective drying of CQ are shown in Fig. 2. It can be observed that the MR decreased with drying time following an exponential decay. The drying results showed that increasing drying temperature led to increase in DR and consequently decrease in drying time. It took only 85 min to dry CQ at 100°C while the drying times were 1920, 230 and 130 min when drying at 40, 60 and 80°C, respectively.

As can be seen from Fig. 3, the constant rate drying period was not observed in convective drying of CQ; the drying process took place in the falling rate period except a very short accelerating period at the beginning. The moisture loss rate of CQ was faster at the beginning than at the end. This observation is in agreement with previous results on thin-layer drying of biological products [7]. The maximum DR obtained from each drying condition was determined. It was found that the maximum drying rates were 0.0059, 0.0107, 0.0173, and 0.0248 g water/g dry matter·min when drying CQ at 40, 60, 80 and 100°C, respectively. As compared to the lowest drying temperature of 40°C, the maximum drying rate increased by 81, 193 and 320% when drying at 60, 80, 100°C, respectively.

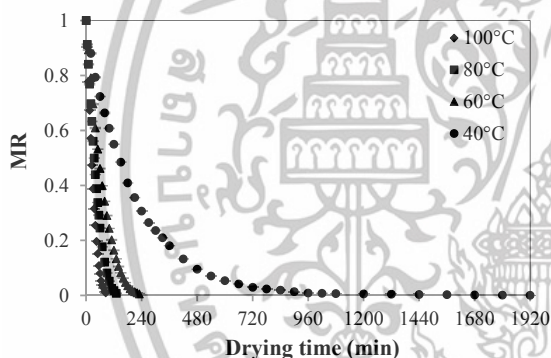


Fig. 2 Drying curves of convective drying of CQ at different drying temperatures.

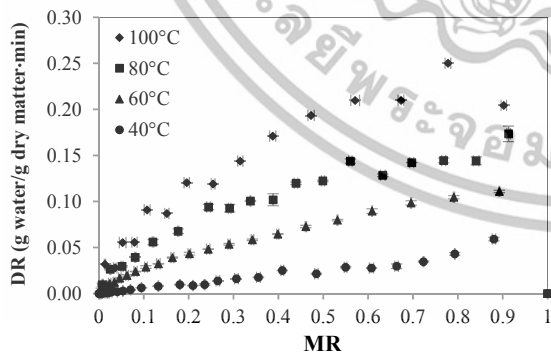


Fig. 3. DR curves of convective drying of CQ at different drying temperatures.

3.2 Effective moisture diffusivity

Values of D_{eff} of CQ dried at different drying temperatures were determined by plotting experimental data in terms of $\ln MR$ versus drying time. It is clear that increasing drying temperature resulted in higher D_{eff} (Table 2). These values met the standard range of D_{eff} of food and agricultural products subjected to drying (from 10^{-10} to 10^{-9} m^2/s) [8].

Table 1. $D_{eff} \times 10^{-9}$ (m^2/s) of convective drying of CQ at different drying temperatures.

Temperature (°C)	$D_{eff} \times 10^{-9}$ (m^2/s)	R^2
40	0.7302	0.9780
60	3.6918	0.9630
80	6.0043	0.9582
100	9.1281	0.9591

3.3 Quality of the dried CQ

Table 2 shows the results of physical property determination of the CQ subjected to convective drying at different drying temperatures. Significant differences of the dried CQ were observed for their greenness (a^*), bulk density, and shrinkage ($P < 0.05$). When drying temperature increased, greenness value decreased. This could be due to a non-enzymatic browning reaction occurring at high drying temperature [9]. On the other hand, increasing drying temperature resulted in increased bulk density and shrinkage of the dried CQ. High drying temperature can cause high stress development in material during drying and result in shrinkage of the material [10]. From these properties, it could be concluded that better physical properties was provided by lower drying temperature.

Significant differences in TPC and quercetin content of the dried CQ were also observed ($p < 0.05$) as shown in Fig. 4. It is interesting that the peak of TPC and quercetin content were given by convective drying of CQ at the drying temperature of 60°C. Chan et al. [11] reported that browning reaction products formed during drying have higher antioxidant activity. This should be the reason of the lowest values of TPC and quercetin content in the CQ dried at 40°C. However, cell walls of CQ may be disrupted at high drying temperature. As a result, its oxidative and hydrolytic enzymes are released and its phytochemicals are degraded [5].

Table 2. Physical properties of the dried CQ.

Temp. (°C)	Greenness (a^*)	Bulk density (g/cm^3)	Shrinkage (%)
40	-2.26 ± 0.13^d	0.182 ± 0.002^c	88.47 ± 0.51^c
60	-1.12 ± 0.01^c	0.184 ± 0.010^c	89.62 ± 2.94^b
80	4.49 ± 0.08^b	0.211 ± 0.001^b	89.63 ± 0.55^b
100	4.75 ± 0.08^a	0.233 ± 0.002^a	92.47 ± 0.32^a

The same letter in the same column is not significantly different at $p < 0.05$.

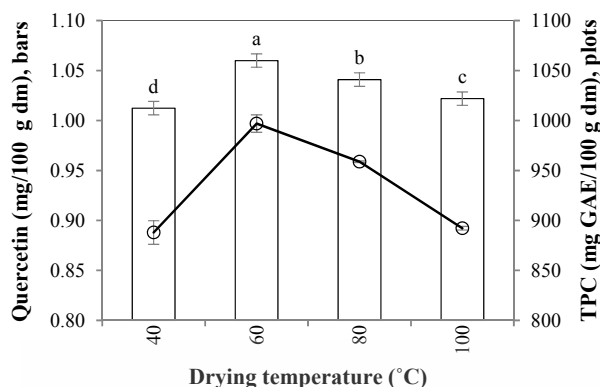


Fig. 4. Quercetin contents (bars) and TPC (plots) of the dried CQ.

4 Conclusions

The effect of drying temperatures on convective drying of CQ was analysed in the present work. Increased drying temperature resulted in increases in DR and D_{eff} and decrease in drying time. The highest values of maximum DR of 0.0248 g water/g dry matter-min and D_{eff} of 9.1281×10^{-9} m²/s and the lowest value of drying time of 85 min were obtained by drying CQ at the highest temperature of 100°C. However, lower drying temperature tended to provide better quality of the dried CQ. The highest TPC and quercetin content were provided by convective drying of CQ at the drying temperature of 60°C.

Acknowledgement

This work was supported by a research grant of the academic year 2015 offered by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The authors would like to express their gratefulness to the Institute.

References

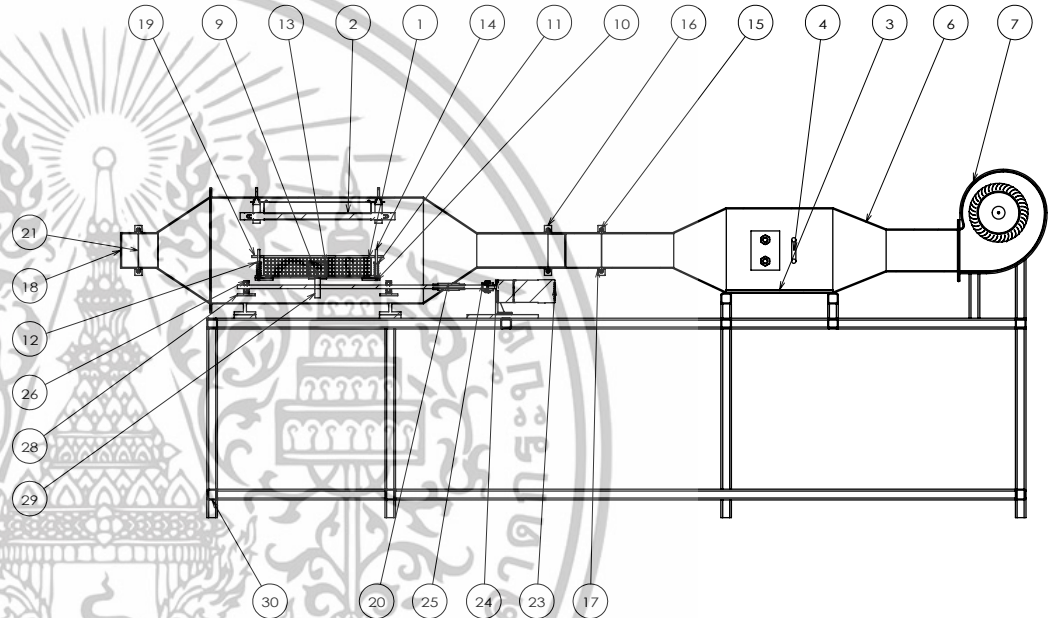
1. A. Vijayalakshmi, P.R. Kumar, S.S. Priyadarsini, C. Meenaxshi, C., Journal of Chemistry doi:10.1155/2013/150675, 1-9, 2013.
2. S. Panpimanmas, C. Sithipongsri, C. Sukdanon, C. Manmee, J Med Assoc Thai **93**, 12 (2010)
3. AOAC, *Official methods of analysis* (Association of Official Agricultural Chemists, Washington, DC., 1995)
4. J. Crank, *The mathematics of diffusion* (Clarendon Press Oxford, UK, 1975)
5. Q. Chen, Z. Li, J. Bi, L. Zhou, J. Yi, X. Wu, LWT-Food Science and Technology **80**, 178-184 (2017).
6. J. Thiangtham, Determination of antioxidant constituents in the medicinal plant *Cissus quadrangularis* Linn. (*Master's thesis, Chulalongkorn University*). Available from the Chulalongkorn University Intellectual Repository. (ISBN No. 9741739184) (2003).
7. I. Doymaz, M. Pala, Journal of food engineering **60**, 125-130 (2003).
8. J. Stripinyowanich, A. Noomhorm, Drying Technology **29**, 735-748 (2011)

9. S. Honma, M. Murata, Food preservation and processing study, *Tokyo kagaku dojin*, Tokyo, 168 (2011).
10. Z. Pan, C. Shih, T. H. McHugh, E. Hirschberg, Food Science and Technology **41**, 1944-1951 (2008).
11. E.W.C. Chan, Y.Y. Lim, S.K. Wong, K.K. Lim, S.P. Tan, F.S. Lianto, et al., Food Chemistry **113**, 166-172 (2009).

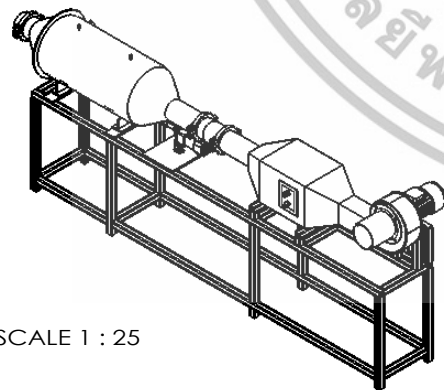


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	ถาดตะแกรงขนาด	ถาดตะแกรง	1
2	MPHHS_300_V100	หลอดอินฟราเรด+โคมสะท้อนรังสี	1
3	Cover He1	Name	1
4	MSHUW12_200_A60_V100_W200	ชุดลดความร้อนแบบครีบ	2
5	Cover He2	Name	2
6	Cover He	ห้องชุดลดความร้อนแบบครีบ	1
7	Blower	พัดลม	1
8	Bracket Motor	Bracket	1
9	PLATE		1
10	Stud	Name	4
11	Spring	สปริง	4
12	SPGCC15_7_4	แหวนรองสปริง	4
13	Bracket Guide	Name	2
14	Stud1	Name	2
15	Tube Joint	Name	1
16	Cover Lock	Name	3
17	Cover Lock 1	Name	3
18	Tube Close	Name	2
19	Plate Lock	Name	1
20	Guide	Name	1
21	Cover side1	Name	1
22	Tube Cover	Name	1
23	5RK60GU_AMF2_5GU3KB0No3	มอเตอร์	1
24	SOL5M6	Bracket	1
25	CPDS32_10_10	ค้ำปลั่ง	1
26	BKHKB6000ZZ_20	แบริ่ง	2
27	SNCPH3Sscrew	สกรูหางปลา	3
28	MAIN BODY	ห้องอบแห้ง	1
29	CAM SHAFT	เพลาลูกเบี้ยว	1
30	FRAME	โครงรับน้ำหนัก	1

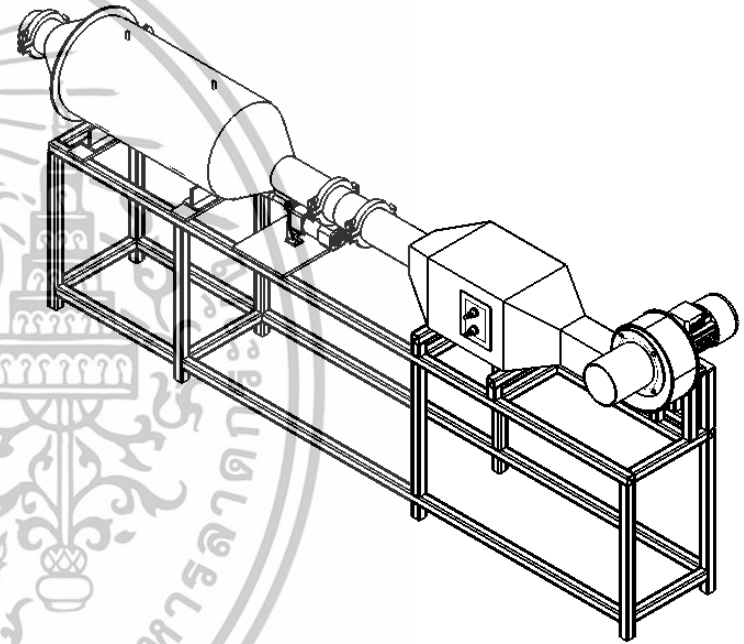
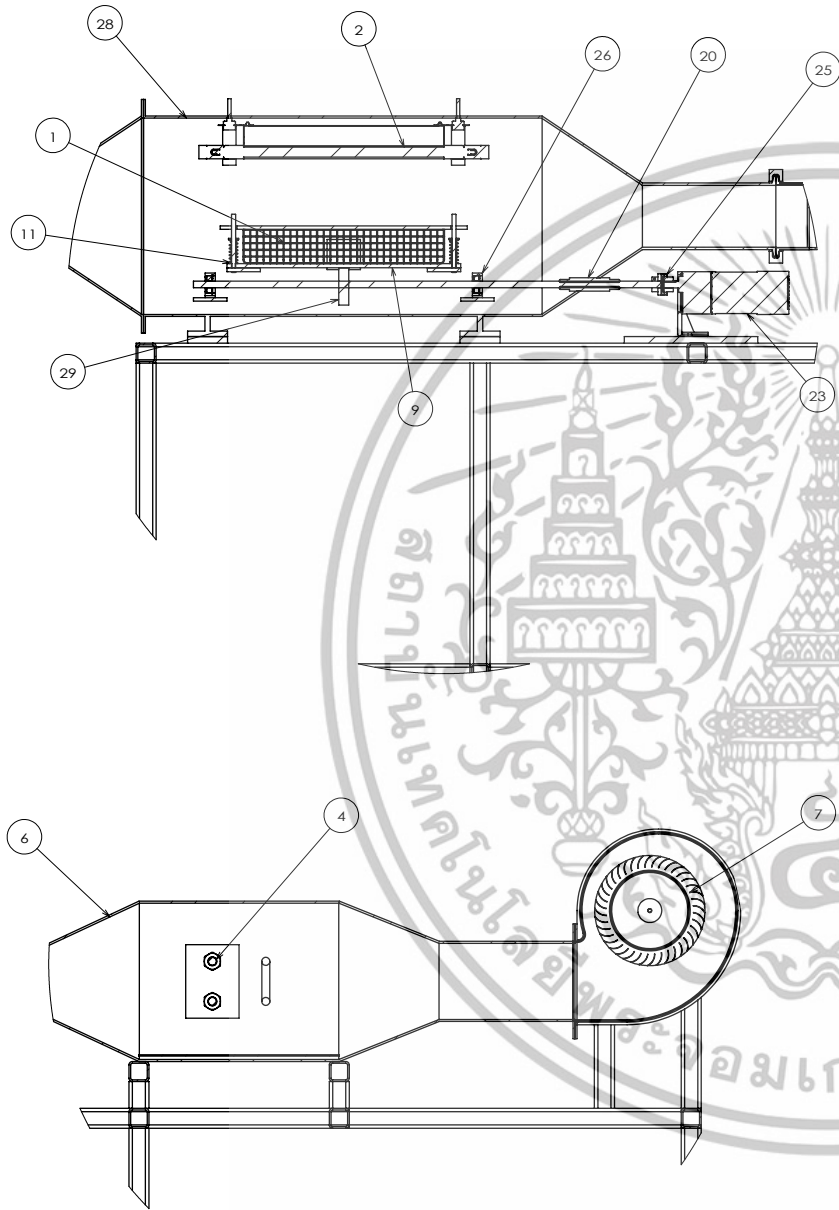


SECTION C-C
SCALE 1 : 15



SCALE 1 : 25

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
				เครื่องอบแห้งอินฟราเรดรวมกับการสิ้นสะท้อน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ	
				TITLE: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
DRAWN:	NAME	SIGNATURE	DATE	DWG. NO.	RESEACH
CHK'D:					
APPV'D:					A3
MFG:					
Q.A:				MATERIAL:	
				WEIGHT:	SCALE:1:20
					SHEET 1 OF 2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:									
DRAWN:		NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:			
CHK'D:						เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับการลั่นสะเทือน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ			
APP'VD:						คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
MFG:						DWG. NO.		RESEACH	
Q.A:					MATERIAL:			A3	
					WEIGHT:	SCALE:1:20		SHEET 2 OF 2	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์
วัน เดือน ปีเกิด	3 กันยายน 2523
ที่อยู่	86 หมู่ที่ 13 ต.ชนอม อ.ชนอม จ.นครศรีธรรมราช 80210 โทรศัพท์ 0-87746-2379
ประวัติการศึกษา	2539 มัธยมศึกษาปีที่ 4 (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์) โรงเรียนเบญจมราชูทิศ นครศรีธรรมราช 2544 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.ช่างยนต์) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี 2546 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล 2551 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.เครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ.2546-2549 ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาช่างยนต์ โรงเรียนอักษรเทคโนโลยีพัทยา พ.ศ.2549-2552 ตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้างประจำสาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคระยอง พ.ศ.2552-2553 ตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้างประจำสาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคทุ่งสง พ.ศ.2553-ปัจจุบัน ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
ผลงานทางวิชาการ	Sirisomboon, P., Kaewsorn, K., Thanimkarn, S. and Phetpan, K. (2016). Non-Linear Viscoelastic Behavior of Cooked White, Brown, and Germinated Brown Thai Jasmine Rice by Large Deformation Relaxation Test. International Journal of Food Properties, 8, 1-11. Thanimkarn, S. and Jongyingcharoen, J.S. (2014). Thin-layer drying characteristics of <i>Cissus Quadrangularis</i> Linn. and selection of suitable drying models. In the 7th TSAE International Conference 2014, 2-4 April 2014. Ayuthaya, Thailand. Rukkur, S., Saijun, D., Jeendug. and Thanimkarn, S. (2014). The value-Added Approach to Sustainable Crisis Management of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rubber Forming. In Asia Global Land Project Conference 2014, 24-26 September 2014. Taipei, Taiwan.

Jongyingcharoen, J.S., Thanimkarn, S. and Vichaiya, P. (2015). Paddy drying in a vibration-assisted vacuum infrared dryer. In the 8th TSAE International Conference 2015, 17-19 March 2015. Bangkok, Thailand.

Thanimkarn, S., Cheevitsopon, E. and Jongyingcharoen, J.S. (2018). Drying characteristics and quality evaluation in convective drying of *Cissus quadrangularis* Linn. MATEC Web Conf., 192, doi.org/10.1051/matecconf/201819203041.

Thanimkarn, S., Cheevitsopon, E. and Jongyingcharoen, J.S. (2019). Effects of Vibration, Vacuum, and Material Thickness on Infrared Drying of *Cissus quadrangularis* Linn. Heliyon 5, in press, doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01999.

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์, สุโหลหมาน หมาดโหยด, สุวรรณมา ผลใหม่ และ สุวิทย์ วุฒิสุทธิเมธาวี. (2558). คุณลักษณะและแบบจำลองการอบแห้งของใบโพลีอ็อก. ในรายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 16, วันที่ 17-19 มีนาคม 2558, จ. กรุงเทพมหานคร.

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์, ชโลธร ศักดิ์มาศ, นศพร ธรรมโชติ และจิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยั้งเจริญ. (2561). ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยใช้ลมร้อนร่วมกับการเป่าอากาศแวดล้อม. ในรายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 10, วันที่ 1-3 สิงหาคม 2561, จ. ตรัง.

เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์, ชโลธร ศักดิ์มาศ และนศพร ธรรมโชติ. (2561). ผลของการอบแห้งตะกอนฟลอคด้วยวิธีการอบแห้งแบบพาความร้อน. ในรายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ครั้งที่ 11, วันที่ 11-13 ธันวาคม 2561, จ.เชียงใหม่.