



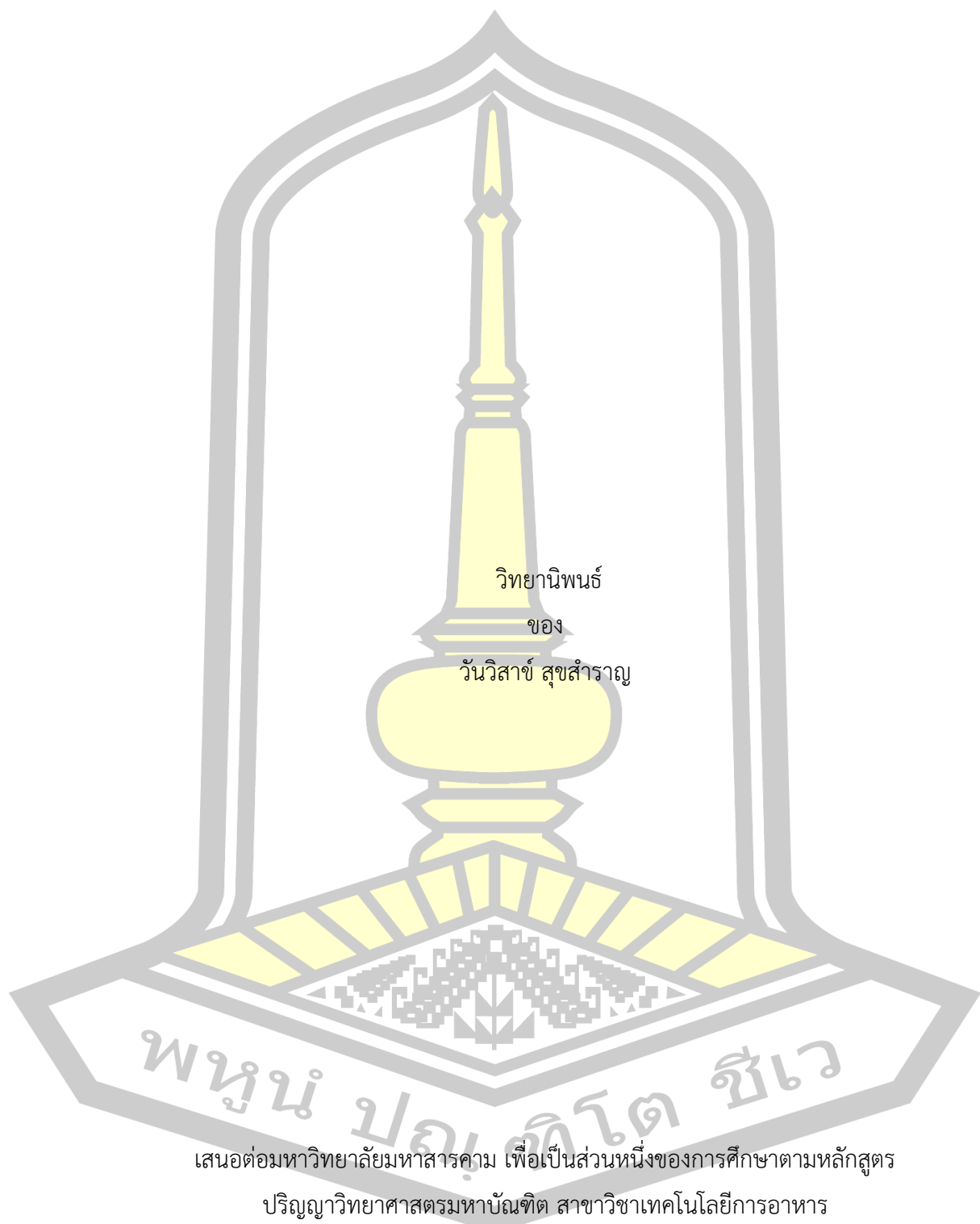
การศึกษาเชิงตัวเลขและการทดลองของการอบแห้งแบบชั้นตอนของแครอท

วิทยานิพนธ์
ของ
วันวิสาข์ สุขสำราญ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร
เมษายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การศึกษาเชิงตัวเลขและการทดลองของการอบแห้งแบบชั้นตอนของแครอท



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

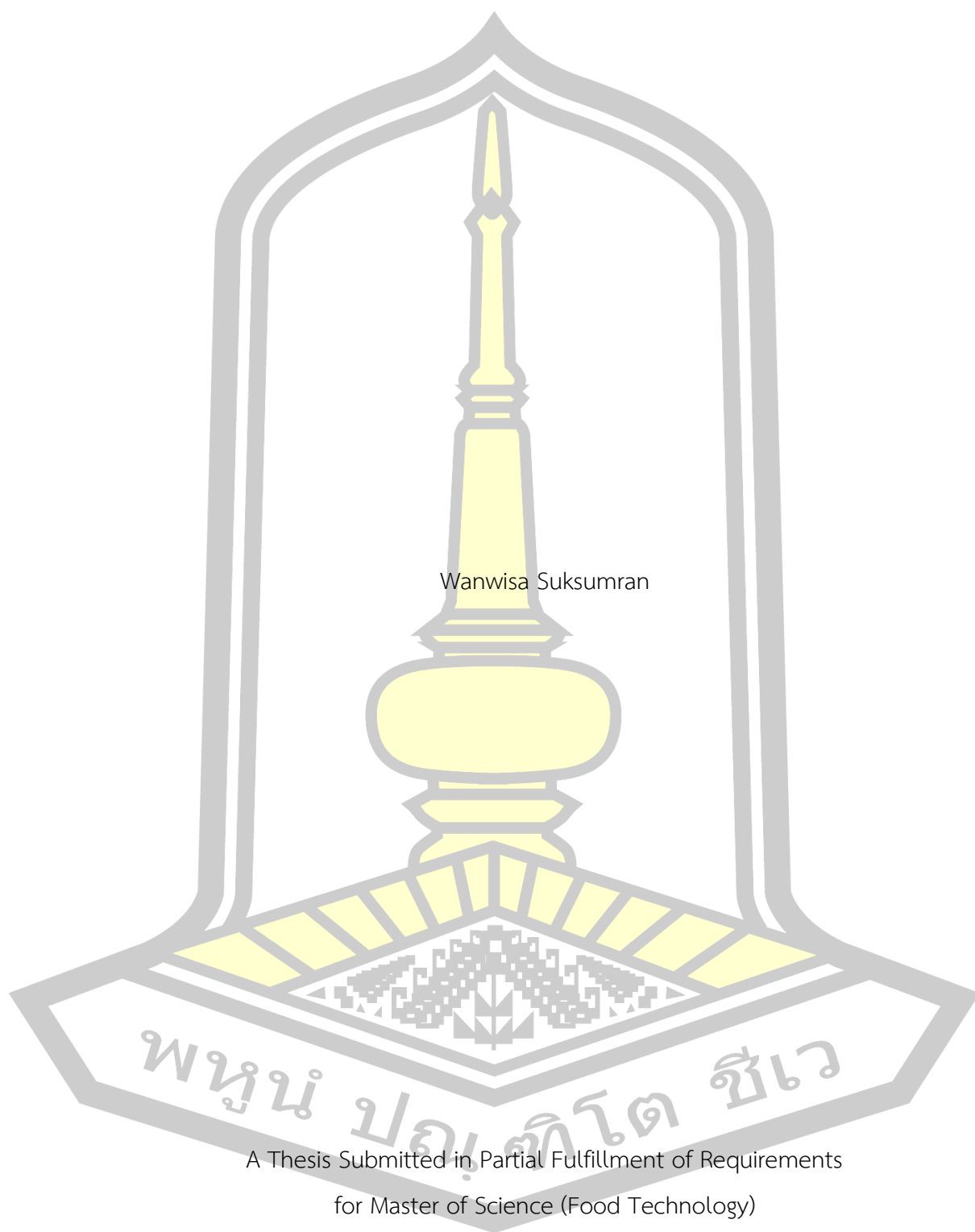
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

เมษายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Numerical and Experimental study of step-wise drying of carrots

Wanwisa Suksumran



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Food Technology)

April 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาววันวิสาข์ สุขสำราญ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. พรพิชญ์ ธรรมปัทม์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ บรรลือ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. วสันต์ ต้วงค์จันทร์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ศรีนวล จันทไทย)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ผศ. ดร. สุมลวรรณ ชุ่มเชื้อ)

คณบดีคณะเทคโนโลยี

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

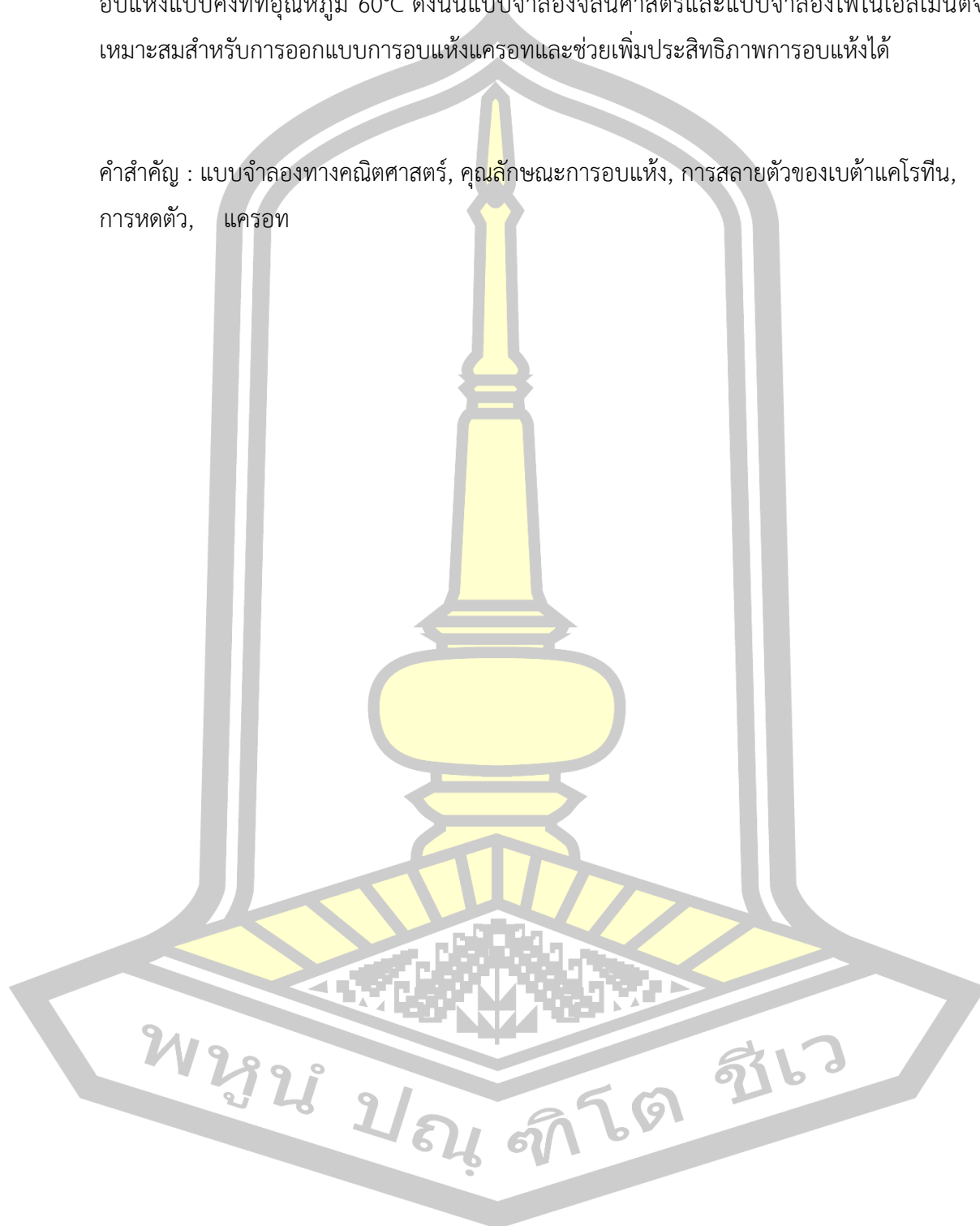
ชื่อเรื่อง	การศึกษาเชิงตัวเลขและการทดลองของการอบแห้งแบบขั้นตอนของแครอท		
ผู้วิจัย	วันวิสาข์ สุขสำราญ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ บรรลือ		
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วสันต์ ดั่งคำจันทร์		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	เทคโนโลยีการอาหาร
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

แครอทเป็นพืชที่มีการบริโภคอย่างกว้างขวางมีคุณค่าทางอาหารโดยเฉพาะสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเบต้าแคโรทีน แต่เนื่องจากสารเบต้าแคโรทีนมีความไวต่อการสูญเสียจากความร้อน ดังนั้นจึงควรพิจารณาพฤติกรรมการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระหว่างกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ของปริมาณความชื้น การหดตัวและการสลายตัวของเบต้าแคโรทีน โดยใช้แครอททรงลูกบาศก์เป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ และใช้ระบบอบแห้งลมร้อนในการทดสอบนี้ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมกับการทดลองภายใต้อุณหภูมิอบแห้งอุณหภูมิคงที่ 60, 70 และ 80°C โดยเปรียบเทียบกับค่าสถิติการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่ามาก และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) และโคสแควร์ (c^2) เลือกค่าข้อมูลที่มีค่าน้อย เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจในการอธิบายและทำนายค่าสมการที่เหมาะสมและใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความชื้น การหดตัวและเบต้าแคโรทีน ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลอง Page and Modified Page เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแครอท ส่วนแบบจำลองของ Ratti และสมการจลนศาสตร์ลำดับที่ 2 อธิบายพฤติกรรมการจลนศาสตร์ของการหดตัวและการสลายตัวของเบต้าแคโรทีน ตามลำดับ การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับข้อมูลผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะการอบแห้งคงที่ 60, 70 และ 80°C และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C ค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่การอบแห้งแบบขั้นตอนปริมาณความชื้นและเวลาในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิคงที่ การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการอบแห้งแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ มีปริมาณเบต้าแคโรทีนมากกว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C แต่การอบแห้งแบบขั้นตอนของทั้งสองช่วงอุณหภูมิพบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีน ของแครอทอบแห้งมีปริมาณลงเหลือน้อยกว่าการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C และผลการทำนายการหดตัวแครอทอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C การหดตัวแครอทน้อยกว่าการอบแห้งแบบขั้นตอน โดยการอบแห้งที่

อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C มีการหดตัวของแครอทมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C ดังนั้นแบบจำลองจลนศาสตร์และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเหมาะสมสำหรับการออกแบบการอบแห้งแครอทและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้

คำสำคัญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, คุณลักษณะการอบแห้ง, การสลายตัวของเบต้าแคโรทีน, การหดตัว, แครอท



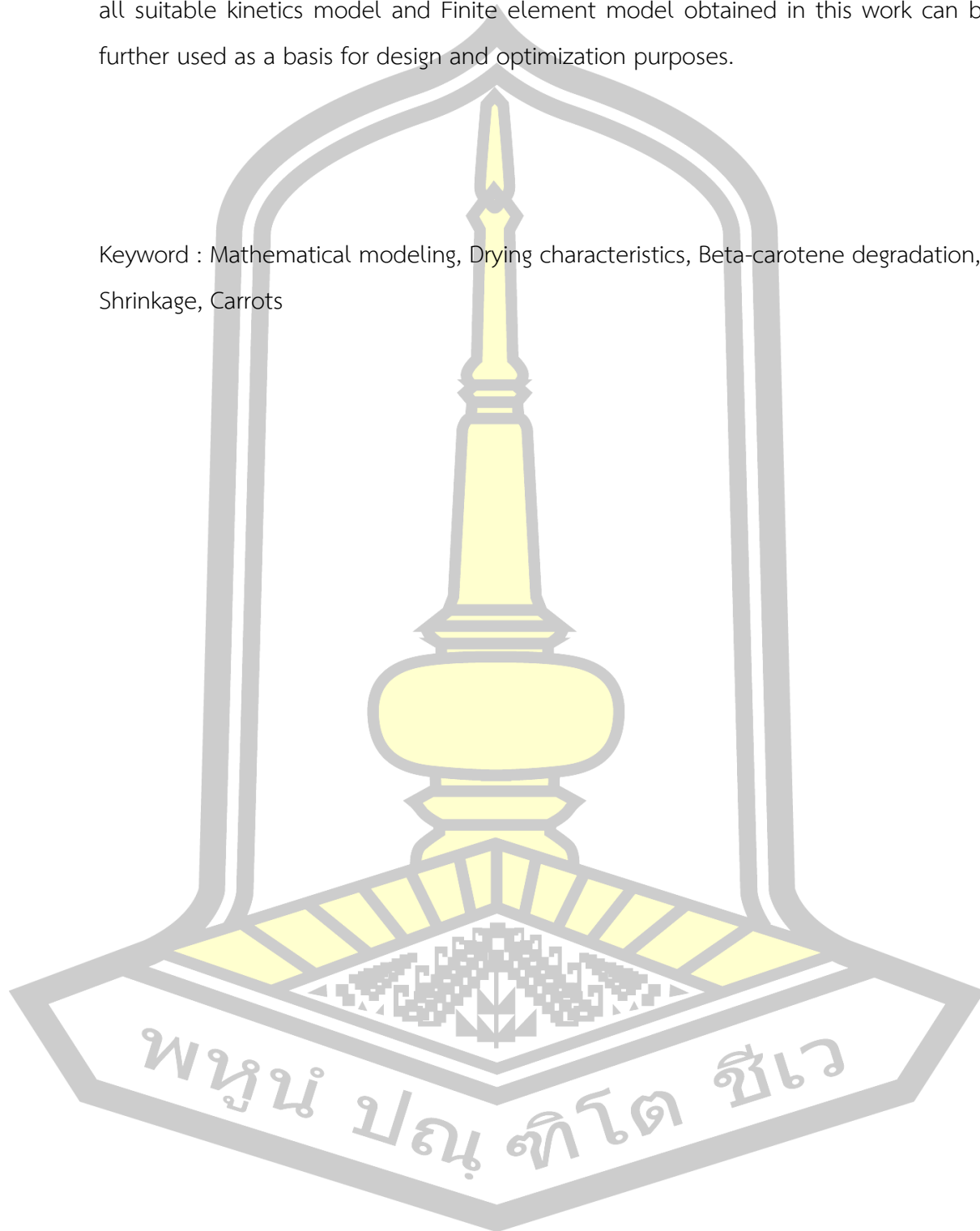
TITLE	Numerical and Experimental study of step-wise drying of carrots		
AUTHOR	Wanwisa Suksumran		
ADVISORS	Assistant Professor Kriangsak Banlue , Ph.D. Assistant Professor Wasan Duangkhamchan , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Food Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

Carrot is widely consumed as it contains bioactive compounds such as carotene. However these are very sensitive to heat. Therefore, degradation behaviors during thermal process should be considered. This study aimed to study kinetics of moisture content, shrinkage and β -carotene degradation of carrot cubes subjected to hot-air drying. Several empirical models were fitted to experimental data obtained under different hot-air temperatures ranging from 60°C to 80°C. Based on the highest coefficient of determination (R^2), lowest root mean square error (RMSE) and chi square (χ^2), the suitable equations were selected and employed to describe the change behavior of moisture, shrinkage and β -carotene. The results indicated that the Page and Modified Page models, the so-called Ratti model and the 2nd-order reaction kinetics equation suitably described the kinetics behaviors of moisture, shrinkage and degradation of β -carotene, respectively. Finite element model was used against data of moisture ratio experiments at constant drying conditions 60, 70 and 80°C. The two-stage drying at 60 to 70°C and 60 to 80°C showed the moisture content obtained from the model relative to the results. However, step drying, moisture content and drying time decrease faster than constant temperature drying. Prediction of β -carotene obtained from step drying at 60 to 70°C and greater β -carotene content than drying at 60 to 80°C. Due to the process drying of both temperature ranges, the β -carotene content of dried carrots was reduced to less than that at the constant temperature of 60°C. The prediction of carrot shrinkage obtained from step drying at 60 to 70°C and 60 to 80°C resulted in less shrinkage of carrots than that of step drying

at 60 to 80°C has more shrinkage of carrots than drying at 60 to 70°C. Consequently, all suitable kinetics model and Finite element model obtained in this work can be further used as a basis for design and optimization purposes.

Keyword : Mathematical modeling, Drying characteristics, Beta-carotene degradation, Shrinkage, Carrots



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.วสันต์ ดั่งวงศ์จันทร์ และผศ. ดร.เกรียงศักดิ์ บรรลือ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด การแก้ไขปัญหาและแนวทางในการทำงานวิจัย จนรูปเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางด้านวิชาการและงานวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่และนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณผู้บริหาร หัวหน้างานและเพื่อนร่วมงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการศึกษาต่อในครั้งนี้

ขอขอบคุณสามี ที่คอยให้กำลังใจ อยู่เคียงข้างเสมอมาแม้ยามทุกข์และสุข จนสามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาผู้ให้กำเนิดที่ให้อิสรภาพและสติปัญญา รวมถึงพี่น้อง ที่เชื่อมั่นและสนับสนุนให้การศึกษาที่ดีและให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณงามความดีอันพึงมี ขอมอบแด่บิดา มารดา ครู-อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วันวิสาข์ สุขสำราญ



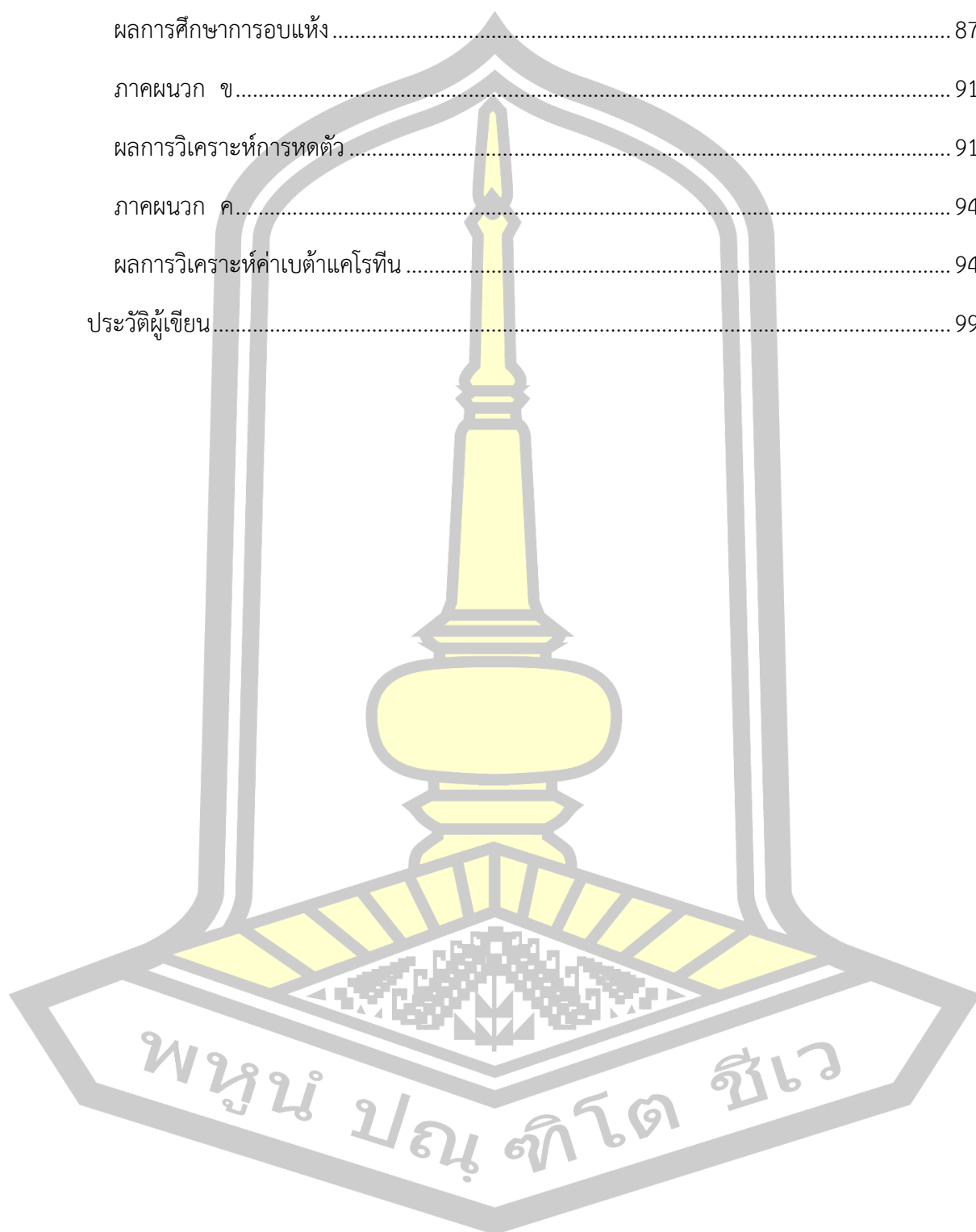
พณฺ ปรณุ จิตฺ ชัยเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2.....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแครอท.....	4
2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	10
2.3 การทำแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying).....	17
2.4 การอบแห้งโดยวิธีแบบขั้นตอน (stepwise drying).....	18
2.5 ทฤษฎีการหดตัว.....	22

2.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง	23
2.7 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์	25
2.8 การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยใช้เครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC).....	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3	35
วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1 การทดลองศึกษาการอบแห้งแบบคงที่ (drying) และการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (Stepwise drying).....	35
3.2 การวิเคราะห์หาการหดตัว (Shrinkage analysis) ด้วยการแทนที่ของ n-heptane.....	39
3.4 ทำนายการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของแครอทอบแห้ง.....	41
3.5 ค่าสถิติสำหรับใช้ยืนยันความถูกต้องของข้อมูลการอบแห้ง.....	44
บทที่ 4	46
ผลการวิจัยและอภิปรายผล	46
4.1 ผลการศึกษาการอบแห้ง	46
4.2 ผลการศึกษาการหดตัว.....	49
4.3 ผลการศึกษาสารเบต้าแคโรทีน.....	52
4.4 ผลการทดลองแบบจำลองแครอทอบแห้งโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์	54
บทที่ 5	75
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผล.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	86

ภาคผนวก ก.....	87
ผลการศึกษารอบแห่ง.....	87
ภาคผนวก ข.....	91
ผลการวิเคราะห์การหดตัว.....	91
ภาคผนวก ค.....	94
ผลการวิเคราะห์ค่าเบต้าแคโรทีน.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	99



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณสารอาหารในแครอทส่วนที่กินได้ 100 กรัม	6
ตารางที่ 2 สมการการอบแห้งแครอท	38
ตารางที่ 3 สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อทำนายการหดตัวของแครอท	40
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C	47
ตารางที่ 5 แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าคงที่ของการอบแห้ง	48
ตารางที่ 6 ผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหดตัวของแครอทอบแห้ง ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร	50
ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปริมาณเบต้าแคโรทีน	53



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 ลักษณะแคโรทีนตามขวาง.....	4
ภาพประกอบที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีน	7
ภาพประกอบที่ 3 โครงสร้างของแอลฟาแคโรทีน (ALPHA-CAROTENE).....	8
ภาพประกอบที่ 4 โครงสร้างของลูทีน (LUTEIN) และ ซีแซนทีน (ZEAXANTHIN)	9
ภาพประกอบที่ 5 การลดลงของความชื้นวัสดุ.....	10
ภาพประกอบที่ 6 อัตราการทำแห้ง.....	11
ภาพประกอบที่ 7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา	12
ภาพประกอบที่ 8 กลไกการทำแห้ง.....	13
ภาพประกอบที่ 9 การไหลออกของน้ำแบบกระจายตัวซึมผ่าน	14
ภาพประกอบที่ 10 การไหลออกของน้ำแบบท่อเล็กๆ	15
ภาพประกอบที่ 11 ลักษณะการระเหยออกของน้ำ ในระหว่างขั้นตอนการอบแห้ง	16
ภาพประกอบที่ 12 วิธีการอบแห้งแบบคงที่และแบบสองขั้นตอน (STEPWISE DRYING).....	19
ภาพประกอบที่ 13 การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐานและวิธีการอบแห้งแบบขั้นตอน (STEPWISE DRYING)	19
ภาพประกอบที่ 14 การผสมผสานอุณหภูมิที่แตกต่างกันสำหรับการอบแห้งแบบขั้นตอนและจุดเปลี่ยนอุณหภูมิที่ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน	20
ภาพประกอบที่ 15 การอบแห้งแบบขั้นตอนที่จุดเปลี่ยน (CHANGE POINT) แตกต่างกัน.....	20
ภาพประกอบที่ 16 การอบแห้งแบบสองขั้นตอน (ก) แบบเพิ่มอุณหภูมิ (ข) แบบลดอุณหภูมิ	21
ภาพประกอบที่ 17 โครมาโตแกรมของปริมาณเบต้าแคโรทีนแคโรทีนที่ความยาวคลื่น 450 ..	29
ภาพประกอบที่ 18 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งลมร้อน	36
ภาพประกอบที่ 19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการประมวลผลด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์	42
ภาพประกอบที่ 20 แบบจำลองแบบ 3 มิติ ของแคโรทีนทรูกลูบาศก์.....	42

ภาพประกอบที่ 21 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างการทดลองของแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C.....	46
ภาพประกอบที่ 22 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C.....	48
ภาพประกอบที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆของแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิตอบแห้ง 60, 70 และ 80°C.....	50
ภาพประกอบที่ 24 การเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C และการอบแห้งแบบคงที่.....	51
ภาพประกอบที่ 25 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนเป็นฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C.....	52
ภาพประกอบที่ 26 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนแบบสองขั้นตอน เป็นฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C.....	54
ภาพประกอบที่ 27 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 60°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง	55
ภาพประกอบที่ 28 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 60°C	56
ภาพประกอบที่ 29 CONTOUR PLOTS 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 60°C	57
ภาพประกอบที่ 30 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 70°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง	58
ภาพประกอบที่ 31 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 70°C.....	59
ภาพประกอบที่ 32 CONTOUR PLOTS 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 70°C.....	60
ภาพประกอบที่ 33 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 80°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง	61
ภาพประกอบที่ 34 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 80°C.....	62

ภาพประกอบที่ 35 ภาพแสดง CONTOUR PLOTS 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้ง ต่างๆภายใต้อุณหภูมิ 80°C ที่ได้จากแบบจำลอง.....	63
ภาพประกอบที่ 36 เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบขั้นตอนระยะเวลา อบแห้งที่แตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C กับค่าข้อมูลจาก แบบจำลองที่อุณหภูมิคงที่ 60°C.....	64
ภาพประกอบที่ 37 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในพื้นที่ผิวทั้งหมดของแครอท ที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 60°C เปรียบเทียบค่าความชื้นแบบสองขั้นตอนของแคร อทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C	65
ภาพประกอบที่ 38 เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบลดอุณหภูมิ 70 เป็น 60°C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลอง ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C.....	66
ภาพประกอบที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C	67
ภาพประกอบที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 70°C.....	68
ภาพประกอบที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 80°C	69
ภาพประกอบที่ 42 เปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของการอบแห้งแบบสอง ขั้นตอนในระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80 °C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C	70
ภาพประกอบที่ 43 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 60°C.....	71
ภาพประกอบที่ 44 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 70°C.....	72
ภาพประกอบที่ 45 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 80°C.....	73
ภาพประกอบที่ 46 เปรียบเทียบผลการทำนายการหดตัวของแครอทแบบสองขั้นตอนใน ระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C กับค่า ข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C.....	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

แครอทมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Daucus carota* L. เป็นพืชที่อุดมด้วยคุณค่าทางอาหาร มีแหล่งกำเนิดอยู่ในยุโรป เอเชียและอเมริกาเหนือ มีลักษณะเนื้อค่อนข้างแข็ง มีรากในการสะสมอาหาร (หัว) รสหวาน มีสีส้ม สีแดงเข้ม สีเหลือง สีของแครอทเกิดจากแคโรทีนที่มีปริมาณสูง (พรรณภา ไชยเกล้า และ ศรีญญา วอขวา, 2561) และจากรายการวิจัยพบว่าแคโรทีนที่มีมากในแครอทเป็นชนิด เบต้าแคโรทีน รองลงมาคือ แอลฟาแคโรทีน สารแคโรทีนเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ซึ่งเบต้าแคโรทีนเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ เบต้าแคโรทีนเป็นสารที่สามารถต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยป้องกันเซลล์ในร่างกายมิให้ถูกทำลายจากอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นเบต้าแคโรทีนหรือ วิตามินเอ จึงมีประโยชน์ต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ในทางอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่ก็นำแครอทมาแปรรูปโดยกระบวนการอบแห้งมากที่สุด เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในซูปหรืออาหารสำเร็จรูป (Holland et al., 1991) ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการปลูกแครอทและเป็นที่นิยมบริโภคกันมากขึ้น เช่น นำมาบริโภคสด แปรรูปเป็นแครอททวน น้ำแครอท แครอทอบแห้ง แครอทกระป๋อง ทำเป็นส่วนผสมในตำรับยาแก้โรคต่างๆ และเครื่องสำอาง เป็นต้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่ากระบวนการอบแห้งสามารถช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร และยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้ (ฤทธิชัย อัสวราชันย์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์, 2554) แต่การอบแห้งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ใช้เครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวทำให้ใช้เวลาในการทำแห้งนาน (บรมพิชัยชาติกุล, 2555) อีกทั้งยังส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของสารออกฤทธิ์ต่างๆ ทั้งนี้มีรายงานว่าเบต้าแคโรทีนสลายได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือแสงสว่าง โดยเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อได้รับความร้อน (thermal isomerization) โครงสร้างในธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบทรานส์ (trans) เกิดการบิดตัวไป 180 องศา เปลี่ยนไปเป็นรูปแบบซิส (cis) ซึ่งเป็นรูปแบบที่เปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้น้อยลง (Holland et al., 1991)

การอบแห้งแบบขั้นตอน (stepwise drying) จึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญต่อการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งลดเวลา และคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเป็นการประหยัดพลังงาน (Kudra & Mujumdar, 2009) โดยมีลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน เนื่องจากการอบแห้งอาหารมีระยะอัตราการระเหยคงที่ (constant drying rate period) และระยะอัตราการระเหยลดลง (falling drying rate period) ซึ่งช่วงอัตราเร็วลดมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอาหารจะเกิดการหดตัว และมีการแพร่ผ่านของความชื้นในส่วนต่างๆ ของชิ้นอาหารในอัตราที่ต่างกัน ความเสียหายของอาหารเนื่องมาจากความร้อนจึงมักเกิดในช่วงอัตราเร็วลดนี้ (กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์, 2535) ทั้งนี้การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(mathematical modeling) มาใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร คุณภาพผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการอบแห้ง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียด แม่นยำ ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการทดลอง ซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สัคมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณความชื้น ที่เวลาต่างๆ ของการอบแห้งแครอทแบบเพิ่มอุณหภูมิที่ความชื้นของแครอท ร้อยละ 70 ฐานเปียก ที่ มีการสับเปลี่ยนพลังงานน้อยที่สุดและด้านการหดตัวใกล้เคียงกับสภาวะอื่น (อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติ กุล, ณัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุล วิเศษ, 2555) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการอบแห้งแบบขั้นตอน (stepwise drying) และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง เพื่อคงคุณภาพของแครอทอบแห้ง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (stepwise drying) ที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุอาหารที่มีต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง โดยใช้แครอททรง ลูกบาศก์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่เวลาต่างๆ แล้วนำมา วิเคราะห์หา สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (stepwise drying) ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งคุณภาพทางเคมี และกายภาพของวัสดุอาหารที่มีต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง : กรณีศึกษาแครอท

1.2.2 ศึกษาแบบจำลองของการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งคุณภาพทางเคมี และกายภาพของวัสดุอาหารที่มีต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง : กรณีศึกษาแครอท

1.2.3 ศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งคุณภาพทางเคมีและกายภาพของวัสดุอาหารที่มีต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง : กรณีศึกษาแครอท

1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

แบบจำลองสามารถทำนายความชื้นที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอบแห้ง และได้แบบจำลองที่เหมาะสมต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้ง

1.4 สมมติฐานของการวิจัย

กระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ การหดตัว ของผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้ง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแครอทได้แก่ค่าการสลายตัวของเบต้าแคโรทีน

1.5.2 ทำการทดลองที่กระบวนการอบแห้งแบบคงที่เท่านั้น โดยใช้แครอทขนาด 1 cm^3 อบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 360, 420, 480, 540 และ 600 นาที และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น การหดตัว และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง

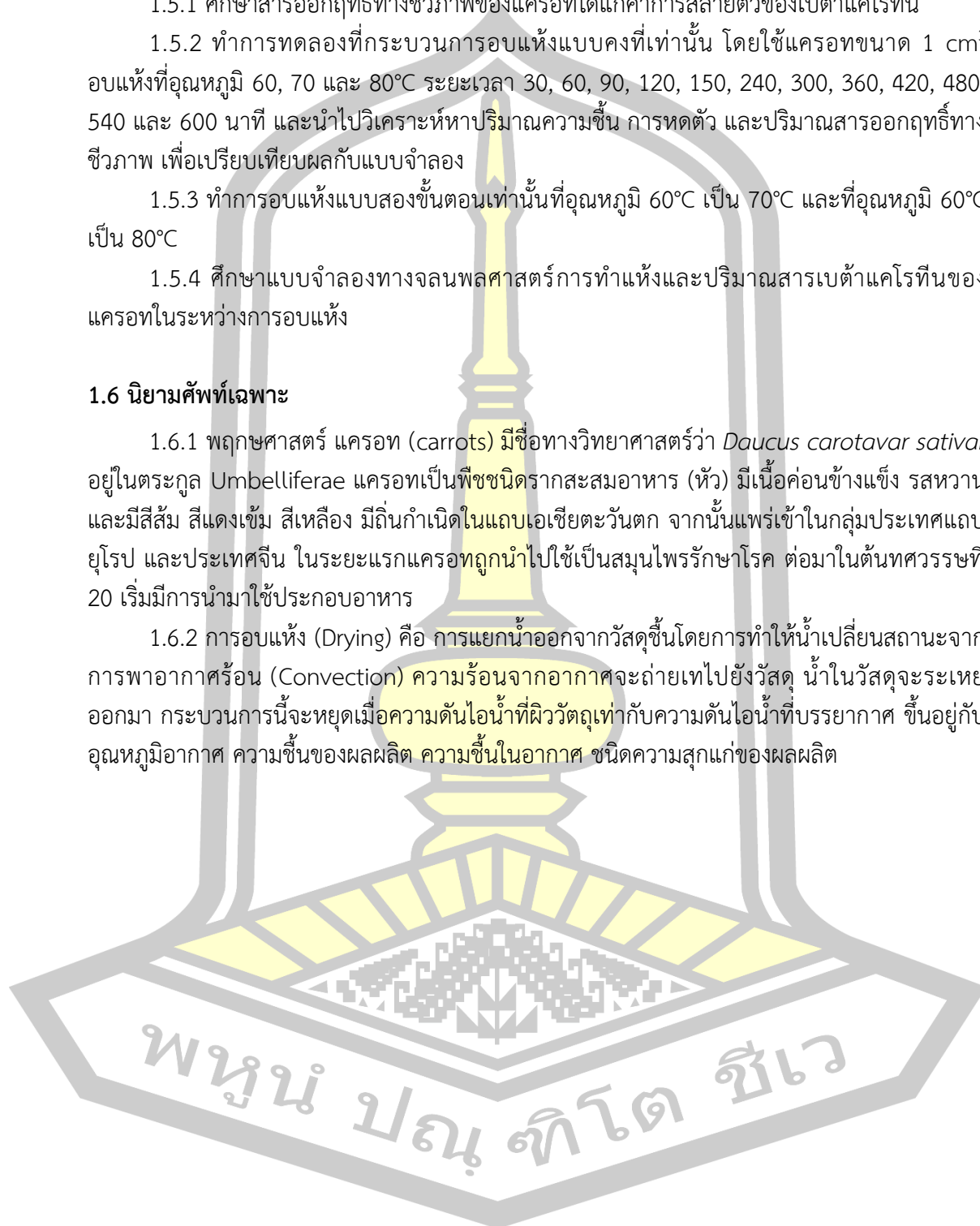
1.5.3 ทำการอบแห้งแบบสองขั้นตอนเท่านั้นที่อุณหภูมิ 60°C เป็น 70°C และที่อุณหภูมิ 60°C เป็น 80°C

1.5.4 ศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งและปริมาณสารเบต้าแคโรทีนของแครอทในระหว่างการอบแห้ง

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 พืชศาสตร์ แครอท (carrots) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Daucus carotavar sativar* อยู่ในตระกูล Umbelliferae แครอทเป็นพืชชนิดรากสะสมอาหาร (หัว) มีเนื้อค่อนข้างแข็ง รสหวาน และมีสีส้ม สีแดงเข้ม สีเหลือง มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันตก จากนั้นแพร่เข้าไปในกลุ่มประเทศแถบยุโรป และประเทศจีน ในระยะแรกแครอทถูกนำไปใช้เป็นสมุนไพรรักษาโรค ต่อมาในต้นทศวรรษที่ 20 เริ่มมีการนำมาใช้ประกอบอาหาร

1.6.2 การอบแห้ง (Drying) คือ การแยกน้ำออกจากวัสดุขึ้นโดยการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากการพาอากาศร้อน (Convection) ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัสดุ น้ำในวัสดุจะระเหยออกมา กระบวนการนี้จะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัตถุเท่ากับความดันไอน้ำที่บรรยากาศ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศ ความชื้นของผลผลิต ความชื้นในอากาศ ชนิดความสูงแก่ของผลผลิต



บทที่ 2

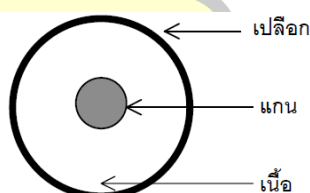
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จำเป็นต้องมีการรวบรวมทฤษฎีต่างๆของงานวิจัย ประกอบด้วยความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแครอท ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การอบแห้ง การหัตถ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแครอท

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ แครอท (carrots) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Daucuc carota* L. อยู่ในตระกูล Umbelliferae แครอทเป็นพืชชนิดรากสะสมอาหาร (หัว) มีเนื้อค่อนข้างแข็ง รสหวานและมีสีส้ม สีแดงเข้ม สีเหลือง มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันตก จากนั้นแพร่เข้าไปในกลุ่มประเทศแถบยุโรป และประเทศจีน ในระยะแรกแครอทถูกนำไปใช้เป็นสมุนไพรรักษาโรค ต่อมาในต้นทศวรรษที่ 20 เริ่มมีการนำมาใช้ประกอบอาหาร (นพวรรณ สมิตินันท์ และณัฏฐา โคกเกษม, 2532) สีของแครอทเกิดจากแคโรทีนที่มีปริมาณสูง เป็นเม็ดสีที่ไม่ละลายในน้ำ (แต่ละลายได้ดีในไขมัน) โดยพบว่าแครอทมีแคโรทีน 4,300 ถึง 11,000 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม และแคโรทีนที่มีมากในแครอทเป็นชนิดเบต้าแคโรทีน รองลงมาคือชนิดแอลฟา-แคโรทีน (Holland et al., 1991)

แครอทประกอบด้วย ส่วนประกอบของหัวอย่างเด่นชัดสองส่วน ดังภาพประกอบที่ 1



ภาพประกอบที่ 1 ลักษณะแครอทผ่าตามขวาง

ที่มา: (Krug, 1981)

แครอทเป็นพืชสองฤดู โดยฤดูแรกเจริญทางต้น ใบ ราก ฤดูที่สองจะเป็นระยะการเจริญของดอกเมล็ด เมื่อตัดหัวตามขวาง จะแสดงให้เห็นส่วนประกอบของหัวอย่างเด่นชัดสองส่วนคือ

2.1.1.1 ส่วนของเนื้อ (outer core) ประกอบด้วย

- 1) เปลือกบาง (Periderm)
- 2) ส่วนของเนื้อ (Cortex) ซึ่งประกอบด้วย ท่ออาหารและเป็นแหล่งเก็บ

อาหาร สำ รอง ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาล เป็นส่วนประกอบ 45 - 65 % ของหัว เนื้อสีขาว เหลือง ส้ม แดง ม่วงและดำ

2.1.1.2 ส่วนของแกน (inner core) ประกอบด้วย

- 1) ท่อน้ำ (xylem)
- 2) แกน (pith)

แครอทสายพันธุ์ที่มีคุณภาพสูง จะมีแกนขนาดเล็ก และมีสีเดียวกับเนื้อ หรือมีส่วนของเนื้อมากกว่าส่วนของแกน ความหวานของหัวแครอทเกิดจากการสะสมคาร์โบไฮเดรตที่มีความเข้มข้นสูง

2.1.1.3 ลักษณะต้นแครอทมีลำต้นคล้ายผักชี ลักษณะต้นอยู่เหนือพื้นดินเล็กน้อย มีลักษณะลำต้นที่สั้นมาก รากมีขนาดใหญ่ รูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่พันธุ์ แครอทเป็นระบบรากแก้ว พองโต ความยาวเฉลี่ยอาจยาวถึง 25-30 นิ้ว แล้วแต่สภาพที่ปลูก

2.1.1.4 สายพันธุ์แครอทที่ปลูกในประเทศไทย (โครงการหลวง, 2533) ได้แก่

- 1) พันธุ์หงส์แดง (New Kurata) เป็นแครอทกลุ่มพันธุ์เขทนีเน่ นิยมปลูกมากที่สุด มีลักษณะอ้วนรูปกรวย เมื่อรากโตเต็มที่จะยาวตั้งแต่ 15 เซนติเมตรขึ้นไป เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 เซนติเมตร
- 2) พันธุ์มินิเอ็กซ์เพรส (Mini Express) เป็นแครอทกลุ่มพันธุ์เบบี้แครอท ขนาดเล็กพอมวย ความยาว 6-8 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร
- 3) พันธุ์ทัมบีลีนา (Thumbelina) มีรูปร่างแปลกสะดุดตา หัวเป็นรูปทรงกลมยาวประมาณ 5 เซนติเมตร
- 4) พันธุ์ทัวร์โน เอฟวัน (Tourino F1) มีระยะการเก็บเกี่ยวสั้น ขนาดความยาวของหัวปานกลาง

แครอทที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เพื่อการบริโภค โดยอาจบริโภคสดเป็นผักสลัด เครื่องจิ้ม เครื่องต้ม และบริโภคในรูปอาหารประเภทผัดแกง ทอด และเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เช่น เค้ก คุกกี้ และขนมปัง (สรจักร ศิริบริรักษ์, 2539) มีการนำไปแปรรูปบ้างแต่ไม่มากนัก เช่น แครอทอบแห้ง แครอทแช่แข็ง และแครอทบรรจุกระป๋อง (โครงการหลวง, 2533)

2.1.2 คุณค่าทางโภชนาการของแครอท ในปี ค.ศ. 1831 Waekenroder ได้แยกสารสีส้มจากแครอท และตั้งชื่อว่า “แคโรทีน (Carotene)” (ศิริวรรณ สุทธิจิตต์, 2550) ดังนั้นจึงถือได้ว่าแครอทเป็นของเบต้าแคโรทีนที่ดีแหล่งหนึ่ง แคโรทีนเป็นสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ซึ่งตามธรรมชาติมีประมาณ 600 กว่าชนิดพบมากในผักและผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง แดง เพราะเบต้าแคโรทีน คือ สารที่ทำให้ผักและผลไม้มีสีดังกล่าว แครอทมีคุณค่าทางโภชนาการดังแสดงในตารางที่ 1

พูน ปณ จิต ชเว

ตารางที่ 1 ปริมาณสารอาหารในแครอทส่วนที่กินได้ 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ (หน่วย)
ความชื้น	85.1 %
พลังงาน	55 กิโลแคลอรี
ไขมัน	0.4 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	12.4 กรัม
กากใย	0.9 กรัม
โปรตีน	1.3 กรัม
แคลเซียม	60 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	28 มิลลิกรัม
เหล็ก	1.7 มิลลิกรัม
เบต้า-แคโรทีน	18,520 ไมโครกรัม
วิตามินบีหนึ่ง	0.04 มิลลิกรัม
วิตามินบีสอง	0.04 มิลลิกรัม
ไนอาซิน	0.6 มิลลิกรัม
วิตามินซี	9 มิลลิกรัม

ที่มา: (กรมอนามัย, 2535)

ปริมาณวิตามินเอที่รับประทานได้ในแต่ละวัน (Recommended Dietary Allowances : RDAs for Vitamin A) สำหรับคนแต่ละกลุ่มจะแตกต่างกันไป และมีหน่วยเป็นไมโครกรัม-อาร์เออี (RAE) ซึ่งเป็นปริมาณที่เทียบได้กับวิตามินเอ (Retinol Activity Equivalents) ซึ่งเป็นหน่วยวัดปริมาณที่ตั้งขึ้นมาให้เป็นสากล แต่ตามฉลากของผลิตภัณฑ์ของวิตามินเอและเบต้าแคโรทีน ยังคงใช้หน่วยเป็นยูนิิต (IU) ซึ่งสามารถคำนวณเทียบเป็น RAE ได้ดังนี้คือ

- 1 IU ของเรตินอล เท่ากับ 0.3 ไมโครกรัม
- 1 IU ของเบต้าแคโรทีนในแบบขูดสำเร็จรูปวางขายตามท้องตลาด เท่ากับ 0.15 ไมโครกรัม
- 1 IU ของเบต้าแคโรทีนจากอาหาร เท่ากับ 0.05 ไมโครกรัม
- 1 IU ของแอลฟาแคโรทีน หรือ เบต้าคริปโทแซนทีน เท่ากับ 0.025 ไมโครกรัม

2.1.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแครอทเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อน

การปรุงสุก หมายถึง เทคนิคกระบวนการให้ความร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงอาหารให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคการปรุงสุกอาหารสามารถทำได้ด้วยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ มากมาย เช่น การต้ม การอบ การย่างการทอดการเคี้ยว ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนทั้งสิ้น การปรุงสุกเป็นเหตุก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านต่างๆ ของอาหารตามมา เช่น การปรับปรุงความสามารถในการย่อยให้ร่างกายสามารถย่อยได้ง่ายขึ้น การเปลี่ยนแปลงทางด้านเนื้อสัมผัส กลิ่น สีรสชาติและคุณค่าทางอาหาร เป็นต้น

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท

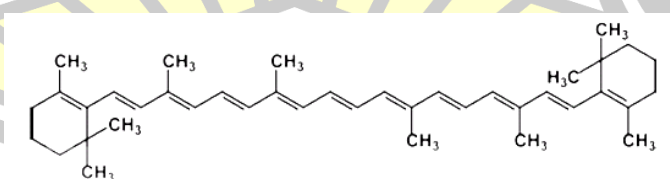
เนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของผักและผลไม้ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผักและผลไม้ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ลักษณะเนื้อสัมผัสสามารถนิยามได้ว่า เป็นกลุ่มของคุณลักษณะทางกายภาพซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางโครงสร้างของอาหารที่สามารถรับรู้โดยความรู้สึกสัมผัส มีความสัมพันธ์กับการเสีรูปทรงและการแตกตัว (Bourne, 2002)

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของอาหารที่ผู้บริโภคจะยอมรับหรือปฏิเสธผลิตภัณฑ์ ในผักและผลไม้ความแข็งของเนื้อสัมผัสจะขึ้นกับโครงสร้างผนังเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกตินและลิกนิน ระหว่างกระบวนการต้มผักและผลไม้การนุ่มขึ้นของเนื้อสัมผัสเกิดจากผลของการที่เซลลูโลส แป้งและเพกตินดูดซึมน้ำ เซลลูโลสจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งต่างกับแป้งและเพกติน ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแป้งจะเกิดการพองตัวและสุก ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสจากแข็งเป็นนุ่ม ในระหว่างนั้นแพคติกซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์จะถูกย่อยโดยน้ำร้อนส่งผลให้เกิดการอ่อนนุ่มขึ้นของเนื้อสัมผัสและเซลล์เกิดการแตกตัวง่ายขึ้น (Gordon et al., 1989)

2.1.5 เบต้าแคโรทีน (Beta-carotene)

เป็นสารที่อยู่ในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ในธรรมชาติมีประมาณ 600 ชนิด ที่พบบ่อยมี 6 ชนิด คือ เบต้าแคโรทีน แอลฟาแคโรทีน เบต้าครีฟ โทแซนทิน โลโคพิน ลูทีน และซีแซนทิน ซึ่งชนิดเบต้าแคโรทีนพบมากที่สุดในแครอท โดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 40-60 ซึ่ง 3 ชนิด แรกสามารถเปลี่ยนรูปเป็นเรตินอลได้ในทางเดินอาหาร ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ หรือโปรวิตามินเอ (provitamin A) โดย 1 ไมโครกรัมเรตินอล (retinol equivalent, RE) มีค่าเท่ากับเบต้าแคโรทีน 6 ไมโครกรัม หรือ แคโรทีนอยด์ตัวอื่น 12 ไมโครกรัม โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีนภาพประกอบที่ 2.2

โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีนจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน ที่ต่อกันเป็นสายยาวด้วยไอโซพรีนหลายๆหน่วยต่อกัน (ภาพประกอบที่ 2) เป็นโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน 40 อะตอม และไฮโดรเจน 56 อะตอม น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 536.9



ภาพประกอบที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีน
ที่มา: (ศศิเกษม ทองยงค์และพรณี เดชกำแหง, 2530)

สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ เป็นสารพื้นฐานสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะมนุษย์แล้ว สารดังกล่าวมีประโยชน์ 2 ประการ คือ

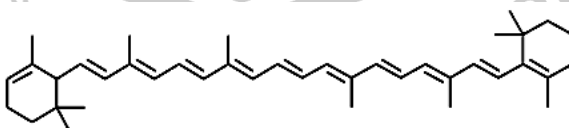
- 1) เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A)
- 2) เป็นสารต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant)

สารแคโรทีน เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ก่อนถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด แคโรทีนที่มีสูตรโครงสร้างเป็นทรานส์ไอโซเมอร์ (*trans-isomer*) สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้สูงกว่าที่เป็นซิสไอโซเมอร์ (*cis-isomer*) และพบว่า เบต้าแคโรทีนเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ดีที่สุด (ร้อยละ 100) และอันดับรองลงมาคือ แอลฟาแคโรทีน (ร้อยละ 50-54) แกมมาแคโรทีน (ร้อยละ 42-50) และจากรายงานวิจัยพบว่า เบต้าแคโรทีนเป็นสารที่สามารถต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยป้องกันเซลล์ในร่างกายไม่ให้ถูกทำลายจากอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้น เบต้าแคโรทีนหรือวิตามินเอจึงมีประโยชน์ต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

เบต้าแคโรทีน เสื่อมสลายได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือแสงสว่างโดยเกิด thermal isomerization กล่าวคือ เบต้าแคโรทีนในธรรมชาติที่มีโครงสร้างทั้งหมดอยู่ในรูปแบบทรานส์ เกิดการบิดตัวไป 180 องศา เปลี่ยนไปเป็นรูปแบบซิส ซึ่งเป็นรูปแบบที่เปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้น้อยลง เบต้าแคโรทีนมีจุดหลอมเหลวที่ 136-140 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 190-200 °C ทำให้เบต้าแคโรทีนเสื่อมสลายเป็นสารประกอบที่ระเหยได้ (Holland et al., 1991)

2.1.6 แอลฟาแคโรทีน (alpha-carotene) เป็นสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ พบในแครอท ปริมาณรองลงมาจากเบต้าแคโรทีน ร้อยละ 30-50 เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายแอลฟาแคโรทีนและเบต้าแคโรทีนจะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ช่วยปกป้องผิว ดวงตา จากการถูกทำลายโดยอนุมูลอิสระ แอลฟาแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ หรือสารประกอบโปรวิตามินเอ ตามผลการศึกษาตีพิมพ์โดยสถาบันมะเร็งแห่งชาติสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1989 นักชีวเคมีชาวญี่ปุ่นแห่งมหาวิทยาลัยแพทยศาสตร์ในกรุงโตเกียว พบว่า แอลฟาแคโรทีนซึ่งมีมากในแครอท อาจมีบทบาทสำคัญยิ่งกว่าเบต้าแคโรทีนในการป้องกันมะเร็ง เนื่องจากมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอก พบว่าฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของแอลฟาแคโรทีนแรงกว่าเบต้าแคโรทีนถึง 10 เท่า

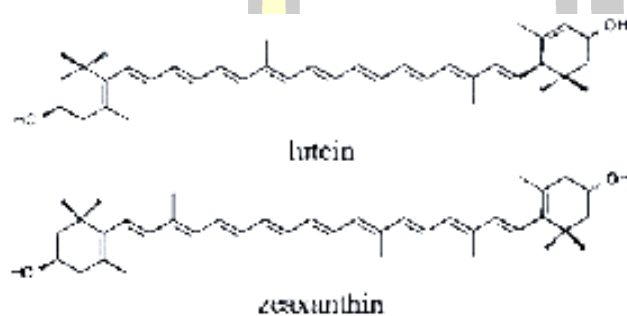
แอลฟาแคโรทีนมีสารพลาโนนอยด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ให้สีและกลิ่นรสแก่ผักผลไม้ที่มีสีส้มและสีแดงจำนวนมาก แหล่งของแอลฟาแคโรทีนพบมากใน แครอท มันฝรั่งหวาน สควอช คื่นช่ายแคนตาลูปกะหล่ำปลี กีวี แครอท มะม่วง สควอชและผักขม เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 3 โครงสร้างของแอลฟาแคโรทีน (ALPHA-CAROTENE)

ที่มา: (ศศิเกษม ทองยงค์และพรณี เดชกำแหง, 2530)

2.1.7 ลูทีน (lutein) เป็นแคโรทีนอยด์ในกลุ่ม xanthophylls คือมีอะตอมของออกซิเจน อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลลูทีนและซีแซนทีน มีความคล้ายคลึงกันมาก มีความแตกต่างกันเพียงพันธะคู่ที่อยู่บนวงแหวนส่วนปลายเท่านั้น ทำให้มีความยากลำบากในการแยกแคโรทีนอยด์ทั้งสองชนิดนี้ออกจากกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโครงสร้างของลูทีนและซีแซนทีน พบว่า ลูทีนมีจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ได้ถึง 8 ไอโซเมอร์ ส่วนซีแซนทีนมีเพียง 3 ไอโซเมอร์ ลูทีนและซีแซนทีนถูกดูดซึมได้ดีกว่าเบต้าแคโรทีนได้ทั้งในรูปปกติและในรูปเอสเทอร์ โดยในรูปเอสเทอร์จะดูดซึมได้ดีเมื่อให้พร้อมกับอาหารที่มีไขมันสูง ดังภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 โครงสร้างของลูทีน (LUTEIN) และ ซีแซนทีน (ZEAXANTHIN)

ที่มา: (ศศิเกษม ทองยงค์และพรณี เดชกำแหง, 2530)

ลูทีนพบสะสมอยู่ในส่วนของแมคูลาลูเทียของเรตินา ลูเทียทำหน้าที่เกี่ยวกับการมองเห็น และการกรองแสงสีน้ำเงิน ป้องกันการทำลาย photoreceptor จากพลังงานแสงของแสงสีน้ำเงินและยังช่วยคงความสมบูรณ์ของเรตินาด้วย แคโรทีนอยด์เหล่านี้ไม่สามารถสร้างได้เองจากร่างกายมนุษย์ แต่จะต้องได้รับจากอาหารที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูง

ลูทีนเป็นสารธรรมชาติที่มีในพืชผักผลไม้หลายชนิด เป็นสารในตระกูลของสารแคโรทีนอยด์ และพบได้ในบริเวณดวงตา โดยเฉพาะตรงบริเวณเลนส์ตาและจอรับภาพตา ในธรรมชาติแม้จะมีแคโรทีนอยด์ มากกว่า 600 ชนิด แต่มีเพียงสาร 2 ชนิดนี้เท่านั้น ที่พบในจุดรับภาพของจอตา สารทั้งสองชนิดนี้จะทำหน้าที่ช่วยกรองหรือป้องกันรังสีจากแสงแดดที่เป็นอันตรายต่อดวงตา และช่วยปกป้องเซลล์ของจอประสาทตาไม่ให้ถูกทำลายโดยการลดอนุมูลอิสระ ดังนั้น จึงทำหน้าที่บำรุงตา ทำให้จอตาไม่เสื่อมเร็ว ซึ่งการรับประทานผักผลไม้สีเหลืองและสีเขียวเข้ม จะสามารถช่วยถนอมสายตาได้นานขึ้น (วิภาดา แซ่เล่า และคณะ, 2562)

แหล่งที่พบ ลูทีน และ ซีแซนทีน ในธรรมชาตินอกจากจะพบมากในดอกดาวเรือง และโกจิเบอร์รี่ (เก๋ากี้) แล้วยังพบใน กะหล่ำ ผักโขม ถั่วลันเตา ต้นอ่อนกะหล่ำดาว ถั่วพิสตาชิโอ บรอกโคลี ข้าวโพด ไข่ แครอท ผักคะน้า ผักบุ้ง ผักปวยเล้ง ผักกาดหอม ผักโขม แตงกวาทั้งเปลือก ชูนิทั้งเปลือก ถั่วแขก อะโวคาโด มัสตาร์ด ฟักทอง เป็นต้น การบริโภคพืชผักที่มีลูทีนและซีแซนทีน จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อสุขภาพของดวงตา ซึ่งมีบทบาทในการป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคต้อ

เนื่องจากการเสื่อมของแมคูลาลูเทีย (macular lutia) ในผู้สูงอายุ (age-related macular regeneration, AMD) และโรคต้อกระจก เป็นต้น (Schalch et al., 2007)

2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

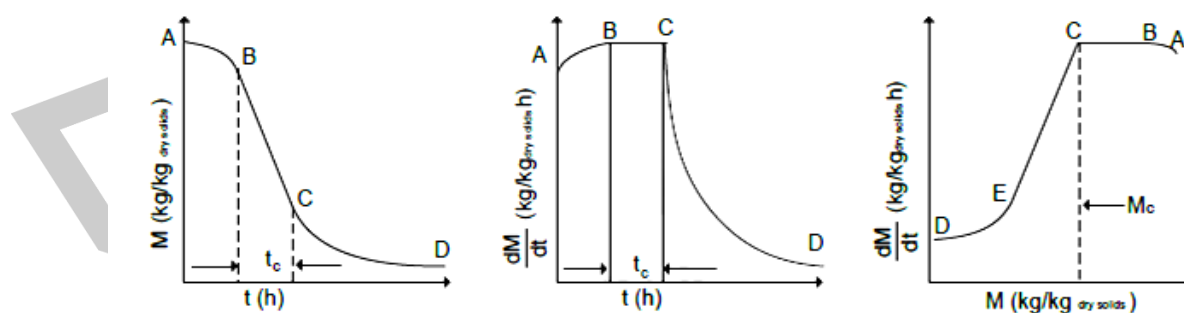
2.2.1 หลักการอบแห้ง

การอบแห้ง (drying) คือ การแยกน้ำออกจากวัสดุขึ้นโดยการทำให้ น้ำเปลี่ยนสถานะจากการพาอากาศร้อน (convection) ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัสดุ น้ำในวัสดุจะระเหยออกมา กระบวนการนี้จะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัสดุเท่ากับความดันไอน้ำที่บรรยากาศ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศ ความชื้นของผลผลิต ความชื้นในอากาศ ชนิดความสุกแก่ของผลผลิต

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้งแสดงในภาพประกอบที่ 5 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ

ช่วง A-B เป็นช่วงสภาวะที่ผิววัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุโดยความร้อนจากอากาศอบแห้งจะถ่ายเทเข้าสู่ผิววัสดุ ซึ่งความร้อนที่ให้กับวัสดุนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัส อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

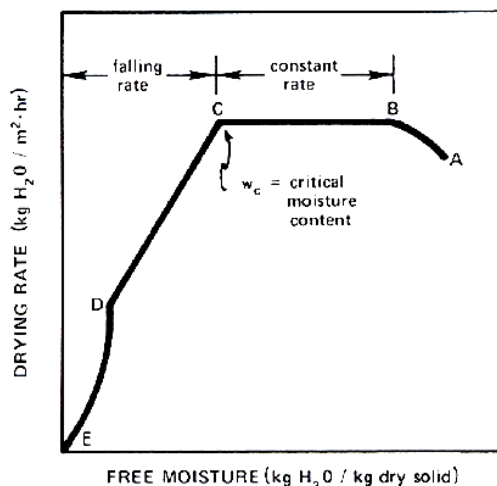
ช่วง B-C เป็นช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate period-BC) น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)



ภาพประกอบที่ 5 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ที่มา: (Brennan, 2006)

ช่วง C-D เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีกที่จุด C (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) ดังภาพประกอบที่ 6 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต

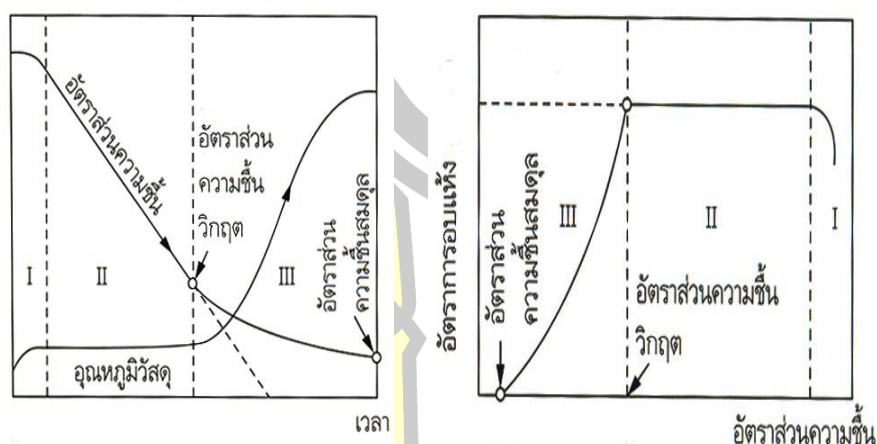


ภาพประกอบที่ 6 อัตราการทำแห้ง

ที่มา: (Brennan, 2006)

จากภาพประกอบที่ 6 เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไป อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-D) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (D-E) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างต่อเนื่อง อัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลง เพื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งพบว่าช่วงของการอบแห้งจะลดลง

ค่าของอัตราส่วนความชื้น ดังภาพประกอบที่ 7 เส้นแบ่งเขตระหว่างช่วงที่ 1 กับช่วงที่ 2 คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต (w_c) และอัตราส่วนความชื้นหลังจากเวลาผ่านไปเป็นอนันต์ ก็คือ อัตราส่วนความชื้นสมดุล ค่าอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วลมเป็นตัวกำหนดค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตว่า มากหรือน้อยเช่นเดียวกันถ้าวิธีการอบแห้งเปลี่ยนไปอัตราส่วนความชื้นวิกฤตก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นเพื่อให้ช่วงเวลาการอบแห้งสั้นลงจึงควรเลือกวิธีการอบแห้ง ที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นวิกฤตเหลือค่าน้อย ๆ (วีไล รังสาทอง, 2547)



ภาพประกอบที่ 7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา

ที่มา: (วิไล รังสาทอง, 2547)

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง (วิไล รังสาทอง, 2547) คือ

1) ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำ ภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำ ในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชั้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3) ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง ทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4) อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5) ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำ และการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6) ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะ

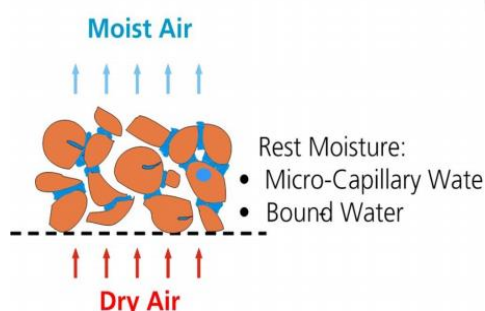
ทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่าย เนื่องจากการลดความดันในสภาวะการอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (vacuum drum drier) เป็นต้น

7) ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8) สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

2.2.3 กลไกการทำให้แห้ง

เมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมา ด้วยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านอากาศ และถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ (วิไล รังสาดทอง, 2547)



ภาพประกอบที่ 8 กลไกการทำให้แห้ง

ที่มา: (วิไล รังสาดทอง, 2547)

สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความดันไอด่างต่างขึ้น อาหารชั้นในจะมีความดันไอที่สูง และค่อยๆลดต่ำลง เมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้งด้านนอก ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันของไอน้ำภายในชั้นอาหารออกสู่อากาศแห้งด้านนอก ซึ่งน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยกลไกดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของเหลวด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อโปร่ง มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกัน เป็นทางแคบๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่นี้จะสะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในช่องแคบๆ นั้นขาดตอนลง

2. การแพร่ของของเหลว ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในอาหารส่วนต่างๆ

3. การแพร่ของของเหลว ซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของๆ แข็งในอาหาร

4. ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหาร

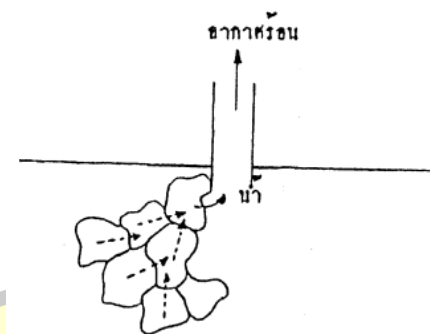
2.2.4 สมบัติของน้ำต่อการอบแห้ง

ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำแห้งที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่สำคัญนั้นมี 2 ประการ คือ การถ่ายเทความร้อน และการเคลื่อนของน้ำในอาหาร

1. การถ่ายเทความร้อน จะเกิดขึ้น ณ จุดที่อุณหภูมิมีความแตกต่างกันเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นแบบการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อนอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือร่วมกันได้ ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอาหาร และตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำออกจากอาหารก็จะรวดเร็วขึ้น

2. การเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร

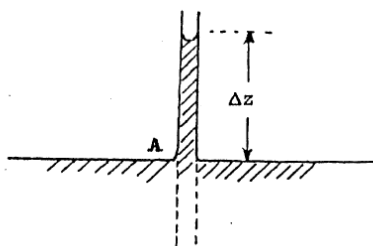
1) การไหลออกแบบกระจายตัวซึมผ่าน (Diffusion mechanism) ส่วนใหญ่เกิดกับพวกสารอินทรีย์ (Homogeneous solid) ซึ่งมีลักษณะเป็นสารพวก fibrous organic, gel-like substance, porous cake เป็นต้น ความชื้นจะถูกกำจัดออก โดยผ่านทาง Molecular diffusion ซึ่งเกิดเนื่องมาจากมีความดันไอต่างกัน ระหว่างภายในเซลล์และภายนอกสาร (Vapor pressure different) ถ้าความดันไอกว้างนอกต่ำกว่าความดันไอกว้างในเซลล์ของอาหาร จากความแตกต่างในความดันไอนี้ จะทำให้น้ำภายในเซลล์ของอาหารซึมผ่านเยื่อผนังเซลล์ ซึ่งเป็นเยื่อที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (Semi permeable membrane) โดยน้ำที่ไหลออกจากเซลล์ที่อยู่ติดกับรู หรือท่อเล็กๆ ในการไหลแบบที่ 2 เมื่อเซลล์ที่อยู่ติดกับรูมีน้ำไหลออก จะทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งจะเป็นแรงดึง (driving fore) ทำให้น้ำในเซลล์ที่อยู่ติดกันซึมตามออกมา การเคลื่อนที่ของน้ำแบบกระจายตัวซึมผ่านนี้ เกิดขึ้นค่อนข้างช้า ดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบที่ 9 การไหลออกของน้ำแบบกระจายตัวซึมผ่าน

ที่มา: (วิไล รังสาดทอง, 2547)

2) การไหลออกแบบท่อเล็กๆ (Capillarity flow mechanism) ในกรณีพวกสารหรือของแข็งที่มีลักษณะของเนื้อสารเป็นรูพรุนมากๆ เป็นแบบ Open-pore-structure และมีขนาดของรูพรุนใหญ่นั้น พบว่าการใช้กลไกของการกระจายตัวซึมผ่านมาอธิบายไม่ได้ สารอาหารต่างๆ ไปจะมีลักษณะรูพรุน (porous material) เมื่อเอาท่อเล็กๆ (Capillary) ใส่เข้าไปดังแสดงในภาพประกอบที่ 10 เมื่ออาหารได้รับความร้อนจากการทำแห้ง อากาศเกิดการขยายตัวให้เกิดแรงดัน น้ำเข้าไปในท่อเล็กๆ ถ้าอากาศได้รับความร้อนสูง จะเกิดการขยายตัวน้ำที่ไหลเข้าในท่อเล็กๆ ก็จะสูงขึ้น



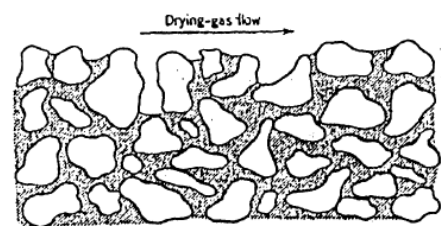
ภาพประกอบที่ 10 การไหลออกของน้ำแบบท่อเล็กๆ

ที่มา: (วิไล รังสาทอง, 2547)

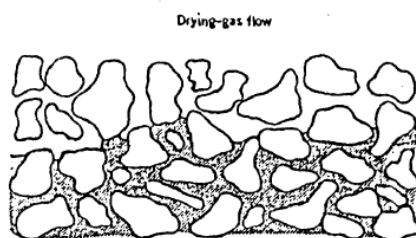
ในสารอาหารหรือพวกสารประกอบอินทรีย์ทั่วไปนั้น เมื่อตอนเริ่มทำแห้ง พบว่า การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อสารอาหารนั้น จะเป็นการไหลแบบท่อเล็กๆ (capillarity flow mechanism) ก่อน ทั้งนี้เนื่องจากในตอนเริ่มให้ความร้อนนั้น น้ำในสารยังมีปริมาณมากอยู่และสารอาหารนับว่าเป็นสารพวกที่มีรูพรุนมากมาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่อมีอากาศร้อนผ่านไปทั่วตัวของสาร จะเกิดการขยายตัวของอากาศคล้ายกับมีท่อขนาดเล็กๆ ติดอยู่ตรงรูนั้น พบว่า ยิ่งอากาศขยายตัวมากเท่าไร จะทำให้มีแรงดึงดูดในท่อเล็กๆมากขึ้นเท่านั้น หลังจากน้ำที่อยู่ตามรูพรุนของสารอาหารนั้นหมดแล้ว การเคลื่อนที่ของน้ำภายในสารก็จะเปลี่ยนเป็นการไหลออกแบบการแพร่กระจายตัวซึมผ่าน (diffusion mechanism) นั่นก็คือ ต่อไปการเคลื่อนที่ของน้ำภายในจะเป็นแบบ molecular diffusion ซึ่งเกิดเนื่องมาจากมีความแตกต่างของความดันไอนั่นเอง โดยจะเริ่มจากเซลล์ที่อยู่ติดกับรูพรุน หรือท่อเล็กๆก่อน เมื่อได้รับความร้อนทำให้อากาศขยายตัว ทำให้น้ำเริ่มซึมตัวออกจากเซลล์ขึ้นไปตามรูพรุนเล็กๆ จึงทำให้ภายในเซลล์นั้น มีความเข้มข้นมากขึ้น จึงเกิดแรงดึงดูดทำให้ทำให้เกิดการซึมผ่านของน้ำจากเซลล์ที่อยู่ติดกันซึมเข้าไปในเซลล์ ที่ติดอยู่กับรูพรุน แล้วจะระเหยออกไปทางรูพรุนนั้น ซึ่งจะเกิดแรงดึงดูดต่อเนื่องไปเรื่อยๆจนทำให้อาหารนั้นแห้งขึ้น

โดยสรุปการไหลออกของน้ำหรือ การระเหยนํ้าออกจากตัวอาหารนั้น จะเป็นไปตามขั้นตอนที่แสดงในภาพประกอบที่ 11

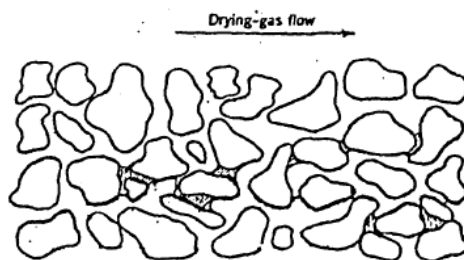




Moisture distribution in a particulate-solid bed during the first falling-rate period.



Moisture distribution in a particulate-solid bed during the second falling-rate period.



Moisture distribution in a solid bed toward the end of the drying process.

ภาพประกอบที่ 11 ลักษณะการระเหยออกของน้ำ ในระหว่างขั้นตอนการอบแห้ง
ที่มา: (วิไล รังสาทอง, 2547)

2.2.5 ค่าความชื้นของวัสดุ

ปริมาณความชื้นของวัสดุจะอธิบายอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง

ความชื้นฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำ ที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะ แสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นฐานเปียกนิยมใช้ในการการค้า เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\%M_w = (w - d) \times 100 / w$$

(2.1)

ความชื้นฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นฐานแห้งหาได้จาก

$$\%M_d = (w - d) \times 100 / d \quad (2.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นฐานเปียก, %
 M_d คือ ความชื้นฐานแห้ง, %
 w คือ มวลของวัสดุเปียก, kg
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง, kg

2.3 การทำแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying)

การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว ยังมีข้อจำกัด ยกตัวอย่าง เช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แม้ว่าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพดีแต่ต้องใช้เวลาในการทำแห้งนาน หรือการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งสั้นและช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้ แต่ยังพบปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหม้เป็นจุดๆได้ การอบแห้งแบบผสมผสาน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว (บรมพิชยชาติกุล, 2555)

การทำแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอน ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว โดยมีลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการพักในที่อับอากาศระหว่างการทำแห้ง หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ หรือใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันมาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มอัตราการทำแห้ง อีกทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน

การทำแห้งแบบผสมผสานออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ (Kudra & Mujumdar, 2009) ได้แก่

2.3.1 Combined modes of heat transfer : การผสมผสานลักษณะการถ่ายเท

ความร้อนหลายๆ ประเภท เข้าด้วยกันแบ่งเป็นลักษณะต่างๆ เช่น

- 1) Convection and conduction : การพาความร้อน ร่วมกับการนำความร้อน
- 2) Convection and Microwave/ Infrared radiation/ Radio-frequency : การพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี เช่น คลื่นไมโครเวฟ / รังสีอินฟราเรด / คลื่นวิทยุ
- 3) Simultaneous : การถ่ายเทความร้อนหลายแบบ เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน
 Sequential : การถ่ายเทความร้อนหลายแบบเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน
- 4) Continuous : การทำแห้งแบบต่อเนื่อง
- 5) Intermittent : การทำแห้งเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่อง มีการหยุดพัก

2.3.2 Multistage dryers : การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) Each stage same dryer type : แต่ละขั้นตอน ใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกัน เช่น Two-stage fluid bed หรือ Two-stage vibrofluid bed เป็นต้น
- 2) Each stage a different dryer : ใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิดร่วมกันในขั้นตอนเดียว เช่น Flash / fluid bed หรือ Spray / fluid bed หรือ Fluid bed / packed bed
- 3) Different drying technologies per stage : ใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันในแต่ละขั้นตอน เช่น Superheated steam dryer ตามด้วย Hot air drying

2.3.3 Multiprocessing dryers : การทำแห้งร่วมกับ กระบวนการอื่นๆ เช่น Drying ---> Cooling : อบแห้งร่วมกับการทำ เย็น Drying ---> Granulation/Agglomeration : อบแห้งร่วมกับการขึ้นรูปเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น

Drying ---> Coating : อบแห้งร่วมกับการเคลือบ

Drying ---> Filtration : อบแห้งร่วมกับการกรอง

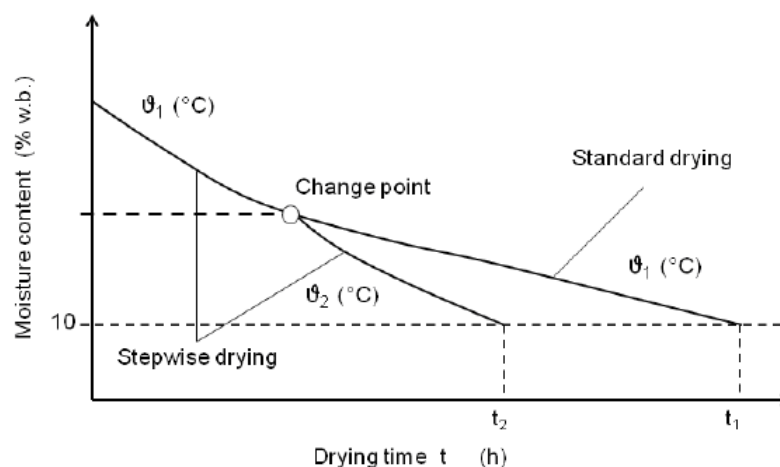
2.4 การอบแห้งโดยวิธีแบบขั้นตอน (stepwise drying)

การอบแห้งแบบขั้นตอน (stepwise drying) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งสามารถลดเวลาในการอบแห้งและเป็นการประหยัดพลังงาน นอกจากนั้นการทำแห้งด้วยวิธีนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งมีคุณลักษณะที่ดี

การอบแห้งแบบขั้นตอนเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันและใช้ความชื้นเป็นจุดเปลี่ยนอุณหภูมิ (change point) โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งช่วงเริ่มต้น เนื่องจากอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและคุณภาพสุดท้ายผลิตภัณฑ์ลดลง (S. P. Cuervo-Andrade & Hensel, 2016)

แสดงกราฟการอบแห้งแบบมาตรฐานและการอบแห้งแบบขั้นตอน (stepwise drying) ดังภาพประกอบที่ 12 ทำการอบแห้งแบบ 2 อุณหภูมิ โดยการอบแห้งในช่วงแรกใช้อุณหภูมิต่ำ (θ_1) ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเพิ่มอุณหภูมิ (θ_2) ซึ่งจุดเปลี่ยนอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (S. P. Cuervo-Andrade & Hensel, 2016)

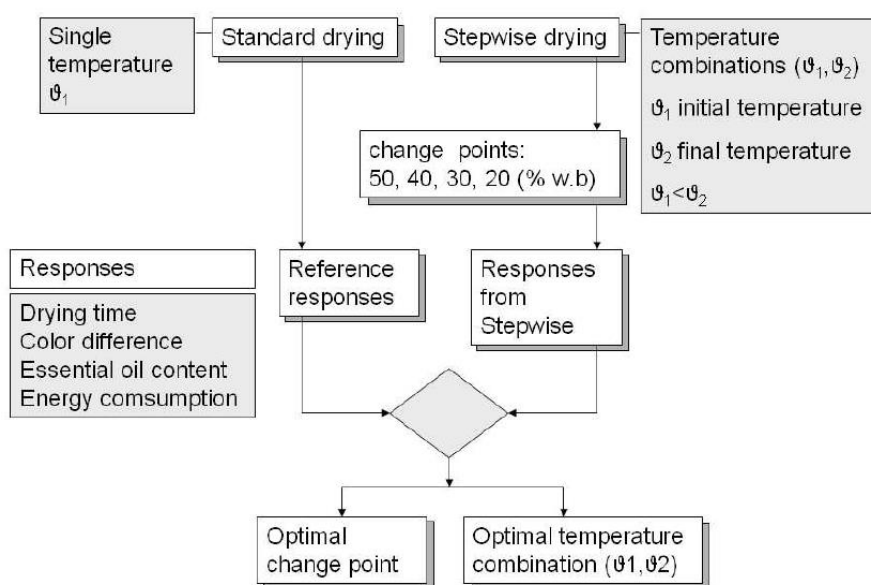




ภาพประกอบที่ 12 วิธีการอบแห้งแบบคงที่และแบบสองขั้นตอน (STEPWISE DRYING)

ที่มา: (S. P. Cuervo-Andrade & Hensel, 2016)

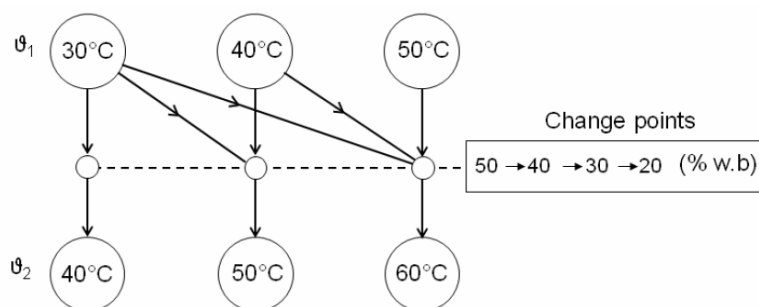
การอบแห้งแบบมาตรฐานเป็นการอบแห้งแบบคงที่ที่ใช้อุณหภูมิเดียวตลอดกระบวนการอบแห้ง ส่วนวิธีการอบแห้งแบบขั้นตอน (stepwise drying) เป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายไม่เท่ากัน โดยอุณหภูมิเริ่มต้นในการอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิสุดท้าย และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ความชื้นฐานเปียก 50,40,30 และ 20 (% w.b) ดังภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบที่ 13 การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐานและวิธีการอบแห้งแบบขั้นตอน (STEPWISE DRYING)

ที่มา: (S. Cuervo-Andrade, 2011)

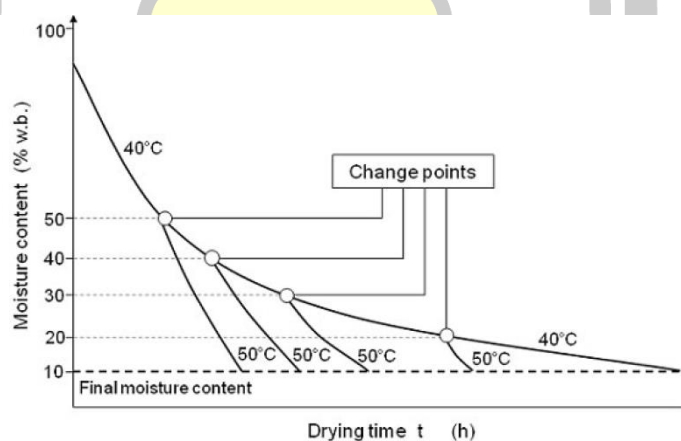
การอบแห้งแบบขั้นตอนสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิ เช่น เพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C เป็น 40°C หรือ 30°C เป็น 50°C เป็นต้น โดยพิจารณาจากความชื้นฐานเปียกที่เหมาะสม 50,40,30 และ 20ตามลำดับ (% w.b) ดังภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบที่ 14 การผสมผสานอุณหภูมิที่แตกต่างกันสำหรับการอบแห้งแบบขั้นตอนและจุดเปลี่ยนอุณหภูมิที่ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน

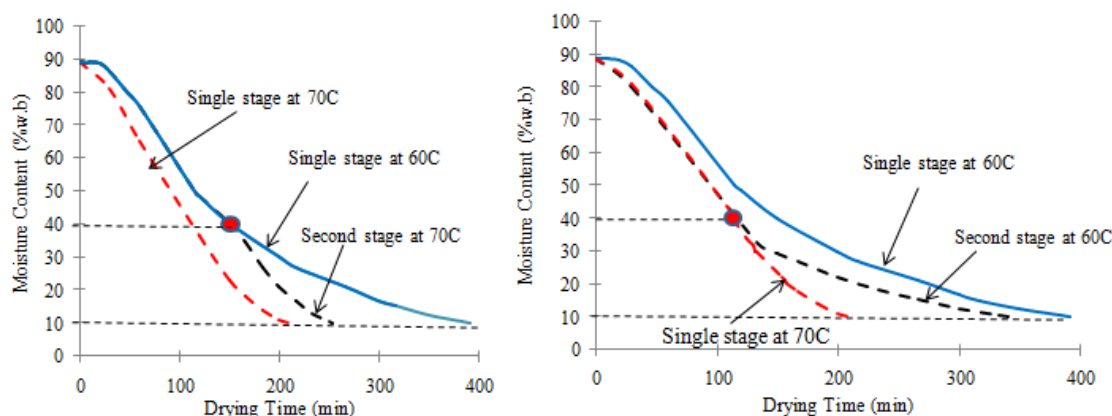
ที่มา : (S. Cuervo-Andrade, 2011)

จากภาพประกอบที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบเวลาการอบแห้งและปริมาณความชื้น โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40°C และเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 50°C ที่ความชื้นฐานเปียก 50,40,30 และ 20 ตามลำดับ (% w.b) ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์จนถึงสิ้นสุดที่ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียก



ภาพประกอบที่ 15 การอบแห้งแบบขั้นตอนที่จุดเปลี่ยน (CHANGE POINT) แตกต่างกัน

ที่มา : (S. Cuervo-Andrade, 2011)



ภาพประกอบที่ 16 การอบแห้งแบบสองขั้นตอน (ก) แบบเพิ่มอุณหภูมิ (ข) แบบลดอุณหภูมิ
ที่มา: (Jomlapelatikul et al., 2016)

การอบแห้งแบบสองขั้นตอน (stepwise drying) การเพิ่มและลดอุณหภูมิอบแห้งที่ความชื้นร้อยละ 40 ฐานเปียก แสดงในภาพประกอบ 16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และทำนายระยะเวลาในการอบแห้งจนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายที่ร้อยละ 10 ฐานเปียก (Sharma et al., 2009) ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมของแครอทอบแห้ง

Jomlapelatikul et al. (2016) ได้ทำนายแบบจำลองการอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบเพิ่มอุณหภูมิ และ แบบลดอุณหภูมิ โดยมีจุดเปลี่ยนอุณหภูมิการอบแห้งที่ความชื้นของผลิตภัณฑ์ทุกๆ ร้อยละ 10 ฐานเปียก เริ่มตั้งแต่ร้อยละ 20 จนถึง 80 ฐานเปียก ทุกสภาวะความชื้นที่เปลี่ยนอุณหภูมิจะทำการประมวลผลแบบจำลองเพื่อหาระยะเวลาการอบแห้งจนสิ้นสุดที่ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียก ให้ผลดังนี้

1. การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยวิธีแบบเพิ่มอุณหภูมิ จาก 60 °C เป็น 70 °C โดยมีจุดเพิ่มอุณหภูมิที่ความชื้นต่างๆ เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นในขั้นตอนที่สอง ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าใช้อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิที่ความชื้นต่างๆ ของแครอทจะมีผลกระทบต่อระยะอัตราการระเหยลดลง (falling drying rate period) คือ ที่จุดเพิ่มอุณหภูมิของความชื้นสูงจะทำให้ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมีระยะสั้นลง เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิที่ความชื้นสูงจะทำให้ระยะเวลาอบแห้งสั้นลง

2. การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยวิธีแบบลดอุณหภูมิ จาก 70 °C เป็น 60 °C อัตราการอบแห้งลดลงยาวขึ้นเมื่อจุดลดอุณหภูมิที่ปริมาณความชื้นเฉลี่ยสูงขึ้น และทุกสภาวะของแบบลดอุณหภูมิจะมีระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวกว่าการอบแห้งคงที่ ที่อุณหภูมิ 70 °C เนื่องมาจากอุณหภูมิสูงมีผลต่อแรงขับเคลื่อนให้น้ำระเหยได้มากกว่า ซึ่งเป็นกลไกทางธรรมชาติของวัสดุชีวภาพ

กระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยวิเคราะห์ทั้งด้านความสิ้นเปลืองพลังงานและการหดตัว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง คือ การอบแห้งแบบเพิ่มอุณหภูมิที่ความชื้นของแครอทร้อยละ 70 ฐานเปียก เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดและด้านการหดตัวใกล้เคียงกับสภาวะอื่น

2.5 ทฤษฎีการหดตัว

ความหมายและสาเหตุของการหดตัวปริมาตรในการหดตัวของวัสดุเกษตร โดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในวัสดุ การสูญเสียความชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในวัสดุ มีผลทำให้รูปทรงของผลิตภัณฑ์มีขนาดลดลง การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหดตัวของแครอทมีสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้ (วาณิช นิลนนท์, 2554)

1) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการหดตัวของผลิตภัณฑ์จะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกไปจากผลิตภัณฑ์

2) โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจะมีน้ำที่มีความหนาแน่น (ρ_w) อยู่ในโครงสร้าง

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ (V) จะประกอบด้วย ปริมาตรของผลิตภัณฑ์แห้ง (V_d) และ ปริมาตรของน้ำในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ (V_w) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่พัฒนาโดย (Sahdev et al., 2016) ดังนี้

$$V = V_w + V_d \quad (2.3)$$

ปริมาตรเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (V_0) ประกอบด้วย ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เป็นรูพรุน (V_{w0}) และปริมาตรผลิตภัณฑ์แห้ง (V_d) แสดงดังสมการ

$$V_0 = V_{w0} + V_d \quad (2.4)$$

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วยความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์และความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แห้ง (ρ_d) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมวลและปริมาตรของผลิตภัณฑ์โดยที่มวลของผลิตภัณฑ์ในแต่ละเวลาทำการวิเคราะห์คือ m ประกอบด้วยมวลของผลิตภัณฑ์แห้ง (m_d) และมวลของน้ำ (m_w) โดยที่มวลเริ่มต้นของน้ำคือ m_{w0} ดังสมการ

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} = \frac{m_{w0}}{V_{w0}}, \rho_d = \frac{m_d}{V_d} \quad (2.5)$$

ความชื้น (M) ที่เวลาใดๆ และความชื้นเริ่มต้น (M_0) ของผลิตภัณฑ์ สามารถหาความสัมพันธ์กับมวลของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

$$M_0 = \frac{m_{w0}}{m_d}, M = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.5) และสมการ (2.6) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{V}{V_0} = \frac{V_w + V_d}{V_{w0} + V_d} \quad (2.7)$$

ผลของการอบแห้งที่มีต่อการหดตัวที่ทำให้โครงสร้างของอาหารเสียหาย โดยธรรมชาติ เซลล์ในอาหารจะอยู่ในลักษณะของเซลล์ที่เต่งตึงเสมอ และเซลล์จะมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นได้ เมื่อน้ำถูกระเหยออกไปจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งผิวของอาหารจะพยายามเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้น ทำให้เซลล์ของอาหารหดตัว การหดตัวของผนังเซลล์ไม่สามารถหดไปเท่ากันทุกส่วนของอาหารได้ ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติของอาหารจะมีส่วนที่ไม่สามารถถูกอัดไปได้ เรียกว่า incompressible part ตรงส่วนที่ไม่สามารถหดตัวเข้าไปได้ก็จะยืดตัวออก ในการยืดตัวออกผนังเซลล์จะทนต่อแรง tensile strength ได้ขนาดหนึ่ง หากเกินกว่านั้นจะทำให้ผิวส่วนนั้นขาดเสียหายได้

การหดตัวของอาหารที่มีปริมาณน้ำสูง เช่น ผักและผลไม้ มีความสำคัญในการคำนวณ จลศาสตร์การอบแห้ง โดยการหดตัวถูกนำมาใช้เพื่อประเมินการแพร่ของความชื้นที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบมิติทางเส้นของวัสดุ (ความยาว, ความกว้างและความหนา) กับการเปลี่ยนแปลงของความชื้น

2.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ในการศึกษาเรื่องการอบแห้ง นิยมแสดงความชื้นของอนุภาคหรือผลิตภัณฑ์ในรูปของ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำ ใน วัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้ง ดำเนินไปที่เวลาใดๆ เขียนเป็นสมการ ได้ ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละ ฐานแห้ง), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐาน แห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละฐานแห้ง)

โดยถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และ ความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงละค่าความชื้น สมดุลในสมการ (2.8) ข้างต้น ทำให้สามารถเขียน สมการ (2.9) ได้ใหม่ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละ ฐานแห้ง) และ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐาน แห้ง)

ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, M_{eq}) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษากระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะการศึกษาระยะเวลาการอบแห้ง (drying period) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งของการอบแห้งกับความชื้นสมดุลของวัสดุคือ การวัดความเป็นไปได้หรือแรงขับเคลื่อนไอน้ำระหว่างวัสดุกับอากาศแวดล้อม นอกจากนี้ความชื้นสมดุลยังมีความสำคัญต่อการผสม (mixing) การบรรจุ (packaging) และการเก็บรักษา (storage) ผลผลิตเกษตร เนื่องจากวัสดุทางการเกษตรเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและเต็มไปด้วยความชื้น การแลกเปลี่ยนความชื้นจะเกิดขึ้นระหว่างตัววัสดุเองกับสิ่งแวดล้อมจนกว่าวัสดุจะถึงจุดความชื้นสมดุลซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีการเพิ่มหรือสูญเสียความชื้นอีกต่อไป

ซึ่งโดยปกติการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่เวลาใดๆ สามารถอธิบายได้โดยสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย (decay exponential) (Kashaninejad et al., 2007) ซึ่งได้มีผู้ศึกษาและสร้างสมการหรือแบบจำลองที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอนุภาคระหว่างการอบแห้งไว้หลายสมการ ดังนี้

- แบบจำลองของลิวอิส (Lewis) ได้ทำการศึกษาและอธิบายว่า การถ่ายเทความชื้นถ่ายเทจากอาหารและวัสดุเกษตรนั้น คล้ายคลึงกับการถ่ายเทความร้อนของร่างกายคนเรา เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เย็นกว่า แบบจำลองนี้ได้สมมติว่าจะไม่มีการต้านทานการถ่ายเทความชื้นจากภายในอนุภาคนั้นๆ ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังสมการที่ 2.10 เมื่อ t คือ เวลา และ k คือค่าคงที่ของการอบแห้ง ซึ่งแบบจำลองนี้ถือได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุด

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.10)$$

- แบบจำลองของเพจ (Page) ได้ทำการปรับปรุงสมการของลิวอิสใหม่โดยใช้ค่าคงที่เพิ่มขึ้น มาอีกหนึ่งค่าคือ n (ค่าคงที่ของแบบจำลอง) เพื่อให้แบบจำลองสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้แม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งใช้ได้กับอาหารและวัสดุเกษตรหลายประเภท

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (2.11)$$

- แบบจำลองของเพจที่มีการปรับปรุง (White & Kight, 1984) ได้ทำการปรับปรุงสมการของเพจเล็กน้อย และพบว่าใช้ได้ดีในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของป๊อปคอร์น ดังสมการที่ 2.12

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-(kt)^n) \quad (2.12)$$

- แบบจำลองของเฮนเดอร์สันและเพปส์ บางครั้งจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้น ระหว่างการอบแห้งสามารถแทนได้โดยการประมาณค่าในรูปของอนุกรมอนันต์ (infinite series) ซึ่งรูปที่ง่ายที่สุดของอนุกรมอนันต์นี้คือสมการที่มีเพียงเทอมแรกดังสมการที่ (2.13)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = a \exp(-kt) \quad (2.13)$$

พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำ ของสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมในการทำแห้ง ถ้าค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลอง ดังกล่าวมีความแม่นยำมาก และค่า RMSE จะเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงค่าความผิดพลาดในการ ทำนายค่าของแบบจำลอง ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่าการทำนายของแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำด้วย ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n MR_{exp} \times MR_{pre}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n MR_{exp}^2)(\sum_{i=1}^n MR_{pre}^2)}} \right]^2 \quad (2.14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pre})^2}{N}} \quad (2.15)$$

เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุที่ได้จากการทดลอง
 MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุที่ได้จากการทำนาย
 N คือ จำนวนค่าสังเกต
 n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.7 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.7.1 การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เป็นวิธีการแก้ปัญหาในการหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อสร้างวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้คอมพิวเตอร์ ลักษณะของการหา คำตอบของปัญหาที่นิยมเป็นวิธีการทำซ้ำ โดยในขั้นตอนเริ่มต้นต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการหาคำตอบ แล้วนำคำตอบนั้นมาหาค่าเริ่มต้นในการหาคำตอบต่อไปกระทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าคำตอบที่ได้ใส่เข้าคำตอบใดคำตอบหนึ่งจนสิ้นกระบวนการ การหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยทั่วไปจะแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นสองแบบคือ ปัญหาแบบเชิงเส้นและปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์แก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2545)

1) ปัญหาแบบเชิงเส้น (linear) เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนไม่สูง สามารถแก้ปัญหาได้ในเวลาไม่นาน เนื่องจากรูปแบบของสมการมีเพียงอันดับเดียว

2) ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงใช้เวลาในการแก้ปัญหามากกว่าปัญหาแบบเชิงเส้น มักแสดงอยู่ในรูปของสมการพหุนาม (polynomial equation) ที่มีอันดับตั้งแต่สองขึ้นไป

2.7.2 ทฤษฎี และลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) ซึ่งมักอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ที่จุดตัดของเส้นรอบเอลิเมนต์เรียกว่า จุดต่อ (node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อมๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ แทนที่แก้สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าจะหาคำตอบได้ครบทุกจุด (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2545)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และโครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในสภาพยืดหยุ่น (elastic) หรือในสภาพยืดตัว (plastic) นอกจากนี้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่นการกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลันหรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้จากสมการอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equations) หรือหาสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) ได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาทีเดียวทั้งระบบเช่นวิธีทั่วไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น ในระบบโครงสร้าง เราหาการกระจัด และความเค้นของแต่ละจุดของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ

2.7.3 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ก่อนที่จะศึกษาในรายละเอียดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เราจำเป็นต้องเข้าใจหลักการเบื้องต้นต่างๆไป เกี่ยวกับชนิดต่างๆของเอลิเมนต์ วิธีการแบ่งเอลิเมนต์ การกำหนดตำแหน่งต่างๆของเอลิเมนต์ ลักษณะของฟังก์ชันการกระจัด และการจำลองแบบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้ง

ต้องมีความรู้พื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์เฉพาะด้านที่ทำการศึกษา เช่น กลศาสตร์ของแข็ง ความสัมพันธ์ของความเค้น- ความเครียดและการกระจัด กลศาสตร์การถ่ายเทความร้อน หรือ กลศาสตร์ของไหล เป็นต้น รวมทั้งควรทราบหลักการของงาน และพลังงาน เพื่อใช้ประกอบในการหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ และควรทราบการประยุกต์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ส่วนหลักการการประยุกต์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณ ส่วนหลักการการประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นสูงทั่วไป

2.7.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆ โดยทั่วไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่ว่าจะทำได้ด้วยมือ หรือใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปก็ตาม ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1) การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นเหล็กจากแรงดึง ขั้นตอนแรกจำเป็นต้องแบ่งแผ่นเหล็กออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ (discretization) หรือหากต้องการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำในท่อ จำเป็นต้องแบ่งโดเมนซึ่งเป็นน้ำนั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ก่อน กระบวนการขั้นตอนแรกนี้ โดยปกติจะใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหา (geometry) อย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจจะประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อน การประดิษฐ์กราฟฟิกส์ซอฟต์แวร์ในส่วนนี้ขึ้นมาเอง จึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้อันประกอบด้วยประสบการณ์ทางด้านนี้เป็นอย่างมาก

2) การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนพื้นที่โมเดลนั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ากันก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมตัวไม่รู้ค่าจะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวไม่รู้ค่าที่สมมุติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่นการเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมุติให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นเรียบเป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ การกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้นการเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆกัน จึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่สามารถคำนวณได้

3) การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่สนใจอยู่นั้นจะเปลี่ยนไปเป็นสมการทางเลือกพีชคณิตที่เรียกว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการจะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ เนื่องจากเอลิเมนต์ต่างๆ มีขนาดไม่เท่ากัน กระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์จึงต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจอย่างมาก

4) การนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิต ซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่แล้วจำเป็นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้อง และมีหลักการเปรียบเทียบเสมือนการนำชิ้นตัวอย่างต่อมาต่อเข้ากันอย่างถูกต้อง และเหมาะสมจึงเกิดรูปภาพใหญ่ที่สมบูรณ์ขึ้นได้ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้น ก่อนแก้ระบบ

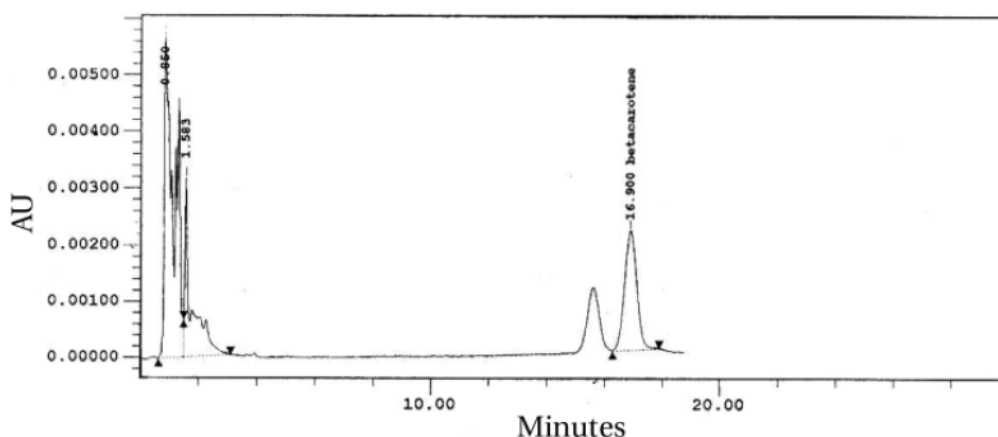
สมการขนาดใหญ่ชุดนั้นเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนค่าอุณหภูมิหากวิเคราะห์ปัญหาด้านการเสีรูป และความเค้น เป็นต้น

5) การคำนวณหาค่าอื่นๆ ที่เหลือ ที่ผู้ใช้ต้องการทราบเพื่อทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่น เมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ แล้วก็สามารถคำนวณหาปริมาณ พลังความร้อนที่ไหลผ่านได้

การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ เพื่อความสะดวกโดยการพิจารณาปัญหา 2 มิติ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงที่ประกอบ 3 จุดต่อ ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมค่อนข้างแบ่งเอลิเมนต์ได้ง่าย คือ กำหนดจุดต่อตรงที่เส้นตัดกันเพิ่มขึ้นตามภาพชิ้นส่วนจะถูกแบ่งออกเป็น 9 เอลิเมนต์ แต่ละด้านจะมีสี่จุดต่อ ระยะระหว่างจุดต่อของแต่ละด้านของสามเหลี่ยมไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ขนาดของเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ จึงมีขนาดแตกต่างกันตามต้องการ ถ้าเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้วยกัน เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมใดๆ มุมภายในของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมควรอยู่ระหว่าง 30 ถึง 120 องศา ในปัญหาสามมิติก็ใช้หลักการเดียวกัน

2.8 การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยใช้เครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC)

เครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC) ใช้หลักการคล้ายกับเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบผิวบาง (thin Layer Chromatography, TLC) โดยเครื่อง HPLC มีส่วนของปั๊มมาช่วยให้ตัวทำละลายหรือเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) และตัวดูดซับหรือเฟสอยู่กับที่ (stationary phase) บรรจุเป็นทรงกลมเล็ก ๆ หรือเรียกว่า คอลัมน์ (column) โดยสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ หรือ stationary phase ได้แตกต่างกัน คอลัมน์ต่างชนิดกันแยกสารได้แตกต่างกัน ซึ่งสารที่ถูกดูดซับได้น้อยจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ออกมาก่อน ส่วนสารที่ถูกดูดซับได้ดีจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ออกมาทีหลัง องค์ประกอบอีกส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนตรวจวัดสัญญาณ (detector) มีหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณของสารตัวอย่างที่แยกออกมาแต่ละชนิด ซึ่งสัญญาณที่ตรวจวัดมีลักษณะเป็นพีค (peak) เรียกว่า โครมาโตแกรม (chromatogram) โดยส่วนตรวจวัดสัญญาณสามารถตรวจวัดด้วย UV, fluorescence, IR เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีความจำเพาะเจาะจงกับสารแตกต่างกัน การแยกสารตามอนุโมลิสระโดยใช้เครื่อง HPLC สามารถตรวจหาสารได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณในเวลาเดียวกัน อีกทั้งสามารถหาสารหลายชนิดไปพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้ต้องมีสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบโดยสารชนิดเดียวกันจะมีพีคออกมาในระยะเวลา (retention time) เดียวกันเสมอ ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์สารหลายชนิดได้ พร้อมกันและวิเคราะห์ สารได้ในปริมาณต่ำ ๆ แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากเครื่อง HPLC มีราคาค่อนข้างแพง และ mobile phase ต้องใช้ประเภท HPLC grade ตัวอย่างโครมาโตแกรมของปริมาณเบต้าแคโรทีนแคโรทีนแคโรทีนที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง HPLC แสดงดังภาพประกอบที่ 17



ภาพประกอบที่ 17 โครมาโตแกรมของปริมาณเบต้าแคโรทีนแครอทอบแห้งที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

ที่มา : (Suvanakuta et al., 2011)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแครอท

สัณณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา (2555) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงเคมี-กายภาพของอาหารซึ่งผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าการเตรียมการก่อนการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแครอทและต้นหอมอบแห้งที่มีคุณภาพสูง ทั้งในแง่ของสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมี โดยทดสอบวิธีการเตรียมแครอทก่อนการอบแห้ง 7 วิธี (ไม่ผ่านการเตรียมการก่อนการอบแห้ง แช่น้ำแช่ในกรดซิตริก จนแครอทมีค่า pH 4 และ pH 5 ลวกในน้ำและลวกในกรดซิตริกจนแครอทมีค่า pH 4 และ pH 5 ก่อนนำแครอทที่ได้ไปอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมี-กายภาพ ได้แก่ สี การหดตัว ความสามารถในการดูดน้ำกลับ ปริมาณเบต้าแคโรทีนและการเกิดไอโซเมอร์ไรเซชันของเบต้าแคโรทีน จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตแครอทอบแห้ง คือการลวกแครอทในกรดซิตริกจนมีค่า pH 5 และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่แปรรูปแครอทที่ได้มีสีดีกว่าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและตรงกับความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด

Krokida et al., (2003) ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งของผักชนิดต่างๆ ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะอากาศ (อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นของอากาศ, ความเร็วของอากาศ) จลนศาสตร์การอบแห้งของตัวอย่างที่มีขนาดต่างๆ ผักที่นำมาทำแห้ง ได้แก่ มันฝรั่ง, แครอท, พริกไทย, กระเทียม, เห็ด, หอม, กระเทียม, ถั่ว, ข้าวโพด, ผักชีฝรั่ง, ฟักทอง, มะเขือเทศ ใช้แบบจำลองโมเดล first-order reaction ใช้การอบแห้งแบบคงที่แบบสมการของตัวแปร ให้ตัวอย่างมีความชื้นสมดุลค่า a_w อยู่ในช่วง 0.10–0.90 ที่อุณหภูมิ 2 ช่วงคือ 30 และ 70°C ซึ่งเท่ากันกับสมการของ GAB จากการทดลองพบว่า จากพารามิเตอร์ของแบบจำลองสภาวะของอากาศ ขนาดของตัวอย่าง มีผลอย่างมากต่อกระบวนการทำแห้ง โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การอบแห้งคงที่และสมดุลเนื่องจากตัวอย่างมีการคายน้ำออก

Donald et al. (2014) ศึกษาการอบแห้งแครอท โดยทำแห้งแครอทที่ผ่านการสไลด์ความหนา 5 ถึง 6 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองจะดูคุณสมบัติโดยรวมของแครอท คัดเลือกแครอทที่สดและใช้มีดเอาเปลือกออกและหั่นเป็นชิ้นหนา 5 ถึง 6 มิลลิเมตร แครอทจะเป็นแผ่นวงกลม ก่อนทำการอบแห้งล้างชิ้นแครอทโดยวางไว้ในน้ำเดือด 2-3 นาที จากนั้นสะเด็ดน้ำออก และนำแครอทแช่ในน้ำเย็นทันที และทำการสะเด็ดน้ำออกจากแครอทให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที วางชิ้นแครอทให้มีช่องว่างห่างกันเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าลมร้อนสัมผัสกับตัวอย่างทั้งหมด อาจใช้ชิ้นส่วนของตาข่ายพลาสติกวาง เพื่อป้องกันชิ้นแครอทล้นผ่านตะแกรงลวด เมื่อแครอทแห้งชิ้นแครอทสไลด์หลังการอบแห้งมีลักษณะแห้งและเหนียวหรืออาจกรอบ และมีลักษณะที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือขอบของแครอทหดรัดตัวมีลักษณะหยักเฉพาะ ข้อมูลการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่หลังจากระยะเวลาอบแห้งผ่านไปหกชั่วโมงความชื้นอยู่ในระดับต่ำ ข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างดี

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจำลองการอบแห้งแบบสองขั้นตอน

สิริมา สุขพรรณ (2541) ศึกษาผลของการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอท พบว่า เวลาในการลวกที่เหมาะสมคือ 4 นาที จากนั้นหาความเข้มข้นของสารละลายแป้งข้าวโพด (corn starch) ที่เหมาะสมต่อการชุบเคลือบแครอท พบว่าการชุบเคลือบแครอทด้วยสารละลายแป้งข้าวโพด (corn starch) 2.5% (w/v) สามารถรักษาปริมาณเบต้าแคโรทีนได้เป็นปริมาณสูง และผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏที่ดี จากนั้นศึกษาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งแครอท แปรอุณหภูมิที่ใช้เป็น 3 ระดับ คือ 60 และ 55°C, 70 และ 65°C, 70 และ 80°C พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 100 นาที แล้วลดอุณหภูมิเป็น 65°C อบอุ่นเป็นเวลา 50 นาที ให้ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ค่าสี ค่าความแน่นเนื้อ และปริมาณเบต้าแคโรทีนสูง

S. Cuervo-Andrade (2011) ได้ทำการศึกษาอบแห้งใบ lemon balm แบบสองขั้นตอนเพื่อรักษาคูณค่าทางยา ทำการอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายของต้น lemon balm มีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ฐานเปียก พบว่าที่อุณหภูมิลำดับขั้น 40/50 °C ที่ความชื้น 50 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก เป็นจุดเปลี่ยนใช้เวลาอบแห้ง 537 นาที และปริมาณการใช้พลังงานน้อยที่สุดที่ 3.07 kwh คิดเป็น 28.5 และ 50 เปอร์เซ็นต์ หากเปรียบเทียบการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการใช้พลังงานมากที่สุด 4.25 kwh และเวลาอบแห้งทั้งหมด 1,140 นาที

ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์ (2554) ได้ศึกษาการอบแห้งแบบสองขั้นตอนเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการอบแห้งลำไยในห้องปฏิบัติการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อน มีวิธีการอบแห้ง 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิคงที่ 70°C และ 80°C ตลอดช่วงการอบแห้ง และแบบที่ 2 เป็นการอบแห้งที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิในระหว่างอบแห้งโดยเริ่มจาก 80°C ใน 10 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดลงเป็น 70°C ใน 16 ชั่วโมงถัดไป และสุดท้ายลดลงเป็น 70°C จนสิ้นสุดการอบแห้ง พบว่ารูปแบบที่ 2 สามารถลดการใช้พลังงานความร้อน

130 MJ แต่มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 0.37 MJ และสามารถลดผลรวมการใช้พลังงานต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหยได้ร้อยละ 16

Devahastin & Niamnuy (2010) ศึกษาการอบแห้งมะพร้าวสับด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอุณหภูมิสองขั้นตอนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ความเร็วลมคงที่และความเร็วลมแบบเป็นลำดับขั้นแต่อุณหภูมิลมร้อนคงที่ เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสีและเพิ่มปริมาณน้ำมันพื้นผิวทำการทดลองช่วงอุณหภูมิลมร้อน 65-120°C และความเร็วลมร้อน 3.82-6 m/s พบว่า การอบแห้งด้วยอุณหภูมิลำดับขั้นทำให้อัตราการอบแห้งมีค่ามากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่ ความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้นมีส่วนทำให้การอบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะพร้าวสับแต่ความเร็วลมร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันมะพร้าวที่พื้นผิวความเร็วลมร้อนแบบเป็นลำดับขั้นมีผลโดยตรงที่ทำให้ปริมาณน้ำมันเพิ่มปริมาณขึ้นที่พื้นผิวอย่างชัดเจน

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของผลิตภัณฑ์

Białobrzewski (2006) ศึกษาอิทธิพลของการหดตัวของวัสดุอบแห้งต่อจลศาสตร์ของการพาความร้อนของการอบแห้งแอปเปิ้ลแผ่น ใช้หลักการ arbitrary lagrange eulerian ใช้ในการแก้ปัญหาขอบเขตที่มีการเคลื่อนที่ พบว่าการหดตัวของการอบแห้งมีอิทธิพลที่สำคัญต่อการจำลองอุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำในวัสดุ วัสดุอบแห้งที่เหลือความชื้นต่ำกว่ามีการหดตัวที่ชัดเจนขึ้นต่อการจำลองของการถ่ายโอนความร้อนและมวล พบว่าการประยุกต์ของ arbitrary lagrange eulerian สำหรับแบบจำลองการหดตัว นำไปสู่ความสัมพันธ์ของตัวอย่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลศาสตร์การอบแห้งในการหดตัวของวัสดุ

จารุวรรณ กุลวิศว สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2550) ได้ทำการอบแห้งกล้วยแผ่น ด้วยการใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน การเปลี่ยนแปลงสารประกอบที่ระเหยง่าย และคุณภาพของกล้วยแผ่นทางด้านการหดตัว สี และเนื้อสัมผัส จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิภาพสูง มีการหดตัวน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากกล้วยแผ่นที่มีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็ว น้ำที่อยู่ผิวของกล้วยแผ่นจะระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกแห้งและเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้นจะช่วยรักษาสภาพรูปร่างและปริมาตรของกล้วยแผ่นไม่ให้เกิดการหดตัวมาก

Chandra Mohan & Talukdar (2010) วิเคราะห์วัสดุขั้นที่อบแห้งด้วยการพาความร้อนโดยวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาสมการการส่งถ่ายความร้อนและความชื้น เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ได้พัฒนาสำหรับทำนายการกระจายความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความชื้นอยู่ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนที่ผิวของวัสดุขึ้นคำนวณด้วยการเขียนโปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) การแก้ปัญหการส่งถ่ายความร้อนและมวลพร้อมกับสมการควบคุมสำหรับวัสดุขั้น ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของความเร็ว

และอุณหภูมิของอากาศอบแห้งต่อวัสดุขึ้น ในการอบแห้งที่เหมาะสมโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วลม อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น พบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

Yadollahinia & Jahangiri, (2009) ได้ศึกษาการอบแห้งผักและผลไม้ที่มีรูปทรงต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ จึงวิเคราะห์การหดตัวและความพรุนด้วยแบบจำลองในการทำนายการถ่ายเทความร้อนและมวล ระหว่างการอบแห้งของมันฝรั่งโดยมีเงื่อนไขในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 62°C นาน 7 ชั่วโมง พบว่าการหดตัวเปลี่ยนแปลงเป็นแนวเส้นตรงกับความชื้น และมีความพรุนมากขึ้นจนถึงความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง แบบจำลองยืนยันความถูกต้องด้วยการทดลอง และแบบจำลองสามารถทำนายอุณหภูมิ ความชื้น และความหนาแน่น ต่อการหดตัวและความพรุนของผักและผลไม้

Aral & Beşe (2016) ได้ศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบางและคุณสมบัติทางกายภาพของผลฮอว์ธอร์น (hawthorn fruit) พันธุ์ *Crataegus spp.* โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C และความเร็วลม 0.5, 0.9 และ 1.3 m/s พบว่าที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงทำให้ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง และด้านคุณภาพทำให้การหดตัวลดลง อัตราการคั้นตัวเพิ่มขึ้น

Nakhaee et al. (2009) ได้ทำการศึกษาวิธีการใหม่สำหรับการหาความหดตัวของมันฝรั่ง ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งการหดตัวระหว่างการอบแห้งมีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง งานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ ผลการหดตัวของมันฝรั่งระหว่างการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าทิศทางการไหลของอากาศมีผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนานและเส้นตั้งฉากในของมันฝรั่งในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C และไม่มีผลต่ออุณหภูมิ 80°C เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น

2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและแบบจำลองสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

Kumara Swamy et al. (2015) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์สารเบต้าแคโรทีนจากแครอทที่ผ่านการอบแห้งโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยนำแครอทไปอบที่อุณหภูมิ 50°C ความชื้นหลังการอบแห้ง $11 \pm 1.5\%$ (dry weight basis) ใช้เวลาในการสกัด 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30°C อัตราส่วนของแครอท (กรัม): เอทานอล (มิลลิลิตร) 1:60 ปริมาณแคโรทีนที่สกัดได้ด้วยตัวทำละลายถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 7 รูปแบบ ได้แก่ Power law, Peleg, Weinbull's equation, Pseudo 2nd order, Intraparticle diffusion, Logarithmic, Weinbull's distribution และในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลอง RSM ขึ้น จากการทดลองพบว่า โมเดล Pseudo 2nd เป็นโมเดลที่ดีที่สุด (R^2 - 0.99, χ^2 - 0.0091, RMSE- 0.1566, MAE- 0.0115) ในการอธิบายจลนพลศาสตร์การสกัดของเบต้าแคโรทีนจากแครอท ซึ่งมีผลต่อกระบวนการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ <0.05

Goula & Adamopoulos (2010) ได้ทำการศึกษา แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายเบต้าแคโรทีนของแครอทในระหว่างการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองสองแบบ คือ first-order decay model ของ Arrhenius คำนวณอุณหภูมิและปริมาณน้ำ และโมเดล WLF dependency ในการลดเวลาโดยใช้วิธีการ glass transition temperature (T_g) โดยใช้สมการของ

Gordon และ Taylor ในการคำนวณปริมาณความชื้นเพื่อหาค่า glass transition temperature (T_g) และได้ทำการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, และ 80°C และนำตัวอย่างแครอทออกมาหาค่าความชื้นและปริมาณเบต้าแคโรทีน ทุก 20 นาที พารามิเตอร์ที่ได้จะนำวิเคราะห์ด้วยสมการ nonlinear regression และได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองดังกล่าวโดยการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 80°C ทำการหั่นสไลด์แครอทที่มีความหนา 3, 6, และ 9 mm พบว่า โมเดลทั้งสองแบบมีความเหมาะสม ในการสร้างแบบจำลองการย่อยสลายของเบต้าแคโรทีน, แม้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณค่า T_g ให้ค่า sum squares (SSQ) ต่ำ แต่ค่าพารามิเตอร์ของ WLF ก็ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการอบแห้ง

2.9.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Sandeep Kumar (2012) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างอบแห้งผลไม้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างกระบวนการอบแห้งกล้วย เนื่องจากกระบวนการเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนใช้ความร้อนและการถ่ายโอนมวลและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและการหดตัวของวัสดุ การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Comsol Multiphysics 4.3 สามารถใช้ทำนายอุณหภูมิและการกระจายตัวของความชื้นภายในผลไม้ระหว่างการอบแห้ง เตรียมตัวอย่างกล้วยเป็นทรงเลขนาคณิต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร สูง 4 มิลลิเมตร และ ทำเป็นโดเมนโมเดลแบบ Simplified 2D axisymmetric อบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 0.5 m/s และ 0.7 m/s เป็นเวลา 300 นาที ทำการจำลองแบบการหดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิเปรียบเทียบผลการทดลอง การใช้แบบจำลองนี้เพื่อยืนยันผล พบว่าข้อมูลและการกระจายตัวของความชื้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปในทางเดียวกันกับกรณีศึกษา

Sahdev et al. (2016) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งมะม่วงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้พัฒนาแบบจำลองการกระจายตัวของความชื้นในผลมะม่วงในระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติ ได้ทำการทดลองและศึกษาข้อมูลทางตัวเลข สร้างแบบจำลองของการแพร่กระจาย (diffusivity) และทดลองอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ศึกษาการหดตัวสร้างสมการพื้นฐานลักษณะทางกายภาพ พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 2 มิติโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ FORTRAN version 6.5 สามารถทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้น ปริมาณความชื้น ของมะม่วงอบแห้งได้ดี แบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการวัดค่าและยังสามารถใช้เพื่อให้ข้อมูลในการออกแบบของเครื่องอบแห้งได้

อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติกุล, ญัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุล วิเศษ (2555) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของสภาวะการอบแห้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขอบเขตของการอบแห้งแบบการพาความร้อน โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อสภาวะการอบแห้ง 4 ตัวแปร คือค่าการนำความร้อน (km), สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล (hm), ค่าการแพร่ความชื้นที่ผิว (Dm) และ อัตราส่วนรูปทรง (AR)

ซึ่งอยู่ในช่วง 1.29×10^{-8} ถึง 1.29×10^{-10} kg/m.s, 1.67×10^{-5} ถึง 1.67×10^{-7} kg/m².s, 5×10^{-9} ถึง 5×10^{-11} m²/s และ 0.5 ถึง 2 ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 135°C ผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำความร้อน และ ค่าการแพร่ความร้อนที่ผิว ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีผลทำให้การกระจายความร้อนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และ การเพิ่มขึ้นของค่าการแพร่ความร้อนที่ผิวไม่มีผลต่อการกระจายความร้อนในผลิตภัณฑ์ สุดท้ายอัตราส่วนรูปทรงเพิ่มขึ้นทำให้การกระจายอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการศึกษาของการทดลองและแบบจำลองของแครอทอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) การทดลองศึกษาการอบแห้งแบบคงที่ (drying) และการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (Stepwise drying)
- 2) ศึกษาการหดตัว (shrinkage analysis)
- 3) ศึกษาปริมาณเบต้าแคโรทีน
- 4) ศึกษาจุลพลศาสตร์การอบแห้งแบบคงที่ การหดตัว และปริมาณเบต้าแคโรทีน
- 5) การศึกษาแบบจำลองตามทฤษฎีไฟโนลิเมนต์ของการอบแห้งแบบคงที่ การอบแห้งแบบสองขั้นตอน (Stepwise drying) การหดตัว และปริมาณเบต้าแคโรทีน

3.1 การทดลองศึกษาการอบแห้งแบบคงที่ (drying) และการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (Stepwise drying)

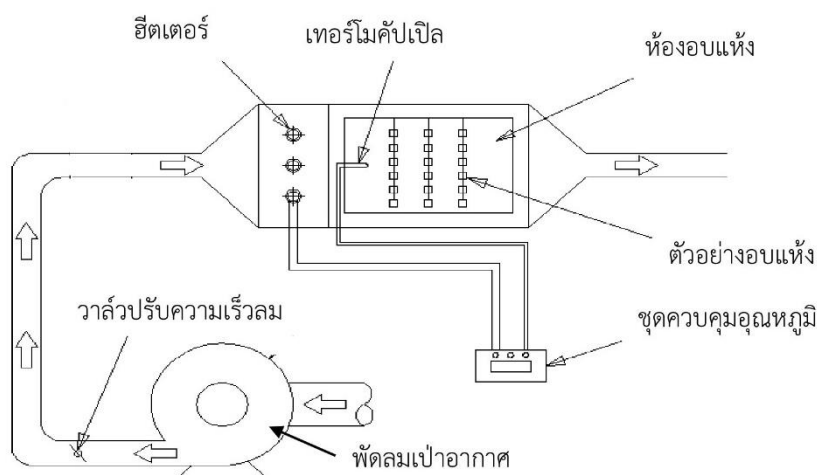
3.1.1 วัตถุดิบ

1) แครอทสด (*Daucus carota* L.) รับซื้อจากศูนย์กลั่นกรองไร่สารพิษวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา พันธุ์คูรุตะ อินพรุฬ เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนเริ่มทำการทดลองอบแห้งในแต่ละครั้ง ปอกเปลือกแครอท และหั่นเป็นรูปลูกเต๋าขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ใช้เฉพาะเนื้อแครอทส่วนใน) หาความชื้นเริ่มต้นของแครอทโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยใช้ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3.1.2 วิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งลมร้อน

การทดลองอบแห้งแครอทเพื่อศึกษาการกระจายความชื้นและอุณหภูมิระหว่างการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ดังภาพประกอบ 18 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ขนาดของห้องอบแห้ง 40 x 70 x 40 cm³ ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ขนาด 15 kW พัดลมเป่าอากาศแบบหอยโข่ง อุณหภูมิในห้องอบแห้งวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีความแม่นยำ ± 1 °C วัดความเร็วลมอากาศรุ่น TESCO 425, Taipei, Taiwan ด้วยความแม่นยำ ± 0.03 m/s



ภาพประกอบที่ 18 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งลมร้อน

3.1.3 วิธีการทดลองอบแห้งแบบอุณหภูมิคงที่

- 1) ล้างแครอทสด ปอกเปลือก และหั่นเป็นลูกบาศก์ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยเป็นพวงตามยาว พวงละ 10 ชิ้น
- 2) เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องอบแห้งลมร้อน (ดังภาพประกอบที่ 18)
- 3) เปิดพัดลมเพื่อให้หมุนเวียนอากาศแล้วปรับความเร็วลมให้ได้ 0.5 m/s
- 4) ปรับฮีตเตอร์ เลือกใช้อุณหภูมิอบแห้งแบบคงที่ 60, 70 และ 80°C
- 5) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามข้อ 1) เข้าไปแขวนไว้ในห้องอบ
- 6) ทำการอบแห้งที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150, 240, 300, 360, 420, 480 และ 540 นาที โดยทำการอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 10 ฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมของแครอทอบแห้ง (Sharma et al., 2009)
- 7) นำตัวอย่างการอบแห้ง ของแต่ละช่วงเวลา ไปวิเคราะห์หาความชื้น การหตตัว และปริมาณเบต้าแคโรทีน เป็นต้น
- 8) นำผลที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น การหตตัว และปริมาณ เบต้าแคโรทีน ที่ระยะเวลาต่างๆ ทั้ง 3 อุณหภูมิการอบแห้ง เปรียบเทียบกับการทำนายของแบบจำลอง

3.1.4 วิธีการอบแห้งแบบขั้นตอน (Stepwise drying)

1. อบแห้งแบบเพิ่มอุณหภูมิจาก 60°C เป็น 70°C และเพิ่มอุณหภูมิจาก 60°C เป็น 80°C โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ความชื้นแครอทร้อยละ 70 ฐานเปียก จุดเพิ่มอุณหภูมิของความชื้นสูงจะทำให้ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมีระยะสั้นลง (S. P. Cuervo-Andrade & Hensel, 2016) ทำการอบแห้งเป็นเวลา 250 นาที จากนั้นนำแครอทอบแห้งมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น การหตตัว ปริมาณเบต้าแคโรทีน

2. พล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของการอบแห้งแครอทแบบขั้นตอนของปริมาณความชื้นการหดตัว และปริมาณเบต้าแคโรทีน เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบคงที่ และสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณความชื้นโดยใช้โปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ในการเปรียบเทียบกับทดลอง

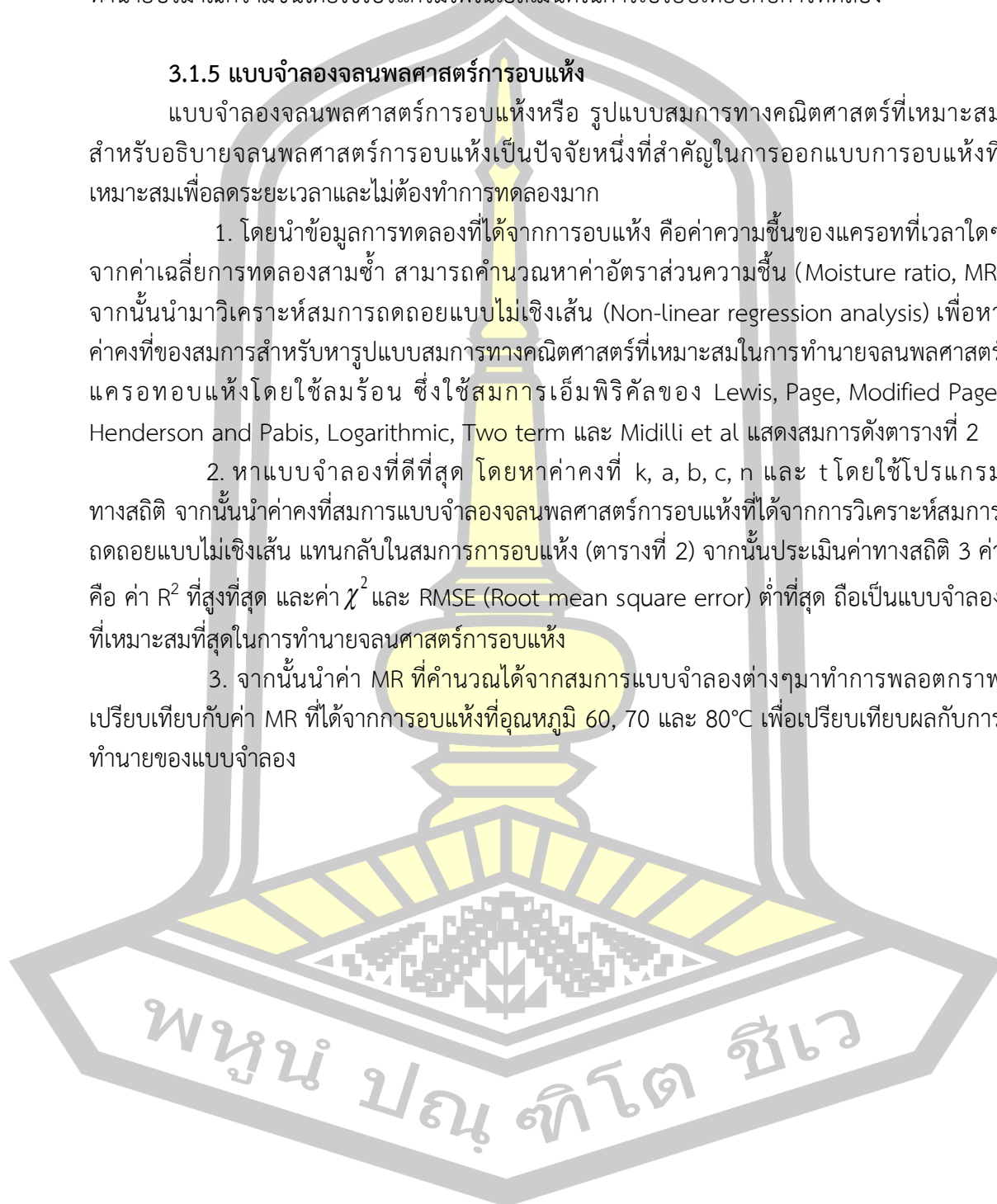
3.1.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งหรือ รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อลดระยะเวลาและไม่ต้องทำการทดลองมาก

1. โดยนำข้อมูลการทดลองที่ได้จากการอบแห้ง คือค่าความชื้นของแครอทที่เวลาใดๆ จากค่าเฉลี่ยการทดลองสามซ้ำ สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) เพื่อหาค่าคงที่ของสมการสำหรับหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์แครอทอบแห้งโดยใช้ลมร้อน ซึ่งใช้สมการเอมพิริคัลของ Lewis, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term และ Midilli et al แสดงสมการดังตารางที่ 2

2. หาแบบจำลองที่ดีที่สุด โดยหาค่าคงที่ k , a , b , c , n และ t โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ จากนั้นนำค่าคงที่สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น แทนกลับในสมการการอบแห้ง (ตารางที่ 2) จากนั้นประเมินค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ ค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า χ^2 และ RMSE (Root mean square error) ต่ำที่สุด ถือเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

3. จากนั้นนำค่า MR ที่คำนวณได้จากสมการแบบจำลองต่างๆมาทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่า MR ที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทำนายของแบบจำลอง



ตารางที่ 2 สมการการอบแห้งแครอท

Model name	Model equation
One parameter	
Lewis	$MR = \exp(-kt) \rightarrow \ln MR = -kt$
Two parameters	
Page	$MR = \exp(-kt^n) \rightarrow \ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Three parameters	
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Four parameters	
Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

เมื่อ k คือ drying parameter (min^{-1}), a , b , c , n คือค่า drying constants (dimensionless)

และ t คือ drying time (min) :

ที่มา: (Darvishi et al., 2014)

3.1.6 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นหลังการอบแห้ง

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นหลังการอบแห้งมีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังนี้

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้น (moisture can) ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ถึงอุณหภูมิของภาชนะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

2. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม

3. ชั่งตัวอย่างแครอทอบแห้งแต่ละช่วงเวลาให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-2 กรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ถึงอุณหภูมิของภาชนะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก

4. คำนวณหาปริมาณความชื้นฐานเปียกและฐานแห้งตามสมการ (3.1) และ (3.2) (A.O.A.C., 1990)

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (3.1)$$

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละมาตรฐานเปียก, % w.b.)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละมาตรฐานแห้ง, % d.b.)

w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กรัม)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กรัม)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำใน วัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้ง ดำเนินไปเป็นเวลาใดๆ เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.3)$$

โดยถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และ ความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงละค่าความชื้น สมดุลในสมการ (3.3) ข้างต้น ทำให้สามารถเขียน สมการ (3.4) ได้ใหม่ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3.4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (อัตราส่วน) M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐาน แห้ง) M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (ร้อยละ มาตรฐานแห้ง) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

3.2 การวิเคราะห์หาการหดตัว (Shrinkage analysis) ด้วยการแทนที่ของ n-heptane

นำแครอทอบแห้งในแต่ละเวลา มาหาปริมาตรการหดตัว ด้วยวิธีการแทนที่ด้วย n-heptane และหั่นแครอทให้มีขนาดเล็ก จากนั้นนำไปใส่ลงในบิวเรตที่เติม n-heptane ไว้ พร้อมกับวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง บันทึกผล แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการหาปริมาตรการหดตัวเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับปริมาตรการหดตัวที่ได้จากการทดลองของ Jomlapelatikul et al. (2016)

$$\% \text{ shrinkage} = \frac{(V_0 - V)}{V_0} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ V_0 = ปริมาตรของแครอทก่อนอบแห้ง , V = ปริมาตรของแครอทหลังการแช่ n-heptane

นำผลที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ การวิเคราะห์ผลด้านการหดตัว (Shrinkage analysis) เปรียบเทียบกับการทำนายของแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหา อัตราส่วนความชื้นซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่

เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแครอทแบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะต้องพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อทำนายการหดตัวของแครอท

Name of the equation	Equation
Lozano	$S = b_1 \cdot MR + b_2$
Lozano	$S = b_3 + b_4 \cdot MR + b_5 \cdot \exp\left(\frac{b_6}{b_7 + MR}\right)$
Ratti	$S = b_8 + b_9 \cdot MR + b_{10} \cdot MR^2 + b_{11} \cdot MR^3$
Vazquez	$S = b_{12} + b_{12} \cdot MR + b_{14} \cdot MR^{3/2} + b_{15} \exp(b_{16} \cdot MR)$
Mayor and Sereno	$S = b_{17} + b_{18} \cdot MR + b_{19} \cdot MR^2$

3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography)

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

นำสารมาตรฐาน เบต้าแคโรทีน ละลายใน chromatography-grade acetone ความเข้มข้น 1.25 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 2.5-40 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 0.25-2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเบต้าแคโรทีน ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่าง ดังนี้

1.1 ดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนตามวิธี ของ (Britfon, 1995) โดยนำแครอทที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ 3 กรัม ใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลายอะซิโตนปริมาตร 10 มิลลิลิตร

1.2 จากนั้นผสมสารทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารละลาย (vortex-mixed) เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปเหวี่ยงแยกชั้นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,100 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และทำการสกัดอีกครั้ง นำสารสกัดที่รวมกันแล้วไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 50°C จากนั้นละลายเบต้าแคโรทีนที่สกัดได้ด้วยอะซิโตนไนไตร 2 มิลลิลิตรและกรอง ด้วย syringe filter รูกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อเตรียมไว้วิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเครื่อง HPLC

3. การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยด้วยเครื่อง HPLC

ทำการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ดัดแปลงจากวิธี (Olives Barba et al., 2006) ตัวทำละลายเคลื่อนที่เป็นเมทานอลและน้ำในอัตราส่วน 90 :10 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อนาทีและปริมาตรการฉีด 20 มิลลิลิตร ใช้ดีเทคเตอร์แบบแสง UV ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 472 นาโนเมตร อุณหภูมิคอลัมน์ ขณะที่ทำการวิเคราะห์คือ 25°C

4. เปรียบเทียบผลที่ได้กับสมการจำลอง

การหาปริมาณความเข้มข้นของสารชีวภาพปัจจุบันนิยมวิเคราะห์อย่างแพร่หลายคือ การหาค่าปริมาณเบต้าแคโรทีน โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทดลองในการหาสภาวะที่เหมาะสมปัจจุบันนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือจลศาสตร์ลำดับที่ 0-2 (0th-2nd) เพื่อหาความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในแต่ละช่วงเวลาในการอบแห้งแบบจำลองจลศาสตร์ลำดับที่ 0, 0.5th-, 1-, 1.5th และลำดับที่ 2 ตัวเลือกที่ดีที่สุดถูกเลือกโดยพิจารณาจากค่า R² ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำสุด โดยค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีน (CR) เป็นฟังก์ชันของเวลาสำหรับการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิ (Liu et al., 2015) ดังสมการ

$$\frac{d(CR)}{dt} = -k(CR)^{1-n} \quad (3.6)$$

สมการ (3.6) ถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบลอการิทึมสำหรับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน Yan et al. (2015)

$$\ln(CR) = -kt + b \quad ; \quad (n = 1) \quad (3.7)$$

$$(CR)^{1-n} = -kt + b \quad ; \quad (n \neq 1) \quad (3.8)$$

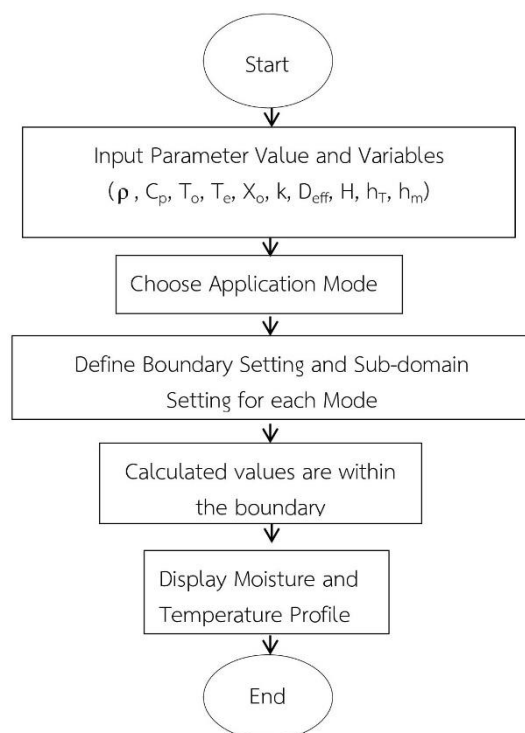
โดยที่ CR คือ (C / C₀, C, C₀ หมายถึงความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีน ณ เวลาที่เจาะจงและเวลาเริ่มต้นตามลำดับ) t คือเวลาในการอบแห้ง (นาทีก), k คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและ b คือค่าคงที่ของสมการ ค่าคงที่ทั้งหมดในสมการ (3.7) และ (3.8) หาโดยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

5. จากนั้นนำค่าปริมาณเบต้าแคโรทีนที่คำนวณได้จากสมการแบบจำลองต่างๆมาทำการพลอตกราฟ เปรียบเทียบกับปริมาณเบต้าแคโรทีน ที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทำนายของแบบจำลอง

3.4 ทำนายการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของแครอทอบแห้ง

1. การศึกษาแบบจำลอง

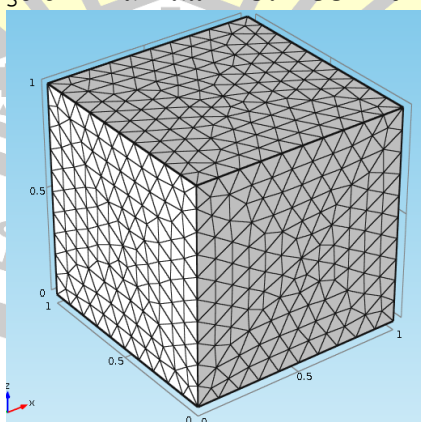
แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้เป็นแบบจำลองไฟโนอีลิเมนต์ โดยทำการประยุกต์ใช้การอบแห้งด้วยการพาความร้อนของแครอท คอมพิวเตอร์ประมวลผลด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือโปรแกรมไฟโนอีลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนการประมวลผลดังภาพประกอบที่ 19 ด้วยโมดูลการส่งถ่ายความร้อนและการส่งถ่ายความร้อน



ภาพประกอบที่ 19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการประมวลผลด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์
ที่มา: (Jomlapelatikul et al., 2016)

2. โครงสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างแบบจำลองแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแบบจำลองมีจำนวนเอลิเมนต์ 16205 เอลิเมนต์ พิจารณาจากวิธี mesh independent test ซึ่งเลือกจำนวนโครงสร้างของตาข่าย (mesh) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความความขึ้นเฉลี่ยของแครอทที่เวลาการอบแห้งใดๆ เปลี่ยนไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ สร้างโครงสร้างของตาข่ายเป็น triangular ดังแสดงในภาพประกอบที่ 20



ภาพประกอบที่ 20 แบบจำลองแบบ 3 มิติ ของแครอททรงลูกบาศก์
ที่มา: (Jomlapelatikul et al., 2016)

3. สมมติฐานของแบบจำลอง

3.1 สมมติให้แครอทมีความเป็นเนื้อเดียว

3.2 การเคลื่อนที่ของความชื้นและการส่งถ่ายความร้อนมีความสม่ำเสมอ

3.3 อุณหภูมิอากาศรอบข้างสัมพันธ์กับผิวผลิตภัณฑ์คงที่ เนื่องจากอัตราการไหลเฉพาะของอากาศสูง คุณสมบัติทางเทอร์โม-ฟิสิกส์ ในการส่งถ่ายสู่ผิวผลิตภัณฑ์จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทิศทางการไหลของอากาศ

4. สมการสำหรับแบบจำลอง

บนพื้นฐานการกำหนดสมมติฐาน สมการทั่วไปการส่งถ่ายความร้อนและมวล สภาวะเงื่อนไขขอบและสภาวะเริ่มต้น สำหรับการแก้ปัญหาแบบจำลองแบบ 3 มิติ มีดังนี้

การส่งถ่ายความร้อน แบบจำลองของการนำความร้อนของแครอทสามารถอธิบายโดยสมการที่ (3.9)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.9)$$

เมื่อค่าวัดค่าความหนาแน่นของแครอทมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1154 kg/m^3 ค่าความจุความร้อนของแครอทเท่ากับ 3736 J/kg-K การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะแปรผันกับค่าการนำความร้อนของแครอท ($k=W/m-K$) (Gomez et al., 2004)

$$k = 0.5464 + 0.0012T - 2.0 \times 10^{-6} T^2 \quad (3.10)$$

4.1 การส่งถ่ายความชื้น

สมมติให้ความต้านทานในการไหลของความชื้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ภายในวัสดุที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{eff}) คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ และถ้าปริมาตรที่ลดลงมีน้อยมาก สามารถเขียนสมการใหม่จาก Fick's second law ดังนี้

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla X) \quad (3.11)$$

เมื่อ $D_{eff} (\text{m}^2\text{s}^{-1})$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น พัฒนาจากงานวิจัยของ (Souraki et al., 2012)

$$D_{eff} = \exp \left[-0.97 - \left(\frac{3459.8}{T + 273} \right) + 0.059X \right] / 3600 \quad (3.12)$$

ที่สภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิและความชื้น

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_0 \quad (3.13)$$

$$X(x, y, z)|_{t=0} = X_0 \quad (3.14)$$

4.2 สภาวะเงื่อนไขขอบเขตของแครอทอบแห้ง

ในสภาวะการอบแห้งที่ผิวของแครอท สมมติให้มีการสูญเสียความร้อนดังสมการที่ (3.13) ทางด้านซ้ายสมการเป็นการนำความร้อน ทางด้านขวาสมการเป็นการสูญเสียความร้อนด้วยการพาสู่อากาศและสมการที่ (3.14) เป็นการสูญเสียความชื้นด้วยการพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ทางด้านซ้ายสมการเป็นการแพร่ความชื้น และด้านขวาเป็นการส่งถ่ายความชื้นสู่อากาศ

$$-n \cdot k \nabla T = h_r (T_a - T) + H \cdot (D_{eff} \nabla X) \quad (3.15)$$

$$-n \cdot (D_{eff} \nabla X) = h_m (X_e - X) \quad (3.16)$$

เมื่อเอนทาลปีของน้ำ อ้างอิงโดย (Koua et al., 2019)

$$H = -0.0469T^2 - 13.493T + 5220 \quad (3.17)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนและมวลพัฒนาจากงานวิจัยของ Botelho et al. (2011)

$$h_r = 0.624T + 16.7261 \quad (3.18)$$

เมื่อ T , T_a และ T_0 คือ อุณหภูมิ (K) ที่ เวลาใดๆ อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิเริ่มต้น X , X_0 และ X_e คือ ปริมาณความชื้น ($g_{น้ำ}/g_{มวลแห้ง}$) ที่ เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุล

3.5 ค่าสถิติสำหรับใช้ยืนยันความถูกต้องของข้อมูลการอบแห้ง

ค่าสถิติสำหรับใช้ยืนยันความถูกต้องของข้อมูลการอบแห้ง จะมีค่าสถิติดังนี้

1. ค่าเปอร์เซ็นต์ P เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองค่าเปอร์เซ็นต์ P ที่ยอมรับจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.19

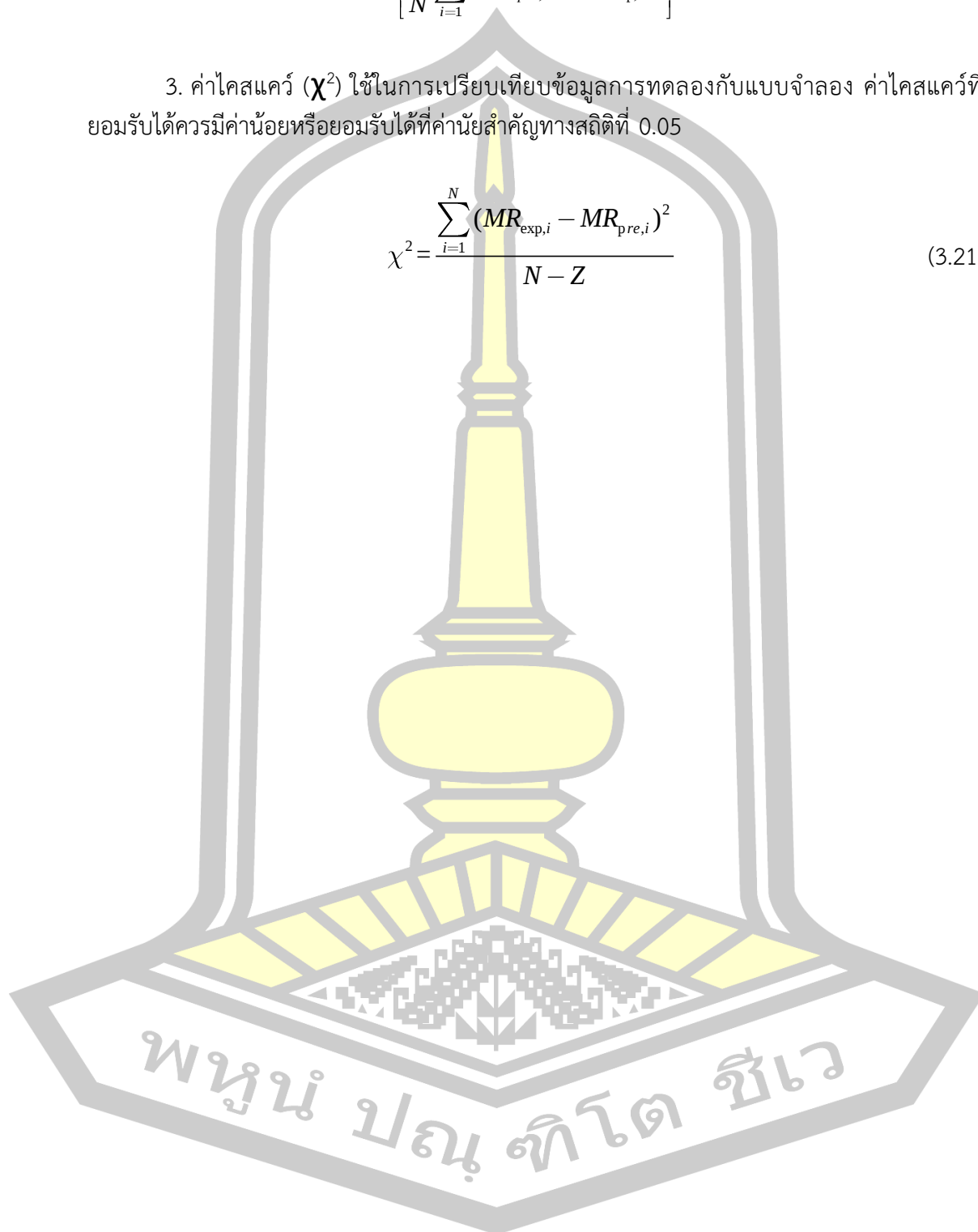
$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \quad (3.19)$$

2. ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับแบบจำลอง ค่า RMSE ที่ยอมรับได้ควรมีค่าน้อยหรือยอมรับได้ที่ค่านัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

3. ค่าไคสแควร์ (χ^2) ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับแบบจำลอง ค่าไคสแควร์ที่ยอมรับได้ควรมีค่าน้อยหรือยอมรับได้ที่ค่านัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - Z} \quad (3.21)$$



บทที่ 4

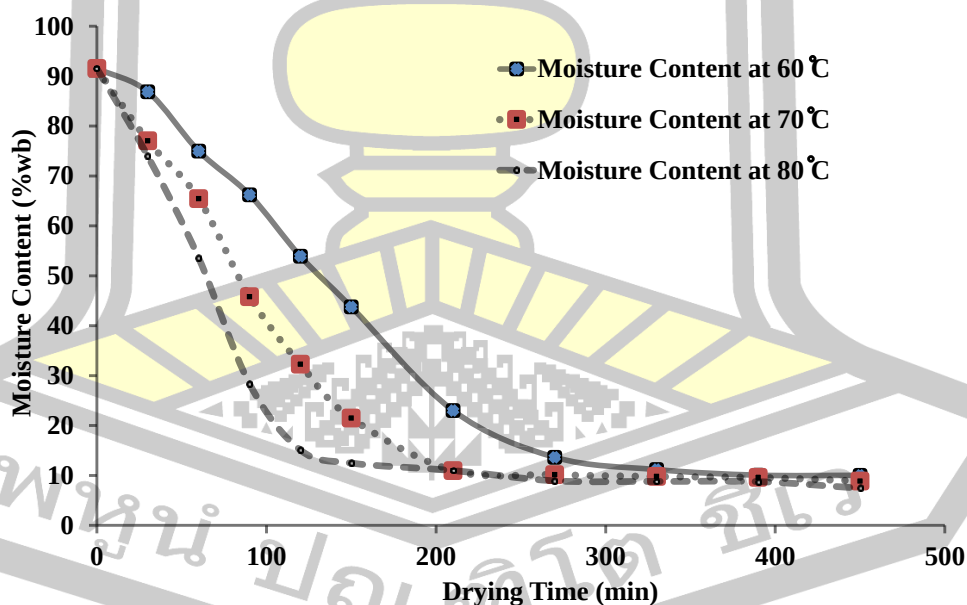
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการศึกษาผลของการทดลองและแบบจำลองของแครอทอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาการอบแห้ง

4.1.1 ผลการทดลองและแบบจำลองการอบแห้ง

การทดสอบค่าความชื้นของการอบแห้งแครอทรูปทรงลูกบาศก์สัมพันธ์กับงานวิจัยของ Jamali, A. *et al.*, (2006) จากภาพประกอบที่ 21 พบว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นความชื้นจะลดลงอย่างมากโดยเฉพาะที่เวลาอบแห้ง 60 นาทีเป็นต้นไป และที่อุณหภูมิ 80°C ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70°C จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดี จึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยไปอย่างรวดเร็ว (วิไล รังสาทอง, 2547) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ศิริวรรณ สุทธิจิตต์, 2550) ที่พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูง ทำให้เกิดการอบแห้งที่เร็วขึ้น



ภาพประกอบที่ 21 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างการทดลองของแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งแครอทเงื่อนไขการทดลองต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งแครอทแบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะต้องพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำสุด แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4 พบว่า การอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C แบบจำลองของ Page และ Modified Page ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ให้ค่า R^2 χ^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99612, 0.00044 และ 0.01892 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70°C เท่ากับ 0.99900, 9.82×10^{-5} และ 0.00896 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 80°C แบบจำลองของ Modified Page ให้ผลการทำนายดีที่สุด ให้ค่า R^2 χ^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99612, 3.77×10^{-5} และ 0.00555 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

Models	Statistical parameters	60°C	70°C	80°C
Lewis	R^2	0.99543	0.99257	0.99543
	χ^2	0.00046	0.00065	0.00014
	RMSE	0.02052	0.02440	0.01147
Page	R^2	0.99612	0.99900	0.99612
	χ^2	0.00044	9.82×10^{-5}	3.76×10^{-5}
	RMSE	0.01892	0.00896	0.00555
Modified Page	R^2	0.99612	0.99900	0.99612
	χ^2	0.00044	9.82×10^{-5}	3.77×10^{-5}
	RMSE	0.01892	0.00896	0.00555
Henderson and Pabis	R^2	0.99558	0.99269	0.99558
	χ^2	0.00050	0.00072	0.00016
	RMSE	0.02019	0.02421	0.01145
Logarithmic	R^2	0.99558	0.99503	0.99558
	χ^2	0.00056	0.00055	5.15×10^{-5}
	RMSE	0.02015	0.01995	0.00612
Two term model	R^2	0.99558	0.99269	0.99558
	χ^2	0.00064	0.00092	0.00021
	RMSE	0.02019	0.02421	0.01145
Midilli	R^2	0.99658	0.70797	0.99658
	χ^2	0.00049	0.03677	0.04701
	RMSE	0.01775	0.15296	0.17297

การใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาสมการที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายลักษณะการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 5 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาทำนายอธิบายลักษณะการอบแห้งแครอทได้อย่างเหมาะสมคือ แบบจำลอง Page and modified Page model เนื่องจากแบบจำลอง 2 แบบนี้ให้ R^2 สูงสุดและ RMSE และ χ^2 ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบของการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Haq et al., 2018) ซึ่งใช้แบบจำลองของ Page สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการ

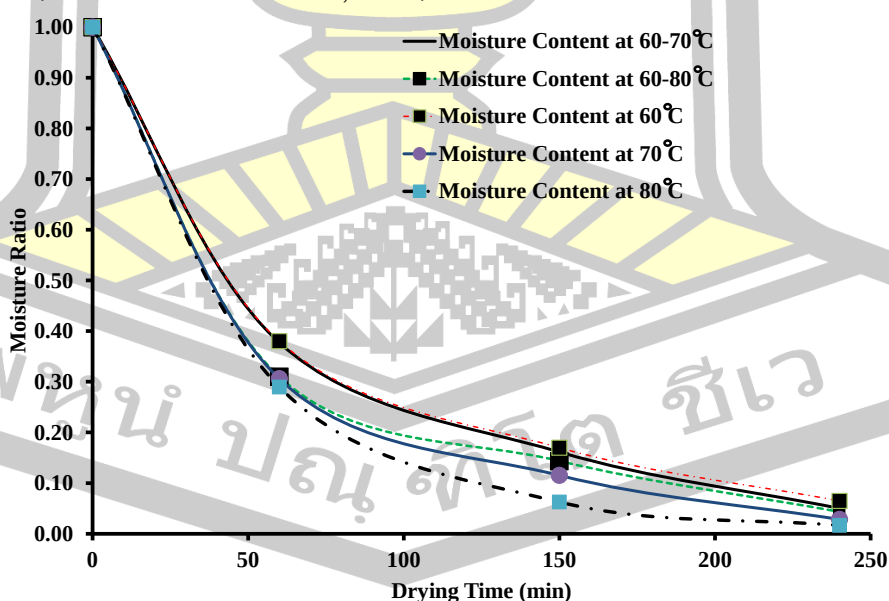
อบแห้งแครอทได้อย่างเหมาะสมที่ขนาด (4x4x20 มม.) โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50-70°C

ตารางที่ 5 แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมและค่าคงที่ของการอบแห้ง

Models	Conditions	Equations
Page	60°C	$MR = \exp(-0.53566t^{0.53566})$
	70°C	$MR = \exp(-1.14821t^{0.70908})$
	80°C	$MR = \exp(-1.34413t^{0.79351})$
Modified Page	60°C	$MR = \exp(-0.55986t^{1.07616})$
	70°C	$MR = \exp(-1.21520t^{0.70908})$
	80°C	$MR = \exp(-1.45166t^{0.79351})$

4.1.2 ผลการอบแห้งแบบสองขั้นตอน

ผลจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22 พบว่า การอบแห้งแบบขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าการอบแห้งอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และอุณหภูมิการอบแห้งคงที่ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) คือที่จุดเพิ่มอุณหภูมิของความชื้นสูงจะทำให้ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมีระยะสั้นลง ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ (S. P. Cuervo-Andrade & Hensel, 2016) และ (S. Cuervo-Andrade, 2011) คือการอบแห้งแบบเพิ่มอุณหภูมิทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ซึ่งเป็นกลไกทางธรรมชาติของวัสดุชีวภาพ (Westwater & Drickamer, 1957)



ภาพประกอบที่ 22 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

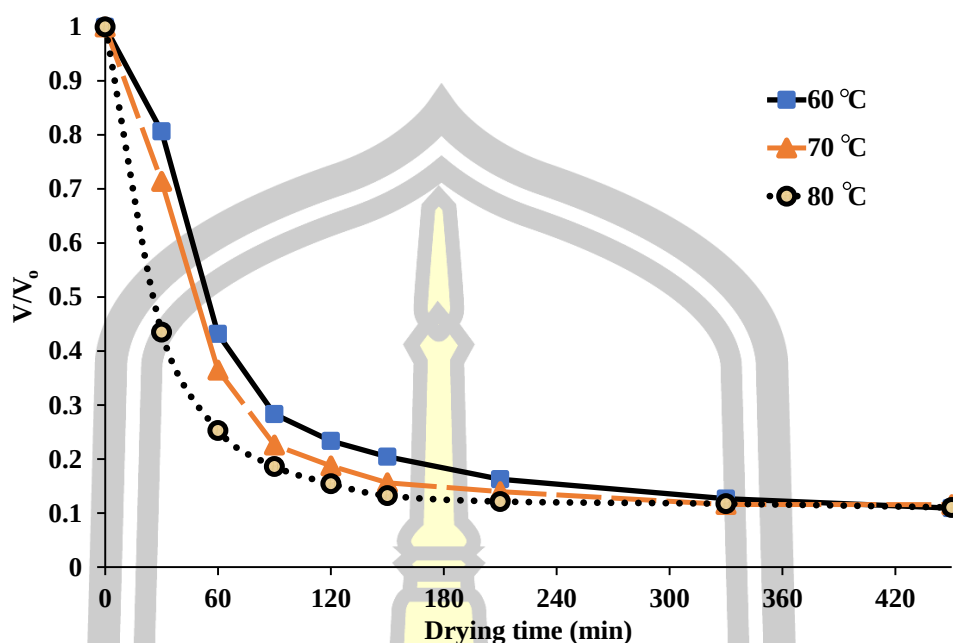
4.2 ผลการศึกษาการหดตัว

4.2.1 ผลการหดตัวของการอบแห้งแครอท

ความสัมพันธ์ของการหดตัวเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ที่อุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 23 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การหดตัวมากขึ้น นั่นคือ V/V_0 มีค่าน้อยลง ซึ่งกราฟจะมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการหดตัวของแครอท โดยเฉพาะในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อการหดตัวเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 80°C ที่ช่วง 30 นาทีแรก จะหดตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C เนื่องจากการระเหยของน้ำภายในเนื้อตัวอย่างส่งผลให้เกิดช่องว่างซึ่งทำให้พื้นผิวของตัวอย่างยุบลง (Yadollahinia & Jahangiri, 2009) นอกจากนี้ตัวอย่างจะหดตัวเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาการอบแห้งเริ่มต้น (0-60 นาที) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัย (Jomlapelatikul et al., 2016)

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งแครอทเงื่อนไขการทดลองต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาการหดตัวซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับเวลาอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรม การหดตัวของแครอทระหว่างการอบแห้ง พบว่า แบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด คือแบบจำลองของ (Ratti, 1994) การหดตัวของแครอทระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ให้ค่า R^2 , χ^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99760, 0.00111 และ 0.02485 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 70°C เท่ากับ 0.99670, 0.10103 และ 0.23691 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 80°C เท่ากับ 0.99840, 0.00073 และ 0.02009 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 6





ภาพประกอบที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ ของแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60,70 และ 80°C

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหดตัวของแครอทอบแห้ง ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

Models	ผลลัพธ์ทางสถิติ	60°C	70°C	80°C
Lozano (1980)	R ²	0.97770	0.88920	0.98770
	χ ²	0.00260	0.01246	0.00118
	RMSE	0.04498	0.09843	0.03024
Lozano (1983)	R ²	0.97778	0.98686	0.99790
	χ ²	0.00453	0.02195	0.00035
	RMSE	0.04486	0.03390	0.01252
Ratti (1994)	R ²	0.99760	0.99670	0.99840
	χ ²	0.00111	0.10103	0.00073
	RMSE	0.02485	0.23691	0.02009
Vazquez (1990)	R ²	0.97778	0.88840	0.98674
	χ ²	0.00453	0.02195	0.00222
	RMSE	0.04486	0.09876	0.03141
Mayor and Sereno (2004)	R ²	0.99370	0.98530	0.99820
	χ ²	0.00086	0.00193	0.03418
	RMSE	0.02392	0.03587	0.15094

พารามิเตอร์จากแบบจำลองของ (Ratti, 1994) ได้อธิบายถึงความเหมาะสมในการอบแห้ง แครอทจะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแครอทและอิทธิพลของอุณหภูมิ โดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ของการหดตัวที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิต่างๆ แสดงดังสมการ:

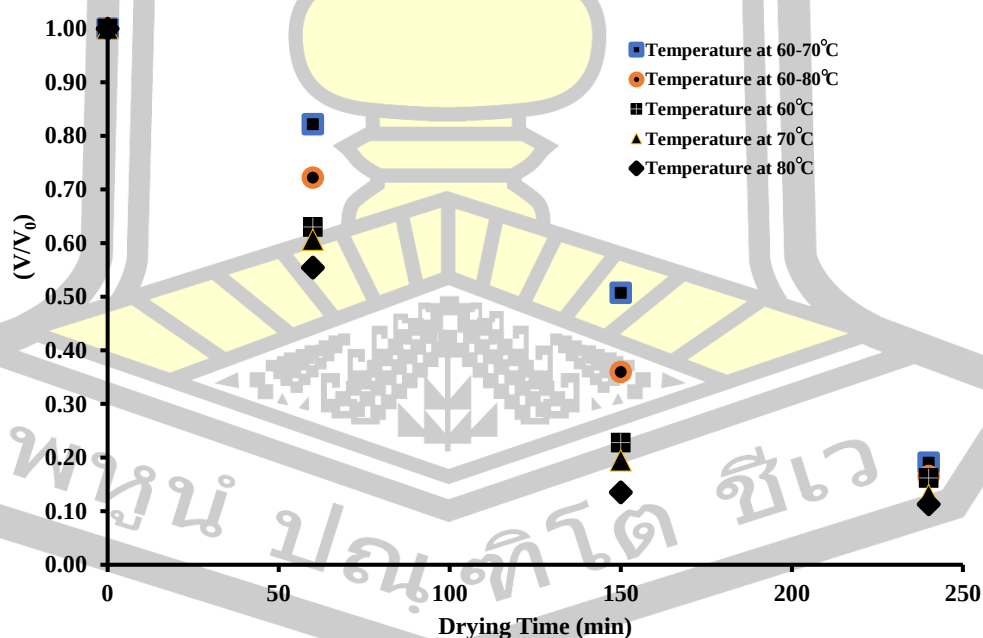
$$60^{\circ}\text{C}: S = 0.1192 + 0.0852 \cdot X + 0.0078 \cdot X^2 - 0.0008 \cdot X^3 \quad (4.1)$$

$$70^{\circ}\text{C}: S = 0.1283 + 0.0637 \cdot X + 0.0463 \cdot X^2 - 0.0041 \cdot X^3 \quad (4.2)$$

$$80^{\circ}\text{C}: S = 0.1111 + 0.1472 \cdot X - 0.0140 \cdot X^2 + 0.0007 \cdot X^3 \quad (4.3)$$

4.2.2 ผลการหัตถ์ของการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอน

การศึกษาการหัตถ์ที่ทำการศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการหัตถ์เท่ากับ ปริมาณน้ำระเหย โดยการนำผลความชื้นที่ได้จากการทำนายมาคำนวณหาการหัตถ์ตามสมมติฐาน และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้อง ด้วยการอบแห้งอุณหภูมิคงที่ และการอบแห้ง สองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ของการหัตถ์เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ที่อุณหภูมิอบแห้ง แตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 24 เมื่อเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การหัตถ์มากขึ้น นั่น คือ V/V_0 มีค่าน้อยลง ซึ่งกราฟจะมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการหัตถ์ของแครอท โดยเฉพาะในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นอุณหภูมิการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่มีผลต่อการหัตถ์ เล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 80°C ที่ช่วง 60 นาทีแรก จะหัตถ์อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C สำหรับการเปรียบเทียบผลของการหัตถ์แครอทอบแห้งที่อุณหภูมิ คงที่และแบบสองขั้นตอน พบว่า การอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C แครอทมีค่าการหัตถ์น้อยกว่าการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิ 60 , 70 และ 80°C เนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งคงที่ ทำให้อัตราการระเหยของน้ำออกจากแครอทมาก ทำให้เกิด ช่องว่างขึ้น ผิวของอาหารจะพยายามเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้น ทำให้เซลล์ของอาหารหัตถ์อย่าง รวดเร็ว (สมบัติ ขอทวีวัฒนา, 2529)



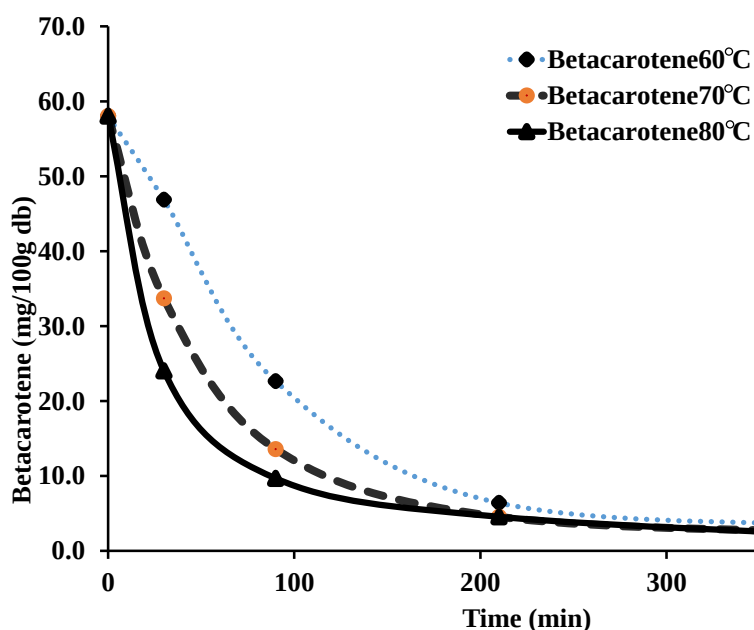
ภาพประกอบที่ 24 การเปรียบเทียบการหัตถ์ของแครอทอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่ม อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C และการอบแห้งแบบคงที่

4.3 ผลการศึกษาสารเบต้าแคโรทีน

4.3.1 ปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้ง

จากการวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้ง โดยสร้างกราฟมาตรฐานจากความเข้มข้นต่างๆของเบต้าแคโรทีนที่ได้เตรียมไว้ และนำไปคำนวณหาปริมาณสารเบต้าแคโรทีนของสารสกัด ดังภาพประกอบที่ภาคผนวก ข.2

จากกราฟมาตรฐานของเบต้าแคโรทีน สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้ง เมื่อนำสารสกัดตัวอย่างมาวัดด้วยเครื่อง HPLC ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะได้สมการ $y = 157500x - 31998$ และ $r^2 = 0.9992$ แล้วนำไปคำนวณหาค่าปริมาณสารเบต้าแคโรทีนทั้งหมด ได้ผลดังภาพประกอบที่ 25 พบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทสดมีค่าเท่ากับ 58.03 mg/100g db และปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ที่เวลา 450 นาที เหลือปริมาณเบต้าแคโรทีนเท่ากับ 2-4 mg/100g db และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เหลือปริมาณเบต้าแคโรทีนมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ผลการทดลองดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Estévez-Santiago et al. (2016) ซึ่งพบว่าการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ ต่ำ 50°C จะมีปริมาณเบต้าแคโรทีนมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นอัตรา การเสื่อมสภาพเบต้าแคโรทีนสูงที่สุด



ภาพประกอบที่ 25 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนเป็นฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งแครอทเงื่อนไขการทดลองต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาปริมาณเบต้าแคโรทีนซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์กับเวลาอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทอบแห้ง โดย

พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองจลนพลศาสตร์แสดงในตารางที่ 7 พารามิเตอร์ทางสถิติของสมการจลนพลศาสตร์เพื่ออธิบายปฏิกิริยาของแคโรทีนจากลูกปาศ์ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยสมการจลนพลศาสตร์ที่สามารถทำนายความเข้มข้นของปริมาณเบต้าแคโรทีนคือสมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่ 2 เนื่องจากสมการจลนพลศาสตร์อันดับ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.981-0.995 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีน ที่สภาวะการอบแห้งอุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปริมาณเบต้าแคโรทีน

Temperature	Statistical parameters	0 th	0.5 th	1 st	1.5 th	2 nd
60°C	R^2	0.70370	0.8076	0.90490	0.97090	0.99010
	χ^2	0.00144	0.11060	0.01343	0.19635	0.17653
	RMSE	0.20102	0.25760	0.08977	0.34324	0.32545
70°C	R^2	0.57890	0.72300	0.87350	0.97120	0.99580
	χ^2	0.09198	0.13082	0.06006	0.22954	0.04177
	RMSE	0.23492	0.28017	0.18983	0.37111	0.15831
80°C	R^2	0.48380	0.66750	0.88080	0.99240	0.98190
	χ^2	0.10992	0.15278	0.08337	0.25417	0.07401
	RMSE	0.25681	0.30277	0.22366	0.39052	0.21073

ค่าของอัตราส่วนความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลา ดังนั้นปริมาณของเบต้าแคโรทีนจึงสามารถทำนายและควบคุมการอบแห้งในช่วงเวลาที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Goula & Adamopoulos, 2010a) แสดงการแทนค่าสมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่ 2 ที่เหมาะสมที่สุด ดังสมการที่ 4.4-4.6

$$60^\circ\text{C}: \left(\frac{1}{CR} \right) = -0.0398t + 0.1825 \quad (4.4)$$

$$70^\circ\text{C}: \left(\frac{1}{CR} \right) = -0.0573t + 0.2053 \quad (4.5)$$

$$80^\circ\text{C}: \left(\frac{1}{CR} \right) = -0.0806t - 0.7163 \quad (4.6)$$

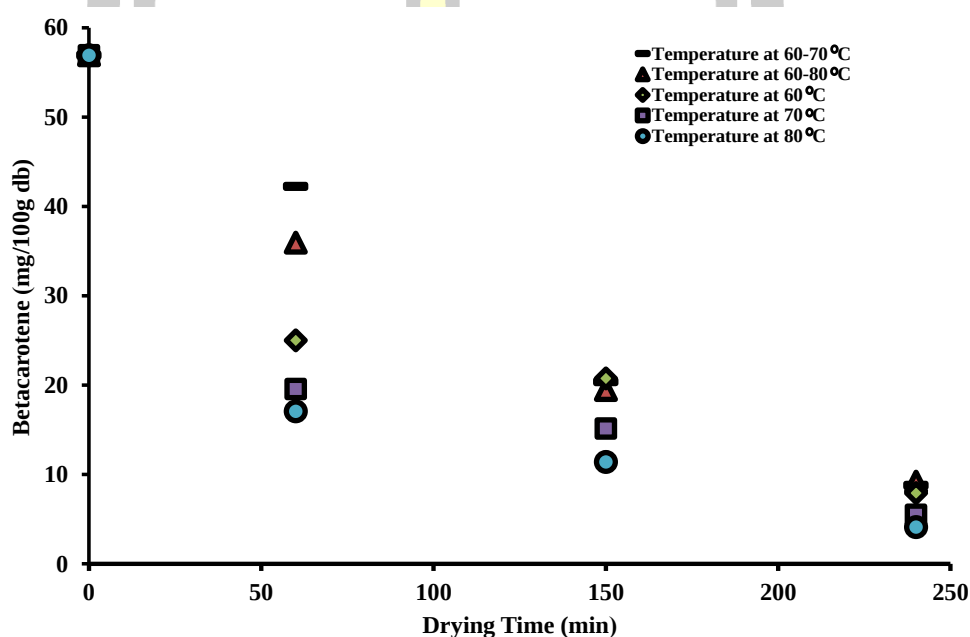
โดยที่ CR หมายถึงอัตราส่วนความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนและ t หมายถึงเวลาในการอบแห้ง (นาท)

4.3.2 ผลปริมาณเบต้าแคโรทีนของการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดยสร้างกราฟมาตรฐานจากความเข้มข้นต่างๆ ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้เตรียมไว้ และนำไปคำนวณหาปริมาณสารเบต้าแคโรทีนของสารสกัด ดังภาพประกอบที่ ภาคผนวกที่ ข.3

จากกราฟมาตรฐานของเบต้าแคโรทีนแบบสองขั้นตอน สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนทั้งหมดของแครอทอบแห้ง เมื่อนำสารสกัดตัวอย่างมาวัดค่าด้วยเครื่อง HPLC ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะได้สมการ $y = 155270x - 21727$ และ $r^2 = 0.9992$ แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณสาร

เบต้าแคโรทีนทั้งหมดได้ผลดังภาพประกอบที่ 26 โดยปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทสดมีค่าเท่ากับ 58.03 mg/100g db เมื่อทำการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอนโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ 60 เป็น 70°C และเพิ่มอุณหภูมิที่ 60 เป็น 80°C ที่เวลา 240 นาที พบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนเหลือประมาณ 4-5 mg/100g db ส่วนการอบแห้งแครอทโดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 60, 70 และ 80°C เวลา 240 นาที พบว่ามีปริมาณเบต้าแคโรทีนเหลือประมาณ 2-4 mg/100g db ซึ่งต่ำกว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทอบแห้งแบบสองขั้นตอน ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goula & Adamopoulos, (2010b) ซึ่งพบว่า การอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 80°C ปริมาณเบต้าแคโรทีนเสื่อมสภาพมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C



ภาพประกอบที่ 26 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนแบบสองขั้นตอน เป็นฟังก์ชันของเวลา ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

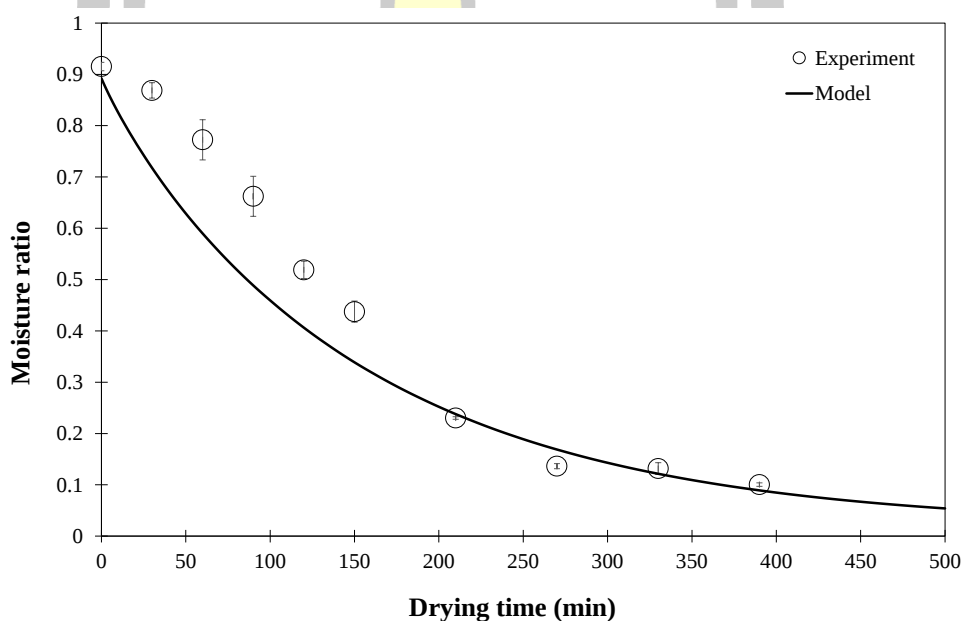
4.4 ผลการทดลองแบบจำลองแครอทอบแห้งโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

4.4.1 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลองกับการทดลองการอบแห้งแครอทแบบคงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) จะเห็นว่าค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.98 ค่า %P เท่ากับ 17.56% และค่า RMSE เท่ากับ 0.199832 จากกราฟค่าความชื้นของแครอท ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาการอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งใช้เวลาประมาณ 350 นาที โดยลักษณะการลดลงของความชื้นภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้มีลักษณะลดลงแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลซึ่งเป็นพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุ

เกษตรและอาหารที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sandeep Kumar, 2012) ที่ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองโดยพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการอบแห้งที่สภาวะ 60°C เป็นเวลา 300 นาที การกระจายตัวของความชื้นและอุณหภูมิเป็นไปในทางเดียวกันกับผลการทดลอง

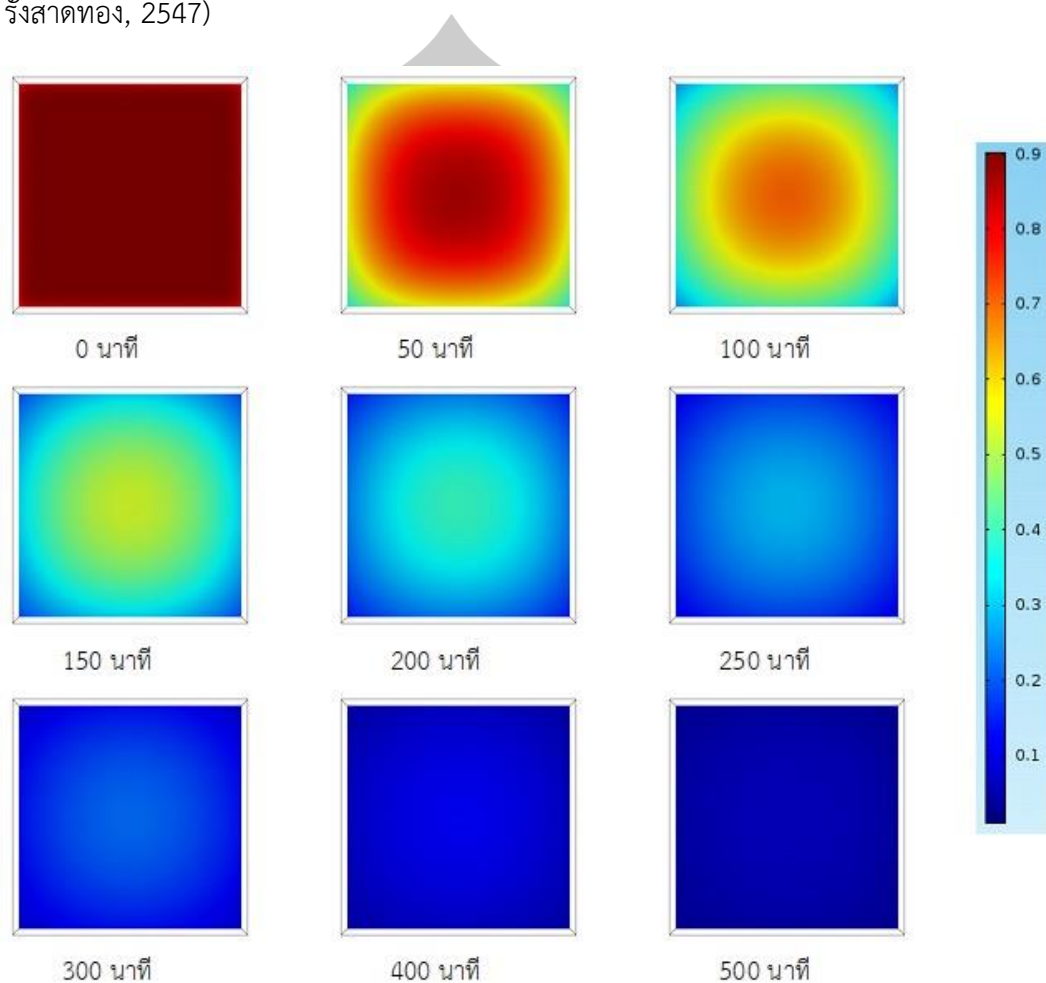
นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมของการอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดหรือค่าความแตกต่างยังมีค่าสูงในช่วงเวลาเริ่มของการอบแห้ง (0-150 นาที) และช่วงการอบแห้งตั้งแต่ 200-500 นาที จะมีค่าการอบแห้งที่สัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jomlapelatikul *et al.* (2016) โดยพบว่าค่าการนำความชื้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีผลทำให้การกระจายความชื้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 27 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 60°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง

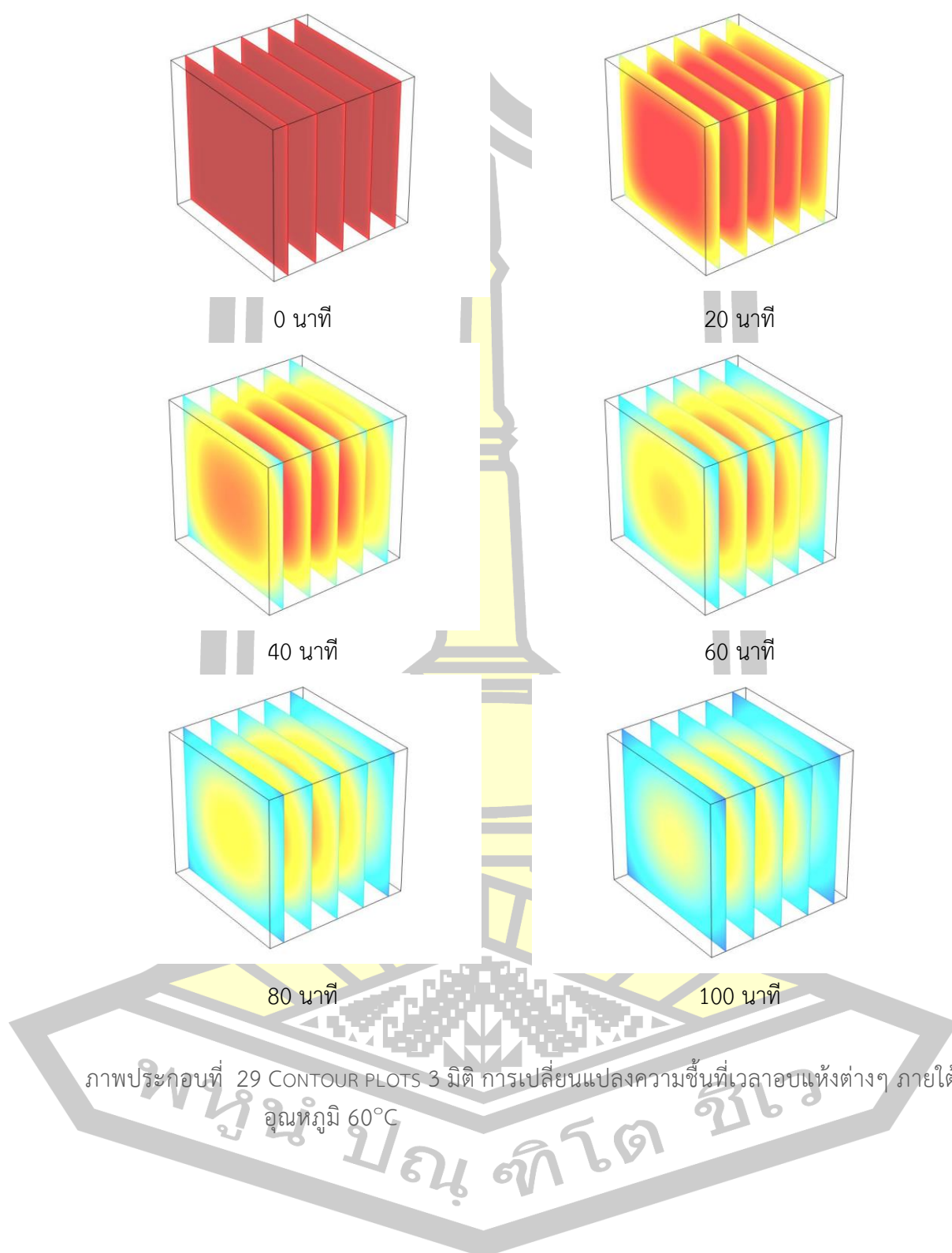
จากภาพประกอบที่ 28 แสดง Contour plots แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 60°C ที่เวลาในการอบแห้ง 0-500 นาที จะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นของแครอทจะลดลงที่ผิวด้านนอกของแครอท เนื่องจากการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งลมร้อนอาศัยหลักการพาความร้อน ทำให้แครอทแห้งจากด้านนอกไปยังด้านใน ในช่วงเวลาการอบแห้งที่เวลา 0-200 นาทีแรก ปริมาณความชื้นที่อยู่ในแครอทจะมีความชื้นสูงในช่วงแรก ซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางในการพาความร้อนออกจากแครอทอัตราทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น และในช่วงเวลา 250-500 นาที แครอทจะมีความชื้นลดลง ความชื้นในแครอทเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า มีการระเหยอย่าง

ต่อเนื่อง อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (วิไล รังสาดทอง, 2547)



ภาพประกอบที่ 28 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้ อุณหภูมิ 60°C

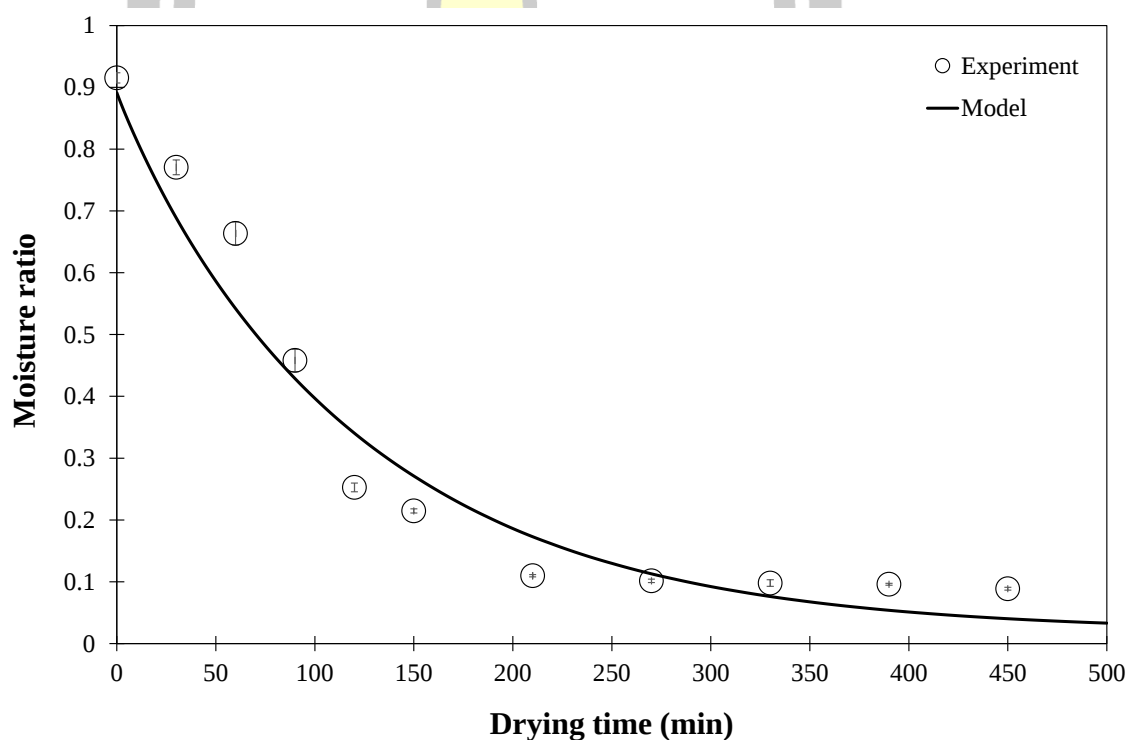
ภาพประกอบที่ 29 แสดง Contour plots 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 60°C จากภาพ Contour plots 3 มิติ จากพื้นผิวด้านนอกที่เวลา 0-30 นาที จะเห็นได้ว่าช่วงความชื้นในพื้นผิวทั้งหมดของแครอทจะมีปริมาณความชื้นที่สูง เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ปริมาณความชื้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง



4.4.2 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลองกับผลการทดลองการอบแห้งแครอทแบบคงที่อุณหภูมิ 70°C

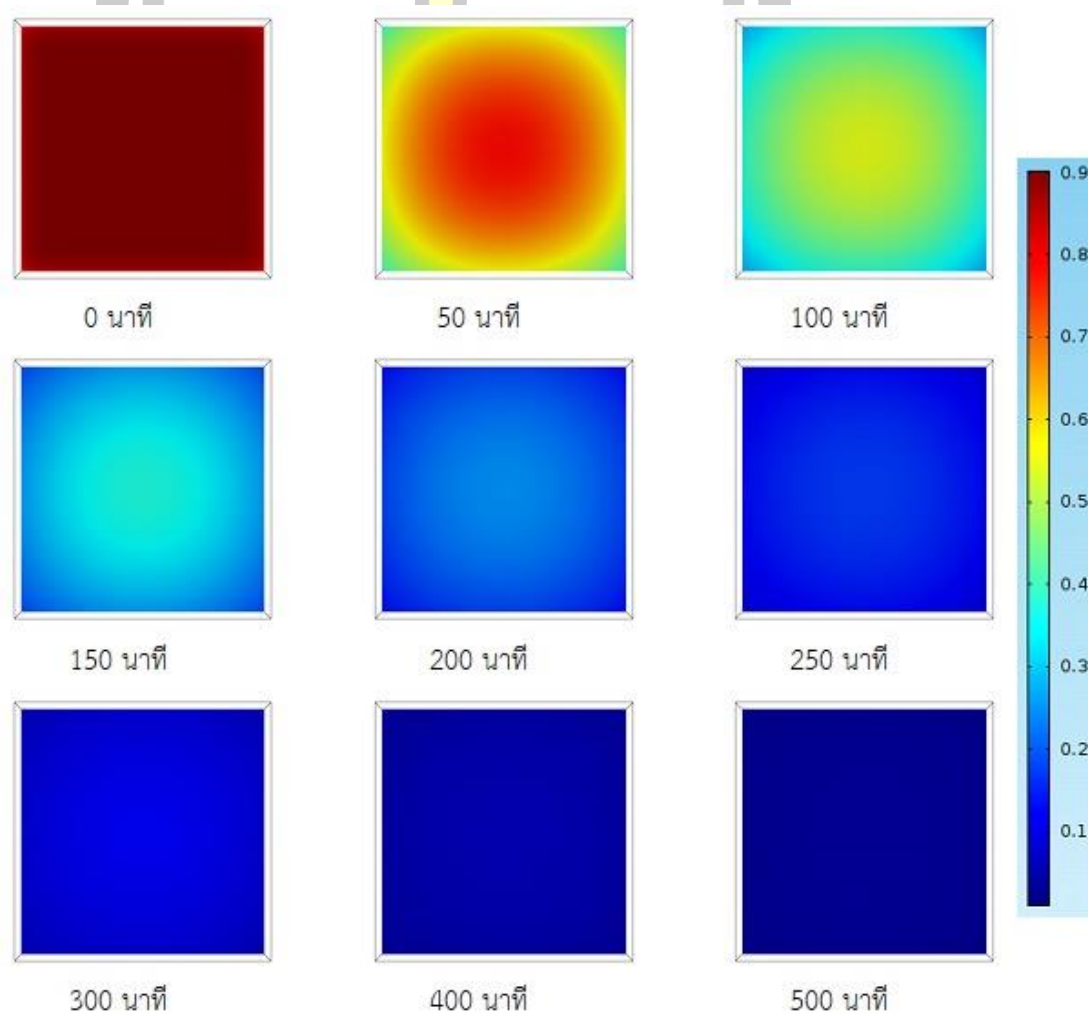
ภาพประกอบที่ 30 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลอง (เส้นทึบ) ภายใต้สภาวะอบแห้งแบบคงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 500 นาที กับผลการทดลองการอบแห้ง (วงกลม) พบว่า ค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.94 ค่า %P เท่ากับ 26.22% และค่า RMSE เท่ากับ 0.319604 ค่าความชื้นของแครอทลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อระยะเวลาอบแห้งผ่านไปหลังจากนาทีที่ 270 การอบแห้งมีอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.1 ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งใช้หลักการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยน้ำในวัสดุจะระเหยออกมา กระบวนการนี้จะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัตถุเท่ากับความดันไอน้ำที่บรรยากาศ

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมรอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามค่าความผิดพลาดหรือค่าความแตกต่างยังมีค่าสูงในช่วงเวลาเริ่มการอบแห้ง (0-200 นาที) ส่วนช่วงการอบแห้งตั้งแต่ 270-500 นาที จะมีค่าการอบแห้งที่สัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองกับจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



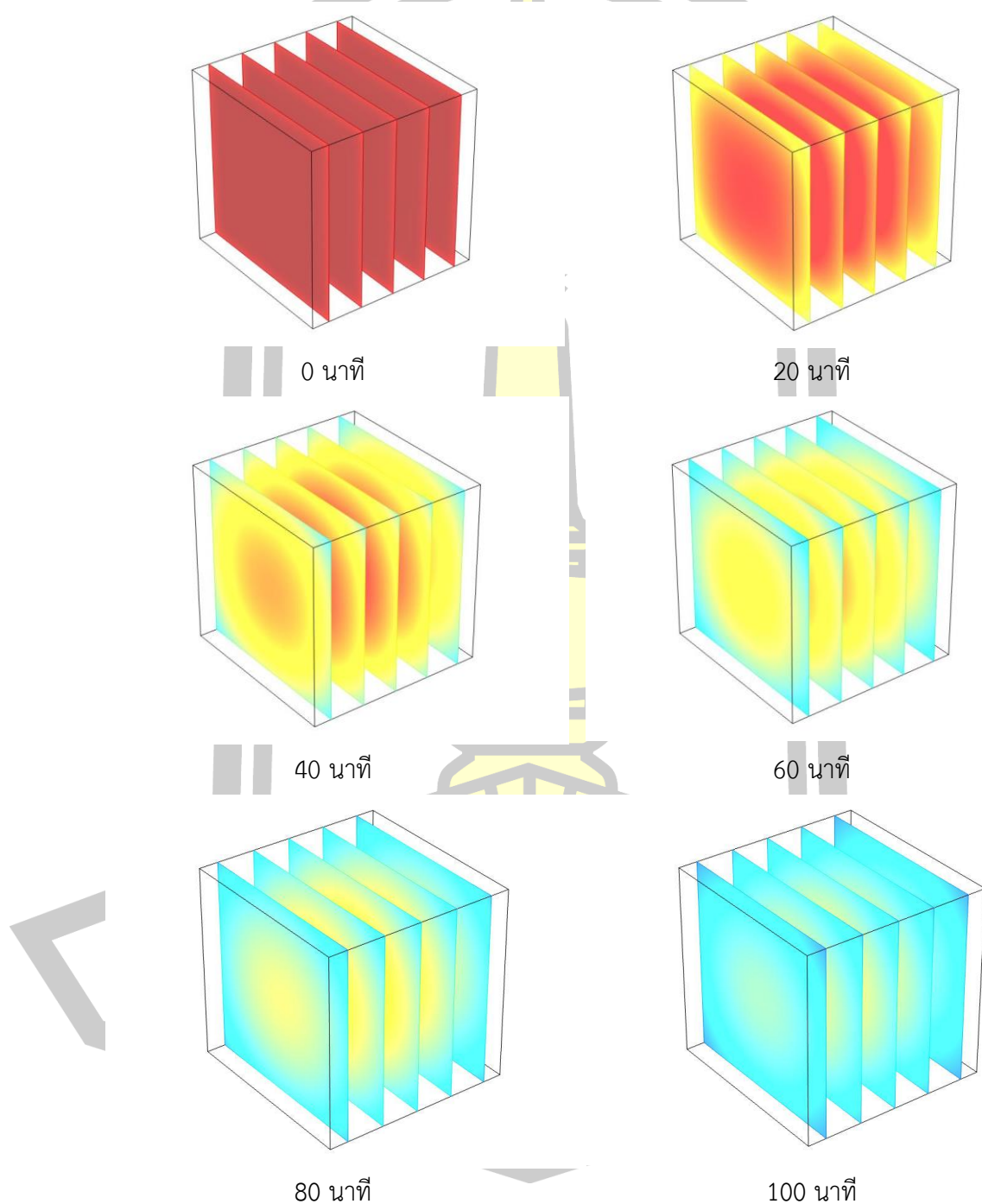
ภาพประกอบที่ 30 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 70°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง

จากภาพประกอบที่ 31 เป็น Contour plots แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 70°C พบว่าการอบแห้งแครอทที่ 0-150 ลี Contour plots มีการเปลี่ยนแปลง โดยช่วงแรกของการอบแห้งแครอทมีความชื้นสูง ความชื้นที่ผิวด้านนอกแครอทมีการระเหยอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาการอบแห้งผ่านไปตั้งแต่เวลาที่ 200 ถึงเวลาที่ 500 ความชื้นภายในแครอทจะลดลงและคงที่จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)



ภาพประกอบที่ 31 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้ อุณหภูมิ 70°C

จากภาพประกอบที่ 32 แสดง Contour plots 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 70°C พบว่า เวลาในการอบแห้งแครอทช่วงแรกนาที่ที่ 0-20 พื้นผิวทั้งหมดของแครอทมีความชื้นสูง เมื่อทำการอบแห้งตั้งแต่นาทีที่ 40 จนถึงนาที่ที่ 100 ปริมาณความชื้นแครอทลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง

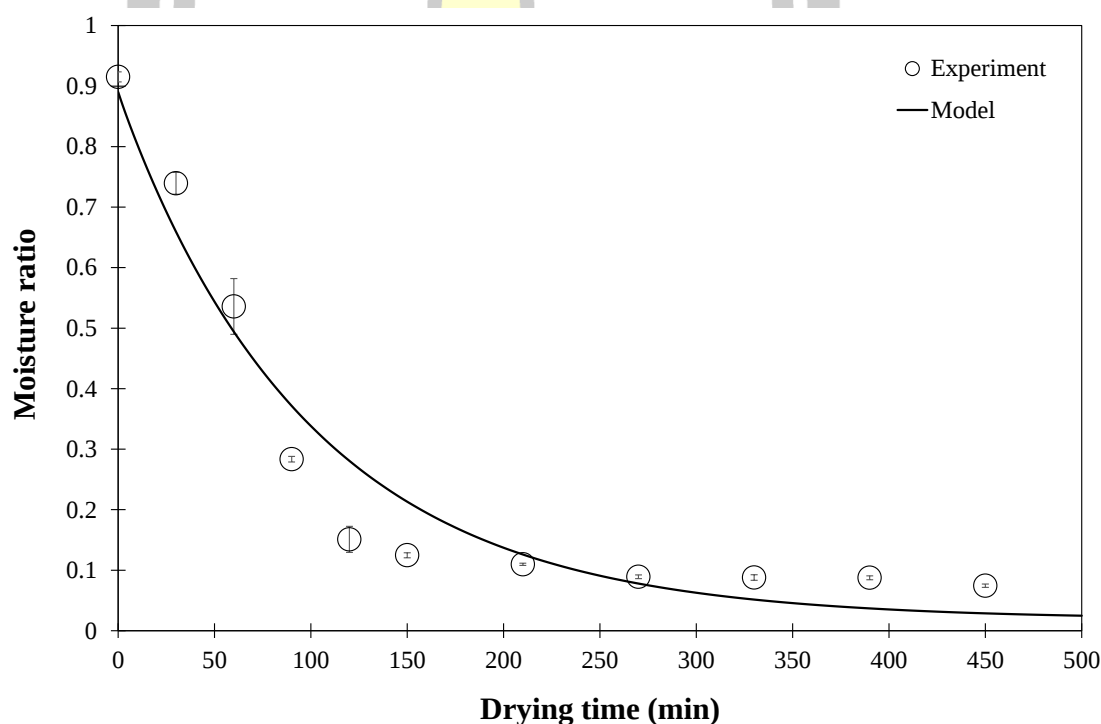


ภาพประกอบที่ 32 CONTOUR PLOTS 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้ อุณหภูมิ 70°C

4.4.3 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลองกับผลการทดลองการอบแห้งแครอทแบบคงที่อุณหภูมิ 80°C

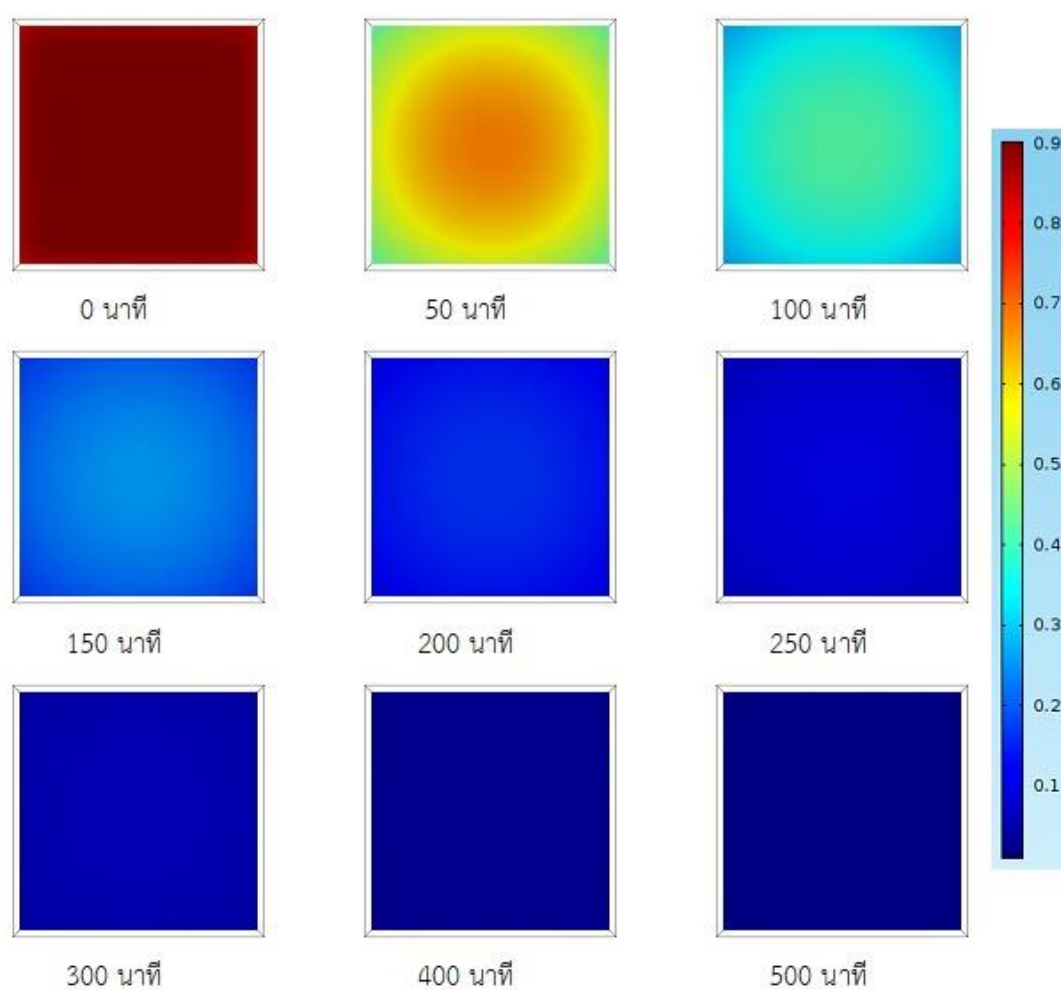
จากภาพประกอบที่ 33 พบว่า ผลการแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 80 °C ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) ค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.90 ค่า %P เท่ากับ 36.17% และค่า RMSE เท่ากับ 0.455676 โดยที่เวลาการอบแห้ง 0-150 นาที เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง แครอทยังคงมีความชื้นสูง และความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งหลังเวลาอบแห้งที่เวลา 200-500 นาที อัตราการทำแห้งจะคงที่ ซึ่งค่าความชื้นของแครอทลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมของการอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดหรือค่าความแตกต่างยังมีค่าสูงในช่วงเวลาเริ่มของการอบแห้ง (0-150 นาที) และช่วงการอบแห้งตั้งแต่ 200-500 นาที จะมีค่าการอบแห้งที่สัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



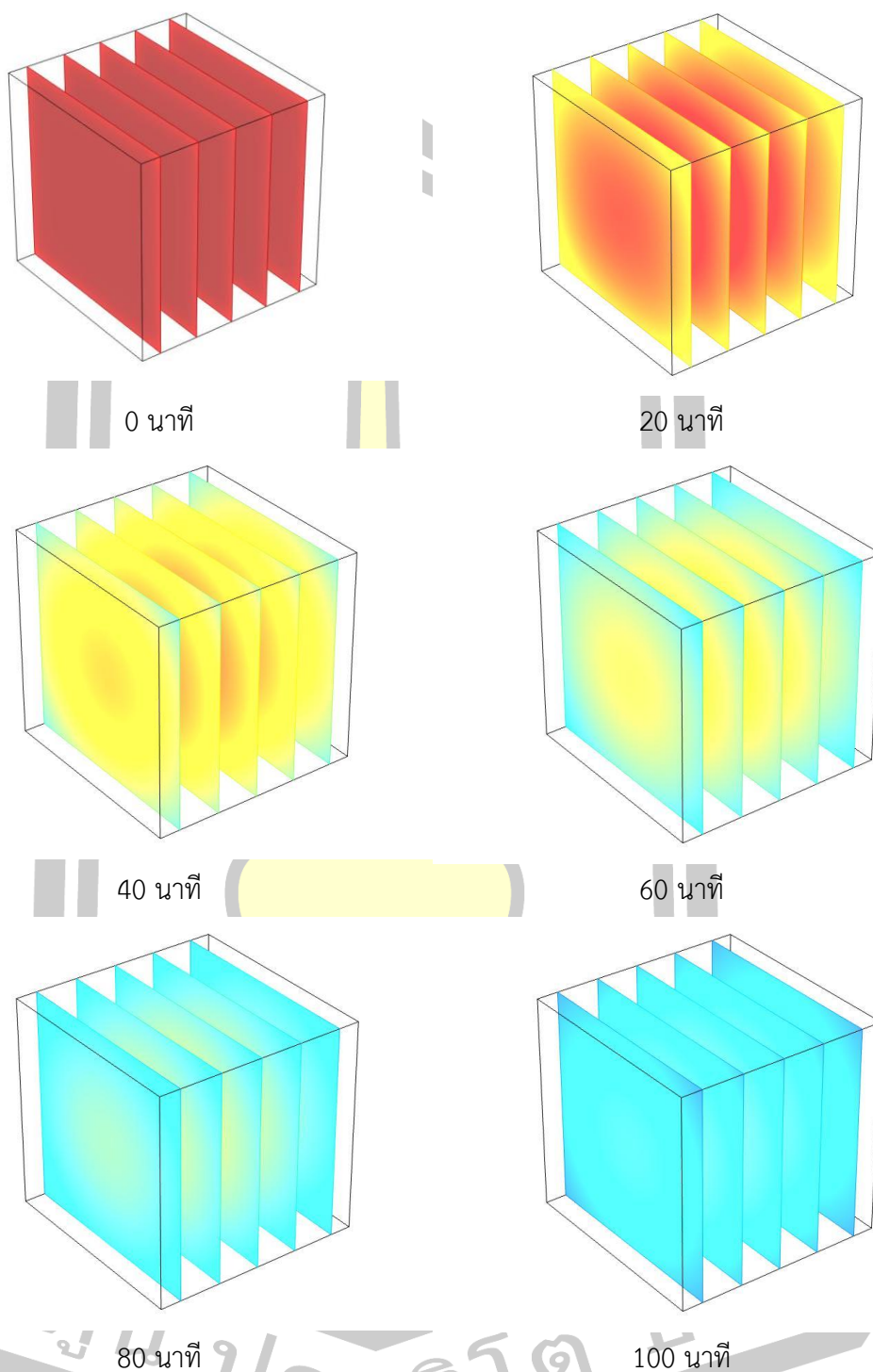
ภาพประกอบที่ 33 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของแครอทที่อุณหภูมิ 80°C ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองและการทดลอง

ภาพประกอบที่ 34 พบว่า Contour plots แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 80°C ปริมาณความชื้นที่ผิวด้านนอกของแครอทในช่วงเวลาการอบแห้งที่เวลา 0-100 นาทีแรกจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิ 60 และ 70°C ทั้งนี้เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมากทำให้มีความชื้นการระเหยเร็วขึ้น (วิไล รังสาดทอง, 2547) และการอบแห้งหลังจากที่ 150 จนถึง 500 นาที ปริมาณความชื้นในแครอทเริ่มลดลงอย่างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากสี Contour plots มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



ภาพประกอบที่ 34 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้ อุณหภูมิ 80°C

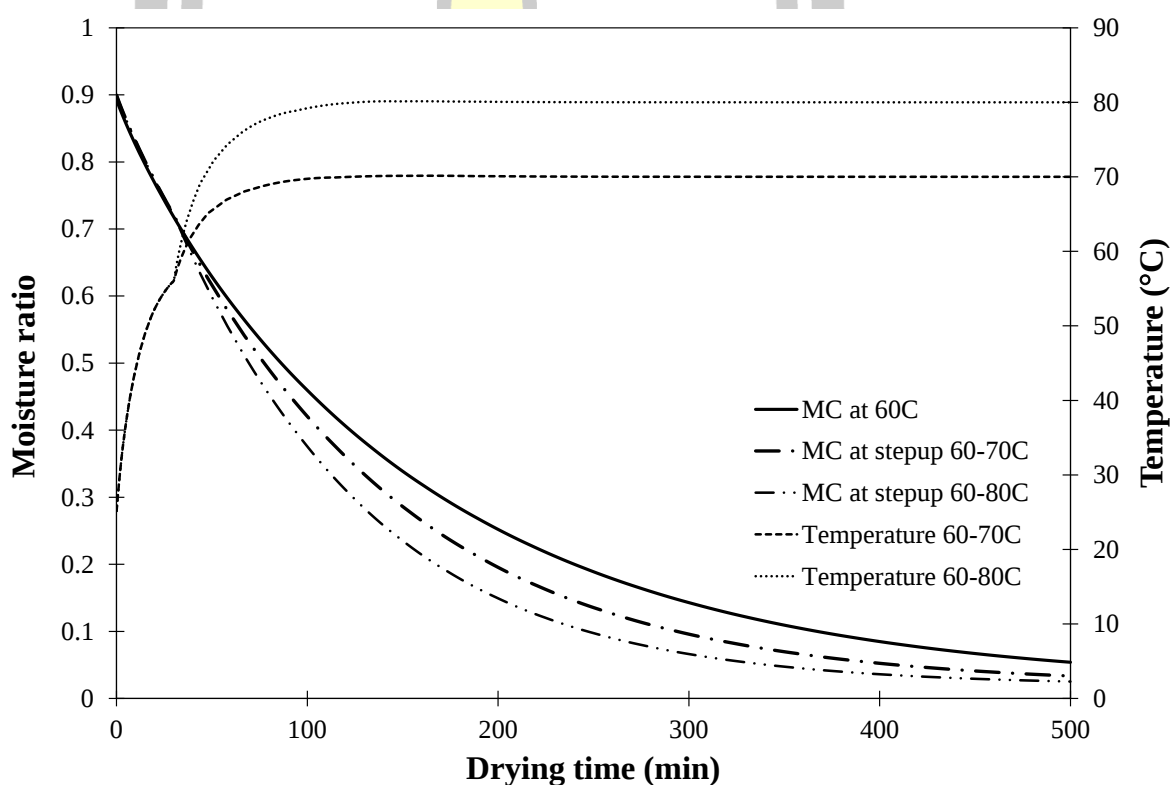
จากภาพประกอบที่ 35 แสดง Contour plots 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิ 80°C พบว่าแครอทอบแห้งความชื้นมีการระเหยอย่างรวดเร็ว พิจารณาได้จากที่เวลาการอบแห้ง 60 นาทีแรก Contour plots 3 มิติ มีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็ว และหลังจากนาทีที่ 60 ถึง 100 นาที ปริมาณความชื้นในแครอทจะน้อยลง



ภาพประกอบที่ 35 ภาพแสดง CONTOUR PLOTS 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เวลาอบแห้ง
ต่างๆภายใต้อุณหภูมิ 80°C ที่ได้จากแบบจำลอง

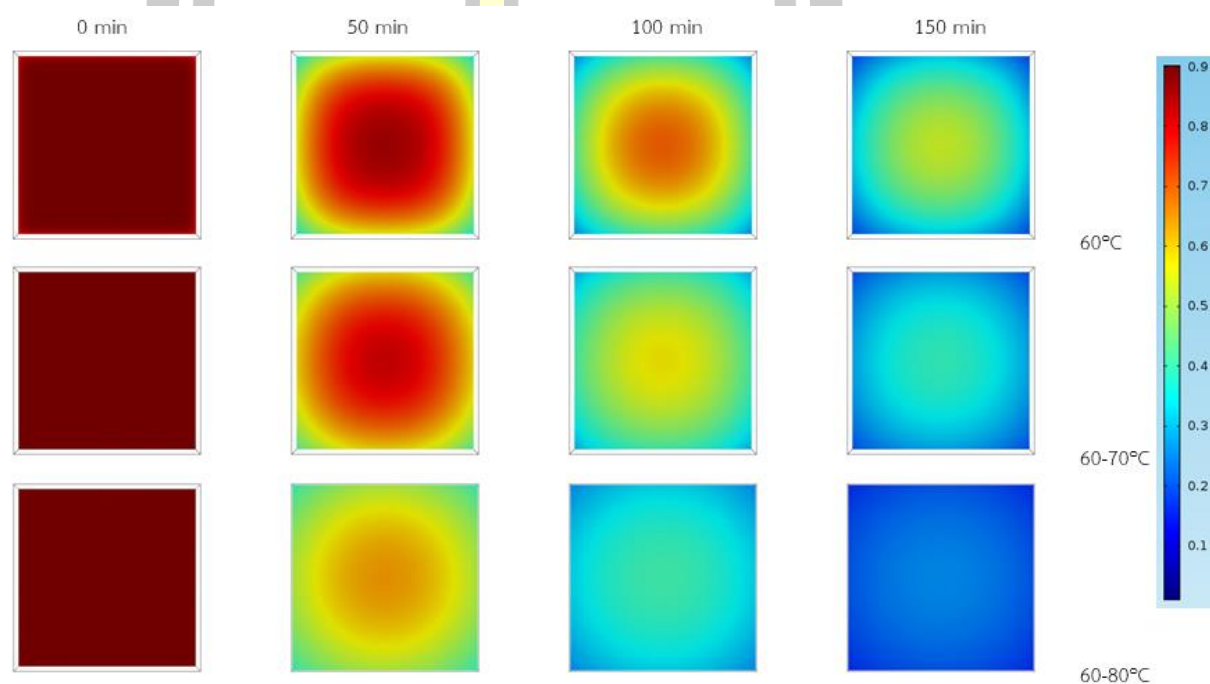
4.4.4 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลองการอบแห้งแครอทแบบขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

ภาพประกอบที่ 36 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความชื้นแบบสองขั้นตอนของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C ที่ได้จากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบคงที่ 60°C (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลอง (เส้นปะ) จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่าการอบแห้งสองขั้นตอนจากอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C เวลาการอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.1 ใช้เวลาประมาณ 300 นาที การอบแห้งสองขั้นตอนจากอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C เวลาการอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งใช้เวลาประมาณ 250 นาที โดยระยะเวลาการอบแห้งอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C จะใช้เวลาสั้นกว่าการอบแห้งอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C ประมาณ 50 นาที ปริมาณความชื้นในแครอทจะลดลงมากกว่า แต่การอบแห้งแบบขั้นตอนปริมาณความชื้นและเวลาในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิคงที่ ผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบเพิ่มอุณหภูมิสอดคล้องกับทฤษฎีการทำแห้ง



ภาพประกอบที่ 36 เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบขั้นตอนระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิคงที่ 60°C

จากภาพประกอบที่ 37 Contour plots แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในพื้นที่ผิวทั้งหมดของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 60°C เปรียบเทียบค่าความชื้นแบบสองขั้นตอนของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C พบว่าการอบแห้งแครอทแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C ปริมาณความชื้นในแครอทจะลดลงเร็วกว่าการอบแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C แต่การอบแห้งแบบคงที่อุณหภูมิ 60°C มีปริมาณความชื้นสูงกว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอนในระยะเวลาการอบแห้งที่เท่ากัน ดังนั้นจะเห็นว่าการอบแห้งแบบเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

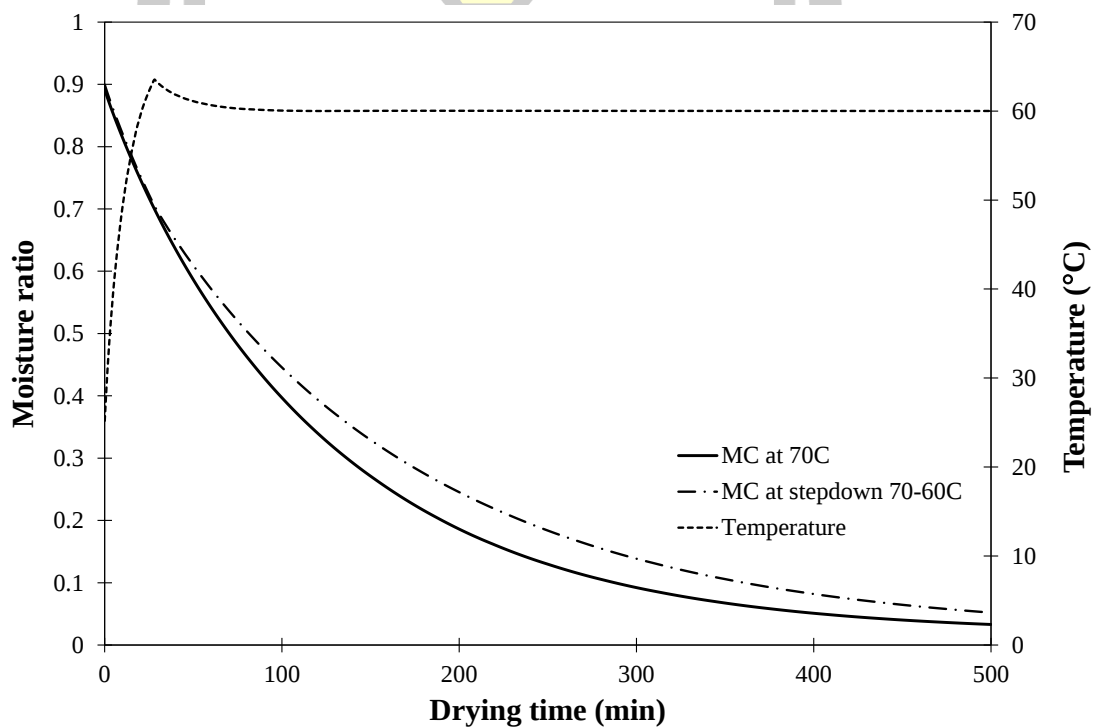


ภาพประกอบที่ 37 CONTOUR PLOTS แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในพื้นที่ผิวทั้งหมดของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 60°C เปรียบเทียบค่าความชื้นแบบสองขั้นตอนของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และอุณหภูมิ 60 เป็น 80°C

พูน ปณ จิต ชีเว

4.4.5 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของแครอทจากแบบจำลองการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอนแบบลดอุณหภูมิจาก 70°C เป็น 60°C

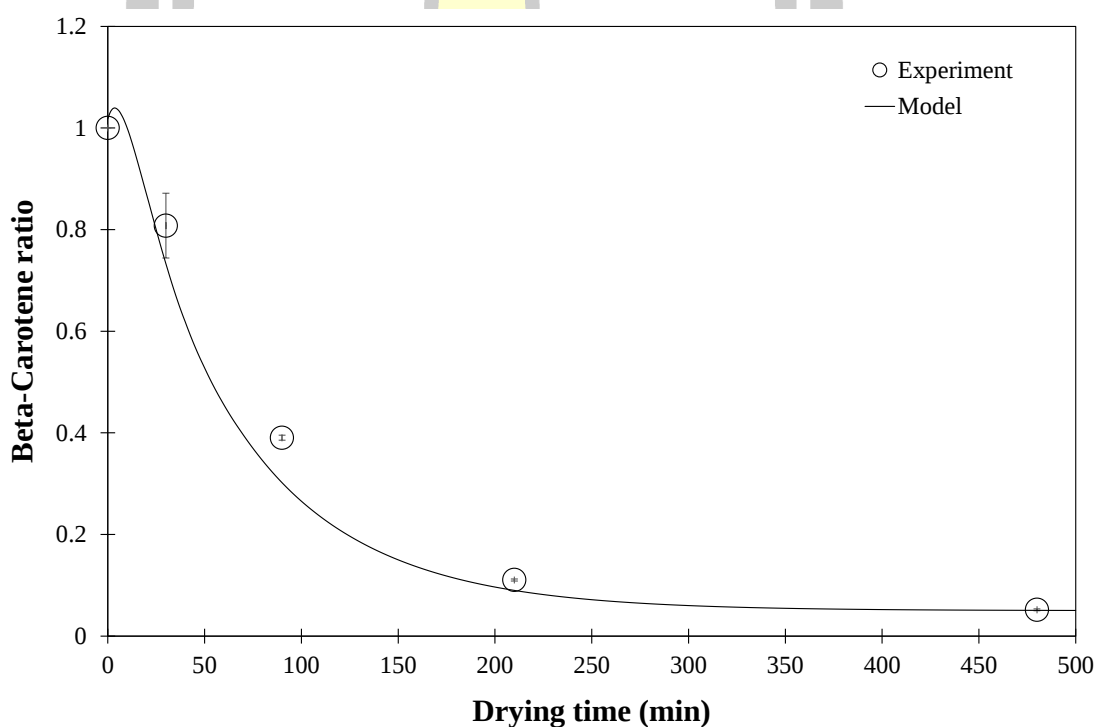
ภาพประกอบที่ 38 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความชื้นแบบสองขั้นตอนของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 เป็น 60°C โดยเปรียบเทียบค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งแบบคงที่ 70°C (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลอง (เส้นปะ) จากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่าการอบแห้งสองขั้นตอนแบบลดอุณหภูมิจาก 70 เป็น 60°C เวลาการอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งใช้เวลามากกว่า 500 นาที โดยการอบแห้งแบบลดอุณหภูมิจาก 70 เป็น 60°C แครอทจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งใช้เวลาการอบแห้งมากกว่า ดังนั้นการอบแห้งแบบลดอุณหภูมิจึงไม่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร เนื่องจากทำให้เสียเวลาในการอบแห้งและสิ้นเปลืองพลังงาน



ภาพประกอบที่ 38 เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบลดอุณหภูมิ 70 เป็น 60°C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิคงที่ 70°C

4.4.6 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองของปริมาณเบต้าแคโรทีนในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60°C

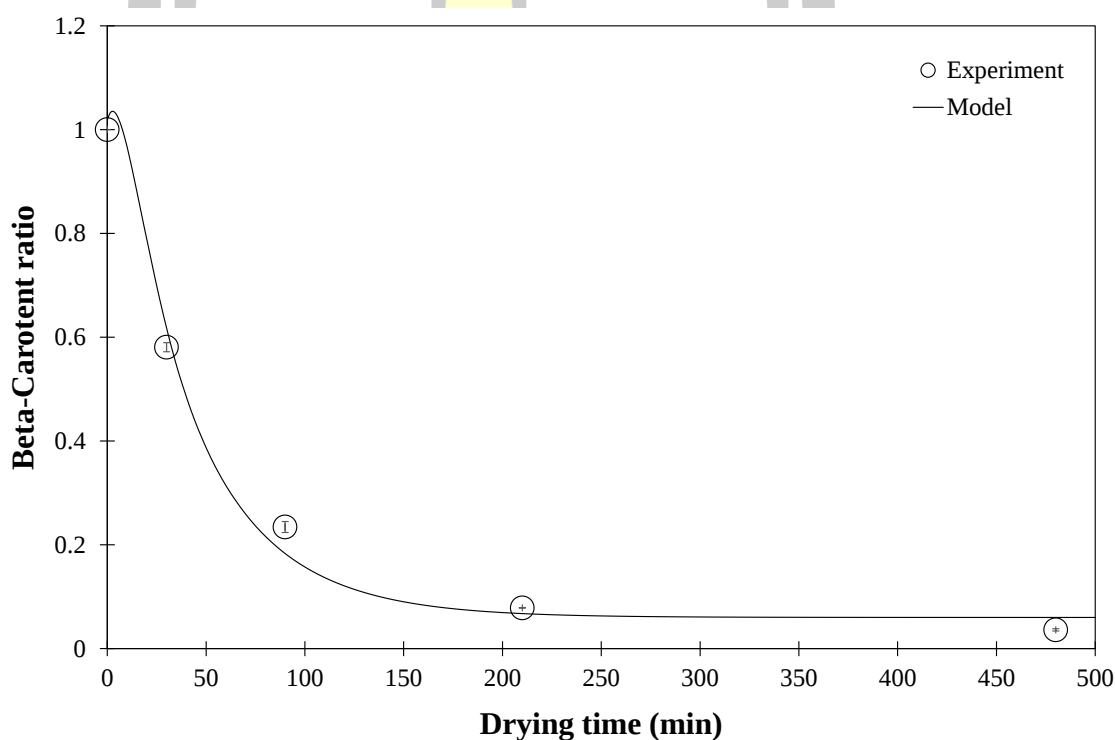
ภาพประกอบที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) พบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9933 ค่า %P เท่ากับ 10.88 % และค่า RMSE เท่ากับ 0.137834 จากกราฟปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอททดลองแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล โดยช่วงแรกของการอบแห้งนาที่ที่ 0-100 อัตราส่วนปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 1.0 เหลือประมาณ 0.4 เมื่อระยะเวลาอบแห้งหลังนาที่ที่ 200 เป็นต้นไป มีค่าเท่ากับ 0.1 และมีการลดลงเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อปริมาณเบต้าแคโรทีน เนื่องจากเบต้าแคโรทีนเสื่อมสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนหรือแสงสว่างโดยเกิดปฏิกิริยาที่สารเปลี่ยนโครงสร้างจากไอโซเมอร์ไปเป็นอีกไอโซเมอร์หนึ่ง (thermal isomerization) แต่ทั้งนี้เบต้าแคโรทีนมีจุดหลอมเหลวที่ 136-140 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 190-200 องศาเซลเซียส จึงจะทำให้เบต้าแคโรทีนเสื่อมสภาพเป็นสารประกอบที่ระเหยได้ (Holland et al., 1991) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรม การอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง



ภาพประกอบที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C

4.4.7 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองของปริมาณเบต้าแคโรทีนในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 70°C

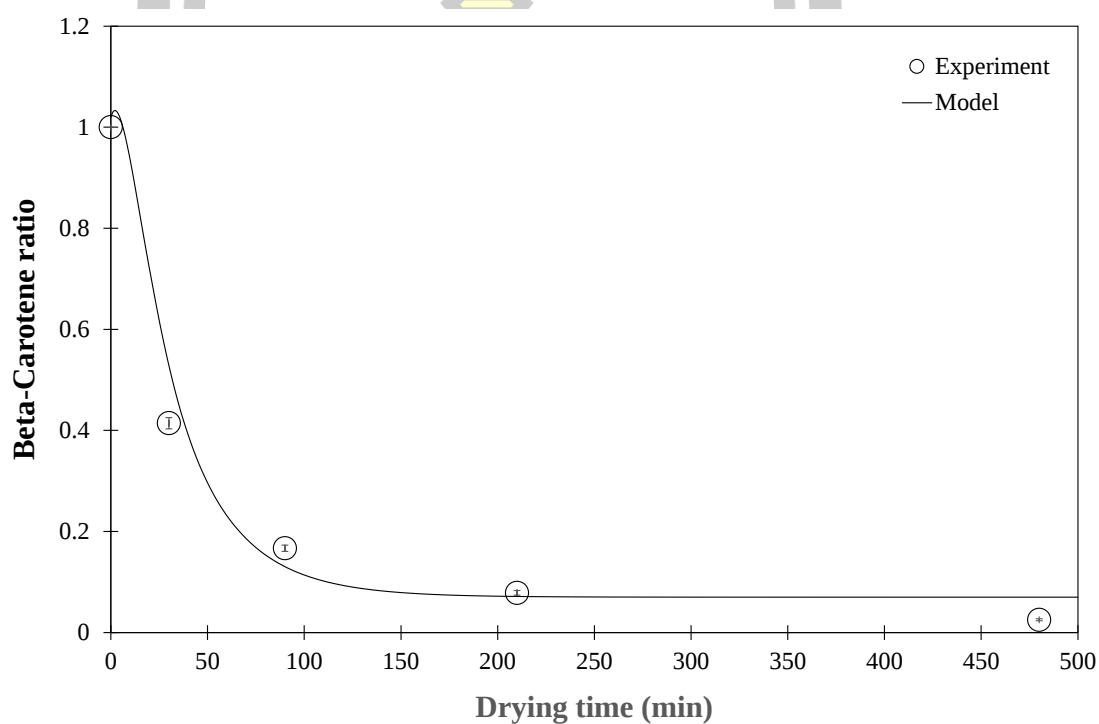
จากภาพประกอบที่ 40 พบว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9081 ค่า %P เท่ากับ 22.08 % และค่า RMSE เท่ากับ 0.319925 จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมของการอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอททดลองแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล โดยเมื่อทำการอบแห้งผ่านไป 100 นาที อัตราส่วนปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงเท่ากับ 0.2 หลังจากนั้นที่ 200 ถึงนาทีที่ 500 มีค่าน้อยกว่า 0.1 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ทำให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนเสื่อมสภาพเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งจึงเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการคงคุณภาพของปริมาณเบต้าแคโรทีน



ภาพประกอบที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 70°C

4.4.8 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองของปริมาณเบต้าแคโรทีนในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 80°C

ภาพประกอบที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) จะเห็นได้ว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9081 ค่า %P เท่ากับ 22.08% และค่า RMSE เท่ากับ 0.319925 เวลาการอบแห้งที่ 100 นาทีแรก อัตราส่วนปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงต่ำกว่า 0.2 และเมื่อระยะเวลาอบแห้งต่อไปอีกประมาณ 350 นาที ปริมาณเบต้าแคโรทีนมีค่าต่ำกว่า 0.1 ทั้งนี้ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C ทำให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนเสื่อมสภาพได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมการอบแห้งมีความสัมพันธ์กับผลที่ได้จากการทดลอง



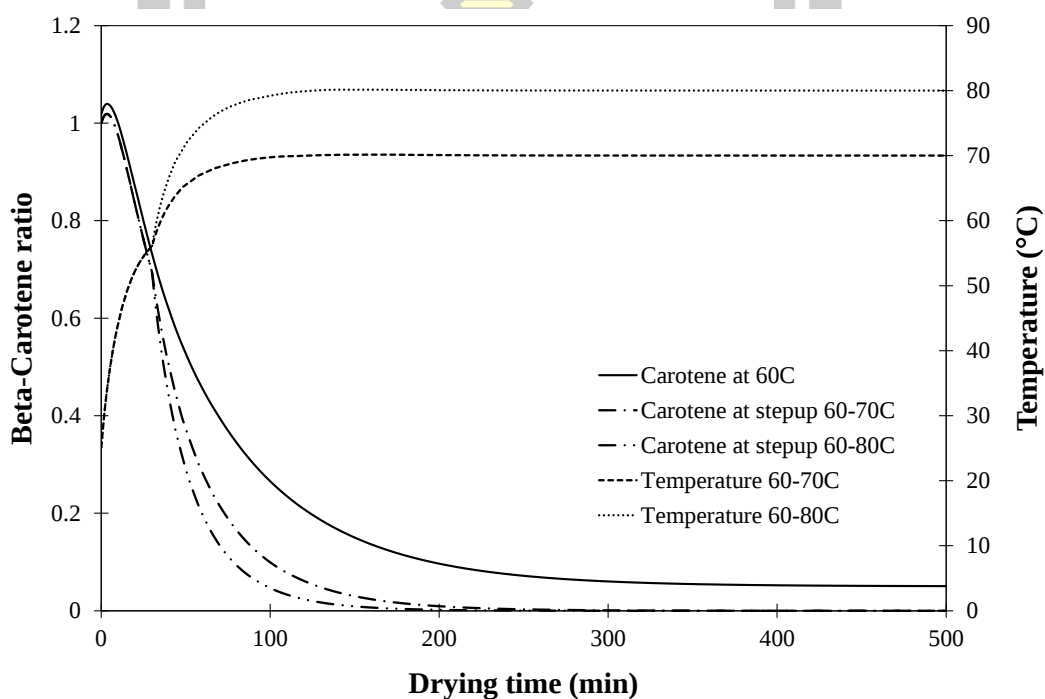
ภาพประกอบที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 80°C

พูน ปลูก โต ชเว

4.4.9 ผลการเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนจากแบบจำลองการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

จากภาพประกอบที่ 42 ผลการเปรียบเทียบค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C (เส้นทึบ) กับค่าที่ได้จากการทำนายแบบจำลองปริมาณเบต้าแคโรทีนของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C (เส้นปะ) พบว่าในการอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิทั้งสองช่วงอุณหภูมิ ทำให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C

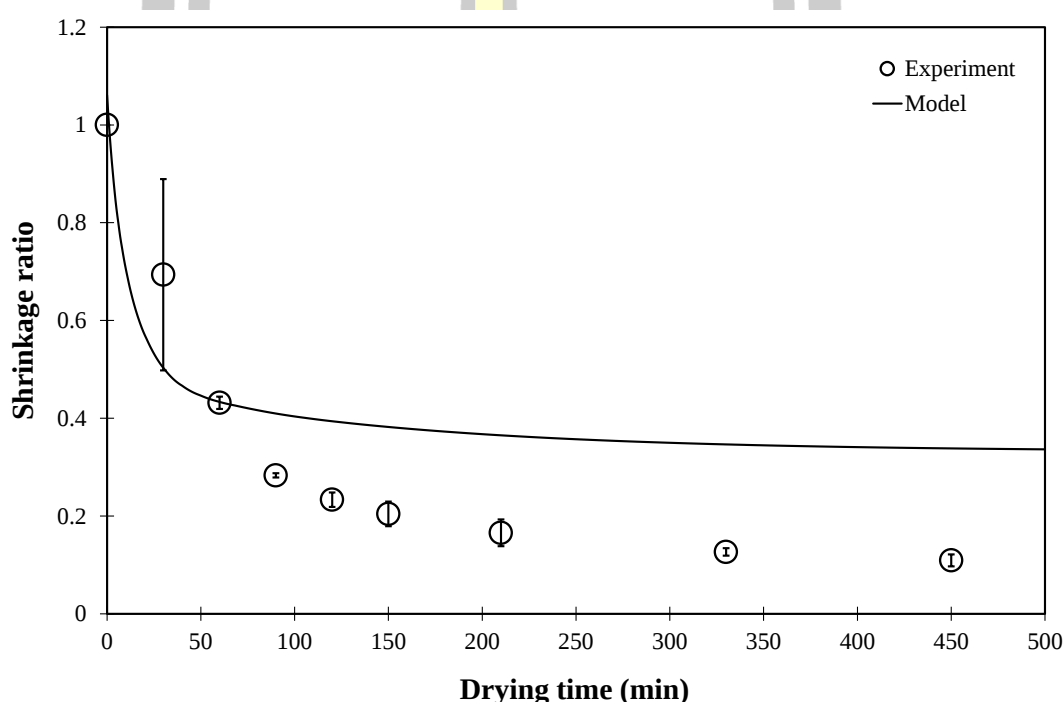
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบแห้งแครอทด้วยลมร้อนแบบสองขั้นตอนมีประโยชน์ในด้านการลดเวลาในการอบแห้งให้สั้นลง เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนต่างๆได้ แต่ในด้านการคงคุณภาพของวัตถุดิบหลังการอบแห้ง เช่น ปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทอบแห้งเหลือปริมาณน้อยกว่าการอบแห้งแบบคงที่ (Goula & Adamopoulos, 2010b)



ภาพประกอบที่ 42 เปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนในระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C

4.4.10 ผลการเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทจากแบบจำลองกับผลการทดลองของการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60°C

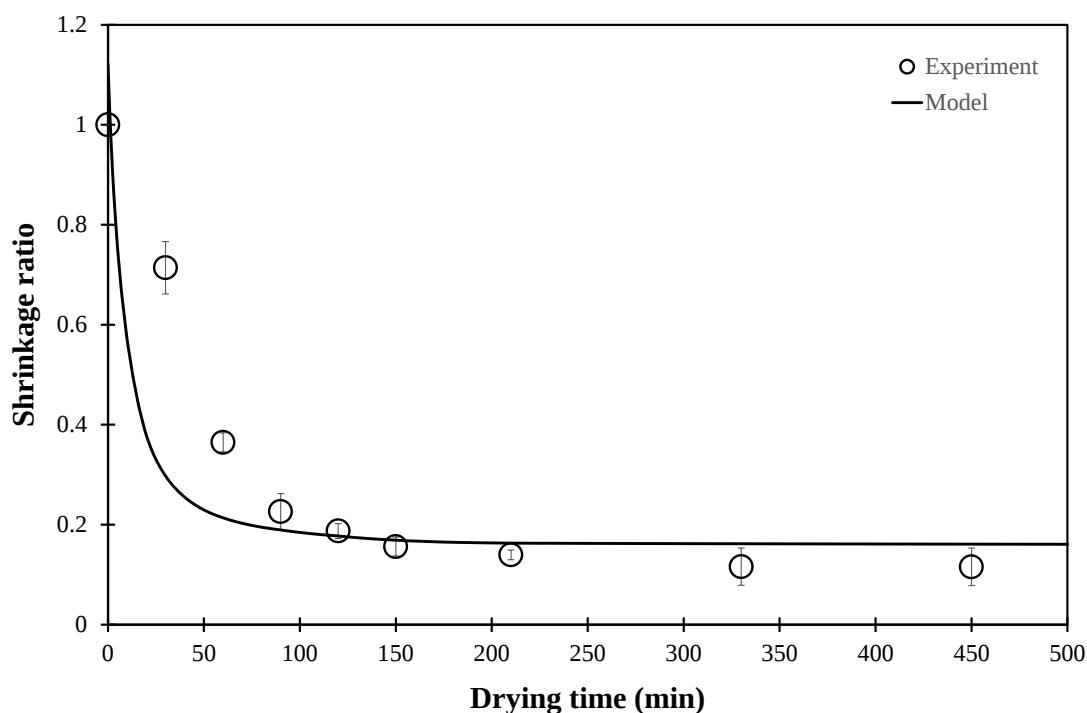
ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) ของการหดตัวในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 60°C ดังภาพประกอบที่ 43 พบว่า แบบจำลองมีค่าการหดตัวน้อยกว่าผลจากการทดลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9726 ค่า %P เท่ากับ 82.13% และค่า RMSE เท่ากับ 1.075196 ซึ่งเวลาการอบแห้งตั้งแต่วันที่ 0-50 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C กับผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน และมีอัตราส่วนการหดตัวลดลงประมาณ 0.4 แต่หลังจากการอบแห้งผ่านไปหลังจากวันที่ 50 จนถึงวันที่ 450 จะเห็นว่าอัตราส่วนการหดตัวไม่สอดคล้องกัน



ภาพประกอบที่ 43 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 60°C

4.4.11 ผลการเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทจากแบบจำลองกับผลการทดลองของการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 70°C

ภาพประกอบที่ 44 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทที่เวลาอบแห้ง 500 นาที ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 70°C เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) ผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9974 ค่า %P เท่ากับ 26.34% และค่า RMSE เท่ากับ 0.316327 ซึ่งระยะเวลาการอบแห้งช่วงแรกนาที่ 0 ถึง 100 อัตราส่วนการหดตัวลดลงประมาณ 0.2 และหลังจากการอบแห้งผ่านไปตั้งแต่วันที่ 100 ถึงนาที่ 500 อัตราส่วนมีค่าประมาณ 0.1 โดยเส้นแนวโน้มระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน

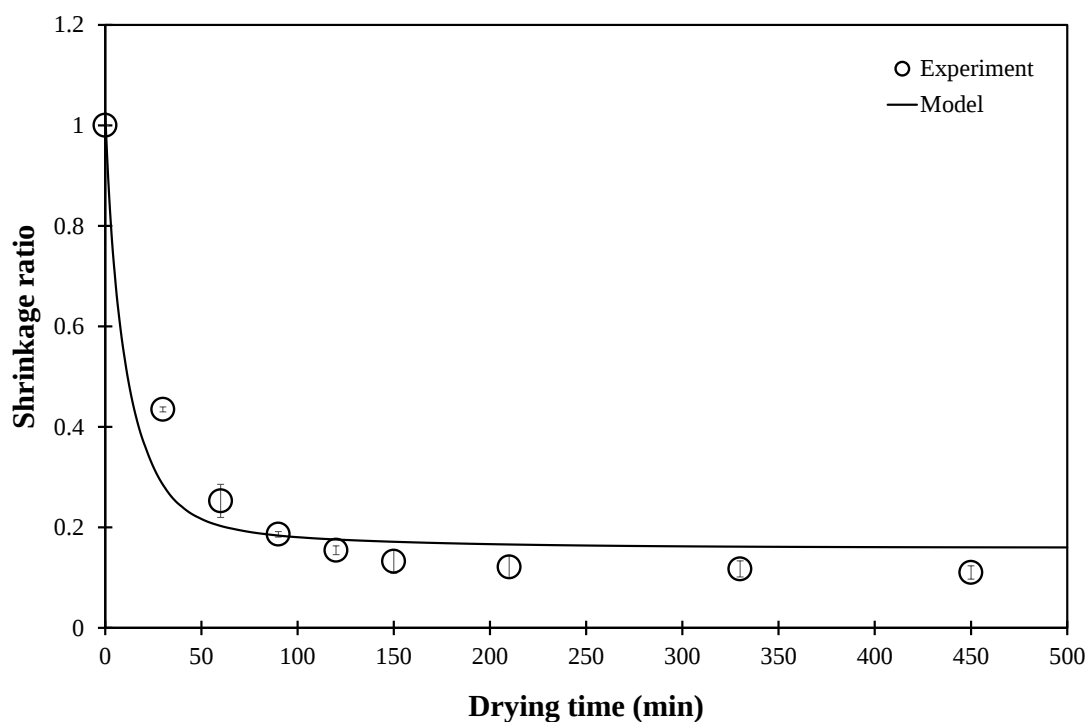


ภาพประกอบที่ 44 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 70°C

4.4.12 ผลการเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทจากแบบจำลองกับผลการทดลองของการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 80°C

ภาพประกอบที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทที่เวลาอบแห้ง 500 นาที ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 80°C เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ) และค่าที่ได้จากการทดลอง (วงกลม) ผลที่ได้จากการทดลองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9875 ค่า %P เท่ากับ 24.6113% และค่า RMSE เท่ากับ 0.288322 โดยช่วงเวลาการอบแห้ง 0-100 นาที เส้นแนวโน้มระหว่างการทดลองกับแบบจำลองไม่สอดคล้องกัน แต่หลังจากอบแห้งเวลา มากกว่า 100 นาทีขึ้นไปแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองมีค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น จะเห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการหดตัวของแครอทมากกว่าการอบแห้งแครอทที่ อุณหภูมิต่ำ และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า

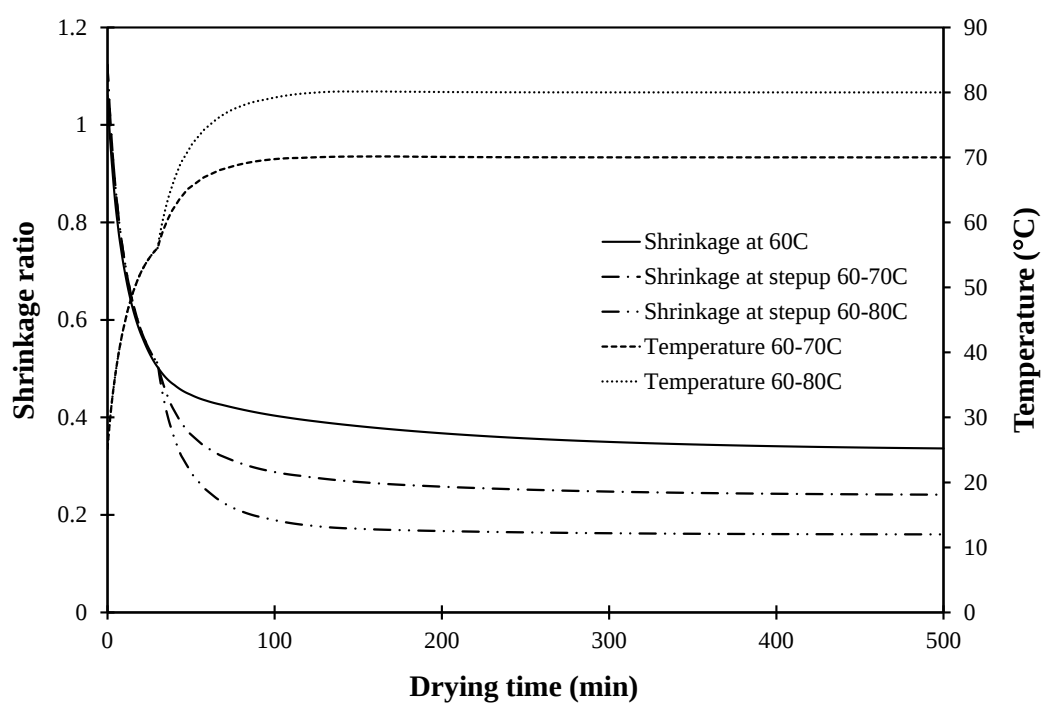
พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบที่ 45 การเปลี่ยนอัตราส่วนการหดตัวที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 80°C

4.4.13 ผลการเปรียบเทียบการหดตัวจากแบบจำลองการอบแห้งแครอทแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

จากภาพประกอบที่ 46 ผลการทำนายการหดตัวของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C พบว่า ค่าข้อมูลจากแบบจำลองการหดตัวของแครอทภายใต้สภาวะการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับผลการทำนายการหดตัวแครอทที่ได้จากการอบแห้งแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C แสดงให้เห็นว่าการหดตัวแครอทน้อยกว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C มีการหดตัวของแครอทมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C ตามลำดับ แต่ในด้านคุณภาพการหดตัวอาจจะมีข้อจำกัดในการคืนตัวของแครอทได้ เนื่องจากการระเหยของความชื้นสูงจะส่งผลทำให้เซลล์ภายในเนื้อแครอทถูกบีบอัดทำให้มีความพยุรน้อย (Mayor & Sereno, 2004)



ภาพประกอบที่ 46 เปรียบเทียบผลการทำนายการหดตัวของกรอบแห้งแบบสองขั้นตอนในระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างกันแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C กับค่าข้อมูลจากแบบจำลองที่อุณหภูมิการอบแห้งคงที่ 60°C



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพทางเคมี และกายภาพของวัสดุอาหาร โดยเปรียบเทียบผลของการอบแห้งแบบสองขั้นตอน กรณีศึกษาแครอทอบแห้งทรงลูกบาศก์ และเปรียบกับแบบจำลองของการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพทางเคมีและกายภาพของวัสดุอาหารที่มีต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ดังรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ผลการศึกษาการอบแห้ง

จากการเปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับระยะเวลาอบแห้งที่กระบวนการอบแห้งอุณหภูมิคงที่ 60, 70 และ 80°C เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการทดลองและแบบจำลอง พบว่าผลของแบบจำลองและการทดลองมีความใกล้เคียงกันมากพบว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ความชื้นจะลดลงอย่างมากโดยเฉพาะที่เวลาอบแห้ง 60 นาทีเป็นต้นไป และที่อุณหภูมิ 80°C ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่ำกว่า 60 และ 70°C โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 60, 70 และ 80°C มีค่า R^2 ที่สูงสุด ค่า RMSE และ χ^2 ที่ต่ำ สุดตามลำดับ เมื่อเปรียบอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งแครอทได้อย่างเหมาะสมคือ แบบจำลอง Page และ modified Page model เป็นต้น การอบแห้งแบบสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ จาก 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C ของแครอทขนาด 1 cm³ ที่จุดลดอุณหภูมิของปริมาณความชื้นเฉลี่ยต่างๆ อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นสั่นขึ้นเมื่อจุดลดอุณหภูมิที่ปริมาณความชื้นเฉลี่ยต่ำลง และทุกสภาวะของแบบลดอุณหภูมิจะมีระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวกว่าการอบแห้งคงที่ และที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C

5.1.2 ผลการศึกษาการหดตัว

ความสัมพันธ์ของการหดตัวกับระยะเวลาในการอบแห้งที่กระบวนการอบแห้งคงที่ 60, 70 และ 80°C เมื่อเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การหดตัวมากขึ้นนั่นคือ ปริมาตรแครอทก่อนอบแห้งต่อปริมาตรแครอทอบแห้ง (V/V_0) มีค่าน้อยลง ซึ่งกราฟจะมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการหดตัวของแครอทโดยเฉพาะในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นอุณหภูมิจากการอบแห้งมีผลต่อการหดตัวเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 80°C ที่ช่วง 30 นาทีแรก จะหดตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหดตัวของแครอทอบแห้งขนาด 1 cm³ โดยสมการของ Ratti (1994) ได้อธิบายถึงความเหมาะสมในการอบแห้งแครอทจะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก้อนแครอทและอิทธิพลของอุณหภูมิ การอบแห้งสองขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิความสัมพันธ์ของการหดตัวเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแตกต่างกัน เมื่อเวลาในการอบแห้งและอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การหดตัวมากขึ้นนั่น ซึ่งกราฟจะมี

แนวโน้มลดลง อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการหดตัวของแครอทโดยเฉพาะในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อการหดตัวเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 80°C

5.1.3 ผลการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

การศึกษาความสัมพันธ์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพกับระยะเวลาในการอบแห้งที่กระบวนการอบแห้งคงที่ 60, 70 และ 80°C อุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนลดลงมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการย่อยสลายเบต้าแคโรทีนมากขึ้น โดยสมการจลนศาสตร์ที่สามารถทำนายความเข้มข้นของปริมาณเบต้าแคโรทีน คือสมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่ 2 เนื่องจากสมการจลนพลศาสตร์อันดับ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.981-0.995 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในในสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

5.1.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองแครอทอบแห้งโดยใช้ไฟในเอลิเมนต์

การใช้แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์เทียบกับข้อมูลผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะการอบแห้งคงที่ 60, 70 และ 80 °C และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C ค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่การอบแห้งแบบขั้นตอนปริมาณความชื้นและเวลาในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิคงที่ ผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบลดอุณหภูมิผลการทำนายความชื้นของการอบแห้งแบบลดอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำแห้ง

การใช้แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทลดลงแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมการอบแห้งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความผิดพลาดหรือค่าความแตกต่างยังมีค่าสูงในช่วงเวลาเริ่มของการอบแห้ง แต่เมื่ออุณหภูมิและเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดก็ลดน้อยลง และผลการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการอบแห้งแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และมีปริมาณเบต้าแคโรทีนมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C แต่อย่างไรก็ตามการในการอบแห้งแบบขั้นตอนของทั้งสองช่วงอุณหภูมิพบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนของแครอทอบแห้งมีปริมาณลงเหลือน้อยกว่าการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60 °C

ผลการทำนายการหดตัวแครอทที่ได้จากการอบแห้งแบบขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C แสดงให้เห็นว่าการหดตัวแครอทน้อยกว่าการอบแห้งแบบขั้นตอน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 80°C มีการหดตัวของแครอทมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า 60 เป็น 70°C และการอบแห้งแบบคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองสามารถทำนายความขึ้นที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอบแห้ง และได้แบบจำลองที่เหมาะสมต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของของผลิตภัณฑ์อบแห้งแครอท ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อบแห้งผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ ได้

1. เปรียบเทียบการอบแห้งแครอทกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ เพื่อสร้างการตลาดเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าทางเกษตร
2. ศึกษาการแปรรูปผลิตภัณฑ์แครอทให้หลากหลายเป็นที่ต้องการของตลาดและเพิ่มโภชนาการทางอาหารด้านต่างๆ ให้มากขึ้น
3. พัฒนาระบบการอบแห้งแครอทให้เป็นแบบปิดเพื่อลดการปนเปื้อนสารเคมีและสิ่งแปลกปลอมที่จะส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคอีกด้วย



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- A.O.A.C. (1990). *Official Methods of Analysis*. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemist, Washington DC.
- Aral, S., & Beşe, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210, 577–584.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.128>
- Białobrzewski, I. (2006). Determination of the heat transfer coefficient by inverse problem formulation during celery root drying. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.011>
- Botelho, F. M., Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Martins, M. A., Magalhães, F. E. A., & Campos, S. C. (2011). Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(8), 845–852. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800012>
- Bourne, M. C. (2002). *Preface to the Second Edition* (Issue March).
- Brennan, J. G. (2006). *Agglomeration in Industry Freeze-Drying Plastic Packaging Materials for Food and Pharmaceuticals Handbook of Flavours Common Fragrance and Flavor Materials Coffee : Growing , Processing , Sustainable Production Agrochemicals*.
- Britton, G. (1995). *Structure and properties of carotenoids in relation to function*. 9, 1551–1558.
- Chandra Mohan, V. P., & Talukdar, P. (2010). Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(21–22), 4638–4650. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.029>

- Cuervo-Andrade, S. (2011). *Quality oriented drying of lemon balm (Melissa officinalis L.)*. 144. <http://d-nb.info/101140561X/34>
- Cuervo-Andrade, S. P., & Hensel, O. (2016). Stepwise drying of medicinal plants as alternative to reduce time and energy processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 138(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012014>
- Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.03.002>
- Devahastin, S., & Niamnuy, C. (2010). Modelling quality changes of fruits and vegetables during drying: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(9), 1755–1767. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02352.x>
- Donald, I. J., Cooper, S. R., & Conchie, S. M. (2014). An extended theory of planned behaviour model of the psychological factors affecting commuters' transport mode use. *Journal of Environmental Psychology*, 40, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.03.003>
- Estévez-Santiago, R., Olmedilla-Alonso, B., & Fernández-Jalao, I. (2016). Bioaccessibility of provitamin A carotenoids from fruits: Application of a standardised static in vitro digestion method. *Food and Function*, 7(3), 1354–1366. <https://doi.org/10.1039/c5fo01242b>
- Gomez, S., Lush, D., & Clements, M. (2004). Work placements enhance the academic performance of bioscience undergraduates. *Journal of Vocational Education and Training*, 56(3), 373–385. <https://doi.org/10.1080/13636820400200260>
- Gordon, C. J., Fogelson, L., & Stead, A. G. (1989). Temperature regulation following nickel intoxication in the mouse: Effect of ambient temperature. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C, Comparative*, 92(1), 73–76. [https://doi.org/10.1016/0742-8413\(89\)90205-3](https://doi.org/10.1016/0742-8413(89)90205-3)

- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010a). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(2), 342–351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.12.001>
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010b). Kinetic models of β -carotene degradation during air drying of carrots. *Drying Technology*, 28(6), 752–761. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.482690>
- Haq, R. ul, Kumar, P., & Prasad, K. (2018). Effect of microwave treatment on dehydration kinetics and moisture diffusivity of Asiatic Himalayan black carrot. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.004>
- Holland, P. M., Abramson, R. D., Watson, R., & Gelfand, D. H. (1991). Detection of specific polymerase chain reaction product by utilizing the 5' $\rightarrow$ 3' exonuclease activity of *Thermus aquaticus* DNA polymerase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(16), 7276–7280. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.16.7276>
- Jomlapelatikul, A., Wiset, L., Duangkhamchan, W., & Poomsa-ad, N. (2016). Model-based investigation of heat and mass transfer for selecting optimum intermediate moisture content in stepwise drying. *Applied Thermal Engineering*, 107, 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.064>
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L. G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.007>
- Koua, B. K., Koffi, P. M. E., & Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.002>

- Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (2003). Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 391–403. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00498-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00498-3)
- Krug, H. (1981). *Handbook for vegetable growers*, 2. Aufl. John Wiley & Sons, New York.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced Drying Technologies*.
- Kumara Swamy, M., Sudipta, K. M., Jayanta, K., & Balasubramanya, S. (2015). The green synthesis, characterization, and evaluation of the biological activities of silver nanoparticles synthesized from *Leptadenia reticulata* leaf extract. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 5(1), 73–81. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0293-6>
- Liu, Y., Hou, Z., Yang, J., & Gao, Y. (2015). Effects of antioxidants on the stability of β -Carotene in O/W emulsions stabilized by Gum Arabic. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3300–3311. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1380-0>
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373–386. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)
- Nakhaee, A., Bokaeian, M., Saravani, M., Farhangi, A., & Akbarzadeh, A. (2009). Attenuation of oxidative stress in streptozotocin-induced diabetic rats by *Eucalyptus globulus*. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 24(4), 419–425. <https://doi.org/10.1007/s12291-009-0075-1>
- Olives Barba, A. I., Cámara Hurtado, M., Sánchez Mata, M. C., Fernández Ruiz, V., & López Sáenz De Tejada, M. (2006). Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β -carotene in vegetables. *Food Chemistry*, 95(2), 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.028>
- Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91–105. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90125-2)

- Sahdev, R. K., Kumar, M., & Dhingra, A. K. (2016). A review on applications of greenhouse drying and its performance. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(2), 395–412.
- Sandeep Kumar. (2012). Antimicrobial activity of *Salvadora oleoides* Decne. against some microorganisms. *Journal of Medicinal Plants Research*, 6(14), 2754–2760. <https://doi.org/10.5897/jmpr11.763>
- Schalch, W., Cohn, W., Barker, F. M., Köpcke, W., Mellerio, J., Bird, A. C., Robson, A. G., Fitzke, F. F., & van Kuijk, F. J. G. M. (2007). Xanthophyll accumulation in the human retina during supplementation with lutein or zeaxanthin - the LUXEA (LUtein Xanthophyll Eye Accumulation) study. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 458(2), 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2006.09.032>
- Sharma, H. K., Kaur, J., Sarkar, B. C., Singh, C., & Singh, B. (2009). Effect of pretreatment conditions on physicochemical parameters of carrot juice. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01462.x>
- Souraki, Y., Ashrafi, M., Karimaie, H., & Torsaeter, O. (2012). Experimental Analyses of Athabasca Bitumen Properties and Field Scale Numerical Simulation Study of Effective Parameters on SAGD Performance. *Energy and Environment Research*, 2(1). <https://doi.org/10.5539/eer.v2n1p140>
- Suvarnakuta, P., Chaweerungrat, C., & Devahastin, S. (2011). Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthonenes in mangosteen rind. *Food Chemistry*, 125(1), 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.015>
- Westwater, J. W., & Drickamer, H. G. (1957). The Mathematics of Diffusion. *Journal of the American Chemical Society*, 79(5), 1267–1268. <https://doi.org/10.1021/ja01562a072>
- White, G. L., & Kight, T. D. (1984). Misattribution of arousal and attraction: Effects of salience of explanations for arousal. *Journal of Experimental Social Psychology*, 20(1), 55–64. [https://doi.org/10.1016/0022-1031\(84\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0022-1031(84)90012-X)

Yadollahinia, A., & Jahangiri, M. (2009). Shrinkage of potato slice during drying. *Journal of Food Engineering*, 94(1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.028>

กรมอนามัย. (2535). ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย. กองโภชนาการ.กระทรวงสาธารณสุข. โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก, กรุงเทพฯ.

กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์. (2535). กระบวนการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: กรุงเทพฯ.

โครงการหลวง. (2533). คู่มือส่งเสริมการปลูกพืชผักบนที่สูงในประเทศไทย. ดารารัตน์การพิมพ์: เชียงใหม่.

จารุวรรณ กุลวิศว สมเกียรติ ประญารากร และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2550). ผลของอุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 30(4), 611–621.

นพวรรณ สมิตินันท์ และณัฐา โคกเกษม. (2532). ผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากแครอทโครงการการเรียนรู้การสอนเพื่อส่งเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บรมพิชัยชาติกุล, ช. (2555). เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 35(2), 269–284.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2545). ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรรณนภา ไชยเกล้า และ ศรัณญา วอขวา. (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เต้าหู้ไข่ผสมน้ำแครอทเสริมแป้งข้าวโพด. 49(2), 509–512.

ฤทธิชัย อัสวรานันท์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์, ด. อ. (2554). คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 18(1), 8–14.
www.tsae.asia

วิภาดา แซ่เล่า และคณะ. (2562). ผลของโปรตีนไอโซเลตจากถั่วเหลืองที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและซีแซนทีนสูง เพื่อสุขภาพสายตาในผู้ใหญ่และผู้สูงอายุ. *วารสารการพยาบาล การสาธารณสุขและการศึกษาวิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนีนี พะเยา*, 20(2), 119.

วีไล รังสาทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
เกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ศศิเกษม ทองยงค์และพรรณิ เดชกำแหง. (2530). เคมีอาหารเบื้องต้น .กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ศิริวรรณ สุทธจิตต์. (2550). วิตามิน.พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : The Knowledge Center.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ : สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

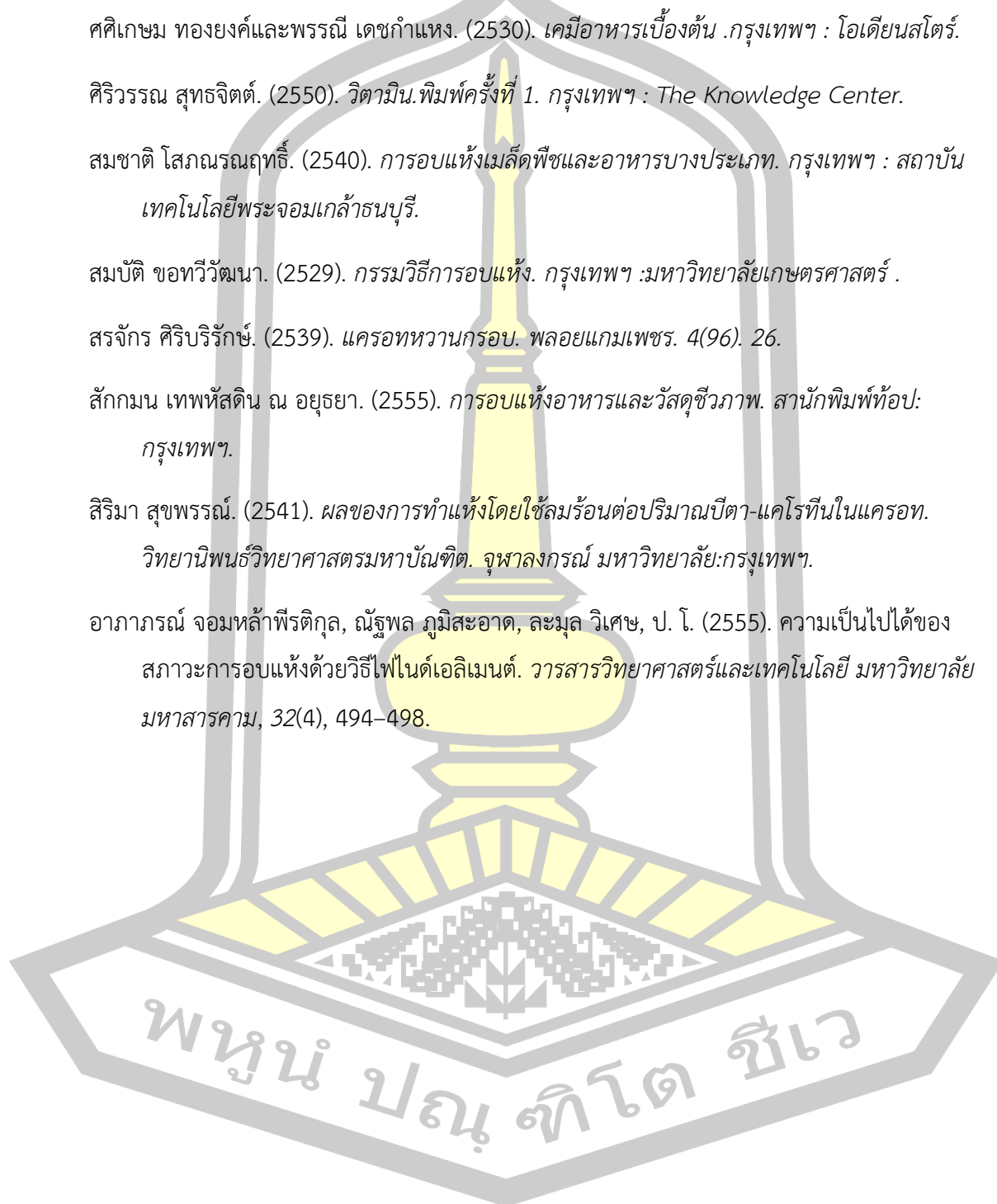
สมบัติ ขอทวีวัฒนา. (2529). กรรมวิธีการอบแห้ง. กรุงเทพฯ :มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ .

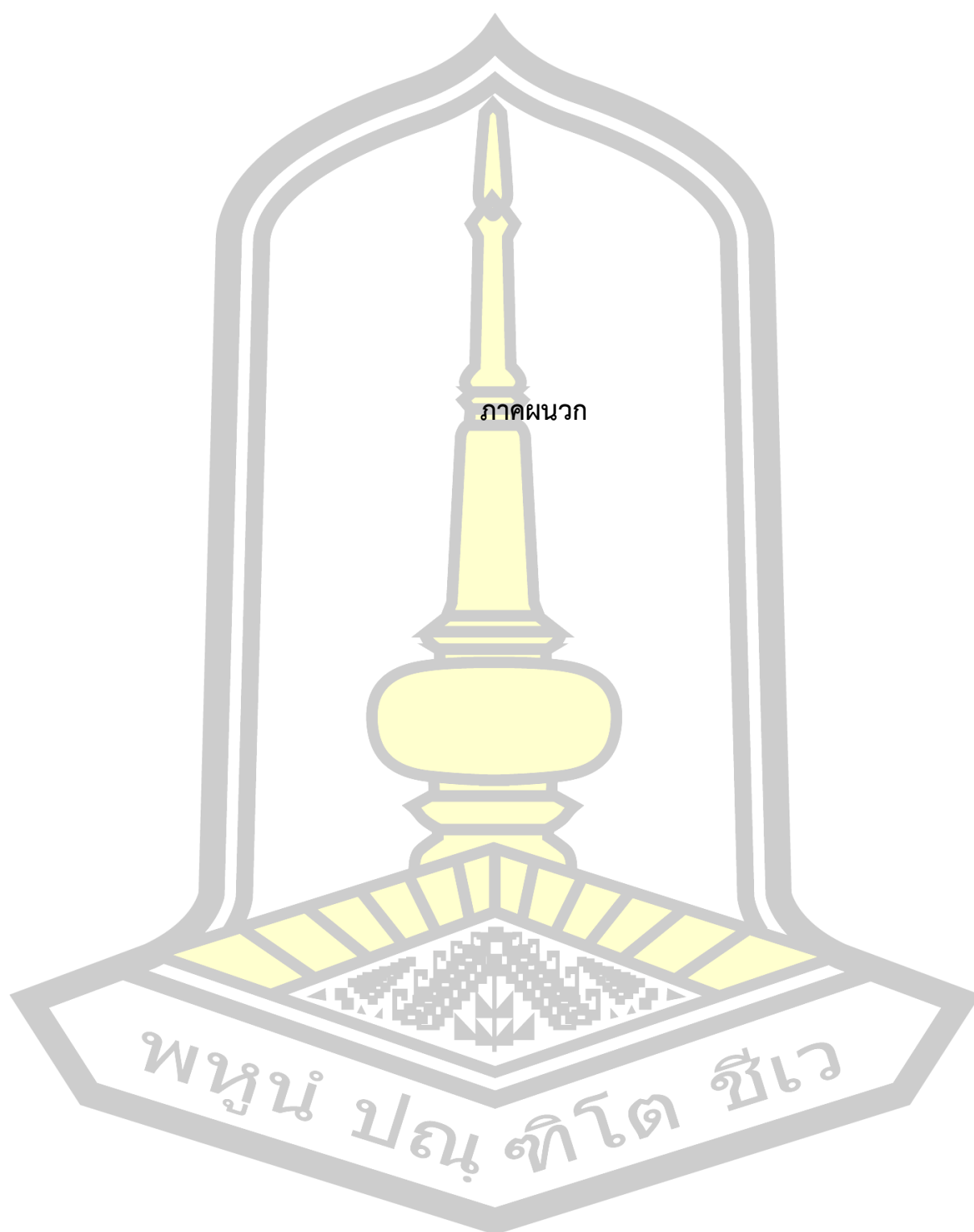
สรจักร ศิริบริรักษ์. (2539). แครอทหวานกรอบ. พลอยแกมเพชร. 4(96). 26.

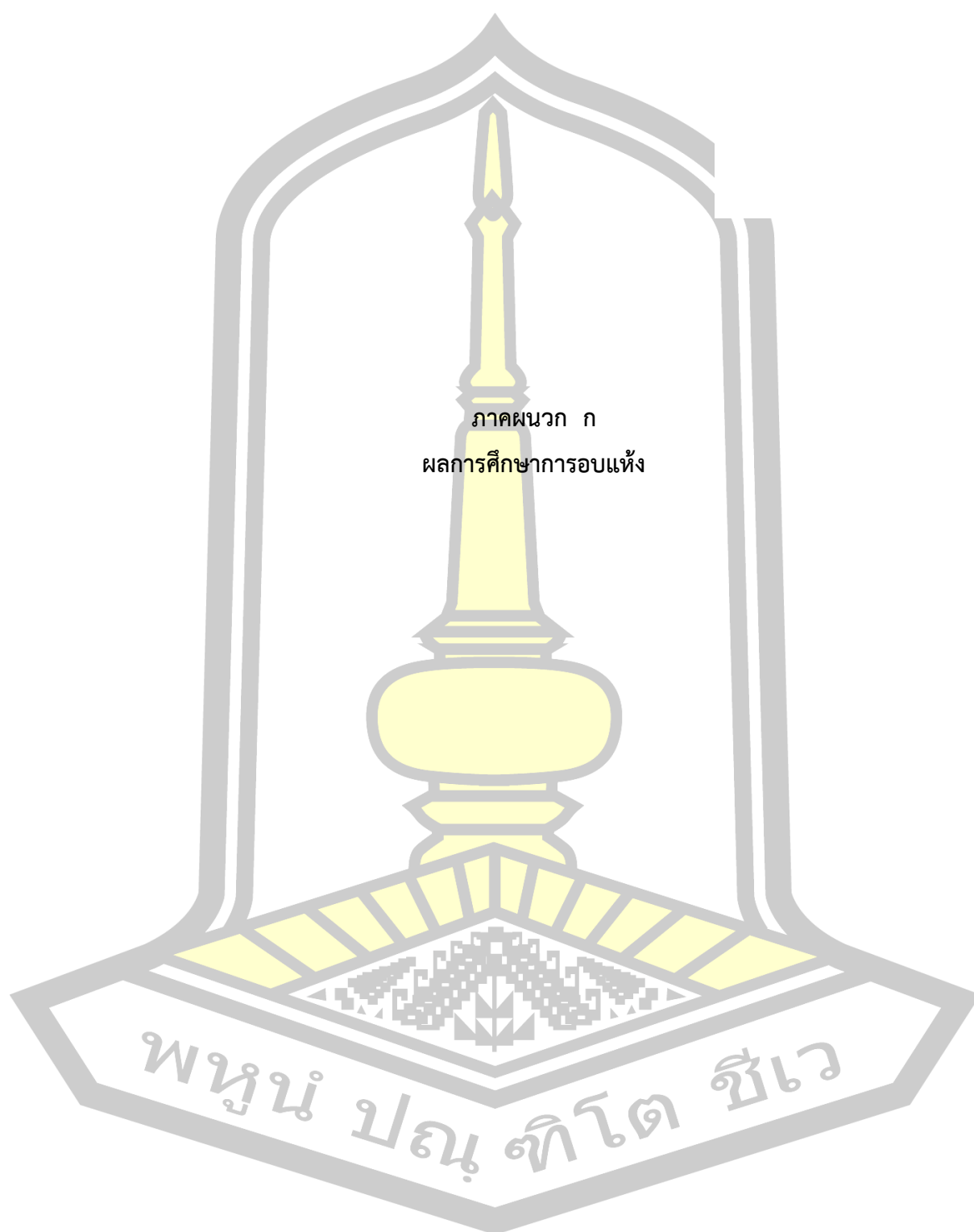
สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. สำนักพิมพ์ท็อป:
กรุงเทพฯ.

สิริมา สุขพรรณ. (2541). ผลของการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนต่อปริมาณปีตา-แคโรทีนในแครอท.
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย:กรุงเทพฯ.

อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติกุล, ณัฐพล ภูมิสะอาด, ละมุล วิเศษ, ป. โ. (2555). ความเป็นไปได้ของ
สภาวะการอบแห้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
มหาสารคาม, 32(4), 494–498.

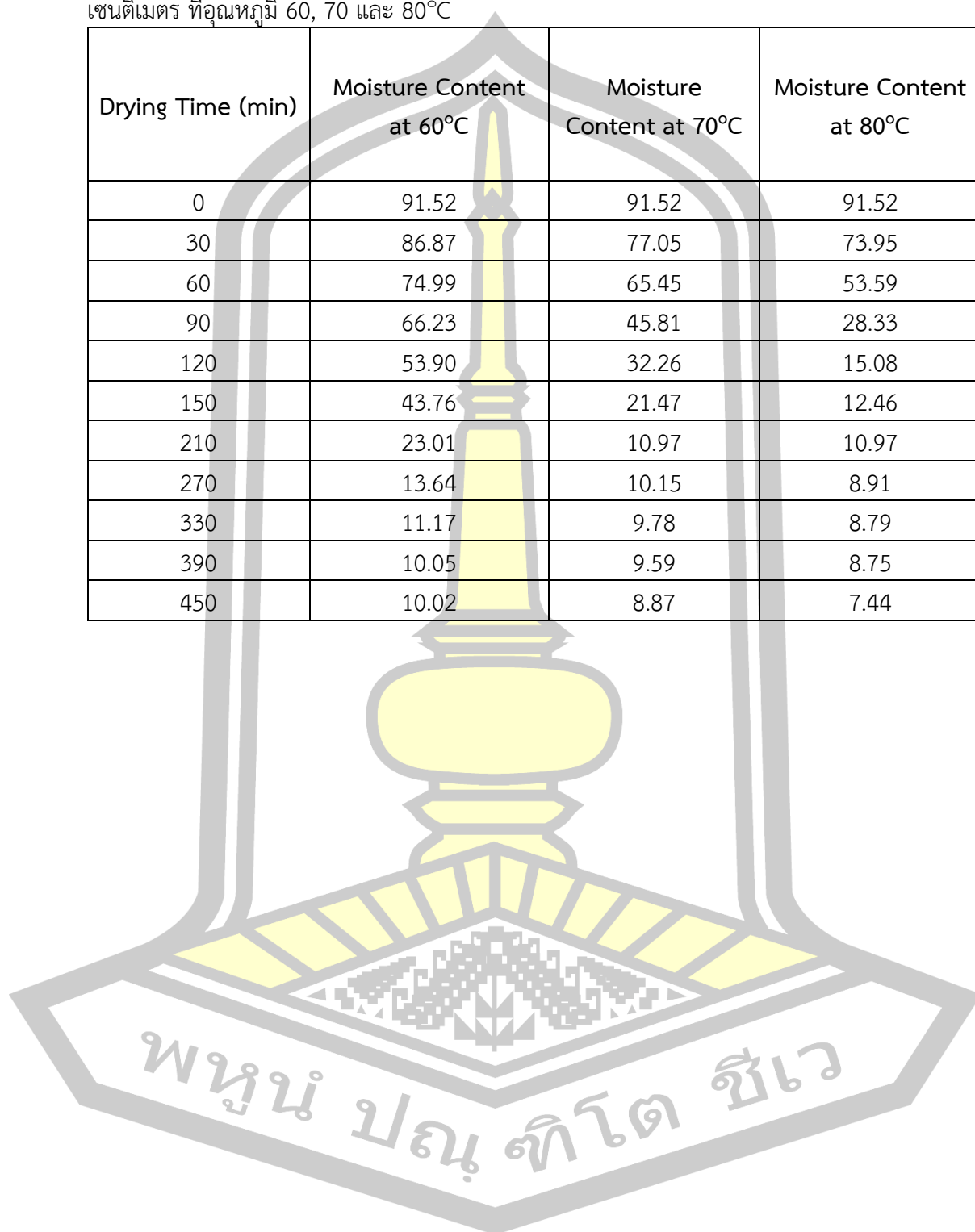






ตารางที่ ก.1 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างการทดลองของแครอทขนาด 1 ลูกบาศก์ เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

Drying Time (min)	Moisture Content at 60°C	Moisture Content at 70°C	Moisture Content at 80°C
0	91.52	91.52	91.52
30	86.87	77.05	73.95
60	74.99	65.45	53.59
90	66.23	45.81	28.33
120	53.90	32.26	15.08
150	43.76	21.47	12.46
210	23.01	10.97	10.97
270	13.64	10.15	8.91
330	11.17	9.78	8.79
390	10.05	9.59	8.75
450	10.02	8.87	7.44

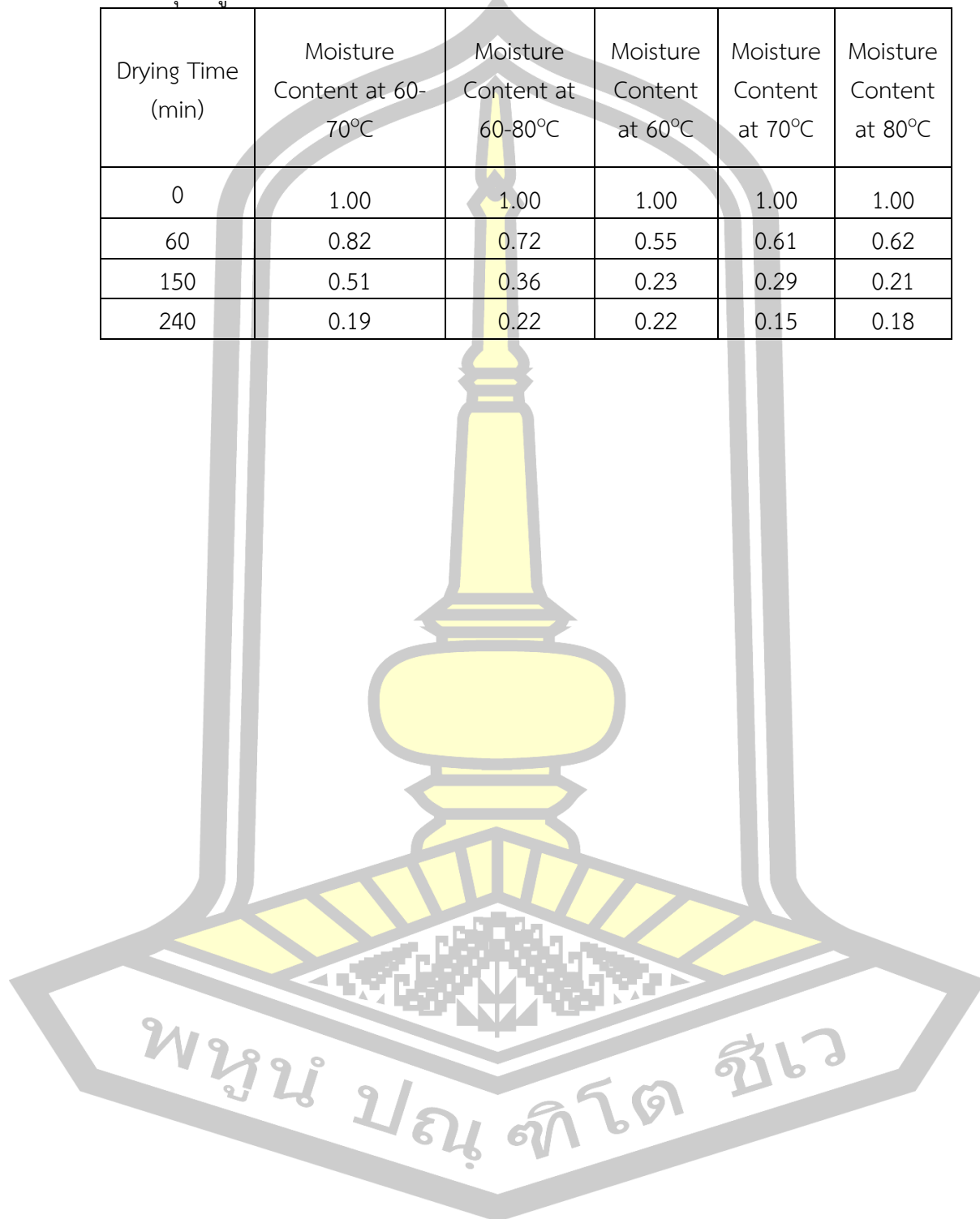


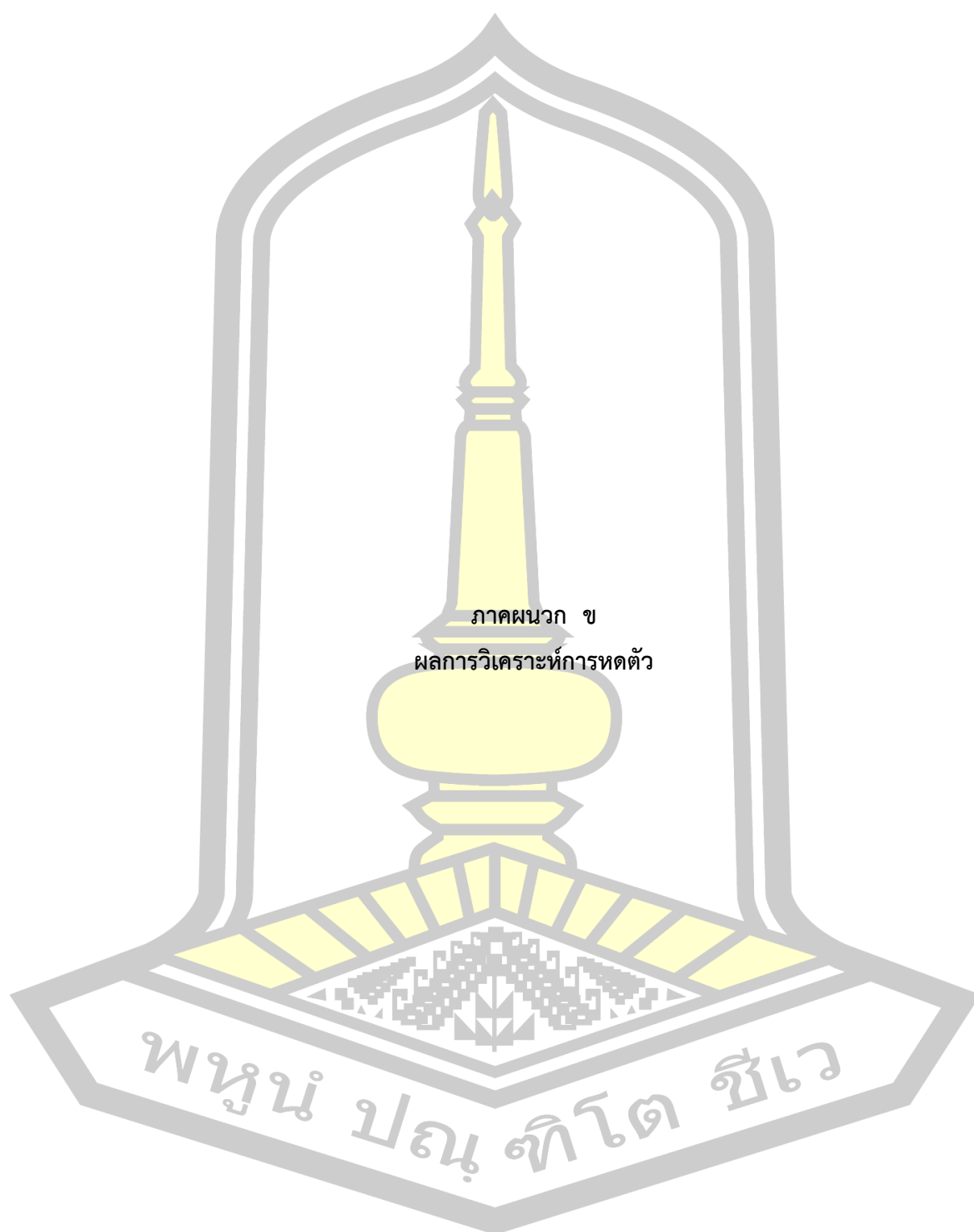
ตารางที่ ก.2 ผลของสมการแบบจำลองการอบแห้งแครอท

Model	Correlation	60°C	70°C	80°C
Lewis	R^2	0.99543	0.99257	0.99543
	χ^2	0.00046	0.00065	0.00014
	RMSE	0.02052	0.02440	0.01147
	k	0.56829	1.02421	1.28275
Page	R^2	0.99612	0.99900	0.99612
	χ^2	0.00044	9.82×10^{-5}	3.76×10^{-5}
	RMSE	0.01892	0.00896	0.00555
	k	0.53566	1.14821	1.34413
	n	0.53566	0.70908	0.79351
Modified Page	R^2	0.99612	0.99900	0.99612
	χ^2	0.00044	9.82×10^{-5}	3.77×10^{-5}
	RMSE	0.01892	0.00896	0.00555
	k	0.55986	1.21520	1.45166
	n	1.07616	0.70908	0.79351
Henderson and Pabis	R^2	0.99558	0.99269	0.99558
	χ^2	0.00050	0.00072	0.00016
	RMSE	0.02019	0.02421	0.01145
	a	1.01153	0.98986	0.99764
	k	0.57414	1.01528	1.28060
Logarithmic	R^2	0.99558	0.99503	0.99558
	χ^2	0.00056	0.00055	5.15×10^{-5}
	RMSE	0.02015	0.01995	0.00612
	a	1.01003	0.97546	0.98696
	k	0.57791	1.08397	1.33473
	c	0.00209	0.01765	0.01175
Two term model	R^2	0.99558	0.99269	0.99558
	χ^2	0.00064	0.00092	0.00021
	RMSE	0.02019	0.02421	0.01145
	a	0.50577	0.49493	0.49882
	K0	0.57414	1.01528	1.28060
	b	0.50577	0.49493	0.49882
	K1	0.57414	1.01528	1.28060
Midilli	R^2	0.99658	0.70797	0.99658
	χ^2	0.00049	0.03677	0.04701
	RMSE	0.01775	0.15296	0.17297
	a	1.00402	0.65739	1.28060
	k	0.53417	0.43955	0.46584
	n	1.10730	0.00002	0.000002
	b	0.00133	-0.06082	-0.063446

ตารางที่ ก.3 การอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ระยะเวลาอบแห้งที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

Drying Time (min)	Moisture Content at 60-70°C	Moisture Content at 60-80°C	Moisture Content at 60°C	Moisture Content at 70°C	Moisture Content at 80°C
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60	0.82	0.72	0.55	0.61	0.62
150	0.51	0.36	0.23	0.29	0.21
240	0.19	0.22	0.22	0.15	0.18





ตารางที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ ของแครอท ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิตอบแห้ง 60, 70 และ 80°C

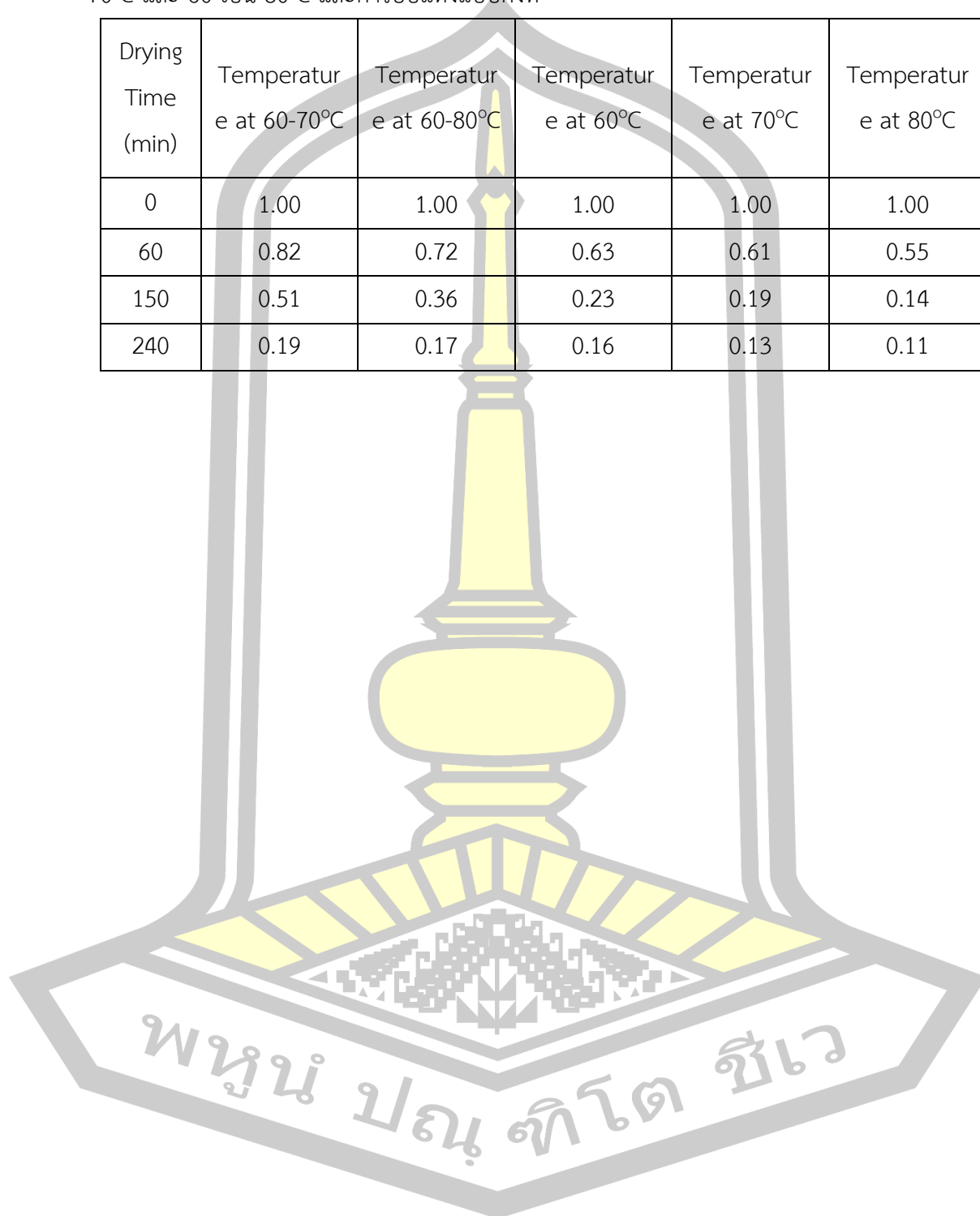
เวลา (นาท)	การหดตัวที่อุณหภูมิ 60°C	การหดตัวที่อุณหภูมิ 70°C	การหดตัวที่อุณหภูมิ 80°C
0	1	1	1
30	0.806402	0.714074	0.434906
60	0.431484	0.364694	0.252697
90	0.283165	0.226081	0.186251
120	0.233356	0.187303	0.154404
150	0.204268	0.156213	0.132312
210	0.162475	0.139673	0.121361
330	0.126463	0.11601	0.117296
450	0.109079	0.11565	0.110394

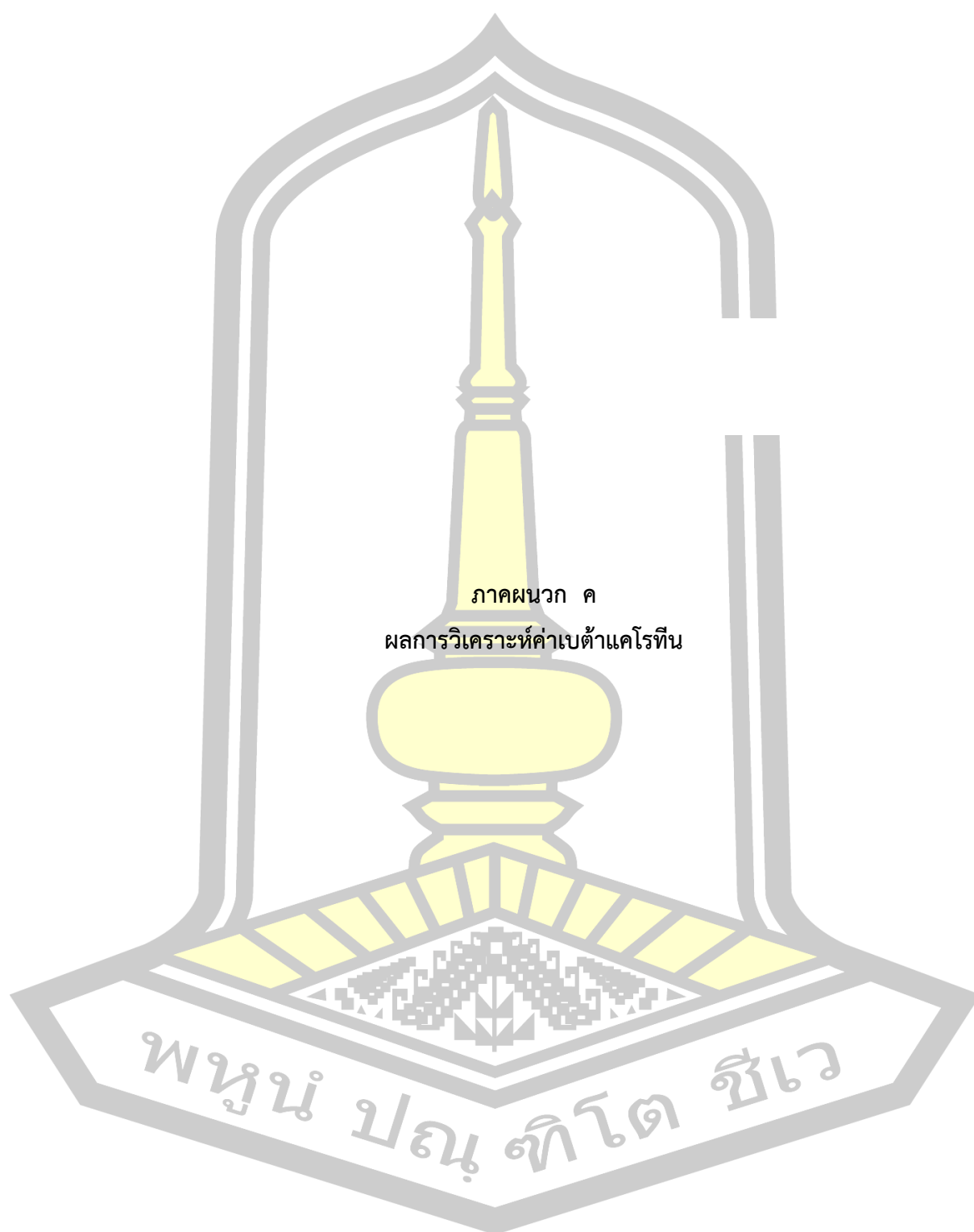
ตารางที่ ข.2 ผลลัพธ์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหดตัวของแครอทอบแห้ง ขนาด 1 cm³

Models	ผลลัพธ์ทางสถิติ	60°C	70°C	80°C
Lozano (1980)	R ²	0.97770	0.88920	0.98770
	χ^2	0.00260	0.01246	0.00118
	RMSE	0.04498	0.09843	0.03024
Lozano (1983)	R ²	0.97778	0.98686	0.99790
	χ^2	0.00453	0.02195	0.00035
	RMSE	0.04486	0.03390	0.01252
Ratti (1994)	R ²	0.99760	0.99670	0.99840
	χ^2	0.00111	0.10103	0.00073
	RMSE	0.02485	0.23691	0.02009
Vazquez (1990)	R ²	0.97778	0.88840	0.98674
	χ^2	0.00453	0.02195	0.00222
	RMSE	0.04486	0.09876	0.03141
Mayor and Sereno (2004)	R ²	0.99370	0.98530	0.99820
	χ^2	0.00086	0.00193	0.03418
	RMSE	0.02392	0.03587	0.15094

ตารางที่ ข.3 การเปรียบเทียบการหดตัวของแครอทอบแห้งแบบขั้นตอนแบบเพิ่มอุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C และการอบแห้งแบบคงที่

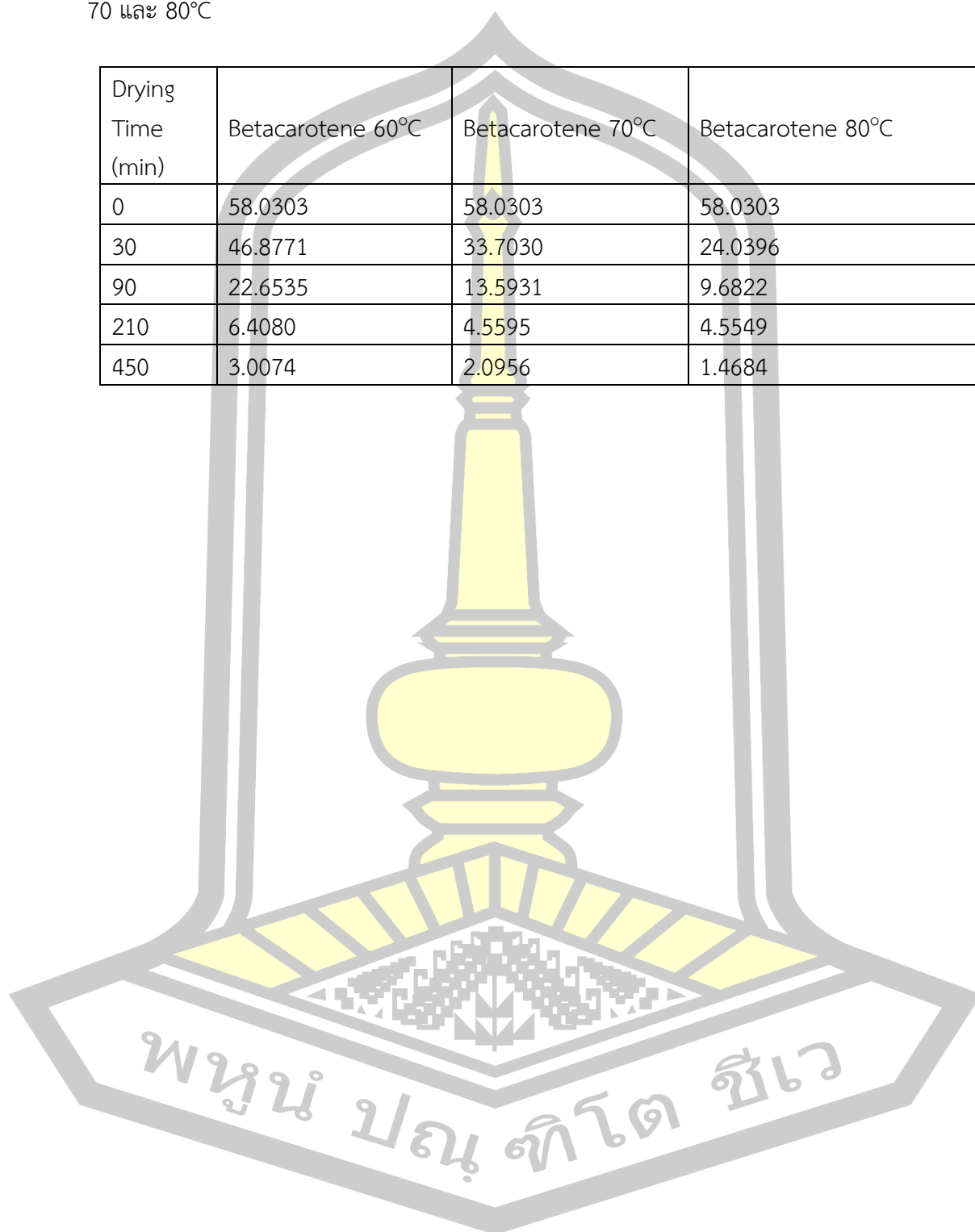
Drying Time (min)	Temperature at 60-70°C	Temperature at 60-80°C	Temperature at 60°C	Temperature at 70°C	Temperature at 80°C
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60	0.82	0.72	0.63	0.61	0.55
150	0.51	0.36	0.23	0.19	0.14
240	0.19	0.17	0.16	0.13	0.11

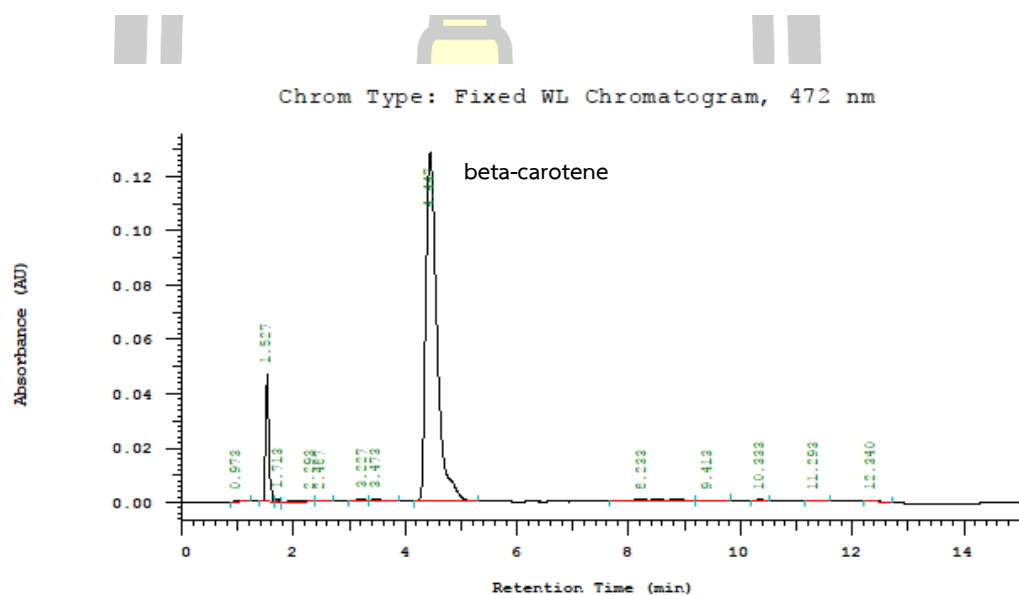
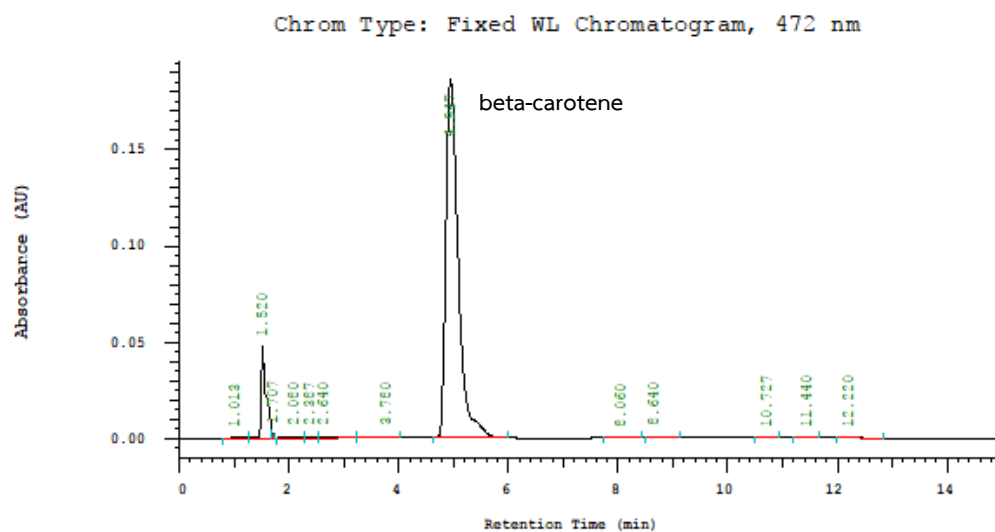




ตารางที่ ค.1 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนเป็นฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C

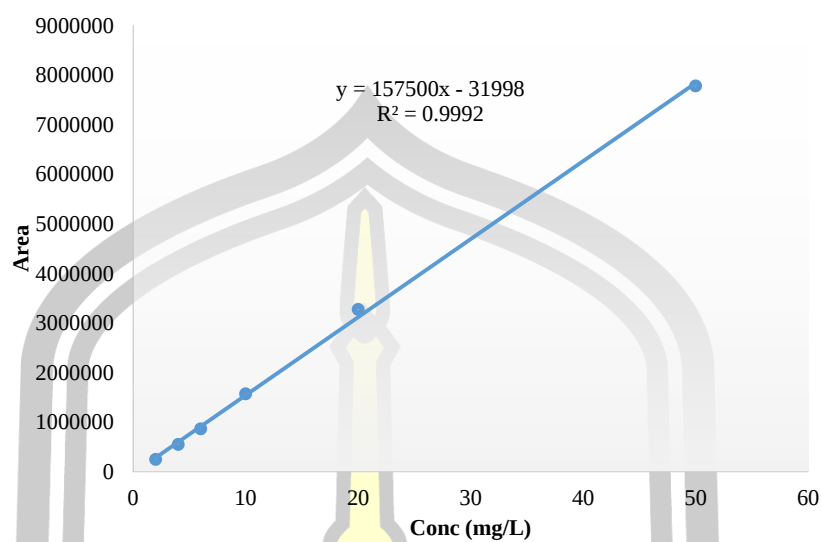
Drying Time (min)	Betacarotene 60°C	Betacarotene 70°C	Betacarotene 80°C
0	58.0303	58.0303	58.0303
30	46.8771	33.7030	24.0396
90	22.6535	13.5931	9.6822
210	6.4080	4.5595	4.5549
450	3.0074	2.0956	1.4684



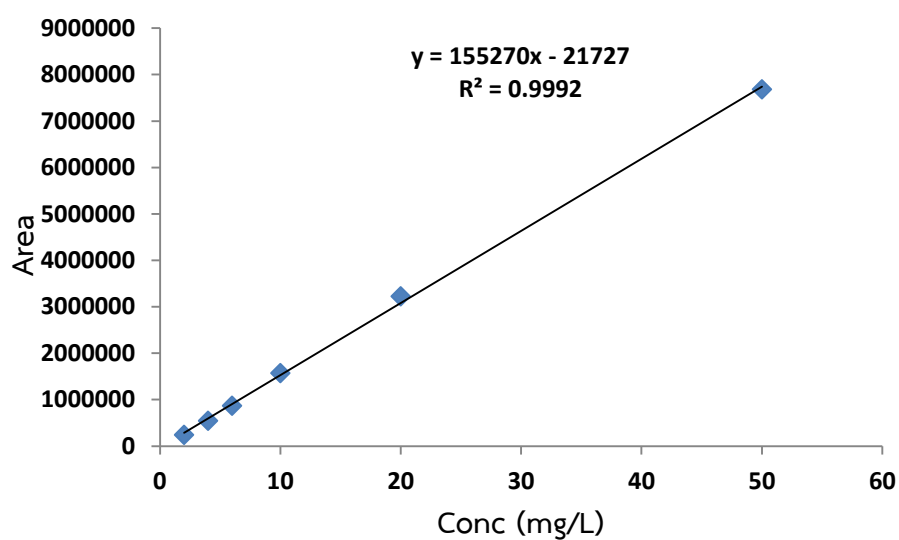


ภาพประกอบที่ ค.1 โครมาโทแกรมของ beta-carotene ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดย Retention time คือ นาทีที่ 4.447 โดย Detector เป็น Photodiode array detector ความยาวคลื่น 472 นาโนเมตร

พหุ ประถม วิชา



ภาพประกอบที่ ค.2 มาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารเบต้าแคโรทีนทั้งหมด



ภาพประกอบที่ ค.3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารเบต้าแคโรทีนทั้งหมด



ตารางที่ ค.2 พารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองจลนศาสตร์ของปริมาณเบต้าแคโรทีน

Temperature	Statistical parameters	0 th	0.5 th	1 st	1.5 th	2 nd
60 °C	R ²	0.70370	0.8076	0.90490	0.97090	0.99010
	χ^2	0.00144	0.11060	0.01343	0.19635	0.17653
	RMSE	0.20102	0.25760	0.08977	0.34324	0.32545
70 °C	R ²	0.57890	0.72300	0.87350	0.97120	0.99580
	χ^2	0.09198	0.13082	0.06006	0.22954	0.04177
	RMSE	0.23492	0.28017	0.18983	0.37111	0.15831
80 °C	R ²	0.48380	0.66750	0.88080	0.99240	0.98190
	χ^2	0.10992	0.15278	0.08337	0.25417	0.07401
	RMSE	0.25681	0.30277	0.22366	0.39052	0.21073

ตารางที่ ค.3 การเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนแบบสองขั้นตอน เป็นฟังก์ชันของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 เป็น 70°C และ 60 เป็น 80°C

Drying Time (min)	Temperature at 60-70°C	Temperature at 60-80°C	Temperature at 60°C	Temperature at 70°C	Temperature at 80°C
0	56.919	56.919	56.919	56.919	56.919
60	42.228	35.9425	25.0098	19.5637	17.0721
150	20.364	19.4612	20.7459	15.1407	11.4067
240	8.766	9.2044	7.9188	5.4912	4.1102

พหุ ประสิทธิภาพ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววันวิสาข์ สุขสำราญ
วันเกิด	12 กรกฎาคม 2531
สถานที่เกิด	89 หมู่ 6 บ้านคำจำปา ต.บ้านโพธิ์ อ.พนมพิสัย จ.หนองคาย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	777/179 หมู่บ้านชิมโบลิค ต.จอหอ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30310
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นักวิชาการศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 340 ถ.สุนทรารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบตง “วีระราษฎร์ประสาน” อำเภอเบตง จังหวัดยะลา พ.ศ. 2554 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยทักษิณ พ.ศ. 2564 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ไม่มี
ผลงานวิจัย	Wanwisa Suksamran, Jakraphan Duangkhamchan, Wasan Duangkhamchan and Kriangsak Banlue (2019). Kinetics Study on Hot-Air Drying Carrot Cubes. Conference : The 6th International Conference on Food Agriculture & Biotechnology (ICoFAB 2019), 26-27 August 2019. Conference Room, Santarat Takasila convention Hotel, Faculty of Technology, Mahasarakham University.