

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสถานะสูญญากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิ  
เมนต์

**A STUDY OF HEAT TRANSFER IN DRYING CHAMBER UNDER VACUUM  
CONDITION USING FINITE ELEMENT METHOD**

ประสิทธิ์ โสภา

**PRASIT SOPHA**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2553

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสภาวะสูญญากาศด้วยวิธีไฟไนท์เอลิ  
เมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2553

**A STUDY OF HEAT TRANSFER IN DRYING CHAMBER UNDER VACUUM  
CONDITION USING FINITE ELEMENT METHOD**



**PRASIT SOPHA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN MECHANICAL DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**2010**

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ข้าพเจ้ารับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายประสิทธิ์ โสภา



COPYRIGHT ©2010

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ลิขสิทธิ์ พ.ศ.2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสภาวะสุญญากาศ  
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF HEAT TRANSFER IN DRYING CHAMBER  
UNDER VACUUM CONDITION USING FINITE ELEMENT  
METHOD

ชื่อนักศึกษา

นายประสิทธิ์ โสภา

รหัสประจำตัว

115070403003-2

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์

วัน เดือน ปี ที่สอบ

12 กันยายน 2553

สถานที่สอบ

ห้องประชุมมีฤทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร.มนูศักดิ์ จานทอง)

.....กรรมการ

(ดร. กฤษณากร บุคดาจันทร์)

.....กรรมการ

(ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์)

.....กรรมการ

(ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสภาวะสุญญากาศด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
ชื่อนักศึกษา	นายประสิทธิ์ โสภา
รหัสประจำตัว	11507043003-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้งกับวัสดุเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ

เงื่อนไขการศึกษาคือ วัสดุที่ใช้เป็นพริกพันธุ์จินดา ความดันสุญญากาศ -15 cmHg. วิธีการศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนจะใช้โปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองให้ความร้อนแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในศึกษาการอบแห้งคือ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นแบบจำลองที่มีการกระจายของอุณหภูมิเหมาะสมที่สุด นำค่าที่ได้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้งกับวัสดุเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศ วิธีการศึกษาจะทดสอบที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในศึกษาการอบแห้ง คือ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยวัดอุณหภูมิของผนังและภายในห้องอบแห้งโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิ 16 จุด หาค่าความชื้นสุดท้ายของพริก ผลการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผนังมีการกระจายตัวดีค่าความชื้นสุดท้ายของพริกแห้งโดยเฉลี่ย คือ 13.37 % (wb.) ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของ มอก. คือ ความชื้นสุดท้ายต้องไม่เกิน 14 % (wb.) และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริก 4.50 %

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน, วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์, การอบแห้งสุญญากาศ

**Thesis Title** : A STUDY OF HEAT TRANSFER IN DRYING CHAMBER UNDER VACUUM CONDITION USING FINITE ELEMENT METHOD

**Student Name** : Mr.Prasit Sopha

**Student ID** : 11507043003-2

**Degree Award** : Master of Engineering

**Study Program** : Mechanical Engineering

**Academic Year** : 2010

**Thesis Advisor** : Dr.Pipat Pramot

### ABSTRACT

This thesis aims to study model of heat transfer using the finite element method and study heat transfer of walls of dryer and agricultural materials in the dryer vacuum system

Experiments were performed on Jinda chilli under the vacuum pressure of  $-15$  cmHg. Finite element program is used as a method to analyse heat transfer model and also a theoretical analysis by specified the temperature range of the heating model at  $70^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  and  $90^{\circ}\text{C}$  respectively. The duration of drying are 6 hours, 7 hours and 8 hours, respectively. All conditions are based on the selected standard dryer.

The results show that the heat transfer model at  $80^{\circ}\text{C}$  with 7 hours of heating time is the best suitable distribution of heat transfer compared to the other models. Base on simulation conditions, the experimental conditions for the vacuum drying oven are also  $70^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  and  $90^{\circ}\text{C}$  respectively. Also, time duration of the drying process are 6 hours, 7 hours and 8 hours, respectively. The temperature distribution were collected by using 16 thermocouples inside drying chamber. After evaluated the moisture content of Jinda chilli sample, the optimum temperature and drying time are  $80^{\circ}\text{C}$  and 7 hours because the heat distribution from these conditions give the best result. The final moisture content of the sample is 13.37% (wb.), which close to the ISO standard (14% wb.), Accordingly the loss percentage of dried chili is 4.50 %

**Keywords:** Heat Transfer, Finite Element Method ,Vacuum Drying.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่องการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสภาวะสูญญากาศด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและแนวคิด ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง และอาจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์และสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. กฤษณากร บุคดาจันทร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปราจีนบุรี ที่สละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้สถานที่ทดสอบ ขอขอบคุณ ดร.ภาณุวัฒน์ ทรัพย์ปรุง ที่ให้คำแนะนำในการทำรูปเล่ม ตลอดจนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรสภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยเก็บข้อมูลการทดสอบครั้งนี้ ขอขอบคุณน้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือมาตลอด ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีส่วนให้ข้าพเจ้าได้สร้างงานวิจัยนี้ขึ้น

นายประสิทธิ์ โสภา

12 กันยายน 2553

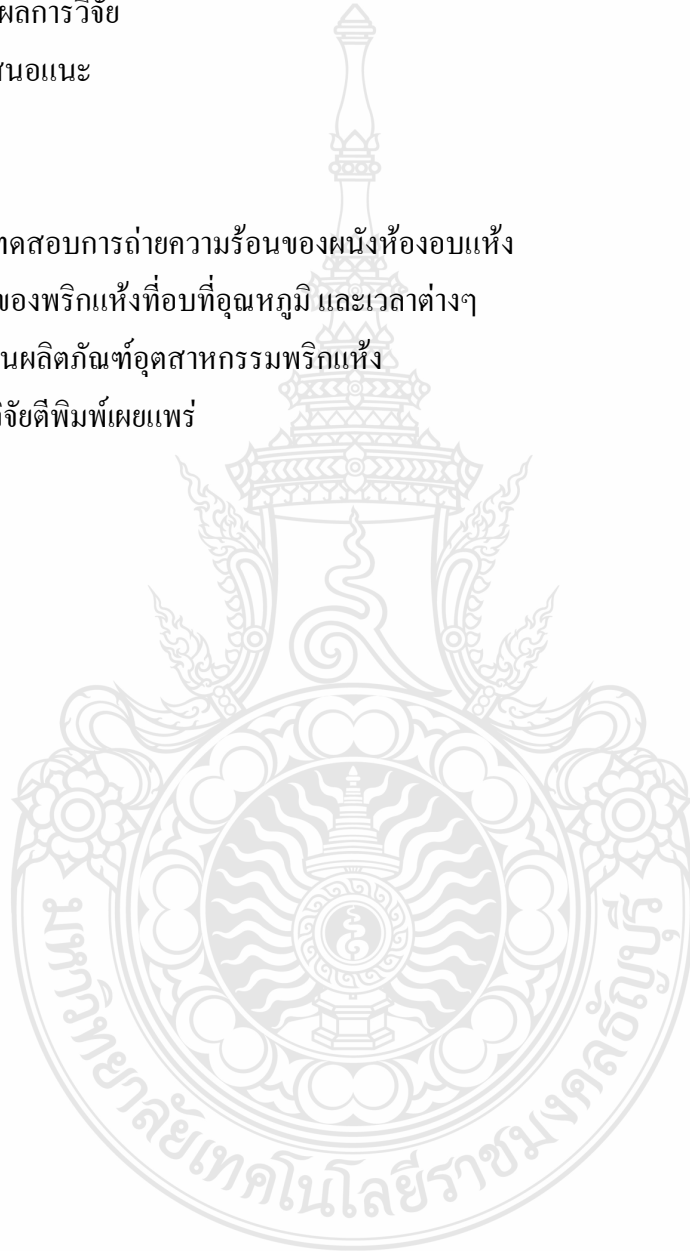


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	4
2.2 หลักพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน	5
2.3 การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต	9
2.4 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	12
2.5 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน	25
2.6 การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	36
3.1 ศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสุญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
3.2 ศึกษาการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสุญญากาศ	38
3.3 การศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา	43
บทที่ 4 ผลของการวิจัย	44
4.1 ผลการศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสุญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
4.2 ผลการศึกษาการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสุญญากาศ	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพ ในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	
ก ผลการทดสอบการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้ง	62
ข ลักษณะของพริกแห้งที่อบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ	68
ค มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกแห้ง	74
ง ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	80
ประวัติผู้เขียน	116



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	54
4.2 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	55
4.3 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	55



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทิศทางการไหลของฟลักซ์ความร้อนในระบบพิกัดหนึ่งมิติ	6
2.2 การเคลื่อนที่ของความร้อนในลักษณะ 3 มิติ	7
2.3 การนำความร้อนที่ทราบค่าอุณหภูมิผิว	10
2.4 การนำความร้อนที่ทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่	10
2.5 การนำความร้อนที่ทราบผิวของขอบเขต	11
2.6 เอลิเมนต์มิติเดียว	14
2.7 เอลิเมนต์ 2 มิติทรงสี่เหลี่ยม	15
2.8 เอลิเมนต์ 2 มิติทรงสามเหลี่ยม	15
2.9 เอลิเมนต์สามมิติชนิดปริซึมหรือชนิดทรงหกหน้า	16
2.10 เอลิเมนต์สามมิติชนิดกรวยสามเหลี่ยมหรือชนิดทรงสี่หน้า	16
2.11 ความกว้างแถบของระบบที่มี $HB = 8$	17
2.12 จำลองไฟในเอลิเมนต์ของคานที่ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ 8 จุดต่อ	17
2.13 การสมมุติฟังก์ชันการกระจัดสำหรับปัญหามิติเดียว	19
2.14 เอลิเมนต์เชิงซ้อน	21
2.15 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ	22
2.16 เอลิเมนต์ชนิดปริซึม	23
2.17 การนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำตรงของฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์	25
2.18 แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปในสามมิติ	26
2.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อใดๆ กับเวลา	29
2.20 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	32
3.1 แบบจำลองคู่ออบแห้ง	36
3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของห้องอบแห้ง	37
3.3 การกำหนดอุณหภูมิเริ่มแรก	38
3.4 ชุดทดสอบการอบแห้งสูญญากาศ	40
3.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ	41
3.6 ระยะห่าง (cm) และตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล 16 จุด	41
3.7 ตำแหน่งการติดตั้ง โดยเทอร์โมคัปเปิ้ล 16 จุด (ภาพด้านหลัง)	42
3.8 การต่อเข้าคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน	42
4.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	44

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	45
4.3 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	45
4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	46
4.5 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	46
4.6 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	47
4.7 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	47
4.8 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	48
4.9 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	48
4.10 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	49
4.11 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	50
4.12 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	50
4.13 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	51
4.14 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	51
4.15 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	52
4.16 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	52
4.17 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	53
4.18 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง	53
4.19 เส้นอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นที่นิยมอย่างมากโดยเฉพาะการอบแห้งในสภาพที่ความดันต่ำเพราะเป็นการถนอมอาหารที่สามารถรักษาค่าของอาหาร สี และรูปทรงไว้ใกล้เคียงกับของเดิม โดยเฉพาะการทำพริกแห้งที่ทำให้คุณสมบัติทางยาอยู่ครบและมีอัตราการอบแห้งสูง ปริมาณออกซิเจนน้อย และอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งมีสี รสชาติ กลิ่น และคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดเพราะการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นต้นเหตุทำให้สีและรสชาติเปลี่ยนแปลงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และกลิ่นของผลิตภัณฑ์แห้งยังสูญเสียเล็กน้อยเนื่องจากจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำและใช้เวลาไม่นาน นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้ยังเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน[1] อีกทั้งยังสามารถควบคุมเรื่องความสะอาดของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งได้และมีการพัฒนาการอบแห้งโดยการนำคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ เพราะคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและโมเลกุลของน้ำสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้ดี ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเพราะผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมากขึ้น แต่การนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้มีข้อเสียคือ การกระจายของคลื่นไมโครเวฟบนผลิตภัณฑ์มีน้อย โดยเฉพาะที่จุดอับต่างๆ เช่น มุม รู และซอกเล็กๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอันตรายที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟอีกด้วย [2]

แต่ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งสุญญากาศส่วนใหญ่จะนำเข้าจากต่างประเทศ ราคาต่อเครื่อง 800,000 ถึง 2,000,000 บาท [17] ถ้าหากสามารถผลิตขึ้นใช้ในประเทศโดยใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า ก็จะช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศและลดการขาดดุลทางการค้าได้อีกด้วย สำหรับเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ ที่สร้างขึ้นได้เลือกเอาเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบเป็นตัวทำสุญญากาศ เนื่องจากมีหลักการทำงานที่ง่าย สามารถทำสุญญากาศได้รวดเร็ว เครื่องทำงานสม่ำเสมอ สามารถดูดความชื้นออกจากพริกได้ดี ราคาถูกกว่าปั๊มสุญญากาศทั่วไป หาซื้อได้ง่าย และในการสร้างเครื่องอบแห้งสุญญากาศจะมีปัญหาในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนเพราะอยู่ในสภาพที่ไม่มีอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นเหตุให้ผลผลิตเกิดความเสียหายจากการอบแห้งเนื่องจากความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านผนังและฉนวนผลผลิตซึ่งความร้อนจะสัมผัสกับผลผลิตโดยตรงทำให้เกิดการไหม้ได้

การศึกษานี้เลือกทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสุญญากาศของเครื่องอบแห้งสุญญากาศที่สร้างขึ้นเพราะการถ่ายความร้อนในสุญญากาศจะช่วยให้การนำความร้อนได้มากกว่าการพาความร้อนซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุที่ทำผนังห้องอบแห้งกับวัสดุเกษตรที่รับความร้อนและมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากันส่งผลให้เวลาในการทำแห้งนานเกินไป และส่งผลถึงคุณภาพของผลผลิตเกษตรด้วย โดยการคำนวณเชิงตัวเลขหรือ

การวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถและมีศักยภาพในการสร้างแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนจึงทำการศึกษาทั้งการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และหลังจากนั้นจะนำผลการถ่ายเทความร้อนที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสุญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.2 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสุญญากาศ
- 1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เพื่อให้การศึกษาเป็นไปตามวัตถุประสงค์ จึงกำหนดสมมติฐานและข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

- 1.3.1 ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องอบกับสิ่งแวดล้อม ผนังโดยรอบมีฉนวนไม่มีการสูญเสียความร้อน
- 1.3.2 พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลา
- 1.3.3 ไม่พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางเชิงเส้น
- 1.3.4 คุณสมบัติของอากาศและพริกมีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่ทดสอบ
- 1.3.5 ไม่พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกขณะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 ใช้พริกพันธุ์จินดาในการวิเคราะห์การอบแห้งแบบสุญญากาศ
- 1.4.2 สร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.3 ในการทดลองจะดำเนินการ โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

## 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.5.1 ได้แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสุญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.2 ได้รู้การถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสูญญากาศ

1.5.3 ได้รู้ความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้ง  
พริกพันธุ์จินดา







## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทบทวนวรรณกรรม

สมจินต์ พวงเจริญชัย [3] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ไซโลเก็บข้าวเปลือกโดยใช้วิธีไฟในเตาอิเลเมนต์ ปัญหาที่สำคัญของการศึกษาคือข้าวสารเป็นผลผลิตทางการเกษตร แต่ก่อนที่จะได้เป็นข้าวสารนั้นต้องนำข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวไปผ่านกรรมวิธีการสีก่อน โดยช่วงระหว่างกรรมวิธีการสีข้าวเปลือกจะถูกนำไปเก็บไว้ในไซโลซึ่งตั้งอยู่บริเวณกลางแดด ทำให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนโดยตรงจากภายนอก ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในข้าวเปลือก ทำให้คุณภาพของข้าวเปลือกเปลี่ยนไป ดังนั้นภายในไซโลเก็บข้าวเปลือกควรจัดให้มีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามต้องการ ดังนั้นควรรู้จักลักษณะการถ่ายโอนความร้อนภายในไซโลเก็บข้าวเปลือกเสียก่อน งานวิจัยนี้เสนอการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีไฟในเตาอิเลเมนต์ เพื่อหาค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของข้าวเปลือกที่ถูกเก็บไว้ในไซโล โดยพิจารณาคุณสมบัติเป็นวัสดุพอรุน จากนั้นสร้างสมการไฟในเตาอิเลเมนต์แล้วทำการเขียนโปรแกรมหาค่าผลเฉลี่ยโดยประมาณของอุณหภูมิ โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิภายในแบบจำลองจะมีการเพิ่มคู่สถานะอิมตัว นั่นคือ อุณหภูมิที่บริเวณขอบแบบจำลองจะกระจายไปสู่ส่วนกลางของแบบจำลอง และเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้น ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่บริเวณขอบของแบบจำลอง โดยผลการเปรียบเทียบเมื่อทำการถอดอยแบบพหุนามกับค่าอุณหภูมิเริ่มแรกก่อนจะนำมาคำนวณ จะเห็นว่า เมื่อให้ความร้อนโดยรอบแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ที่อุณหภูมิ  $45^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ที่คำนวณได้แตกต่างไปจากผลการทดลอง 3.57% ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  มีค่าความแตกต่าง 8.21% และที่อุณหภูมิมีค่าความแตกต่าง 11.28 % โดยในทางปฏิบัติถือว่าค่าดังกล่าวยอมรับได้

มนชิต คันธวงศ์ [4] ได้ทำการศึกษารวบรวมปัญหาการถ่ายโอนความร้อนในสองมิติและสามมิติภายใต้สถานะคงตัว โดยใช้การวิเคราะห์ไฟในเตาอิเลเมนต์ โดยได้เพิ่มการคำนวณค่าเมตริกซ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าเวกเตอร์ของภาระความร้อนของแต่ละเตาอิเลเมนต์ทั้งในอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สูงกว่าหนึ่ง จากการศึกษาปรากฏว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเกิดการลู่เข้าของผลเฉลยของอุณหภูมิของเตาอิเลเมนต์เมื่อทำการปรับแต่งการวิเคราะห์ไฟในเตาอิเลเมนต์จากอันดับที่ 1 ถึงอันดับที่ 8 ได้จำลองขึ้นมา 2 รูปแบบซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นแบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสเจาะรูตรงกลางแผ่น โดยแบบจำลองแบบแรกเจาะรูกลมและแบบจำลองที่สองเจาะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งแบบจำลองทั้งสองจะถูกกำหนดให้ที่บริเวณขอบที่เจาะรูมีอุณหภูมิคงที่ทั่วทั้งขอบ และมีปริมาณความ

ร้อนไหลออกที่บริเวณขอบด้านข้างทั้งสองข้าง พบว่าจะมีค่าผลเฉลยของอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ในช่วงที่ต่างกันออกไปในแต่ละโหนด โดยจะอยู่ในช่วง 0.02% ถึง 1.45% และ 0.07% ถึง 0.20% สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในสองมิติ และสามมิติ

พัลลภ ศรีชัยโชติ [5] ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นในวัสดุพูนอิมตัวด้วยน้ำภายใต้กระบวนการทำความเย็นแบบสูญญากาศ อิฐมวลเบารูปทรงกระบอกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm และยาว 126 mm ถูกนำมาทดสอบเป็นอันดับแรก การทดลองได้ดำเนินการที่อุณหภูมิเริ่มต้นของอิฐมวลเบาคือ 60°C, 40°C และ 26.4°C กับความเร็วป้อนที่ต่างกันคือ 60 m<sup>3</sup>/hr และ 8.5m<sup>3</sup>/hr จากผลการทดลองพบว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูงถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียความชื้นที่อุณหภูมิเริ่มต้นของอิฐมวลเบา (60°C, 40°C และ 26.4°C) คือ 7.23%, 5.35% และ 5.03% ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแกนกลางของอิฐมวลเบาจาก 60°C เหลือ 10°C เท่ากับ 4 นาที สำหรับความเร็วป้อน 60 m<sup>3</sup>/hr และ 39 นาที สำหรับความเร็วป้อน 8.5 m<sup>3</sup>/hr แบบจำลองเชิงตัวเลขได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้เทคนิคของผลต่างสืบเนื่องแบบชัดแจ้ง (Explicit) เพื่อใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิและปริมาณความชื้นภายในอิฐมวลเบาที่อิมตัวด้วยน้ำ ผลต่างสูงสุดของอุณหภูมิระหว่างการทดลองและการคำนวณที่ผิว ที่ความลึก 12 mm และแกนกลางของอิฐมวลเบามีค่าเท่ากับ 5°C, 3°C และ 2°C ตามลำดับ ผลต่างของปริมาณความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3.31% ในงานวิจัยนี้ ผักกาดหอมยังได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบอีกด้วย พบว่าอุณหภูมิแกนกลางของผักกาดหอมสามารถลดลงจาก 24.7°C เหลือ 2.6°C ภายใน 20 นาที ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียความชื้นประมาณ 5.3%

## 2.2 หลักพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นส่วนๆ ตามลักษณะการใช้งานได้ทั้งหมด 3 ส่วน คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี วิธีการถ่ายเทความร้อนทั้งสาม วิธีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในทิศทางของการไหลของความร้อน กลไกที่มีการเคลื่อนที่ของความร้อนในแต่ละวิธีประกอบด้วยดังนี้

### 2.2.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

อุณหภูมิที่มีการถ่ายเทจากภายในตัวกลางของวัสดุออกสู่ผิวด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามี การถ่ายเทพลังงานจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งจาก โมเลกุลหนึ่งไปยังอีก โมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง ลักษณะเช่นนี้เรียกได้ว่าการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนำ จากกฎของฟูเรียร์การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) อัตราการถ่ายความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิดังสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = -kA \frac{\partial T}{\partial X_i} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial Q_t}{\partial t} = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อน}$$

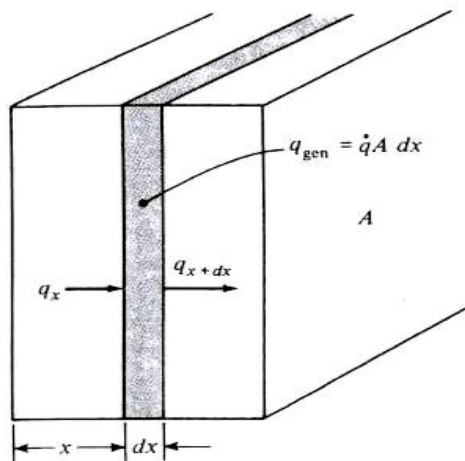
$$\frac{\partial T}{\partial X_t} = \text{ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล}$$

$$A = \text{พื้นที่ผิวการไหลของความร้อน}$$

$$K = \text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ}$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อนในหนึ่งมิติแสดงดังรูปที่ 2.1 ถ้าระบบการไหลเป็นแบบราบเรียบ คือค่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ความร้อนที่จ่ายออกจากเอลิเมนต์ที่มีความหนา  $dx$  สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานจะได้ดังนี้

พลังงานที่ถูกนำเข้าไปที่ผิววัสดุทางด้านซ้าย + พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในเอลิเมนต์ = พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง + พลังงานถูกนำออกจากผิววัสดุทางด้านขวา



รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของฟลักซ์ความร้อนในระบบพิกัดหนึ่งมิติ [7]

เขียนความสัมพันธ์ลงในสมการสมดุลพลังงาน ได้ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3

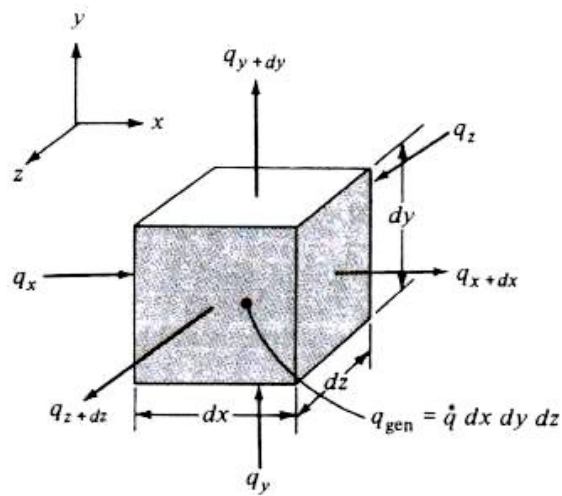
$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} A dx = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t} dx - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad (2.2)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $q$  = พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นต่อหน่วยปริมาตร ( $\text{W}/\text{m}^3$ )  
 $C_p$  = ค่าความร้อนจำเพาะ ( $\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$ )  
 $\rho$  = ความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

ที่กล่าวมาเป็นสมการการนำความร้อนในหนึ่งทิศทาง (1 มิติ) สำหรับการไหลของความร้อนมากกว่าหนึ่งทิศทาง พิจารณาการนำความร้อนเข้าและออกในหน่วยปริมาตรทั้ง 3 ทิศทาง (3 มิติ) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของความร้อนในลักษณะ 3 มิติ [7]

เขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังสมการที่ 2.4

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{dt} \quad (2.4)$$

- เมื่อ  $q_x$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน  $x$   
 $q_y$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน  $y$   
 $q_z$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน  $z$

$$\text{เมื่อ } \frac{dE}{dt} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

สมการทั่วไปของการนำความร้อน 3 มิติ สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.6

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

เมื่อค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่ดังนั้นจากสมการ สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.7

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = \frac{k}{\rho C_p} = \text{ค่าการแพร่ความร้อนของวัสดุ}$$

$\rho$  = ค่าความหนาแน่น

$C_p$  = ความร้อนจำเพาะของวัสดุ

### 2.2.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนในเทอมของการถ่ายความร้อนนั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งระหว่างตัววัสดุ ตัวอย่างเช่น ระหว่างผิวชั้นวัสดุและอากาศเมื่อความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นระหว่างผิวของวัสดุและของไหลที่ไหลผ่านตัววัสดุ นั่นคือขอบเขตของความร้อนหรือฟิล์มที่ผิวของวัสดุ เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจากผิวของวัสดุไปยังของไหลที่ไหลผ่านแสดงถึงผลกระทบเนื่องจากการพาความร้อนจะใช้กฎของนิวตันว่าด้วยการระบายความร้อนดังสมการที่ 2.8

$$\frac{dQ}{dt} = hA\Delta T \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } Q = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อน}$$

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัส

$h$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

### 2.2.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีคือการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากแหล่งความร้อนหนึ่งถ่ายโอนความร้อนไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางการเคลื่อนที่ของความร้อนถ่ายเทผ่านขอบเขตที่ต้องการ กลไกในกรณีนี้เป็นแบบการแผ่รังสีในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์จะพิจารณาว่าตัวแผ่รังสีความร้อนเป็นไอเดิลหรือวัตถุดำ (Black Body) พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาของวัตถุเป็นสัดส่วนของอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวดังสมการที่ 2.9

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma AT^4 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัส

$\sigma$  = ค่าคงที่สเตฟาน โบลซ์แมน (Stefant Boltzmann Constant) มีค่าเท่ากับ

$$5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^{-4}$$

วัตถุที่ให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดเรียกว่าวัตถุดูมคติหรือวัตถุดำเพราะว่ามีผิวดำ ส่วนวัตถุที่มีอยู่ทั่วไปจะแผ่รังสีน้อยกว่าวัตถุดูมคติ การแผ่รังสีความร้อนโดยทั่วไปที่อุณหภูมิ  $T$  และพื้นที่  $A$  เขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma \epsilon T^4 \quad (2.10)$$

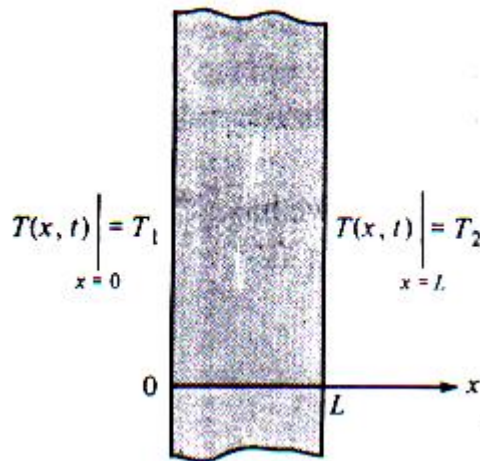
เมื่อ  $\epsilon$  = ค่าการแผ่รังสี วัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุดค่า  $\epsilon$  ค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

### 2.3 การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions)

การกำหนดเงื่อนไขมีอยู่สามลักษณะคือ

#### 2.3.1 เงื่อนไขของขอบเขตแบบที่หนึ่ง

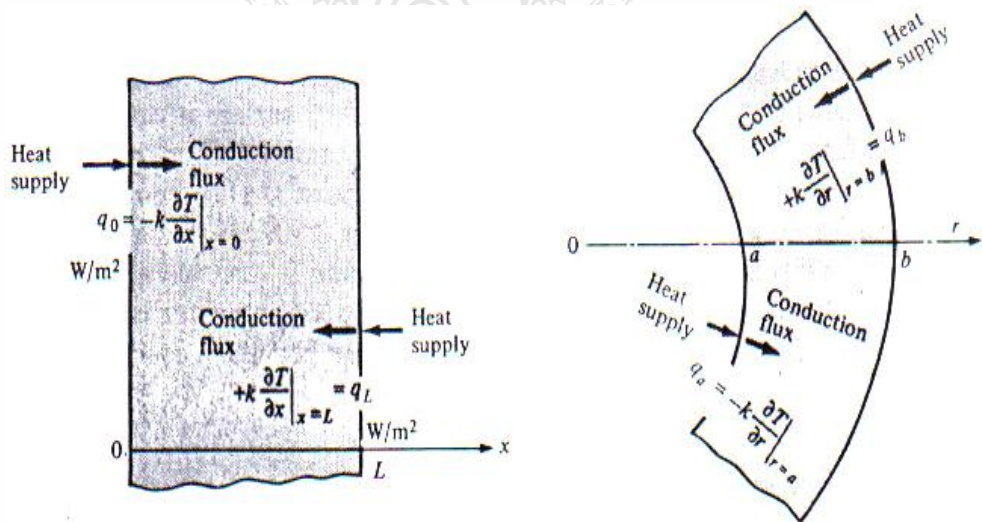
เป็นปัญหาการนำความร้อนที่ทราบค่าอุณหภูมิผิวของขอบเขต (Boundary Surface) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การนำความร้อนที่ทราบค่าอุณหภูมิผิว [8]

### 2.3.2 เงื่อนไขของขอบเขตแบบที่สอง

เป็นปัญหาการนำความร้อนที่ทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวกลางที่ผิวขอบเขต ลักษณะเงื่อนไขของขอบเขตแบบนี้ได้แก่ กรณีที่ผิวขอบเขตถูกหุ้มด้วยฉนวนหรือขอบเขตแบบอะเดียเบติก หรือกรณีสภาวะสมมาตรทางความร้อน ดังแสดงรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การนำความร้อนที่ทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ [8]

กรณีทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวกลางที่ผิวของขอบเขต ตำแหน่ง  $x = 0$  ดังสมการที่ 2.11

$$q_0 = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

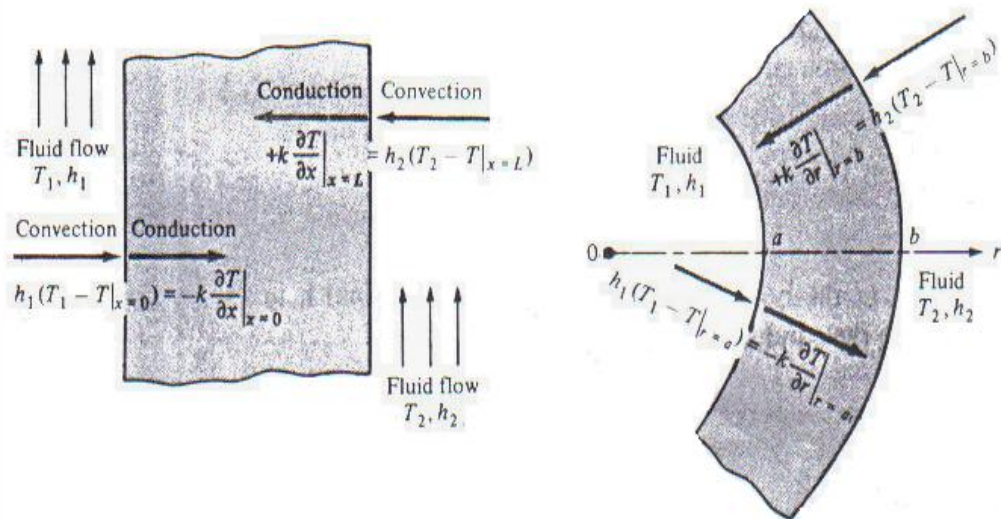


กรณีทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวกลางที่ผิวของขอบเขต ตำแหน่ง  $X=L$  ดังสมการที่ 2.12

$$q_L = +k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.12)$$

### 2.3.3 เงื่อนไขของขอบเขตแบบที่สาม

เป็นปัญหาการนำความร้อนที่ทราบผิวของขอบเขตเกิดการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนสู่ตัวกลางที่ทราบอุณหภูมิ ดังแสดงรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การนำความร้อนที่ทราบผิวของขอบเขต [8]

พิจารณาปัญหาของผนัง ซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อน โดยการพาจากผิวขอบเขตทั้งสองด้านไปยังสิ่งแวดล้อม ในการพิสูจน์หาสมการเงื่อนไขของขอบเขตที่ผิว ณ ตำแหน่ง  $X=0$  ดังสมการที่ 2.13

(อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ที่เข้าโดยการพา) = (อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ที่ออกโดยการนำ)

$$h_1 [T_1 - T(x,t)_{x=0}] = -k \left[ \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (2.13)$$

การพิสูจน์หาสมการเงื่อนไขของขอบเขตที่ผิว ณ ตำแหน่ง  $X = L$  ดังสมการที่ 2.14

$$h_2[T_2 - T(x,t)_{x=L}] = +k \left[ \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right]_{x=L} \quad (2.14)$$

สำหรับกรณีทรงกระบอกกลวงหรือทรงกลม เมื่อรัศมีภายในคือ  $a$  และรัศมีภายนอกคือ  $b$  สามารถหาสมการเงื่อนไขของขอบเขตได้ดังสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 [9]

$$\left[ -k \frac{\partial T}{\partial r} + h_1 T \right]_{r=a} = h_1 T_1 \quad \text{ที่ } r = a \quad (2.15)$$

$$\left[ +k \frac{\partial T}{\partial r} + h_2 T \right]_{r=b} = h_2 T_2 \quad \text{ที่ } r = b \quad (2.16)$$

## 2.4. หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.4.1 วิธีกรไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีกรไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า เช่น ความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น โดยทำการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อเรียกว่า โหนด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณนั่นเอง โดยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ 7 ขั้นตอนดังนี้

ก. แบบจำลองของระบบแล้วแบ่งแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยแต่ละเอลิเมนต์อาจมีลักษณะและขนาดที่ต่างกัน

ข. เลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (shape function) โดยที่แต่ละจุดต่อที่ใช้จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับแต่ละจุด โดยลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้อ่านบนเอลิเมนต์สามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และตัวแปรที่จุดต่อโดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.17

$$\phi(x, y, z) = N_1(x, y, z)\phi_1 + N_2(x, y, z)\phi_2 + N_3(x, y, z)\phi_3 + N_4(x, y, z)\phi_4 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\phi(x, y, z) =$  ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

$N_i(x, y, z), i = 1, 2, 3, 4 =$  ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

หรือสามารถเขียนรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\phi(x, y, z) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

ค. สร้างสมการของเอลิเมนต์ที่ต้องการทราบคำตอบโดยมีรูปแบบของสมการดัง  
สมการที่ 2.19

$$[k]_e \{\phi\}_e = \{f\}_e \quad (2.19)$$

เมื่อ  $[k]_e$  = เอลิเมนต์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหานั้น (Element Stiffness Matrix)

$\{\phi\}_e$  = เวกเตอร์ตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Vector of nodal Unknowns)

$\{f\}_e$  = เวกเตอร์ของโหลดที่จุดต่อ (Vector of nodal Loads)

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ สมการของเอลิเมนต์จะมีรูปแบบดังสมการ  
ที่ 2.20

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

ง. เนื่องจากการเรียงตัวของชิ้นส่วนย่อยในแบบจำลอง จะไม่ขนานหรือตั้งฉากกับระบบแกนรวมใหญ่  $x-y$  (Global Coordinate System) แต่จะบิดเบี่ยงตามรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยหรือที่เรียกว่าระบบแกนย่อย (Local Coordinate System) ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากในการอินทิเกรตบนพื้นที่ของชิ้นส่วนย่อยที่เอียงไปมาในพิกัด  $x-y$  ต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนย่อยที่เอียงไปมาให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในพิกัด  $\xi-\eta$  โดยมีเซฟฟังก์ชัน

จ. นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกัน เป็นสมการรวมของระบบโดยมีรูปแบบ

ฉ. แทนเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงบนสมการรวมของระบบ

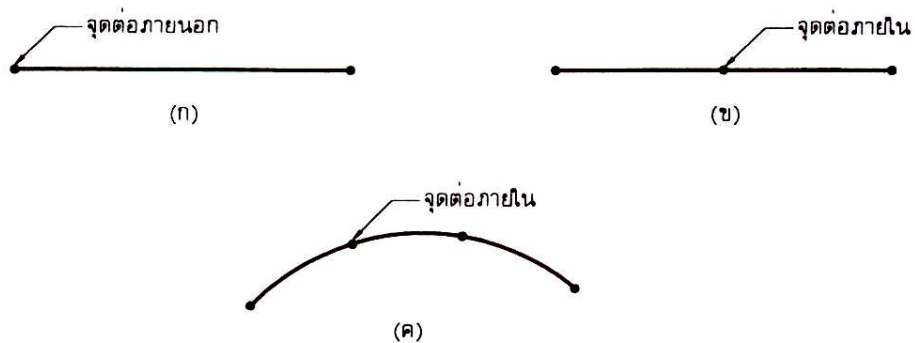
ช. แก้สมการของระบบเพื่อหาค่าโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า

### 2.4.2 ชนิดของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามมิติคือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ [11]

#### ก. เอลิเมนต์มิติเดียว

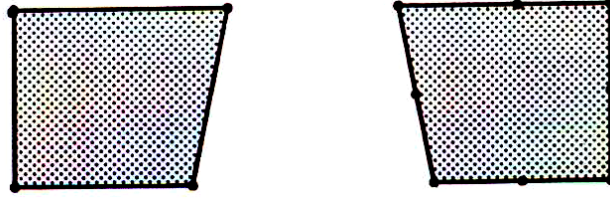
เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียว เป็นต้น ดังรูปที่ 2.6(ก) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเรียกว่าจุดต่อภายนอก ส่วนรูปที่ 2.6(ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อคือจุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ และรูปที่ 2.6(ค) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นส่วนโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือ สองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายในซึ่งเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีการยึดตัวไม่เป็นเส้นตรง เช่น การยึดตัวของท่อนโลหะ อันเนื่องมาจากมวลของท่อน โลหะเอง เป็นต้น



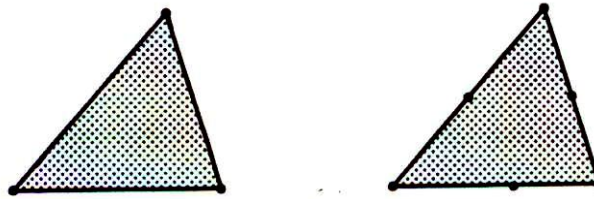
รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์มิติเดียว [11]

#### ข. เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์สองมิติมักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดระนาบ โดยทั่วไป เอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ดังรูปที่ 2.7 เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อและ 8 จุด



รูปที่ 2.7 เอลิเมนต์ 2 มิติทรงสี่เหลี่ยม [11]

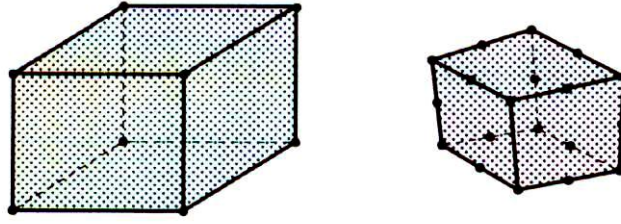


รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์ 2 มิติทรงสามเหลี่ยม [11]

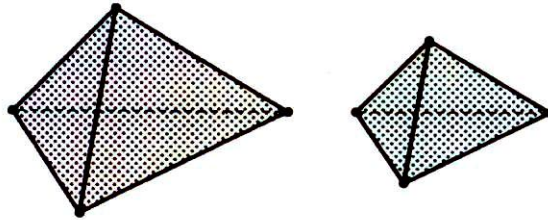
ต่อชนิดด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามेटริกซ์ ส่วนรูปที่ 2.8 เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อและ 6 จุดต่อด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามेटริกซ์ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับความนิยมมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับขั้นความเสรีเท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านตรงหรือด้านโค้งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมุติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้

#### ก. เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.9 เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 6 หน้า (hexahedron) ชนิดหน้าตรง (linear) 8 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (straight-line quadratic) 20 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (quadratic with curved faces) 20 จุดต่อ ส่วนรูปที่ 2.10 เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 4 หน้า (tetrahedron) ชนิดด้านตรง 4 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง 10 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง 10 จุดต่อ



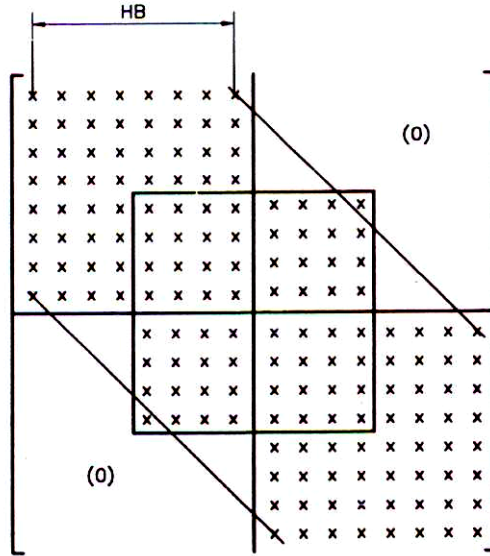
รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สามมิติชนิดปริซึมหรือชนิดทรงหกหน้า [11]



รูปที่ 2.10 เอลิเมนต์สามมิติชนิดกรวยสามเหลี่ยมหรือชนิดทรงสี่หน้า [11]

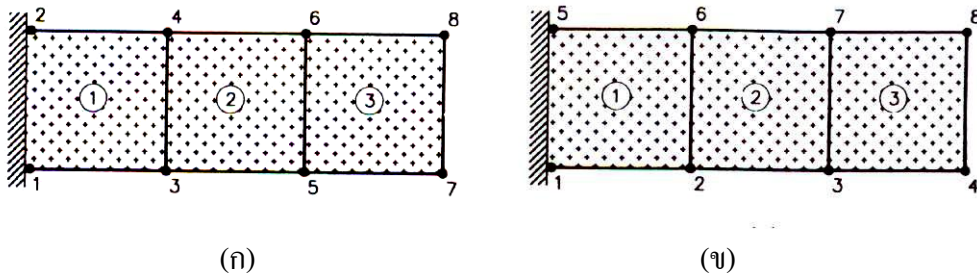
#### 2.4.3 การกำหนดจุดต่อและความกว้างแถบ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนของระบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยสมการเชิงพีชคณิตเป็นจำนวนมาก จำนวนสมการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดตำแหน่งของจุดต่อของเอลิเมนต์ สัมประสิทธิ์ของสมการจะเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ เช่น สทิงเฟสเมทริกซ์ สัมประสิทธิ์บางตัวจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณและประหยัดพื้นที่เก็บข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ เราจะจัดให้สัมประสิทธิ์ของสมการอยู่ของเมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.11 คือ ความกว้างแถบจะเท่ากับ  $2HB-1$  ซึ่ง HB คือ ครึ่งความกว้างแถบ (half bandwidth) ในช่วง HB ค่าสัมประสิทธิ์จะไม่เท่ากับศูนย์ แต่อาจจะมีบางตัวเท่ากับศูนย์ปนอยู่ด้วย ส่วนช่วงนอกครึ่งความกว้างแถบค่าสัมประสิทธิ์จะเท่ากับศูนย์ทุกตัว สัมประสิทธิ์ช่วงของ HB นี้ไม่จำเป็นต้องเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ถ้าให้ขนาดของเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์คือ  $N \times N$  ส่วนที่จำเป็นต้องเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณก็คือเมทริกซ์เป็นเมทริกซ์สมมาตร ซึ่งทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณและประหยัดพื้นที่เก็บข้อมูลและยังสามารถจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดความจำเล็กลงได้ด้วย ความกว้างแถบ HB ดังกล่าวสามารถจะคำนวณได้จาก  $HB = (R + 1) NDOF$  ซึ่ง R เท่ากับจำนวนที่แตกต่างกันสูงสุดของจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ และ NDOF คือระดับขั้นความเสรีของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์



รูปที่ 2.11 ความกว้างแถบของระบบที่มี  $HB=8$  [10]

การคำนวณและประหยัดพื้นที่เก็บข้อมูลและยังสามารถจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดความจำเล็กลงได้ด้วย ความกว้างแถบ  $HB$  ดังกล่าวสามารถจะคำนวณได้จาก  $HB = (R + 1) \text{ NDOF}$  ซึ่ง  $R$  คือจำนวนที่แตกต่างกันสูงสุดของจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ และ  $\text{NDOF}$  ก็คือระดับขั้นความเสรีของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ พื้นที่เก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์น้อยสุด ถ้าสามารถหาค่าน้อยสุดของ  $HB$  ได้ ซึ่งในระบบที่ซับซ้อนการหาค่าต่ำสุดของ  $HB$  ทำได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามสำหรับระบบทั่วไป สามารถหาค่า  $HB$  น้อยสุดได้ เช่นระบบของคานาดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ สองพิกัดเช่นพิกัด  $x, y$  หรือ  $\text{NDOF} = 2$  สำหรับรูปที่ 2.12 (ก)  $R = 4 - 1 = 3$  ดังนั้นครั้งความกว้างแถบ  $HB = 8$  และหนึ่งเอลิเมนต์จะประกอบ 4 จุดต่อ หรือ 8 ระดับขั้นความเสรีนั้นขนาดของสัมประสิทธิ์เมทริกซ์หรือสทิเฟเนสเมทริกซ์จะมีขนาด  $8 \times 8$  แต่เนื่องจากคานาประกอบด้วยสามเหลี่ยมเอลิเมนต์ย่อย นั่นคือสทิเฟเนสเมทริกซ์ของระบบคานาจะมีขนาด  $16 \times 16$



รูปที่ 2.12 จำลองไฟในเอลิเมนต์ของคานาที่ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ 8 จุดต่อ [11]

#### 2.4.4 ฟังก์ชันการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องแบ่งชิ้นส่วนหรือโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมุติฟังก์ชันการกระจัดโดยแบ่งชิ้นส่วนหรือโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมุติฟังก์ชันการกระจัดโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์ ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างหรือชิ้นส่วนรวมการกระจัดโดยประมาณที่สมมุติขึ้นเรียกว่าฟังก์ชันการกระจัด (displacement function) หรือแบบจำลองการกระจัด (displacement models) หรือสนามการกระจัด (displacement fields) หรือรูปแบบการกระจัด (displacement patterns)

ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียล ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันโพลีโนเมียลดังสมการที่ 2.21

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n+1}x^n \quad (2.21)$$

เมื่อ  $a_1, a_2, a_3 \dots a_{n+1}$  = สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียล

$u$  = การกระจัดในทิศทาง  $x$

ในกรณีของปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันโพลีโนเมียลจะเขียนได้ดังสมการที่ 2.22

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + \dots + a_n y^m \quad (2.22)$$

$$v(x, y) = a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}x^2 + a_{m+5}xy + a_{m+6}y^2 + \dots + a_{2m} y^n$$

เมื่อ  $u$  = การกระจัดในทิศทาง  $x$

$v$  = การกระจัดในทิศทาง  $y$

$a$  = สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียล

และผลรวมดังสมการที่ 2.23

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i \quad (2.23)$$

ส่วนในกรณีของปัญหาสามมิติ ฟังก์ชันโพลีโนเมียลดังสมการที่ 2.24



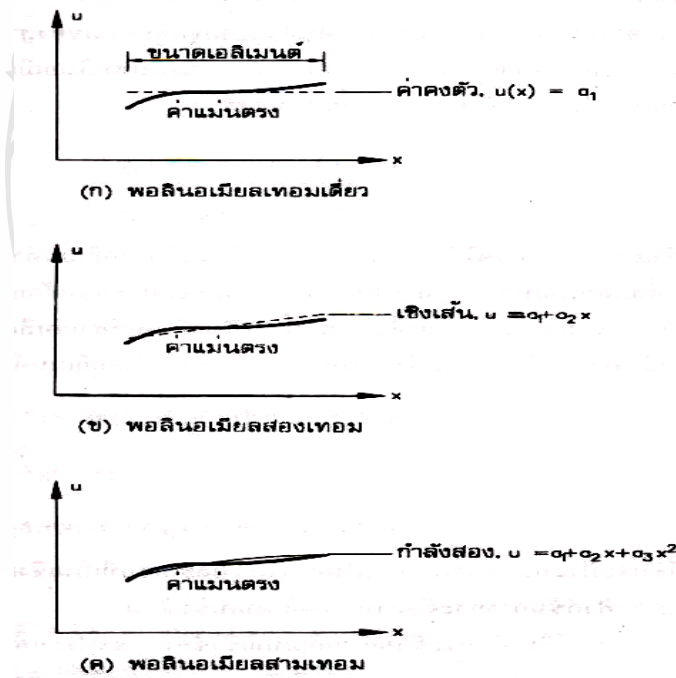
$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx + \dots + a_mz^n \\
 v(x, y) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\
 w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

เมื่อ  $u$  = ส่วนประกอบของการกระจัดในทิศทาง  $x$   
 $v$  = ส่วนประกอบของการกระจัดในทิศทาง  $y$   
 $w$  = ส่วนประกอบของการกระจัดในทิศทาง  $z$

และผลรวมดั่งสมการที่ 2.25

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i) \tag{2.25}$$

โพลีโนเมียลที่มีหลายเทอมหรือกำลังสูงๆ จะให้การกระจัดที่สมมุติขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแน่นอนตรง แต่การแก้สมการค่อนข้างทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกให้ฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา และความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ กรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสองสามเทอม จะให้ผลเฉลยดีกว่าฟังก์ชันโพลีโนเมียลเทอมเดียวและสองเทอม ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การสมมุติฟังก์ชันการกระจัดสำหรับปัญหามิติเดียว [11]

การจำลองเอลิเมนต์ด้วยการกระจัด อาจแบ่งออกตามกำลังของโพลีโนเมียลได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มเชิงเดียว (simplex) กลุ่มเชิงซ้อน (complex) และกลุ่มเชิงซับซ้อน (multiplex)

ก. ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว จะประกอบด้วยโพลีโนเมียลเทอมที่มีค่าคงตัวและเทอมที่เป็นเส้นตรง ส่วนสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลจะเท่ากับระดับขั้นความเสรีของระบบ ในกรณีของปัญหามิติเดียว เช่น ท่อนโลหะ เพลลาโครงข้อหมุน โครงข้อแข็ง เป็นต้น เอลิเมนต์เชิงเดียวของปัญหาเหล่านี้จะประกอบด้วยสองจุดต่อภายนอก ซึ่งสามารถจะแทนได้ด้วยโพลีโนเมียลสองเทอมคือ เทอมที่เป็นค่าคงตัวและเทอมที่เป็นเชิงเส้นตรงดังสมการที่ 2.26

$$u(x) = a_1 + a_2x \quad (2.26)$$

กรณีของปัญหาสองมิติเช่น ปัญหาความเค้นระนาบ ความเค้นระนาบและปัญหาวงแหวนแกนสมมาตร (axisymmetric) เอลิเมนต์เชิงเดียวของปัญหาเหล่านี้จะเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสามจุดต่อที่มุมของสามเหลี่ยม และจุดต่อจะประกอบด้วยการกระจัด  $u$  และ  $v$  ดังนั้น โพลีโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียวสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย 6 ระดับขั้นความเสรีดังสมการที่ 2.27

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ v(x, y) &= a_4 + a_5x + a_6y \end{aligned} \quad (2.27)$$

กรณีของปัญหาสามมิติ เอลิเมนต์เชิงเดียวก็คือ เอลิเมนต์ชนิดกรวยสามเหลี่ยม ประกอบด้วยสี่จุดต่อภายนอก แต่ละจุดต่อจะประกอบด้วยการกระจัด  $u, v$  และ  $w$  ในทิศทาง  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ ฉะนั้นหนึ่งเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงเดียวจึงประกอบด้วย 12 ระดับขั้นความเสรี และฟังก์ชันโพลีโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์ ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะประกอบด้วยเทอมที่เป็นค่าคงตัว และเทอมที่เป็นเชิงเส้นตรงดังสมการที่ 2.28

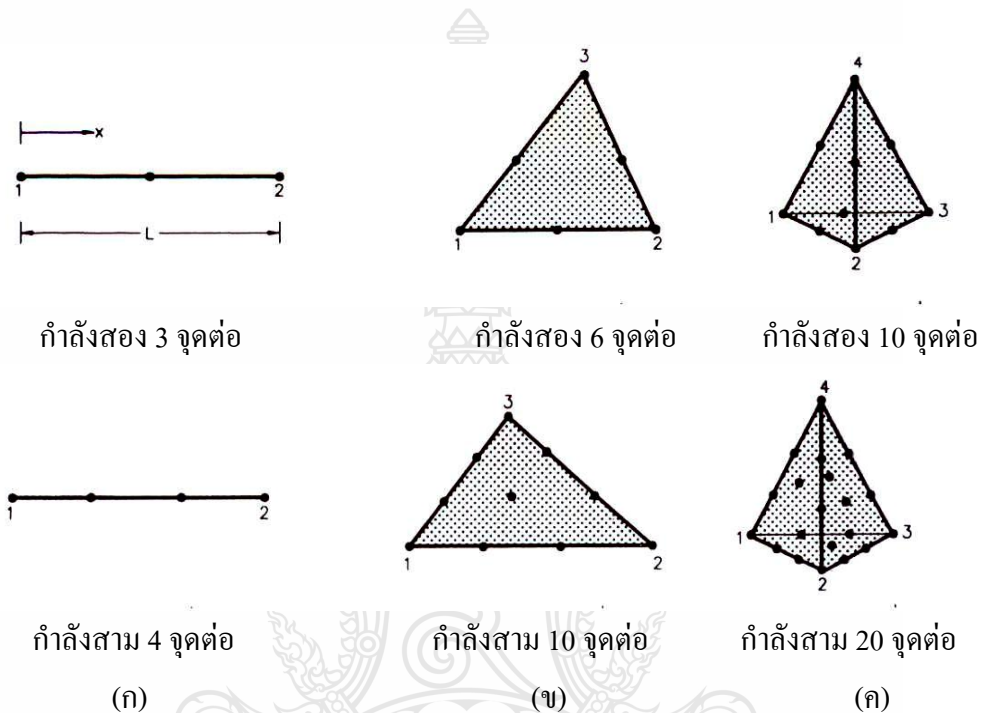
$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v(x, y, z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w(x, y, z) &= a_9 + a_{10x} + a_{11y} + a_{12z} \end{aligned} \quad (2.28)$$

ข. ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยโพลีโนเมียลที่มีเทอมค่าคงตัว เทอมเชิงเส้น เทอมกำลัง กำลังสาม และเทอมที่มีกำลังสูงกว่านั้นเท่าที่จำเป็นเอลิเมนต์

เชิงซ้อนอาจจะเหมือนกับเอลิเมนต์เชิงเดียว แต่จะมีจุดต่อภายในเพิ่มขึ้น ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเอลิเมนต์เชิงเดียวและเชิงซ้อนก็คือ จำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์เชิงซ้อนจะมากกว่ามิติของเอลิเมนต์อย่างน้อย 1 จุดต่อ

กรณีของปัญหามิติเดียว เอลิเมนต์เชิงซ้อนจะเป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ ดังรูปที่ 2.14 จะมีจุดต่อภายในเพิ่มขึ้นอีก 1 จุดหรือ 2 จุด [12]



รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์เชิงซ้อน(ก) เอลิเมนต์มิติเดียว  
(ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมกรวย 3 มิติ [12]

ดังนั้นฟังก์ชันโพลีโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อนกำลังสอง 3 จุดต่อ ดังสมการที่ 2.29

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 \quad (2.29)$$

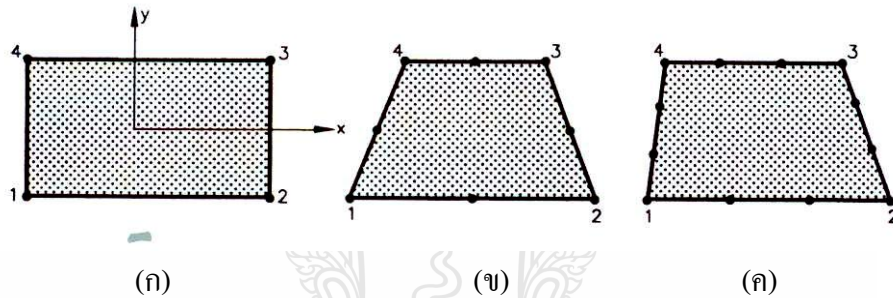
ฟังก์ชันที่ประกอบด้วย 3 ระดับขั้นความเสรี สำหรับปัญหาสองมิติเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองและกำลังสาม และฟังก์ชันโพลีโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองดังสมการที่ 2.30

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\ v(x, y) &= a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

ฟังก์ชันที่ประกอบด้วย 12 ระดับชั้นความเสรี เป็นเอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมกรวยกำลัง 2 และกำลัง 3 ที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ และ 20 จุดต่อตามลำดับส่วนฟังก์ชัน โพลินอเมียลของเอลิเมนต์ ทั้งสองเขียนได้ในทำนองเดียวกันกับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนสองมิติ

ก. ฟังก์ชันการกระจายสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน

ฟังก์ชันการกระจายของเอลิเมนต์เชิงซ้อน (multiplex) จะประกอบด้วยโพลินอเมียลที่มีกำลังสูงเช่นเดียวกับฟังก์ชันการกระจายของเอลิเมนต์เชิงซ้อน แต่ขอบของเอลิเมนต์จะต้องขนานกับแกนของพิกตรวมของระบบ ทั้งนี้เพื่อให้การกระจายระหว่างของเอลิเมนต์มีความต่อเนื่องกัน ตัวอย่างที่ดีของเอลิเมนต์เชิงซ้อนก็คือ เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมในกรณีพิเศษที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อภายนอก 8 ระดับชั้นความเสรี



รูปที่ 2.15 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น (ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม [12]

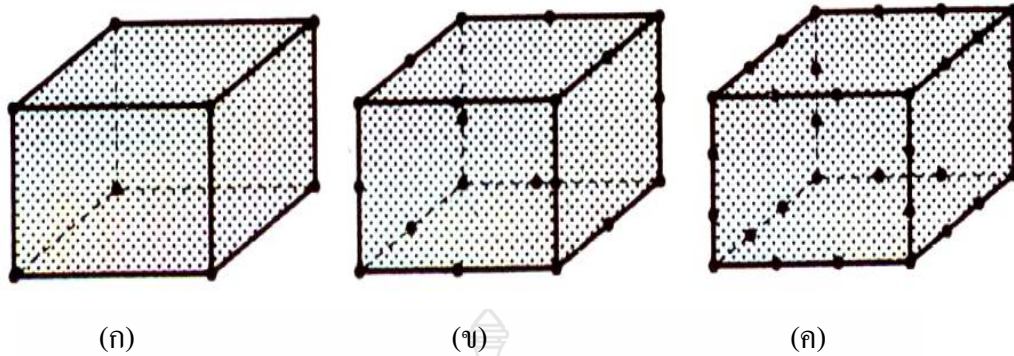
ฟังก์ชัน โพลินอเมียลสำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงซ้อนเชิงเส้นดังสมการที่ 2.31

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \\ v(x, y) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \end{aligned} \quad (2.31)$$

เลือกโพลินอเมียลเทอม  $xy$  แทนที่จะเลือกเทอม  $x^2$  หรือ  $y^2$  เพราะว่า เทอม  $xy$  จะทำให้การกระจายในด้านที่  $x$  หรือ  $y$  มีค่าคงที่แปรตามเชิงเส้น

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองและกำลังสาม ดังรูปที่ 2.16 สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชัน โพลินอเมียลที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันกับ  $u$  เท่ากับ 8 เทอม ฟังก์ชันกับ  $v$  เท่ากับ 8 เทอม และ  $u$  เท่ากับ 12 เทอม และ  $v$  เท่ากับ 12 เทอม

ส่วนเอลิเมนต์เชิงซ้อนที่ใช้กับปัญหาสามมิติจะเป็นชนิดปริซึมในลักษณะเชิงเส้น 8 จุดต่อ กำลังสอง 20 จุดต่อและกำลังสาม 32 จุดต่อ



รูปที่ 2.16 เอลิเมนต์ชนิดปริซึม (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น  
(ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม [11]

การเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูง เอลิเมนต์กำลังสอง กำลังสาม จะทำให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่คาดว่าจะมีความเข้มของความเค้นสูงการกระจายของความเค้นจะไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูงตรงบริเวณดังกล่าว เพื่อจะลดความยุ่งยากของการอินทิเกรตเชิงตัวเลขและลดเวลาในการอินทิเกรต เราอาจจะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบผสมระหว่างเอลิเมนต์เชิงเดียวเป็นส่วนใหญ่และเอลิเมนต์เชิงซ้อนหรือเอลิเมนต์เชิงซับซ้อนตรงบริเวณที่จำเป็น

#### 2.4.5 การนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำ

การวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการสมมุติฟังก์ชันการกระจัด หรือแบบจำลองการกระจัดของเอลิเมนต์ โดยทั่วไปผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าการกระจัดน้อยกว่าค่าแม่นยำและเพื่อให้มีความมั่นใจว่า ถ้าแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนจริงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ มากขึ้นแล้ว ผลของการวิเคราะห์จะต้องเข้าใกล้หรือนำไปสู่ (converge) ผลเฉลยแม่นยำ ควรมีข้อกำหนดหรือควรมีคุณสมบัติดังนี้

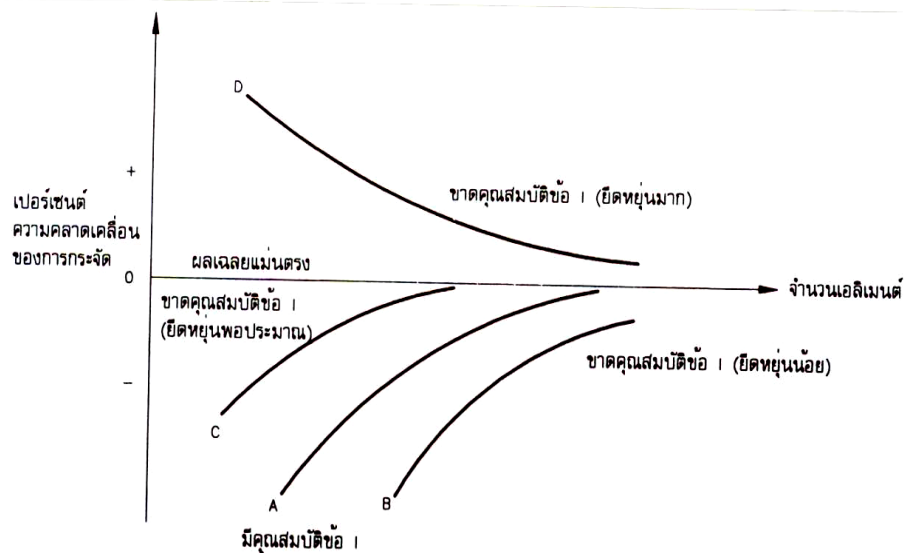
ก. ฟังก์ชันการกระจัดจะต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องภายในเอลิเมนต์และการกระจัดระหว่างของเอลิเมนต์หรือระหว่างจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ติดกันจะต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งฟังก์ชันโพลินอเมียลจะเป็นฟังก์ชันที่ให้ค่าต่อเนื่องภายในเอลิเมนต์ตามที่ต้องการ สำหรับความหมายของส่วนที่สองก็คือ การกระจัดของเอลิเมนต์ที่อยู่ติดกันจะต้องไม่มีช่องว่างหรือซ้อนกัน หรือการกระจัดระหว่างเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องกัน

ข. ฟังก์ชันการกระจัดจะต้องมีเทอมที่ให้ค่าการกระจัดของวัตถุเกร็ง (rigid body displacement) ของเอลิเมนต์อยู่ด้วย การกระจัดของวัตถุเกร็งจะเป็นการกระจัดในลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง (translation) หรือการหมุน (rotation) กรณีของปัญหามิติเดียวและฟังก์ชันการกระจัดเขียนอยู่ในรูปของโพลินอเมียล เทอมที่ให้ค่าการกระจัดของวัตถุเกร็งก็คือ  $a_1$  เป็นต้น

ก. ฟังก์ชันการกระจัด จะต้องมีเทอมที่ให้ค่าความเครียดคงที่ (constant strain states) ของเอลิเมนต์อยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะว่าถ้าเราแบ่งชิ้นส่วนหรือโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์เล็กมากๆ ค่าของความเครียดจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ และในกรณีของปัญหาสองมิติ ถ้าสมมุติให้ฟังก์ชันการกระจัดเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียล เทอมที่จะให้ความเครียด  $\epsilon_x, \epsilon_y$  คงที่ก็คือ เทอมที่มีสัมประสิทธิ์เป็น  $a_2$  และ  $a_6$  ตามลำดับ

กรณีที่ฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์เป็นไปตามข้อกำหนด ก. เราจะเรียกว่าเอลิเมนต์ที่เข้ากันได้หรือเอลิเมนต์ที่ลงรอยกัน (compatible or conforming elements) ส่วนฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์ที่เป็นไปตามข้อกำหนด ข. และ ค. เราจะเรียกว่า เอลิเมนต์บริบูรณ์ (complete)

ทางปฏิบัติ การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน เช่น คาน แผ่น โลหะ และแผ่นโลหะผนังโค้ง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ในบางครั้งยากที่จะให้สมการพอลิโนเมียลเป็นไปตามข้อกำหนด ก. และ ข. อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันการกระจัดที่เป็นไปตามเฉพาะเงื่อนไข ค. จะให้ผลเฉลยที่นำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำได้และฟังก์ชันการกระจัดที่เป็นไปตามข้อกำหนด ข. และ ค. (ขาดคุณสมบัติข้อ ก.) ก็นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งจะให้ค่าสูงกว่าค่าแม่นยำถ้ายึดหยุ่นมาก และให้ค่าน้อยกว่าค่าแม่นยำถ้ายึดหยุ่นปานกลางและน้อย แต่ถ้าฟังก์ชันการกระจัดนั้นเป็นไปตามข้อกำหนด ก. ด้วย จะให้ผลเฉลยน้อยกว่าค่าแม่นยำเสมอ การเปรียบเทียบผลเฉลยของเอลิเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามข้อ ก. ดังรูปที่ 2.17 โดยทั่วไปเอลิเมนต์ที่มีคุณสมบัติครบทั้งสามประการจะให้ค่าผลเฉลยต่ำกว่าค่าแม่นยำเสมอ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือยึดหยุ่นได้น้อยกว่าระบบจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากเงื่อนไขบังคับของฟังก์ชันรูปร่าง (constrained by the shape functions) ทำให้สทิฟเนสของเอลิเมนต์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.17 การนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำของฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์ [11]

## 2.5 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

### 2.5.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

สมการครอบคลุมเชิงอนุพันธ์สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังวัสดุต่างชนิดกันดังสมการที่ 2.32 [13]

$$kA \frac{d^2\phi}{dx^2} = 0 \quad (2.32)$$

ซึ่งตัวแปร  $\phi$  เป็นอุณหภูมิที่รู้ค่าที่ผิวนอกด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน หรือมีการสูญเสียจากการพาความร้อนที่ผิวนอกด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน สำหรับเงื่อนไขขอบของการพาความร้อนดังสมการที่ 2.33

$$\begin{aligned} kA \frac{d\phi}{dx} &= hA(\phi_b - \phi_f) && \text{ที่ } x = 0 \\ \text{และ} \quad -kA \frac{d\phi}{dx} &= hA(\phi_b - \phi_f) && \text{ที่ } x = H \end{aligned} \quad (2.33)$$

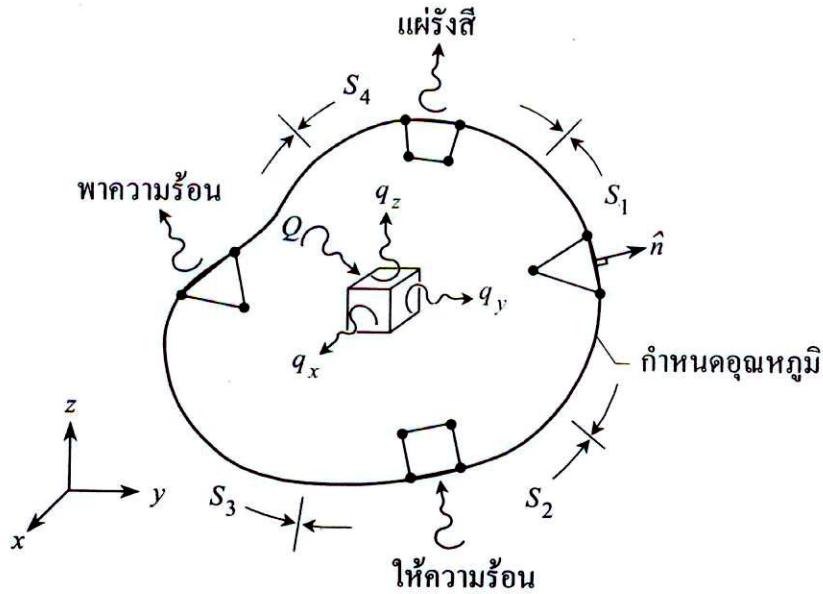
เอลิเมนต์เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง กำหนดให้ไว้ดังสมการที่ 2.34

$$\begin{aligned} [k^{(e)}] &= \frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} hA_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & hA_j \end{bmatrix} \\ &= [k_D^e] + [k_{Mi}^e] + [k_{Mj}^e] \end{aligned} \quad (2.34)$$

ซึ่งเมทริกซ์ที่สอง  $[k_{Mi}^e]$  เป็นผลลัพธ์มาจากเงื่อนไขขอบของการพาความร้อนที่จุดต่อ  $i$  และเมทริกซ์ที่สาม  $[k_{Mj}^e]$  เป็นผลลัพธ์มาจากเงื่อนไขขอบของการพาความร้อนที่จุดต่อ  $j$

### 2.5.2 สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ

การถ่ายเทความร้อนในของแข็งสามมิติที่ประกอบด้วยการนำความร้อนในโดเมน  $\Omega$  โดยที่พื้นผิวรอบนอก  $\Gamma$  อาจมีการกำหนดอุณหภูมิ การให้ปริมาณความร้อนที่ผิว การพาความร้อน รวมไปถึงการแผ่รังสี ดังรูปที่ 2.18 [10]



รูปที่ 2.18 การถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปในสามมิติ [10]

สมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนภายใต้สถานะไม่อยู่ตัวทั่วไปดังสมการที่

2.35

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $q_x, q_y$  และ  $q_z$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน (heat flow rate) ในแกน  $x, y$  และ  $z$

$Q$  = อัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นเอง (internal heat generation)

$\rho$  = ความหนาแน่นมวล (mass density)

$C$  = ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของวัตถุนั้น

$T$  = อุณหภูมิที่อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา  $t$  ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นตัวไม่รู้

ค่าที่ที่ต้องการหาจากการคำนวณ

จากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's Law) อัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความชันของการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์โดยทั่วไปดังสมการที่ 2.36



$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \underbrace{\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}}_{[k]} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.36)$$

โดย  $[k]$  เรียกว่าเมทริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งหากวัตถุนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic material) เมทริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ลดรูปลงสู่แบบที่ง่ายดังสมการที่ 2.37

$$[k] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

จากรูปที่ 2.18 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปอาจประกอบด้วย

ก. กำหนดอุณหภูมิที่ผิวตลอดผิว  $s_1$  : ดังสมการที่ 2.38

$$T_s = T_1(x, y, z, t) \quad (2.38)$$

ข. กำหนดปริมาณความร้อนเข้าตลอดผิว  $s_2$  : ดังสมการที่ 2.39

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -q_s \quad (2.39)$$

ค. กำหนดการพาความร้อนออกตลอดผิว  $s_3$  : ดังสมการที่ 2.40

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = h(T_s - T_\infty) \quad (2.40)$$

ง. มีการแผ่รังสีออกตลอดผิว  $s_4$  : ดังสมการที่ 2.41

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) - \alpha q_r \quad (2.41)$$

เมื่อ  $q_s$  = ปริมาณความร้อนที่พุ่งเข้าสู่วัตถุ (กำหนดให้ปริมาณความร้อนที่พุ่งเข้าสู่ผิวเป็นบวก)

$T_s$  = อุณหภูมิที่ผิว

$T_\infty$  = อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน

$\varepsilon$  = ค่าสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสี (emissivity)

$\sigma$  = ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant)

$\bar{T}_\infty$  = อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการแผ่รังสี

$\alpha$  = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (absorptivity)

$q_r$  = ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบเนื่องจากการแผ่รังสี

สมการเชิงอนุพันธ์ต้องการเงื่อนไขตอนเริ่มต้น (initial condition) ซึ่งโดยทั่วไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบได้ดังสมการที่ 2.42

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.42)$$

เมื่อ  $T_0$  = อุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆ บนวัตถุนั้น

### 2.5.3 ปัญหาเชิงเส้นภายใต้สถานะชั่วครู่

การถ่ายเทความร้อนแบบเชิงเส้นภายใต้สถานะชั่วครู่ (linear transient heat transfer problem) เป็นปัญหาอีกชนิดหนึ่งโดยอุณหภูมิที่จุดต่อนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้โดยไม่ยากนัก อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอาจมีสาเหตุมาจากเงื่อนไขขอบเขต เช่น โหลดของปริมาณความร้อนนั้นมีการเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาอุณหภูมิที่เวลาต่างกันซึ่งเป็นผลลัพธ์ของปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่นั้นก็เปรียบเสมือนกับการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิของปัญหานั้นภายใต้สถานะอยู่ตัวแล้วนำมาเรียงประกอบกันขึ้น สมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปสำหรับปัญหาเชิงเส้นภายใต้สถานะชั่วครู่ดังสมการที่ 2.43 [10]

$$[C]\{\dot{T}\} + [[K_c] + [K_h]]\{T\} = \{Q_c\} + \{Q_o\} + \{Q_q\} + \{Q_h\} \quad (2.43)$$

โดยเมทริกซ์จัตุรัสต่างๆ ทางด้านซ้ายของสมการนั้นคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และโหลดเวกเตอร์ทั้งสามเวกเตอร์ท้ายทางด้านขวาของสมการนั้นอาจขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเวลา นั่นคือเป็นโหลดเวกเตอร์

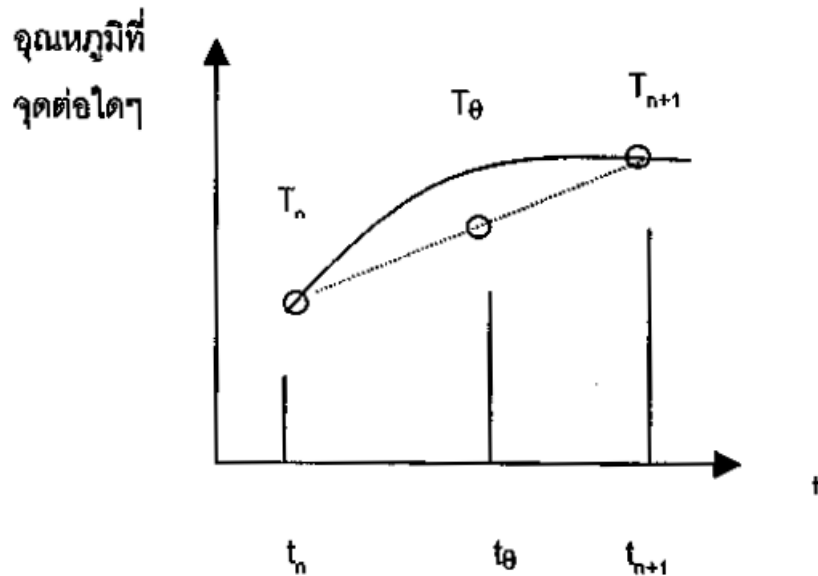
ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการผลิตความร้อนได้เอง เพื่อให้ง่ายแก่การทำความเข้าใจสามารถเขียนสมการโดยย่อดังสมการที่ 2.44

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (2.44)$$

โดย  $[K] = [K_c] + [K_h]$  (2.45)

$$\{Q\} = \{Q_c\} + \{Q_o\} + \{Q_q\} + \{Q_h\} \quad (2.46)$$

วิธีการแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือการใช้ความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (recurrence relations) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.19 กล่าวคือ ที่เวลา  $t_n$  เรารู้ค่าอุณหภูมิ  $T_n$  และเราจะใช้ช่วงเวลา (time step)  $\Delta t$  เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิ  $T_{n+1}$  ที่เวลา  $t_{n+1}$



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อใดๆ กับเวลา [10]

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าที่เวลา  $t_\theta$  ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา  $\Delta t$  สามารถเขียนเวลาดังสมการที่

2.47

$$t_\theta = t_n + \theta \Delta t \quad (2.47)$$

โดย  $0 \leq \theta \leq 1$  ในช่วงเวลาดังกล่าวค่าความชันของอุณหภูมิโดยประมาณดังสมการที่ 2.48

$$\dot{T}_\theta \cong \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} \quad (2.48)$$

และอุณหภูมิโดยประมาณที่เวลา  $t_\theta$  ดังสมการที่ 2.49

$$T_\theta \cong (1 - \theta)T_n + \theta T_{n+1} \quad (2.49)$$

จะใช้หลักการดังแสดงในสมการที่ 2.48 ถึง 2.49 เพื่อการคำนวณหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิในสถานะชั่วครู่จากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ 2.44 โดยเริ่มจากการเขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวที่เวลา  $t_\theta$  ดังสมการที่ 2.50

$$[C]\{\dot{T}\}_\theta + [K]\{T\}_\theta = \{Q\}_\theta \quad (2.50)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ 2.48 เวกเตอร์ของความชันของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ดังสมการที่ 2.51

$$\{\dot{T}\}_\theta \cong \frac{\{T\}_{n+1} - \{T\}_n}{\Delta t} \quad (2.51)$$

และในทำนองเดียวกันกับสมการ 2.49 เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆ ดังสมการที่ 2.52

$$\{T\}_\theta \cong (1 - \theta)\{T\}_n + \theta\{T\}_{n+1} \quad (2.52)$$

หากโหลดเวกเตอร์ทางด้านขวามือของสมการ 2.44 นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โหลดเวกเตอร์ดังกล่าวที่เวลา  $t_\theta$  สามารถคำนวณดังสมการที่ 2.53

$$\{Q\}_\theta \cong (1 - \theta)\{Q\}_n + \theta\{Q\}_{n+1} \quad (2.53)$$

แทนสมการ 2.51 ถึง 2.53 ลงในสมการที่ 2.50 จัดพจน์โดยให้เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่ไม่รู้ค่าอยู่ทางซ้ายของสมการ ดังสมการที่ 2.54

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C] + \theta[K]\right)\{T\}_{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t}[C] - (1-\theta)[K]\right)\{T\}_n + (1-\theta)\{Q\}_n + \theta\{Q\}_{n+1} \quad (2.54)$$

## 2.6 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

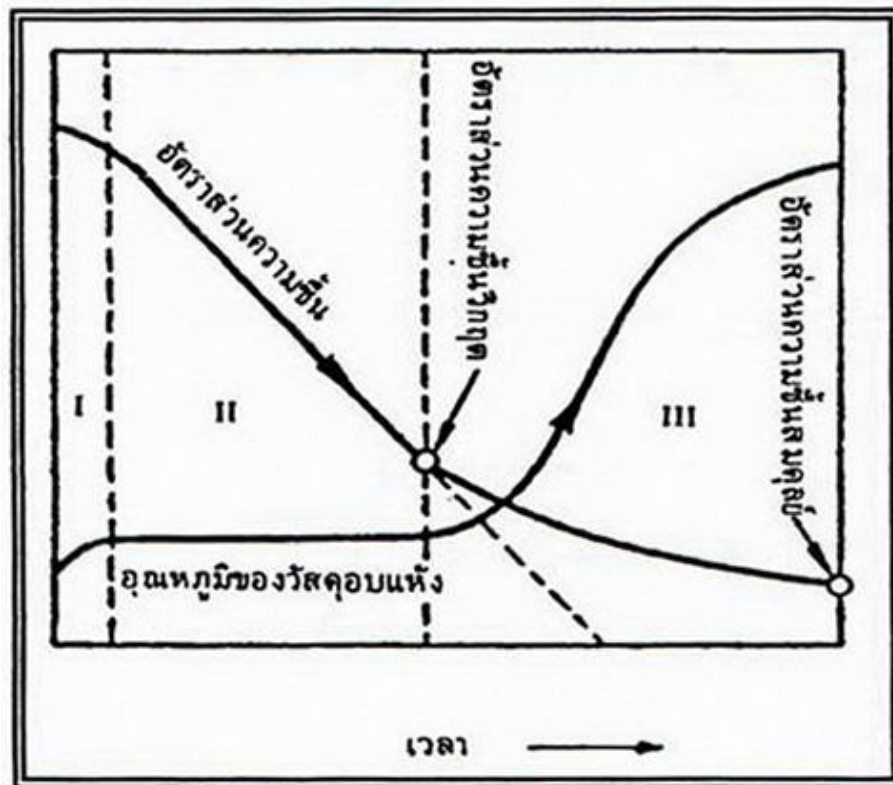
### 2.6.1 ลักษณะทั่วไปของการอบแห้ง

การอบแห้งจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งโดยผ่านอากาศไปยังเนื้อของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง และการถ่ายเทมวลของวัสดุไปยังอากาศจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่วัสดุส่วนใหญ่ได้รับ จะถูกทำให้น้ำภายในเนื้อวัสดุระเหยออก ในการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นคงที่ปรากฏเหมือนกันมากที่สุดคือ เมื่อเกิดการสัมผัสขึ้นครั้งแรกอุณหภูมิที่สัมผัสครั้งแรกก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งแล้วค่าๆ นั้นก็จะคงที่ไประยะหนึ่ง หลังจากนั้นอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

ส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเนื้อวัสดุภายในกระบวนการอบแห้งและความชื้นที่ระเหยออกมาจะเป็นดังนี้คือ ในตอนแรกความชื้นจะถูกขับออกจากเนื้อวัสดุเพียงเล็กน้อยความชื้นจะค่อยๆ ลดลงในตอนเริ่มต้นต่อมาความชื้นจะมีอัตราการระเหยอย่างรวดเร็วและมีค่าอัตราการระเหยอย่างคงที่ ทำให้ความชื้นในเนื้อวัสดุที่อบแห้งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วพอถึงระยะหนึ่งความชื้นก็จะมีค่าลดลงอีกและช้าอย่างมากจนกระทั่งไม่ระเหยเลย ถ้าไม่เปลี่ยนสภาวะของก๊าซที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรูปที่ 2.20

การตากแห้งอาศัยแสงแดดเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่อาหาร เพื่อให้น้ำระเหยออกจากอาหาร และอาศัยลมช่วยพัดพาไอน้ำออกไป วิธีนี้ต้องพึ่งพาธรรมชาติ ต้องการเนื้อที่ในการตากมากกว่าการอบแห้ง คุณภาพไม่แน่นอน ควบคุมคุณภาพได้ยาก คุณภาพของผักผลไม้ตากแห้ง ขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศในระยะที่ตาก ผักผลไม้ตากแห้งมักเปราะเปื้อนฝุ่นละอองและอาจมีแมลงและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อน ถ้าฝนตกอาจทำให้ผักผลไม้แห้งไม่ทันมีการเน่าเสียหรือเสื่อมคุณภาพ

การอบแห้งอาศัยเครื่องจักรกลไม่ต้องพึ่งพาธรรมชาติให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น ไฟฟ้า หรือ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซหุงต้ม น้ำมันเชื้อเพลิง วัสดุการเกษตรและพื้นโรงงานอุตสาหกรรมใช้ไอน้ำเป็นแหล่งให้ความร้อน และมีเครื่องจักรสำหรับทำแห้งหลายแบบสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของอาหารที่จะทำให้อแห้ง การอบแห้งใช้พื้นที่น้อยกว่าการตากแห้งสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้คงที่ และมีคุณภาพดีกว่าและสามารถควบคุมความสะอาดได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือ ต้องการใช้จ่ายในการลงทุนซื้อตู้อบและค่าพลังงานในการดำเนินการอบแห้งมากกว่าการตากแห้ง อย่างไรก็ตามราคาของผลิตภัณฑ์อาจจะสูงกว่าการตากแดดและระยะเวลาในการอบแห้งจะสั้นกว่า และการอบแห้งได้เปรียบในช่วงที่มีฝนตกหรือไม่ค่อยมีแดด



รูปที่ 2.20 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง [16]

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำแห้งได้เปรียบวิธีการถนอมอาหารวิธีอื่น คือ ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบากว่าอาหารสดหรือแช่แข็งหรือบรรจุกระป๋อง ต้นทุนการผลิตถูกกว่า ใช้แรงงาน ภาชนะบรรจุ และเครื่องจักรน้อยกว่า สามารถเก็บรักษาและขนส่งได้สะดวกไม่เปลืองพื้นที่

การอบแห้ง อาศัยหลักการหลายๆ วิธีรวมกัน ได้แก่ การลดปริมาณน้ำในอาหาร การใช้สารเคมีป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การใช้ความร้อนหรือสารเคมีในการทำลายเอนไซม์ในอาหารเพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาล และการใช้ภาชนะบรรจุในการป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ และป้องกันการเพิ่มความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้การเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีได้นานอีกด้วย

### 2.6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการทำแห้ง

ในการทำแห้งอาหารต่างๆ ไป มีปัจจัยหลายประการที่จะทำให้การอบแห้งนั้นเกิดได้เร็วหรือช้า ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

ก. ลักษณะทางธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีรูพรุนมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งเร็ว นอกจากนั้นพื้นที่ผิวของอาหารก็จะมีผลต่ออัตราการอบแห้งด้วย

ข. ขนาดและรูปร่างของอาหาร อาหารส่วนใหญ่จะคำนึงถึงเฉพาะความหนาของอาหารเนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร ยิ่งอาหารหนามากเท่าไร การอบแห้งจะเกิดได้ช้า

ค. ปริมาณของอาหารที่ใส่ในเครื่องอบแห้งและการจัดเรียง เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งหากใส่ปริมาณอาหารเข้าไปมากเกินไป จะทำให้การอบแห้งทำได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะบริเวณช่วงกลางๆ น้ำจะระเหยออกได้ไม่ดี ทำให้อัตราการอบแห้งเกิดได้ช้ามาก

ง. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของลม ความชื้นของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วของลม นอกจากนั้นอุณหภูมิที่ใช้ออบก็จะเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นกัน

จ. ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำๆ น้ำก็จะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้น การทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

### 2.6.3 ประโยชน์ของการทำแห้ง

ก. เพื่อการถนอมรักษาอาหาร อาหารที่แห้งแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ข. เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนัก อาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาตรและน้ำหนักลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการรักษาและการขนส่ง

ค. เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้น ในกรณีนี้อาจไม่จริงเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตนั้นๆ

ง. ทำให้มีใช้ในยามขาดแคลน นอกฤดูการผลิตหรือแหล่งห่างไกล

จ. ให้ความสะดวกในการใช้งาน เช่น พริกแห้งสามารถทำเป็นพริกป่นได้เร็ว

กรณีของเมล็ดพืช เกษตรกรสามารถที่จะเก็บเกี่ยวได้เมื่อเมล็ดพืชยังมีความชื้นสูงอยู่ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืชอันเนื่องมาจากการร่วงหล่นก่อนและหลังเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยวที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองอย่างได้ผล ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือแห้ง

### 2.6.4 ความชื้น

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุใดๆ ความชื้นในผลผลิตผลทางการเกษตรเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดว่าผลผลิตทางการเกษตรนั้นจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานเท่าใด ความชื้นในผลผลิตผลทางการเกษตร (Agricultural products moisture)

ลักษณะความชื้นในผลผลิตผลทางการเกษตรสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

ก. ความชื้นที่เกาะกันด้วยแรงทางเคมี

ความชื้นประเภทนี้อยู่ใน โมเลกุลของสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน

วิตามิน และเกลือแร่ เป็นต้น ในการที่จะแยกความชื้นประเภทนี้ออกจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต้องอาศัยวิธีทางเคมี หรือการอบในเตาอบ ซึ่งทำให้โครงสร้าง และคุณภาพเปลี่ยนไป

ข. ความชื้นที่เกาะกันด้วยแรงทางกายภาพ

ความชื้นประเภทนี้อยู่ถัดจากชั้นที่เล็ดออกมา จะเกาะกันในรูปของแรงทางกายภาพ การที่จะแยกความชื้นประเภทนี้ออกจากเมล็ดพืช ต้องอาศัยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ การออสโมซิส ซึ่งจะทำให้โครงสร้าง และคุณภาพของเมล็ดพืชเปลี่ยนไป

ค. ความชื้นที่เกาะกันด้วยแรงทางกล

ความชื้นประเภทนี้อยู่ชั้นนอกสุด อยู่ในรูปของน้ำอิสระ การที่จะแยกความชื้นประเภทนี้ออกจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ทำได้โดยการอบแห้งอย่างง่าย ๆ เช่น การนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรตากแดด เป็นต้น และไม่ทำให้โครงสร้างและคุณภาพของเมล็ดพืชเปลี่ยนไป ความชื้นประเภทนี้เป็นความชื้นที่ระเหยออกมาในการอบแห้งทั่วไป

### 2.6.5 ความชื้นในวัสดุ

การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

ก. การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยตรง ได้แก่ วิธีใช้เตาอบ วิธีการใช้สูญญากาศ และวิธีการกลั่น เป็นต้น

ข. การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยทางอ้อม ได้แก่ การใช้เครื่องมือวัด

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

ก. ความชื้นแบบมาตรฐานเปียก (Wet basis) คำนวณได้จากสมการที่ 2.55

$$M.C_{wb} = \frac{W-d}{W} \times 100 \quad (2.55)$$

ข. ความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis) คำนวณได้จากสมการที่ 2.56

$$M.C_{db} = \frac{W-d}{d} \times 100 \quad (2.56)$$

เมื่อ  $M.C_{wb}$  = ความชื้นแบบมาตรฐานเปียก, % (wb)

$M.C_{db}$  = ความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง, % (wd)

$W$  = มวลของวัสดุ, g

$d$  = มวลของวัสดุแห้ง, g

สำหรับความชื้นแบบมาตรฐานเปียกนิยมใช้กันในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ ส่วนความชื้นแบบมาตรฐานแห้งนิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทาง



ทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลิตภัณฑ์จากการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึง มีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย



## บทที่ 3

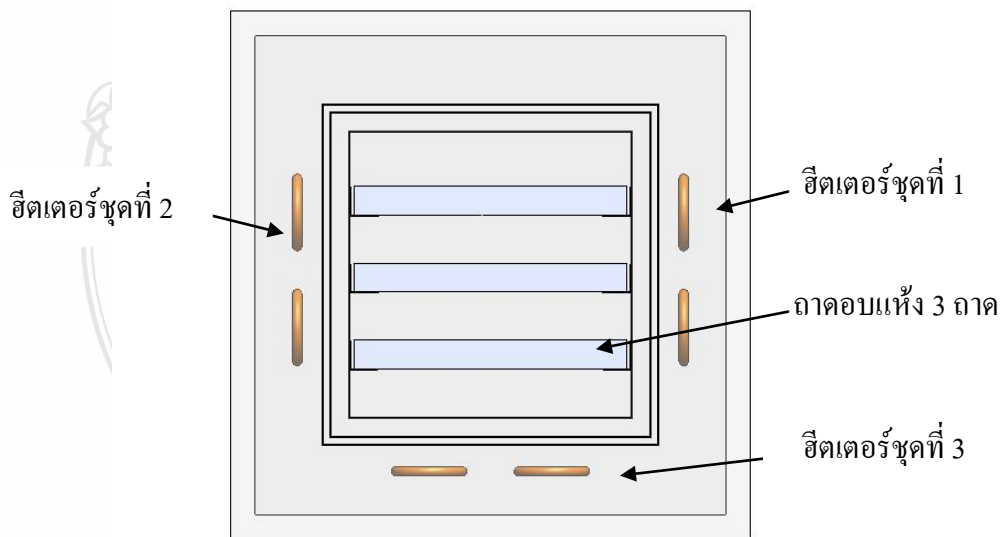
### วิธีการดำเนินการวิจัย

การทำงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้ง โดยเลือกวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ และศึกษาการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้งกับวัสดุเกษตรในการอบแห้งในสภาพสูญญากาศ

#### 3.1 ศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสูญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 3.1.1 การสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองของการอบแห้งสำหรับการศึกษานั้น มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 30 cm ยาว 30 cm และสูง 30 cm ทำด้วยสแตนเลส เบอร์ 304 ติดตั้งชุดให้ความร้อน (Heater) จำนวน 6 ตัว มีฉนวนชนิดไมโครไฟเบอร์หนา 5 cm ด้านในมีถาดทำด้วยสแตนเลส เบอร์ 304 จำนวน 3 ชั้น และติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) จำนวน 16 จุด ดังรูปที่ 3.1 และ 3.5



รูปที่ 3.1 ภาพด้านหน้าแบบจำลองตู้อบแห้ง

##### 3.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

กำหนดการถ่ายเทความร้อนแบบเชิงเส้นภายใต้สภาวะชั่วคราว เป็นปัญหาอีกชนิดหนึ่ง โดยอุณหภูมิที่จุดต่อนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้โดยไม่ยากนัก

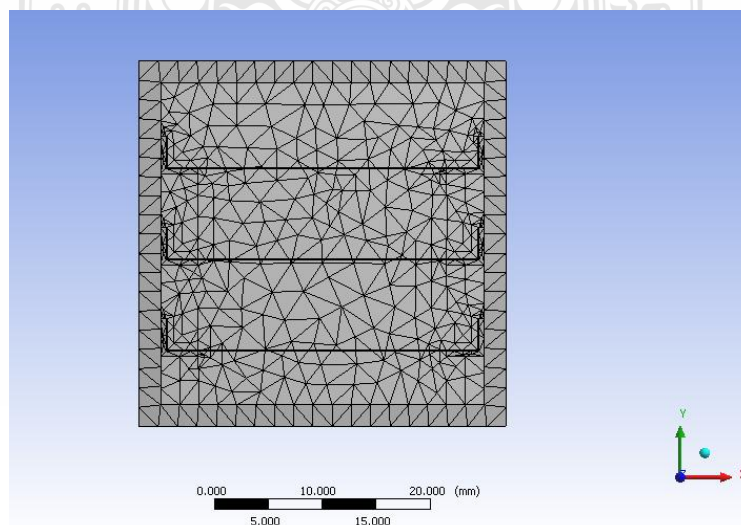
อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอาจมีสาเหตุมาจากเงื่อนไขขอบเขต[10] จากลักษณะของแบบจำลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนโดยรอบแก่แบบจำลองตู้อบแห้งเป็นแบบคงที่ และส่วนบริเวณโดยรอบของแบบจำลองจะไม่มี การสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม ดังนั้น สำหรับการวิจัยจะวิเคราะห์การให้ความร้อนขณะอุณหภูมิคงที่ อุณหภูมิและเวลาที่ ได้จากการทดสอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ในช่วง 70 - 95 องศาเซลเซียส[17] และจากการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่ เหมาะสมในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดาด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศยี่ห้อ Binder เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทดสอบ[14] ดังนั้น สำหรับการทดสอบจึงแบ่งอุณหภูมิที่ทดสอบออกเป็น 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ความดันสุญญากาศ -15 cmHg.[15] โดยทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ขณะที่อุณหภูมิคงที่
2. ให้ความร้อนแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ขณะที่อุณหภูมิคงที่
3. ให้ความร้อนแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ขณะที่อุณหภูมิคงที่

### 3.1.3 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1. เริ่มจากการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองซึ่งในกรณีนี้ค่าเหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมเป็นจำนวน 69,288 เอลิเมนต์ ประกอบด้วย โหนดทั้งหมด 161,940 โหนด โดยแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเป็นแบบเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของห้องอบแห้ง

## 2. ป้อนค่า Boundary Conditions ลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย

2.1 จำนวนของชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 69,288 เอลิเมนต์

2.2 จำนวนของโหนดเท่ากับ 161,940 โหนด

2.3 กำหนดความละเอียดของเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดเท่ากับ 100%

2.4 เลือกวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบ Steady state และแบบ Transient

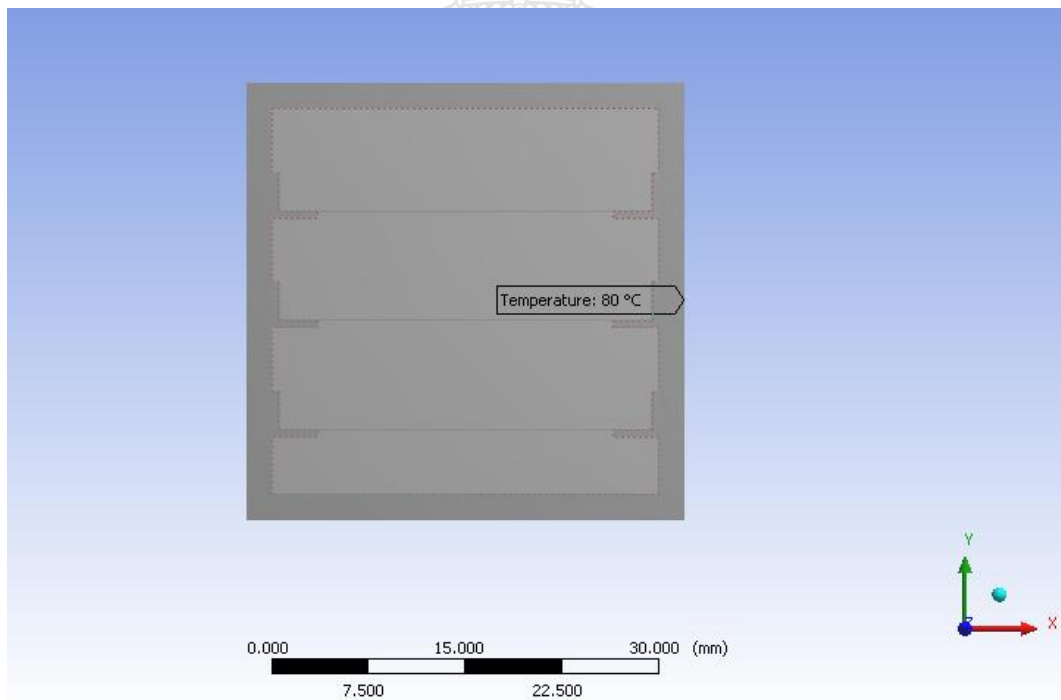
2.5 เลือกประเภทของการวิเคราะห์จากการ simulation

2.6 เลือกประเภทของวัสดุเป็น Stainless steel

2.7 กำหนดอุณหภูมิเริ่มแรกที่จุดต่อต่างๆ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ดังรูปที่

3.3

2.8 กำหนดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 การกำหนดอุณหภูมิเริ่มแรก

## 3.2 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสูญญากาศ

### 3.2.1 ข้อมูลจำเพาะสำหรับการศึกษา

- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1. ห้องอบแห้งขนาด                            | 2.7 m <sup>3</sup> |
| 2. ชุดขดลวดให้ความร้อนประกอบด้วยฮีตเตอร์ขนาด | 3000 watt.         |
| 3. เครื่องอัดอากาศในการดูดอากาศ              | 2 ตัว              |

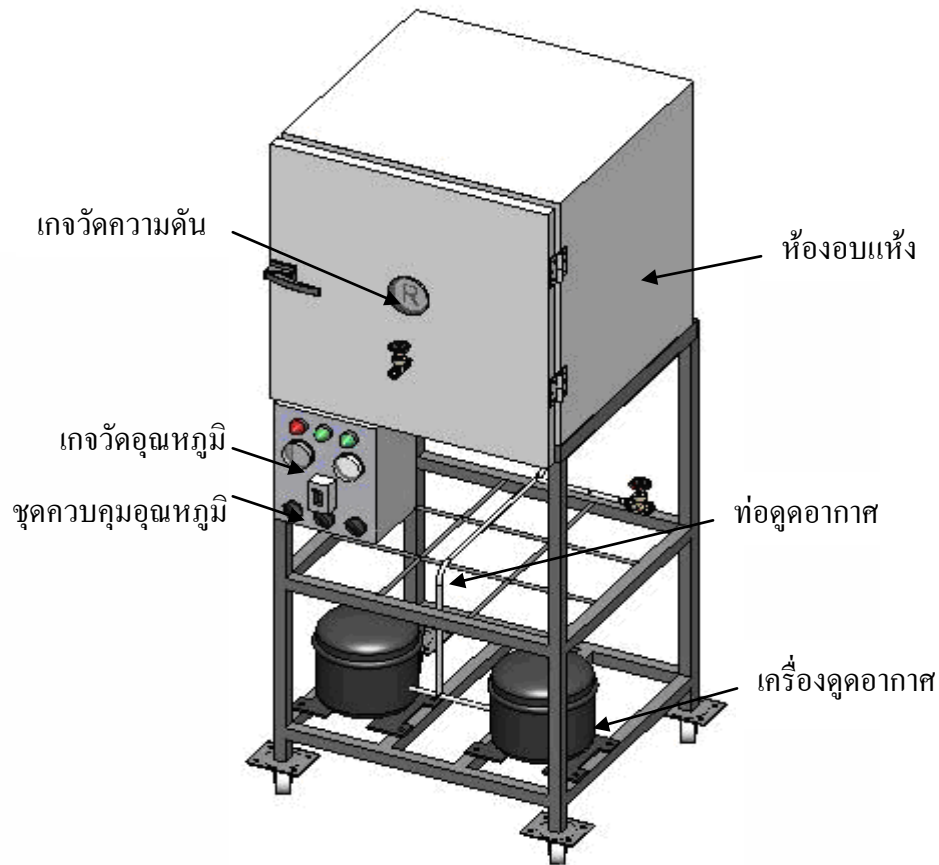
4. ความชื้นเฉลี่ยของพริก	14 % (wb.)
5. ผนังของห้องอบทำด้วยสแตนเลสเบอร์ 304 หนา	0.5 mm.
6. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสแตนเลส	14.9 W/m K
7. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนใยแก้ว	0.04 W/m K
8. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็ก	80.2 W/m K
9. ความดันสุญญากาศ	-15 cmHg.

### 3.2.2 เครื่องมือและวิธีการ

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ เป็นเครื่องที่ออกแบบและสร้างโดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ลักษณะของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.4

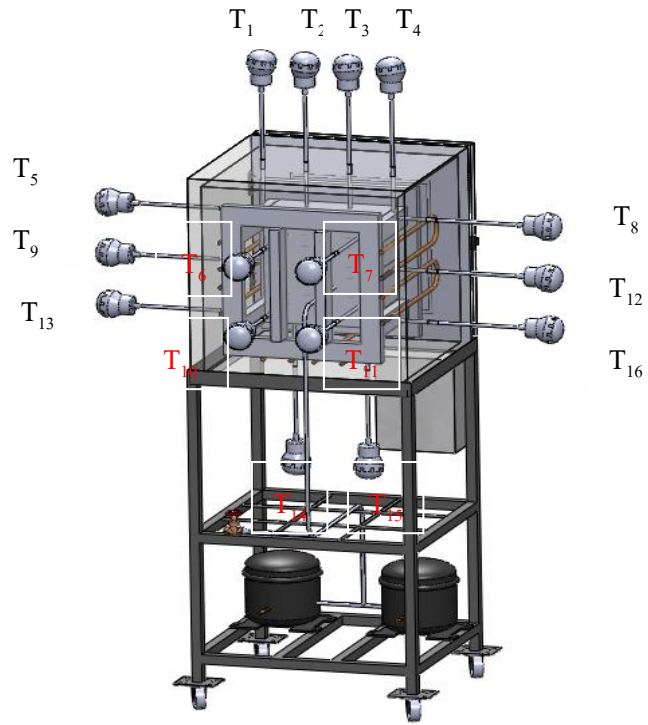
1. ห้องอบแห้งขนาด 30 cm X 30 cm X 30 cm
2. ชุดควบคุมให้ความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิขนาด 3000 วัตต์
3. เครื่องอัดอากาศในการดูดอากาศ 2 ตัว
4. ชุดควบคุมอุณหภูมิและชุดควบคุมการเปิด-ปิด เครื่อง
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลขมีความละเอียด 0.01 กรัม
6. เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K จำนวนหัววัด 16 จุด
7. นาฬิกาจับเวลา



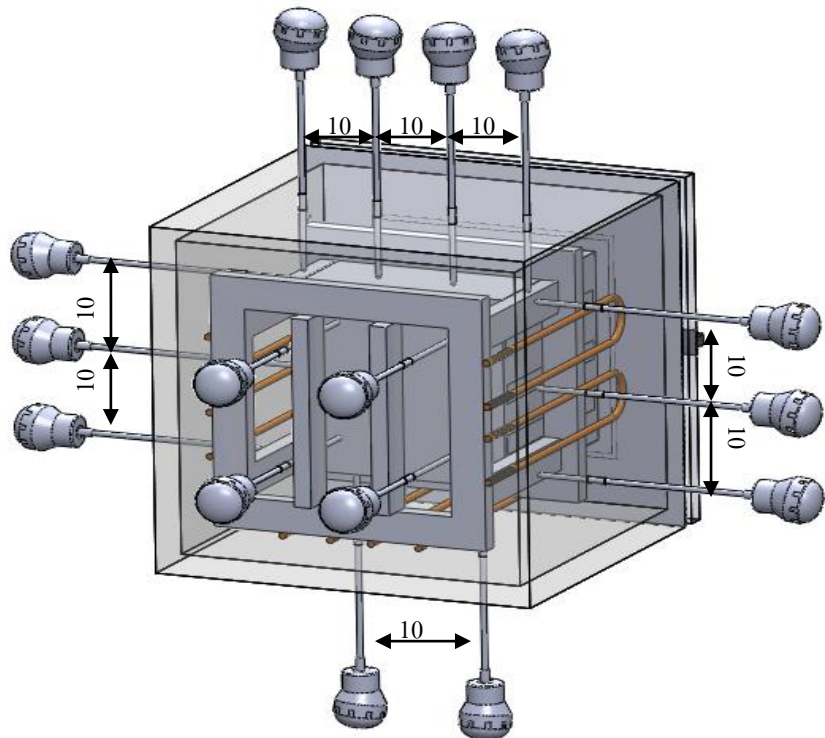
รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบการอบแห้งสุญญากาศ [14]

## 2. วิธีการศึกษา

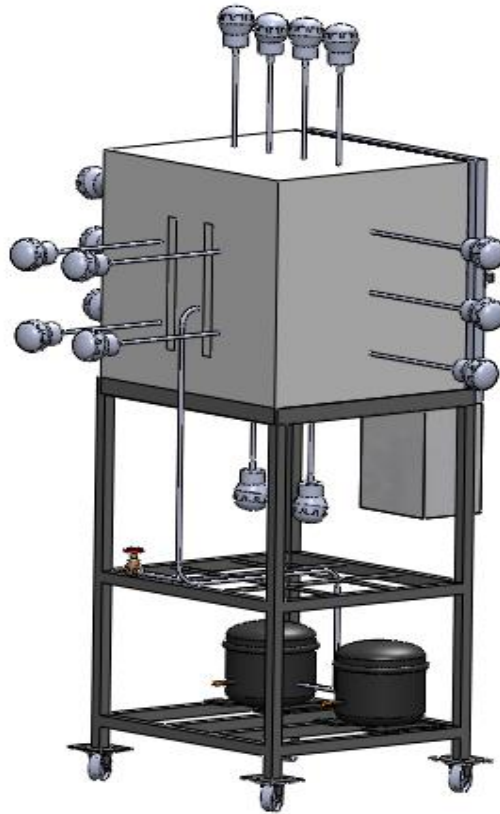
การศึกษการถ่ายเทความร้อนในห้องอบแห้งสุญญากาศดั่งแบบจำลองที่มีตำแหน่งการวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 3.5 เพื่อต้องการทราบถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้น ต้องมีการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลรอบๆ ชุดทดลอง โดยใช้ฉนวนเป็นใยแก้วหุ้มเพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากห้องอบขึ้นในเป็นยังผนังชั้นนอก และจะติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลจำนวน 16 จุดรอบๆ ชุดทดลองภาพด้านหน้า ดังรูปที่ 3.6 และภาพด้านหลังดังรูปที่ 3.7 เพื่อบันทึกอุณหภูมิที่เกิดจากการอบแห้ง อุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการทดสอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่เป็นรูปร่างกลม เช่น ถ้ำใย หรือ วัสดุที่เป็นพีซีบี หรือชิ้นเล็กๆ เช่น ถั่ว พริก เป็นต้น การอบแห้งอุณหภูมิภายในถึงอบอยู่ในช่วง 70 - 95 องศาเซลเซียส[17] และจากการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดาด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศยี่ห้อ Binder เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้น[14] ดังนั้นสำหรับการทดสอบจึงแบ่งอุณหภูมิที่ทดสอบออกเป็น 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ความดันสุญญากาศ -15 cmHg.[15] การทดสอบการถ่ายเทความร้อนในห้องอบแห้งสุญญากาศจะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 ระยะห่าง (cm) และตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล 16 จุด



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการติดตั้งโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล 16 จุด (ภาพด้านหลัง)



รูปที่ 3.8 การต่อเข้าคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน



### 3.3 ศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา

#### 3.3.1 การหาความชื้นของพริก

ก. การทดสอบหาความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ มีวิธีการคือคัดเลือกเม็ดพริกสดพันธุ์จินดาที่ไม่มีความผิดปกติจากโรคและแมลง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักให้ได้ 200 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง มาอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำพริกแห้งออกมาชั่งน้ำหนักหาค่าเฉลี่ย และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น

ข. การทดสอบหาความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ นำพริกนำมาชั่งน้ำหนักให้ได้ 200 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง มาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ความดันสุญญากาศ - 15 cmHg เมื่อครบ 6 ชั่วโมง นำพริกแห้งออกมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น จากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเวลาของการอบแห้งพริกเป็น 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยเครื่องสุญญากาศมาอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำพริกแห้งออกมาชั่งน้ำหนักหาค่าเฉลี่ย และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้าย

#### 3.3.2 การหาความสูญเสียของพริก

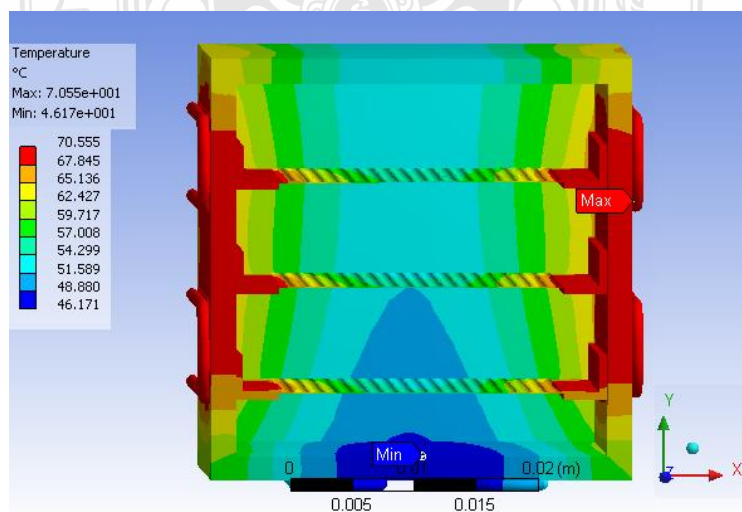
การหาความสูญเสียของพริกโดยการนำพริกที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเวลาของการอบแห้งพริกเป็น 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ นำพริกแห้งออกมาชั่งน้ำหนัก คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น และนำตัวอย่างที่ได้จากการอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำพริกแห้งออกมาชั่งน้ำหนักหาค่าเฉลี่ย และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้าย จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกแห้ง มอก. 456-2526 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิด คุณลักษณะที่ต้องการ สุขลักษณะ ภาชนะบรรจุ ปริมาณ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน และการตรวจสอบและการวิเคราะห์พริกแห้ง ความชื้นร้อยละไม่เกิน 14% (wb) ถ้าพริกมีค่าความชื้นน้อยกว่าหรือมากกว่าที่กำหนดแสดงว่าพริกมีความสูญเสียและไม่เหมาะสมกับการเก็บรักษาจะเกิดสารอัลฟาโทกซินซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย

## บทที่ 4

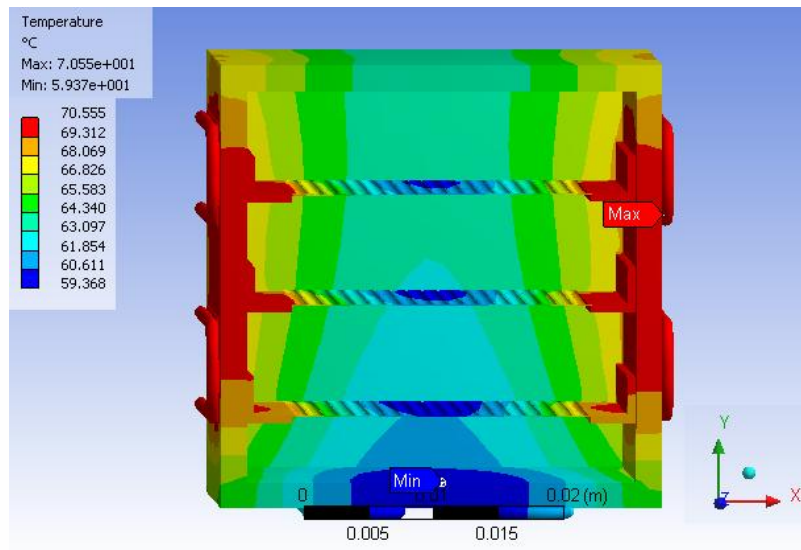
### ผลของการวิจัย

#### 4.1 ผลการศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของห้องอบแห้งสูญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

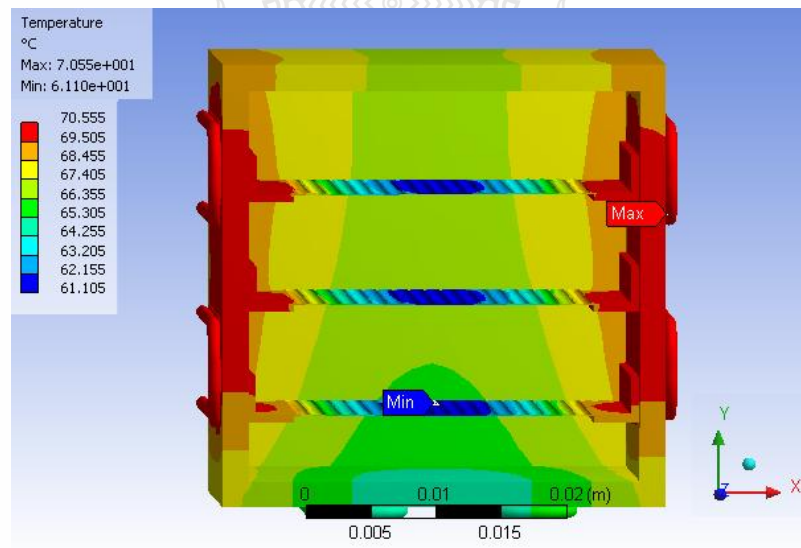
การศึกษาแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนเริ่มจากการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองเป็นจำนวน 69,288 เอลิเมนต์ ประกอบด้วยจุดต่อทั้งหมด 161,940 จุดต่อ จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง โดยให้ความร้อนโดยตรงคงที่แก่แบบจำลอง และกำหนดให้ผนังไม่มีการสูญเสียความร้อน โดยจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในศึกษาการอบแห้ง คือ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.9 พบว่าแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นแบบจำลองที่มีการกระจายของอุณหภูมิเหมาะสมที่สุด จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวาจะคงที่อยู่ช่วงประมาณ 80 องศาเซลเซียส ผนังด้านบนอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 71 องศาเซลเซียส ผนังด้านล่างอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 72 องศาเซลเซียส ส่วนตรงกลางห้องอบแห้งอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 75 องศาเซลเซียส การกระจายอุณหภูมิจากผนังซ้ายและขวาไปยังส่วนกลางซึ่งเป็นส่วนของตะแกรงโดยอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 69 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่กระจายจะลดลงจากอุณหภูมิที่ผนังเนื่องจากเป็นส่วนของตะแกรงมีรูและมีช่องว่างจำนวนมากเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิมีการกระจายช้าและการกระจายของอุณหภูมิไม่ทั่วถึง



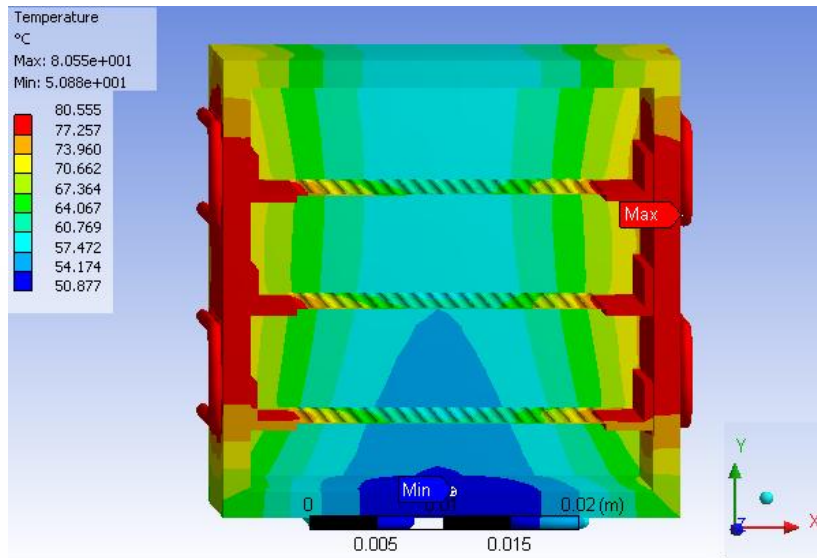
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



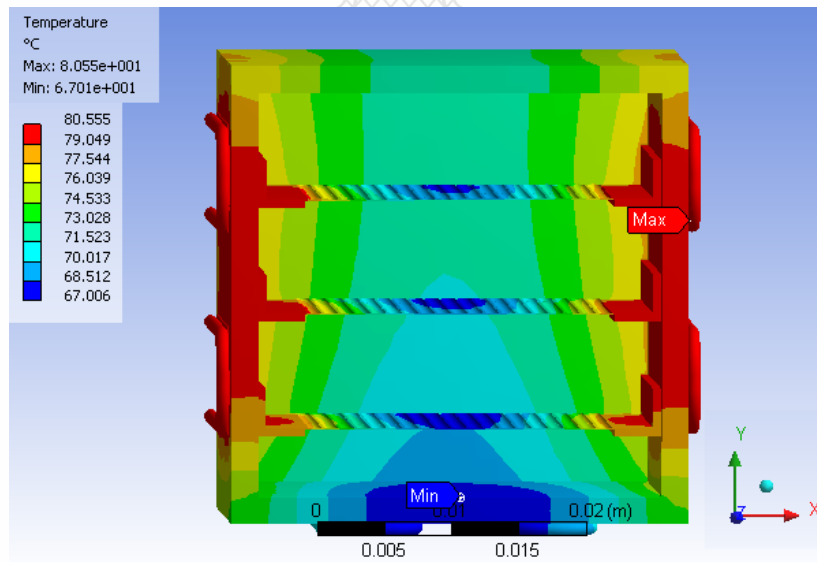
รูปที่ 4.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



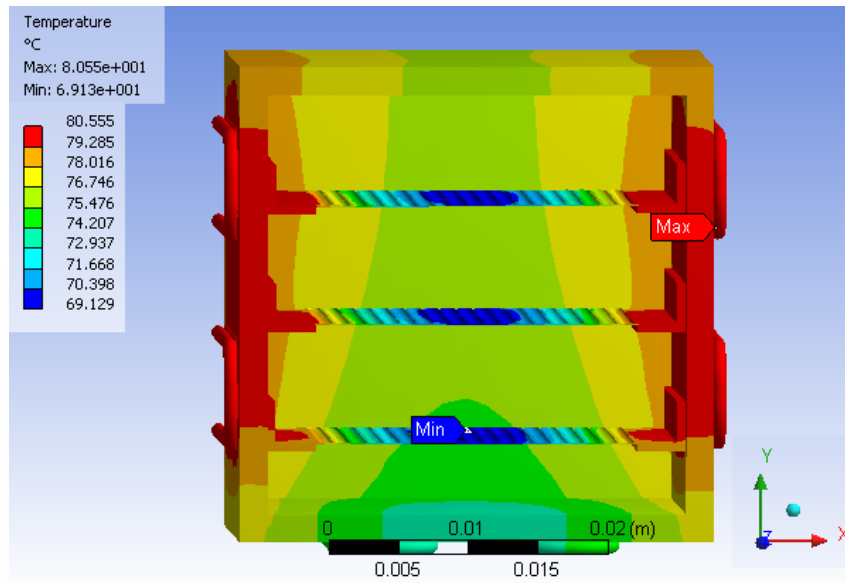
รูปที่ 4.3 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง



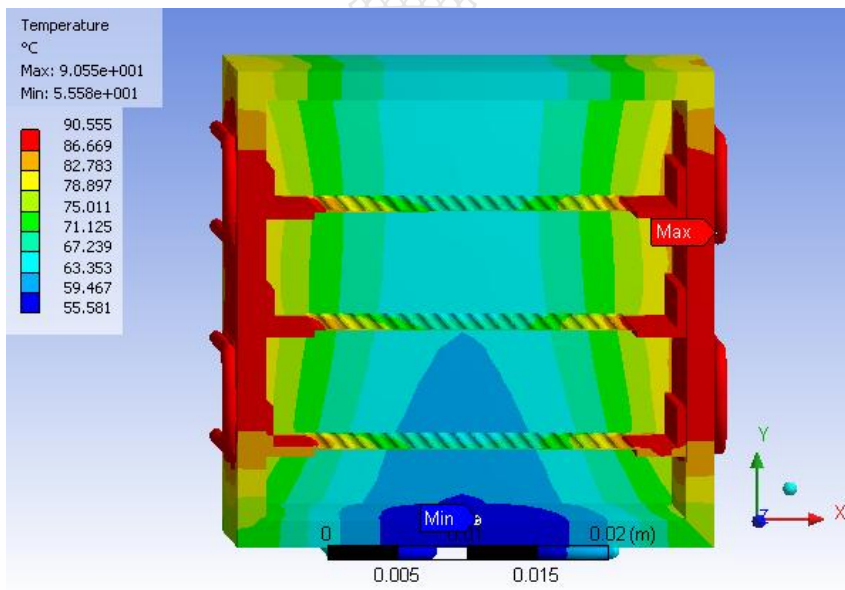
รูปที่ 4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



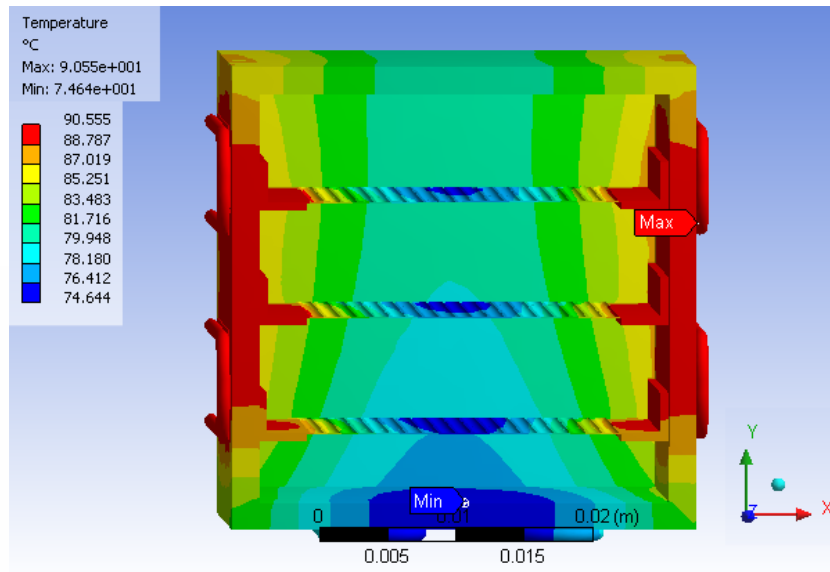
รูปที่ 4.5 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



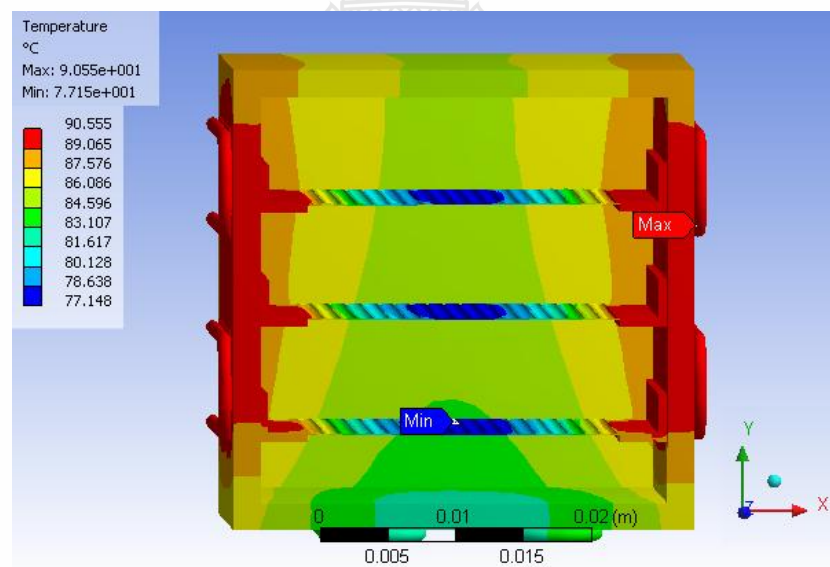
รูปที่ 4.6 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง

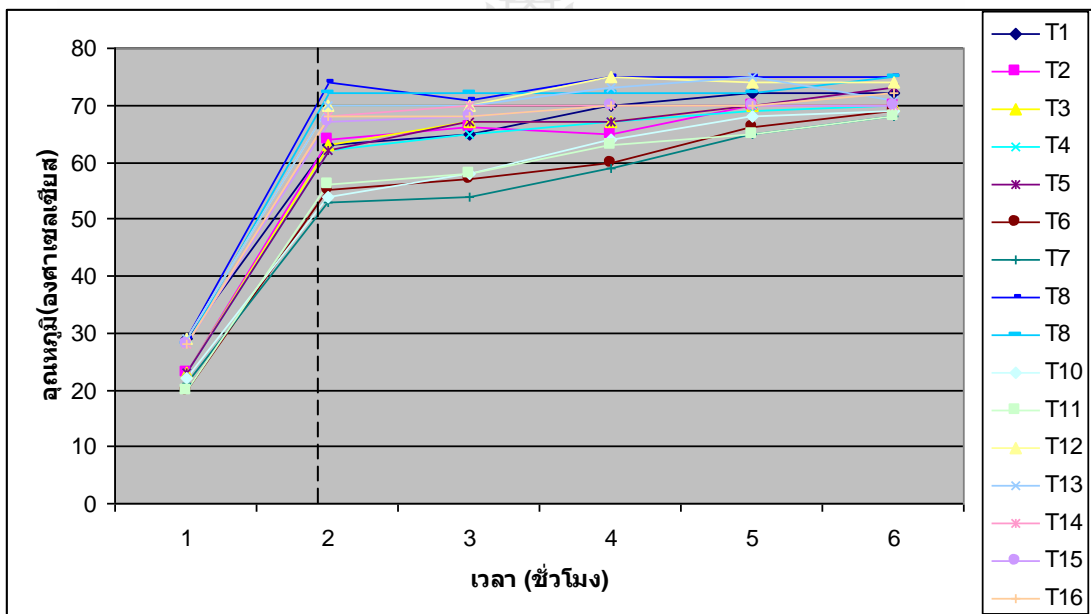


รูปที่ 4.9 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง

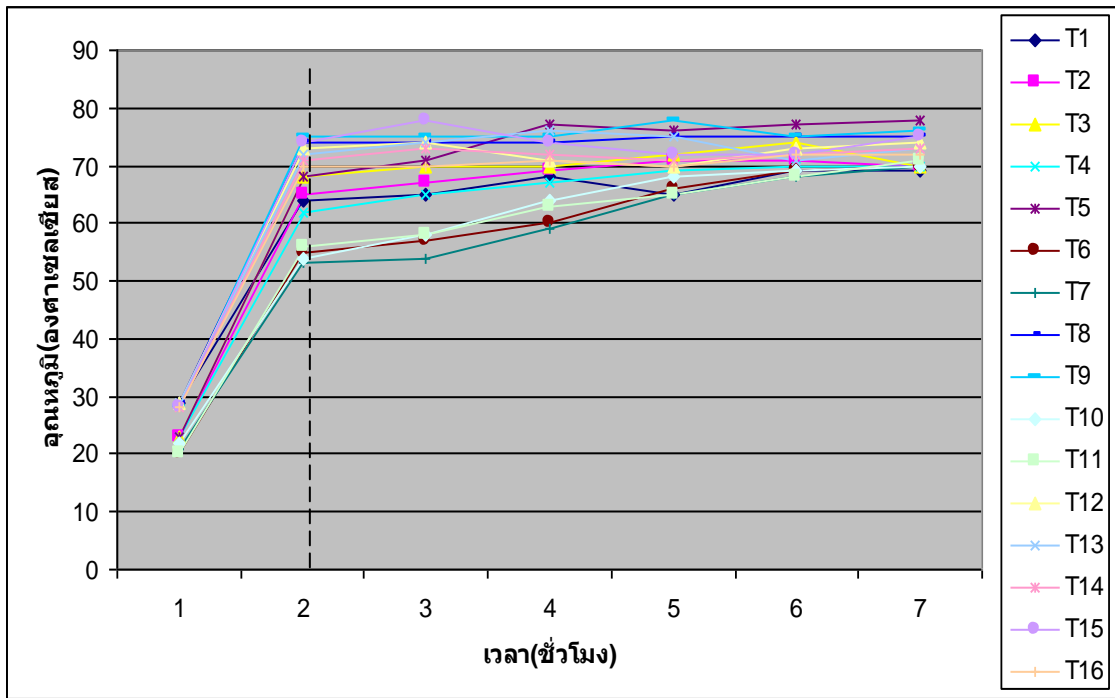
## 4.2 ผลการศึกษาการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งสูญญากาศ

จากการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการอบแห้งสภาพสูญญากาศ โดยอุณหภูมิที่ทดสอบ 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ความดันสูญญากาศ -15 cmHg. โดยนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.18 และวิเคราะห์ข้อมูลที่อุณหภูมิถ่ายเทความร้อนที่เวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะคงที่โดยในรูปจะเป็นช่วงก่อนเส้นประ พบว่าการถ่ายเท

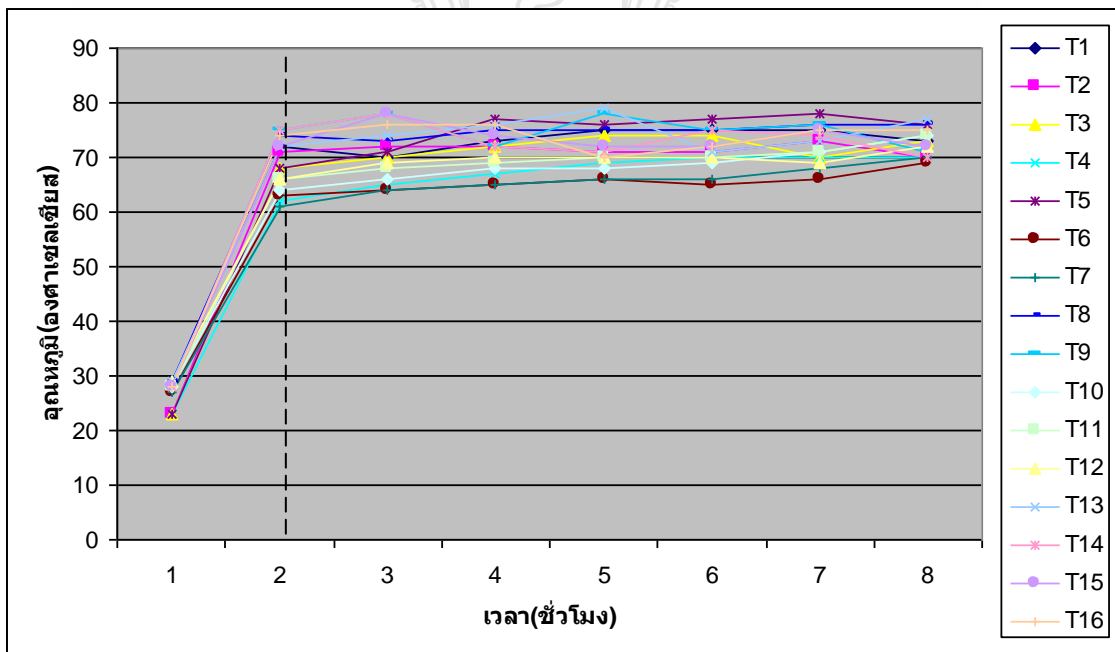
ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นการถ่ายความร้อนที่เหมาะสมซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านบน T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> และ T<sub>4</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 79 องศาเซลเซียส ผนังด้านซ้าย T<sub>5</sub>, T<sub>9</sub> และ T<sub>13</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 82 องศาเซลเซียส ผนังด้านขวา T<sub>8</sub>, T<sub>12</sub> และ T<sub>16</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 80.66 องศาเซลเซียส ผนังด้านล่าง T<sub>4</sub>, T<sub>15</sub> และ T<sub>16</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 78.33 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>, T<sub>10</sub> และ T<sub>11</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 77.25 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิที่บริเวณผนังห้องอบแห้ง จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ควบคุม และหลังจากนั้นไม่ว่าจะเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นเท่าใดก็ตาม ค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.10 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

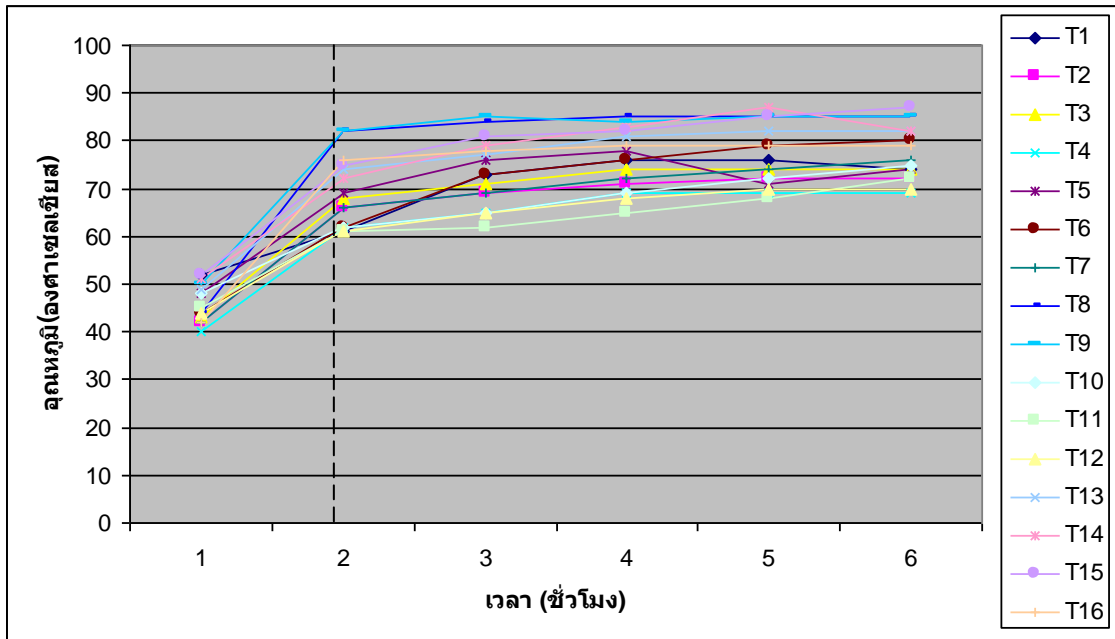


รูปที่ 4.11 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง

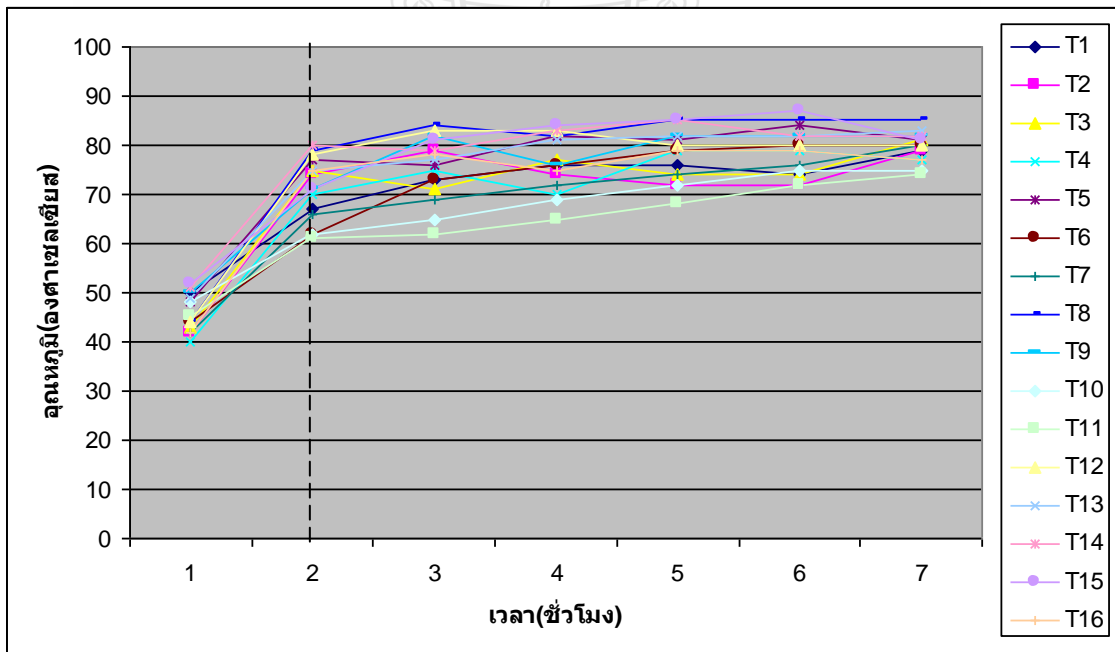


รูปที่ 4.12 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง

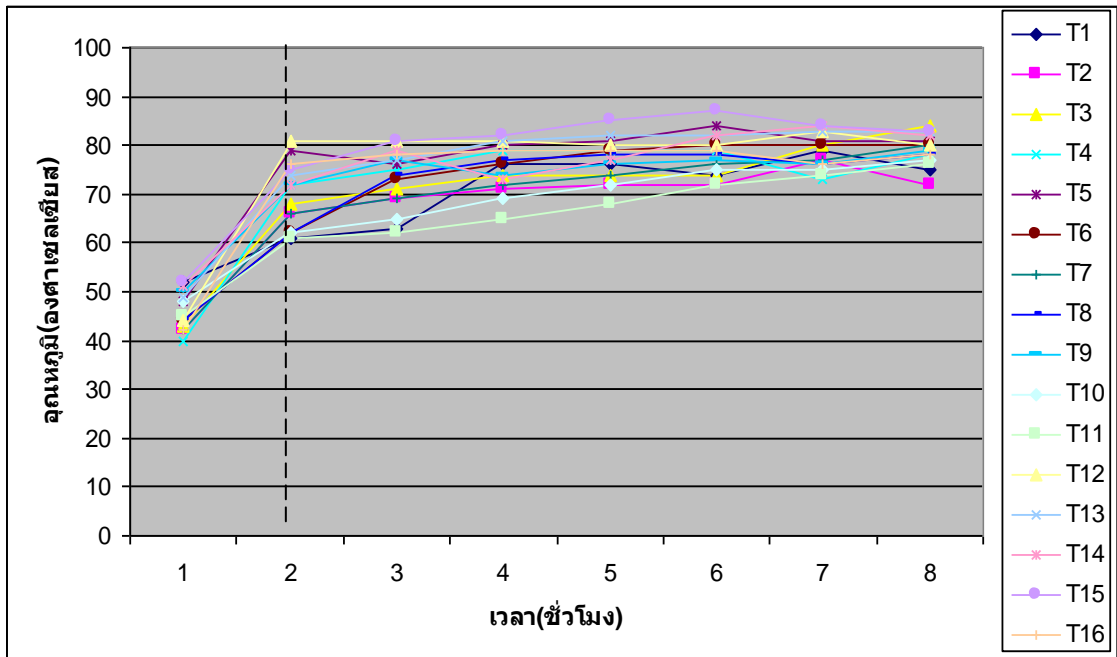




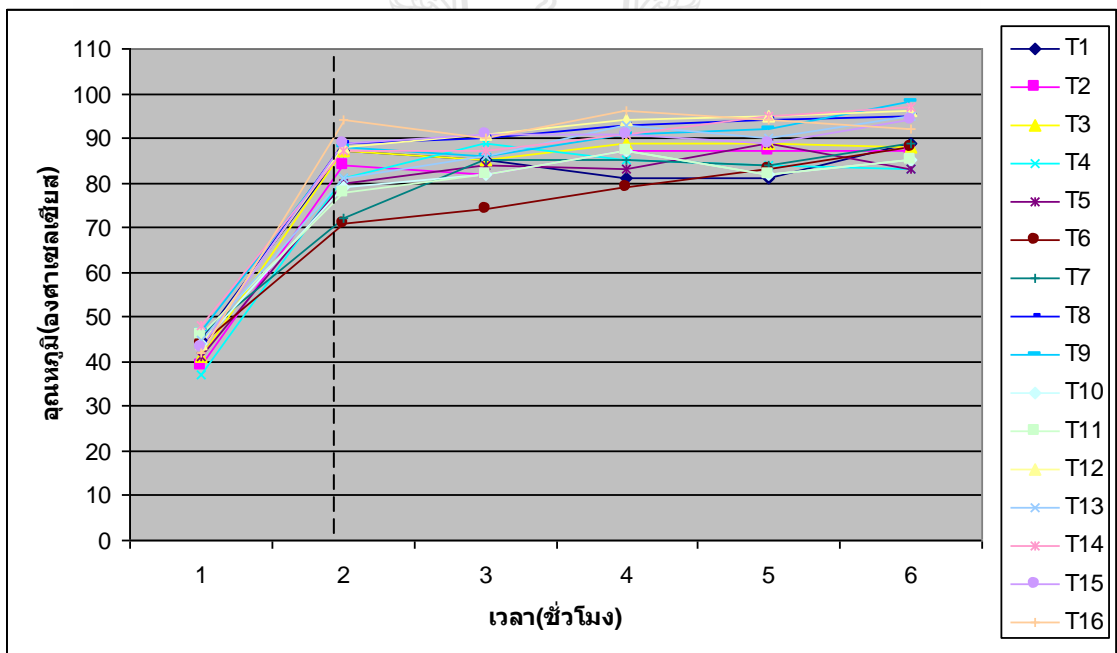
รูปที่ 4.13 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



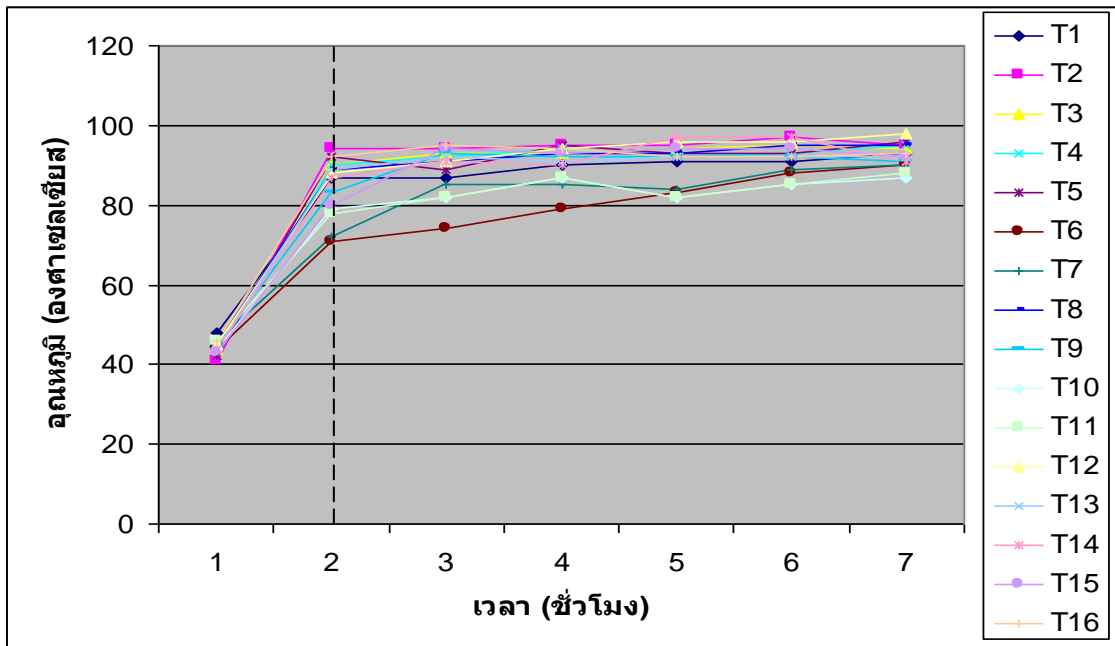
รูปที่ 4.14 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



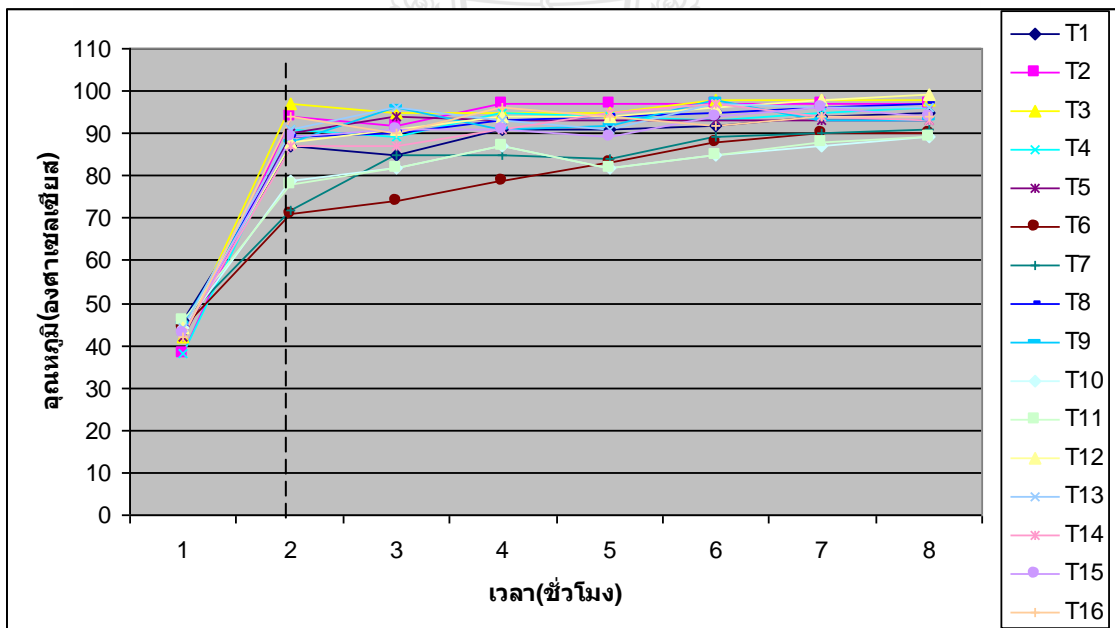
รูปที่ 4.15 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.16 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง

#### 4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้งพริกพันธุ์จินดา โดยอุณหภูมิที่ทดสอบ 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6,7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 28.90 , 23.88 และ 16.11% (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 93.56, 81.36 และ 12.94% ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งน้อยจึงส่งผลให้ความชื้นพริกสูงไม่เหมาะสมในการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6,7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 19.05, 13.37 และ 10.87 % (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 32.78, 4.50 และ 23.11% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6,7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 16.13, 9.40 และ 5.47% (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 8.16, 24.15 และ 81.01% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งสูงค่าความชื้นจะต่ำและพริกจะไหม้มีสีแดงคล้ำ และพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะที่สุด เนื่องจากความชื้นสุดท้ายของพริกแห้งโดยเฉลี่ย คือ 13.37% (wb) ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของ มอก.456-2526 คือ ความชื้นสุดท้ายต้องไม่เกิน 14% (wb) และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริก 4.50 %

ตารางที่ 4.1 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้อบ (ชม.)	ครั้งที่ทดลอง	น้ำหนัก (กรัม)		ความชื้นเริ่มต้น (% wb)	ความชื้นสุดท้าย (% wb)	การสูญเสียของพริก(%)
		ก่อนอบ	หลังอบ			
6	1	200	73.85	63.07	32.47	90.71
	2	200	73.16	63.42	26.52	94.87
	3	200	69.96	65.02	27.72	95.12
	เฉลี่ย	200	72.2	63.83	28.90	93.56
7	1	200	66.52	66.74	26.23	80.81
	2	200	64.74	67.63	24.42	81.11
	3	200	64.04	67.98	20.99	82.18
	เฉลี่ย	200	65.10	67.45	23.88	81.36
8	1	200	60.87	69.56	15.74	10.12
	2	200	61.08	69.46	14.88	15.55
	3	200	59.12	70.44	17.71	13.17
	เฉลี่ย	200	60.35	69.82	16.11	12.94

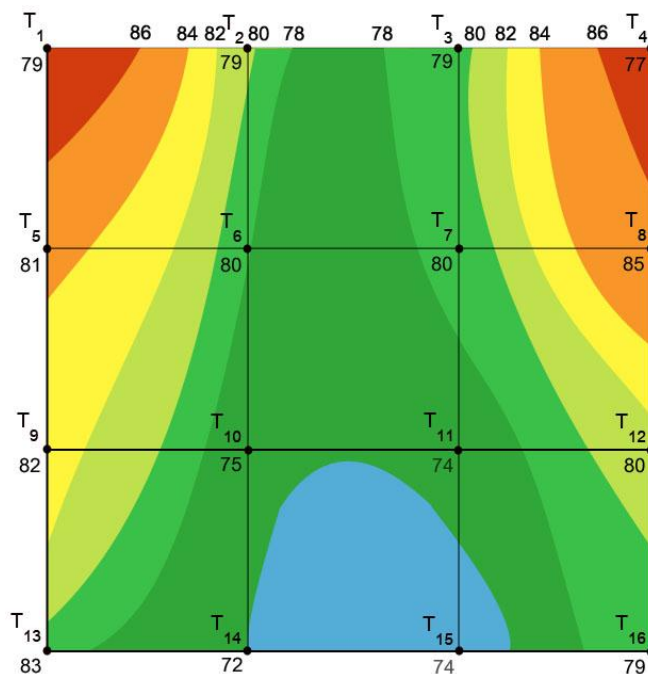
ตารางที่ 4.2 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้อบ (ชม.)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนัก (กรัม)		ความชื้น เริ่มต้น (% wb)	ความชื้น สุดท้าย (% wb)	การสูญเสีย ของพริก(%)
		ก่อนอบ	หลังอบ			
6	1	200	65.86	67.07	20.92	30.12
	2	200	64.59	67.70	17.46	32.28
	3	200	62.16	68.92	18.79	35.95
	เฉลี่ย	200	64.20	67.89	19.05	32.78
7	1	200	58.09	70.95	12.70	4.55
	2	200	56.03	71.98	14.36	3.45
	3	200	57.92	71.04	13.05	5.52
	เฉลี่ย	200	57.34	71.32	13.37	4.50
8	1	200	52.05	73.97	10.97	20.55
	2	200	54.44	72.78	10.49	25.12
	3	200	52.31	73.84	11.16	23.28
	เฉลี่ย	200	52.93	73.53	10.87	23.11

ตารางที่ 4.3 ผลการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้อบ (ชม.)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนัก (กรัม)		ความชื้น เริ่มต้น (% wb)	ความชื้น สุดท้าย (% wb)	การสูญเสีย ของพริก(%)
		ก่อนอบ	หลังอบ			
6	1	200	57.88	71.06	17.54	7.52
	2	200	57.82	71.09	16.90	8.17
	3	200	57.48	71.26	13.97	8.81
	เฉลี่ย	200	57.72	71.13	16.13	8.16
7	1	200	53.76	73.12	10.31	20.18
	2	200	50.98	74.51	8.94	25.44
	3	200	53.38	73.31	8.97	26.83
	เฉลี่ย	200	52.70	73.64	9.40	24.15
8	1	200	49.05	75.45	6.10	80.17
	2	200	48.72	75.64	4.70	82.33
	3	200	49.37	75.35	5.61	80.57
	เฉลี่ย	200	49.04	75.48	5.47	81.01

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณ พบว่า อุณหภูมิจุดที่ 1 มีค่าความแตกต่าง 1.84% อุณหภูมิจุดที่ 2 มีค่าความแตกต่าง 7.55% อุณหภูมิจุดที่ 3 มีค่าความแตกต่าง 7.55% อุณหภูมิจุดที่ 4 มีค่าความแตกต่าง 0.70% อุณหภูมิจุดที่ 5 มีค่าความแตกต่าง 0.54% อุณหภูมิจุดที่ 6 มีค่าความแตกต่าง 10.59% อุณหภูมิจุดที่ 7 มีค่าความแตกต่าง 10.59% อุณหภูมิจุดที่ 8 มีค่าความแตกต่าง 5.22% อุณหภูมิจุดที่ 9 มีค่าความแตกต่าง 1.76% อุณหภูมิจุดที่ 10 มีค่าความแตกต่าง 4.63% อุณหภูมิจุดที่ 11 มีค่าความแตกต่าง 3.34% อุณหภูมิจุดที่ 12 มีค่าความแตกต่าง 0.69% อุณหภูมิจุดที่ 13 มีค่าความแตกต่าง 8.38% อุณหภูมิจุดที่ 14 มีค่าความแตกต่าง 6.89% อุณหภูมิจุดที่ 15 มีค่าความแตกต่าง 9.45% และอุณหภูมิจุดที่ 16 มีค่าความแตกต่าง 3.74% และลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 เส้นอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง







# บทที่ 5

## สรุปผลการวิจัย

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จากการศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองซึ่งในกรณีนี้ค่าเหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมเป็นจำนวน 69,288 เอลิเมนต์ ประกอบด้วยจุดต่อทั้งหมด 161,940 จุดต่อ จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง เลือกข้อมูลจากการทดสอบเบื้องต้น โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศยี่ห้อ Binder ในการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งพริก[14] ดังนั้นจึงเลือกให้ความร้อนแก่แบบจำลองที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในศึกษาการอบแห้ง คือ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นแบบจำลองที่มีการกระจายของอุณหภูมิเหมาะสมที่สุด จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวาจะคงที่อยู่ช่วงประมาณ 80 องศาเซลเซียส ผนังด้านบนอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 71 องศาเซลเซียส ผนังด้านล่างอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 72 องศาเซลเซียส ส่วนตรงกลางห้องอบแห้งอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 75 องศาเซลเซียส การกระจายอุณหภูมิจากผนังซ้ายและขวาไปยังส่วนกลางซึ่งเป็นส่วนของตะแกรง โดยอุณหภูมิกระจายอยู่ช่วงประมาณ 69 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่กระจายจะลดลงจากอุณหภูมิที่ผนังเนื่องจากเป็นส่วนของตะแกรงมีรูและมีช่องว่างจำนวนมากเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิมีการกระจายช้าและการกระจายของอุณหภูมิไม่ทั่วถึง แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิที่บริเวณผนังห้องอบแห้ง และจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิขอบของแบบจำลอง และหลังจากนั้นไม่ว่าจะเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นเท่าใดก็ตาม ค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากนั้นนำค่าที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง ไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการอบแห้งพริก จะเห็นได้ว่าการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการอบแห้งสภาพสูญญากาศโดยอุณหภูมิที่ทดสอบ 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ความดันสูญญากาศ -15 cmHg. พบว่าการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านบน  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  และ  $T_4$  อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 79 องศาเซลเซียส ผนังด้านซ้าย  $T_5$ ,  $T_6$  และ  $T_{13}$  อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 82 องศาเซลเซียส ผนังด้านขวา  $T_8$ ,  $T_{12}$  และ  $T_{16}$  อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 80.66 องศาเซลเซียส ผนังด้านล่าง

$T_4$ ,  $T_{15}$  และ  $T_{16}$  อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 78.33 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง  $T_6$ ,  $T_7$ ,  $T_{10}$  และ  $T_{11}$  อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 77.25 องศาเซลเซียส และเมื่อทดสอบความชื้นของผลิตภัณฑ์อุณหภูมิที่ทดสอบ 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 28.90, 23.88 และ 16.11% (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 93.56, 81.36 และ 12.94% ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งน้อยจึงส่งผลให้ความชื้นพริกสูงไม่เหมาะสมในกาเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 19.05, 13.37 และ 10.87% (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 32.78, 4.50 และ 23.11% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 6, 7 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นเฉลี่ยคือ 16.13, 9.40 และ 5.47% (wb) ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริกเฉลี่ย 8.16, 24.15 และ 81.01% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในการอบแห้งสูงค่าความชื้นจะต่ำและพริกจะไหม้มีสีแดงคล้ำ และพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบ 7 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะที่สุดเนื่องจากความชื้นสุดท้ายของพริกแห้งโดยเฉลี่ย คือ 13.37% (wb) ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของ มอก.456-2526 คือ ความชื้นสุดท้ายต้องไม่เกิน 14% (wb) มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพริก 4.50%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิจัยนี้ทดสอบ โดยใช้เครื่องที่สร้างขึ้นเองการควบคุมอุณหภูมิและการควบคุมสภาพสุญญากาศทำได้ยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่นำมาสร้าง

5.2.2 การทดสอบในสภาวะสุญญากาศโดยใช้วัสดุเกษตรที่มีความชื้นสูงจะเป็นผลเสียกับเครื่องเนื่องจากเครื่องต้องคูดน้ำออกมามากกว่าปกติอาจทำให้ปั๊มดูดอากาศเสียหายได้

5.2.3 ควรมีการหาค่าผลเฉลยของการถ่ายเทความร้อนในห้องอบแห้งพริกด้วยวิธีอื่นเพื่อนำผลที่ได้มาประกอบการเปรียบเทียบกับงานวิจัย

5.2.4 ควรศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบไม่เชิงเส้นภายใต้สถานะชั่วครู่ เพื่อนำผลที่ได้มาประกอบการเปรียบเทียบกับงานวิจัยเพื่อหาผลสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ได้นั้นมีความแตกต่างกันมากน้อยแค่ไหน

5.2.5 ควรศึกษาผลการทดลองจาก MatLab กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำผลที่ได้มาประกอบการเปรียบเทียบกับงานวิจัย



## เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E. Drouzas, E. Tsami and G.D. Saravacos. 1999, "Microwave vacuum drying of model fruit gels" **Journal of Food Engineering**. Vol. 39. pp.117-122
- [2] L. Wu, T. Orikasa, Y. Ogawa, and A. Tagawa. 2007, "Vacuum drying characteristics of eggplants" **Journal of Food Engineering** . Vol. 89. pp.422-429
- [3] สมจินต์ พ่วงเจริญชัย, การจำลองการถ่ายโอนความร้อนภายในไซโลเก็บข้าวเปลือกโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- [4] มนชิต คันธวงศ์, การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเชิงเส้นภายใต้สถานะคงตัวในสองมิติ และสามมิติโดยใช้วิธีการปรับแต่งไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพีเวอร์ชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- [5] พัลลภ ศรีณขโชค, การถ่ายโอนความร้อนและความชื้นในวัสดุพูนอิมตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะสูญญากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [6] สุนันท์ ศรีณขนิตย์, การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2545
- [7] Holman, J.P. **Heat Transfer**. McGraw-Hill, 1992
- [8] Saeed Moaveni, **Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS**. New Jersey: Prattice-Hall, 1999
- [9] อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์, "แบบจำลองการนำความร้อนใน 2 มิติ," **วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น**, ฉบับที่ 4, ปีที่พิมพ์ 2550
- [10] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550
- [11] เดช พุทธเจริญทอง, **การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2541
- [12] สมชาย สิงโต, **วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. 2544
- [13] Larry J. Segerlind, **Applied Finite Element Analysis**. John Wiley and Sons. 1984
- [14] ประเสริฐศักดิ์ ขอดทุม และคณะ, การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น,2550.

- [15] ชัยวิทย์ ศิวาวัชฌาไณย, **ฟิลิคส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2526
- [16] สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, **การอบแห้งเม็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.2540
- [17] MARCH COOL INDUSTRY CO., LTD. 2550. **เครื่องอบแห้งสุญญากาศ**. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก <http://www.protradecommercial.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=194924>. (วันที่ 22 มิถุนายน 2550)





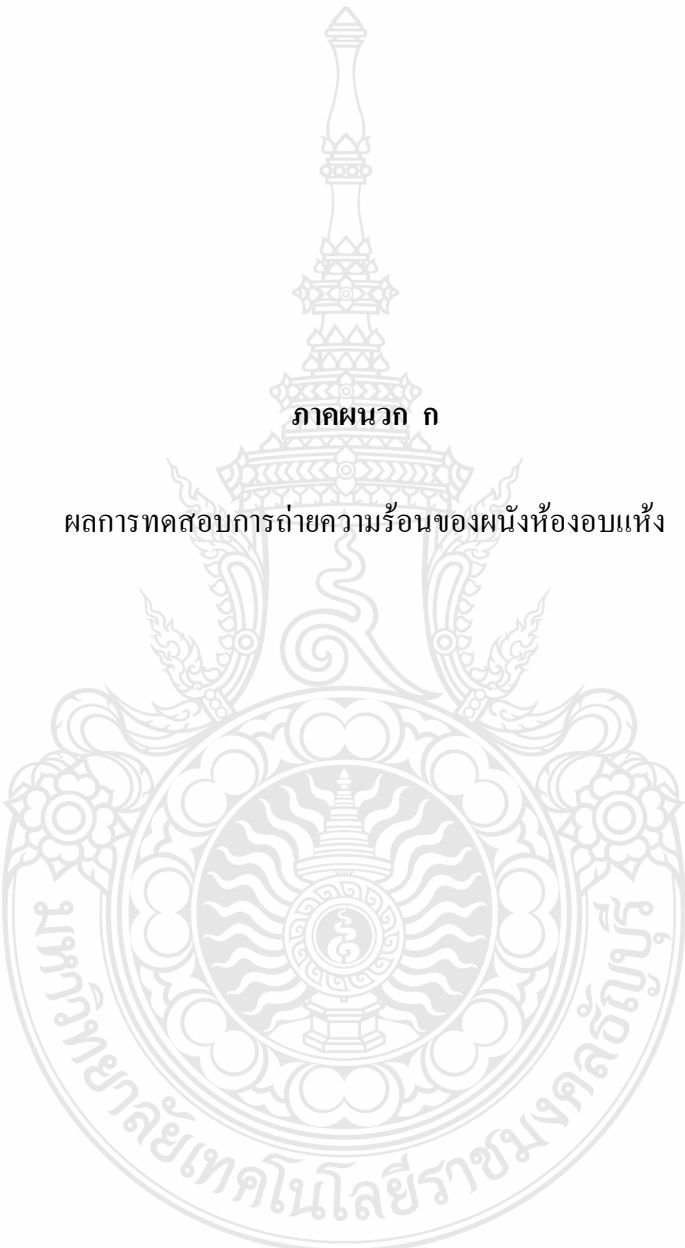
**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้ง

ภาคผนวก ข ลักษณะของพริกแห้งที่อบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

ภาคผนวก ค มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกแห้ง

ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่



**ภาคผนวก ก**

ผลการทดสอบการถ่ายความร้อนของผนังห้องอบแห้ง

ตารางที่ ก.1 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 6 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	29	23	23	23	23	20	21	29	28	22	20	29	29	28	28	28
2	63	64	63	62	62	55	53	74	72	54	56	70	70	68	67	68
3	65	66	67	65	67	57	54	71	72	58	58	70	70	70	68	68
4	70	65	67	67	67	60	59	75	72	64	63	75	73	70	70	70
5	72	70	70	69	70	66	65	75	72	68	65	74	75	70	70	70
6	72	70	70	70	73	69	68	75	75	69	68	74	71	70	70	72

ตารางที่ ก.2 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 7 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	29	23	23	23	23	20	21	29	28	22	20	29	29	28	28	28
2	64	65	68	62	68	55	53	74	75	54	56	73	72	71	74	70
3	65	67	70	65	71	57	54	74	75	58	58	74	74	73	78	70
4	68	69	70	67	77	60	59	74	75	64	63	71	76	72	74	71
5	65	71	72	69	76	66	65	75	78	68	65	70	75	71	72	70
6	69	71	74	70	77	69	68	75	75	69	68	73	71	72	72	72
7	69	70	70	70	78	70	70	75	76	70	71	74	73	73	75	72



ตารางที่ ก.3 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 8 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	29	23	23	23	23	27	27	29	28	28	28	29	29	28	28	28
2	72	71	68	62	68	63	61	74	75	64	66	66	72	75	72	74
3	70	72	70	65	71	64	64	73	78	66	68	69	74	78	78	76
4	73	72	72	67	77	65	65	75	72	68	69	70	76	72	74	76
5	75	71	74	69	76	66	66	75	78	68	70	70	79	71	72	70
6	75	71	74	70	77	65	66	75	75	69	70	70	71	75	72	72
	75	73	70	70	78	66	68	76	76	71	71	69	73	74	75	75
	73	70	73	70	76	69	70	76	71	74	74	72	77	70	72	75

ตารางที่ ก.4 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 6 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	52	42	43	40	48	44	42	44	50	48	45	44	49	51	52	42
2	61	66	68	62	69	62	66	82	82	62	61	61	74	72	75	76
3	73	69	71	65	76	73	69	84	85	65	62	65	77	79	81	78
4	76	71	74	69	78	76	72	85	84	69	65	68	81	83	82	79
5	76	72	74	69	71	79	74	85	85	72	68	70	82	87	85	79
6	74	72	74	69	74	80	76	85	85	75	72	70	82	82	87	79

ตารางที่ ก.5 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 7 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ (°C)															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	50	42	43	40	48	44	42	44	50	48	45	44	49	51	52	42
2	67	74	75	70	77	62	66	79	71	62	61	78	75	80	71	75
3	73	79	71	75	76	73	69	84	82	65	62	83	77	79	81	78
4	76	74	77	70	82	76	72	82	76	69	65	83	81	83	84	75
5	76	72	74	79	81	79	74	85	82	72	68	80	82	85	85	79
6	74	72	74	79	84	80	76	85	82	75	72	80	82	82	87	79
7	79	79	81	77	81	80	80	85	82	75	74	80	83	82	81	77

ตารางที่ ก.6 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 8 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ (°C)															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	52	42	43	40	48	44	42	44	50	48	45	44	49	51	52	42
2	61	66	68	72	79	62	66	62	72	62	61	81	74	72	75	76
3	63	69	71	75	76	73	69	74	77	65	62	81	77	79	81	78
4	76	71	74	79	80	76	72	77	74	69	65	81	81	73	82	79
5	76	72	74	79	81	79	74	78	76	72	68	80	82	77	85	79
6	74	72	74	79	84	80	76	78	77	75	72	80	82	82	87	79
7	79	77	80	73	81	80	77	76	76	75	74	83	83	84	84	76
8	75	72	84	78	81	80	80	78	79	77	76	80	83	82	83	78

ตารางที่ ก.7 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เวลา 6 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	45	39	41	37	41	44	46	44	47	44	46	44	45	48	43	42
2	87	84	87	81	80	71	72	89	88	79	78	88	81	87	89	94
3	85	82	85	89	84	74	85	90	86	82	82	91	86	87	91	90
4	81	87	89	85	83	79	85	93	91	87	87	94	93	91	91	96
5	81	87	89	84	89	83	84	94	92	82	82	95	90	95	89	94
6	89	87	88	83	83	88	89	95	98	85	85	96	95	97	94	92

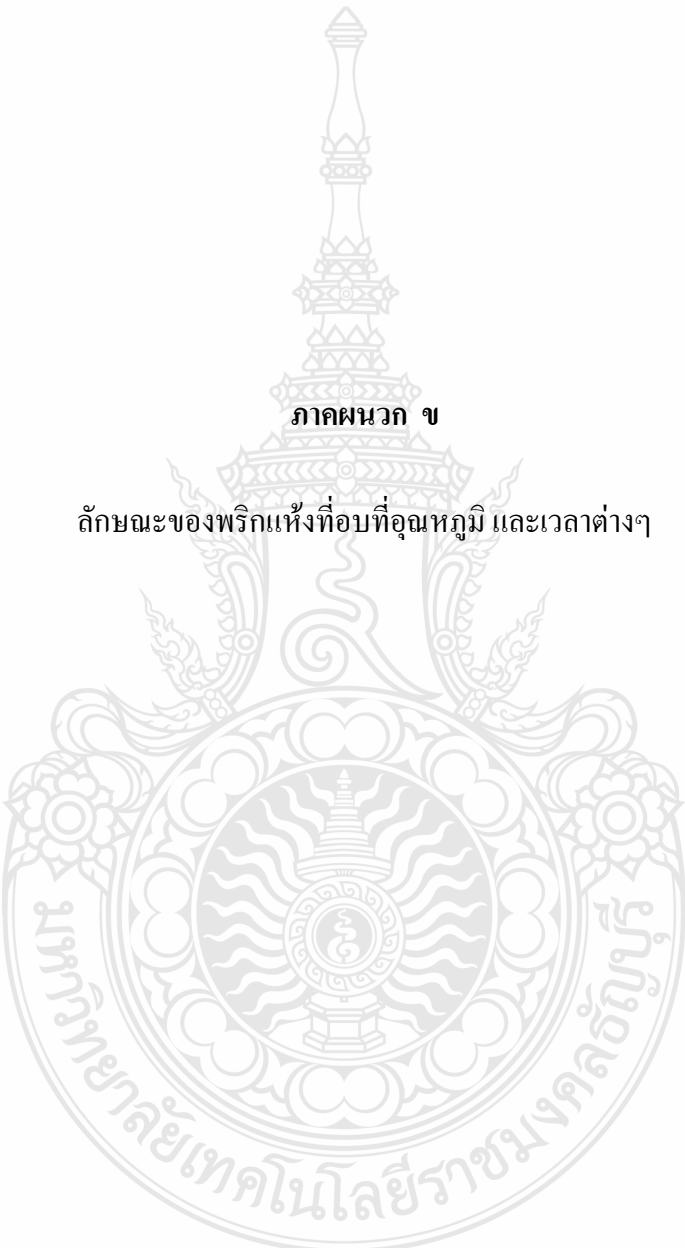
ตารางที่ ก.8 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เวลา 7 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	48	41	44	42	71	44	46	45	61	44	46	45	51	81	69	46
2	87	94	90	90	92	71	72	89	83	79	78	88	89	87	80	92
3	87	94	93	92	89	74	85	91	93	82	82	91	92	91	94	95
4	90	95	93	94	95	79	85	93	92	87	87	94	91	90	93	94
5	91	95	94	92	93	83	84	93	92	82	82	96	92	97	94	92
6	91	97	95	93	93	88	89	95	92	85	85	96	92	97	94	92
7	93	95	94	95	96	90	90	95	91	87	88	98	92	91	92	93

ตารางที่ ก.9 การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เวลา 8 ชั่วโมง

เวลา (hr)	หัววัดอุณหภูมิ ( °C )															
	Ch 01	Ch 02	Ch 03	Ch 04	Ch 05	Ch 06	Ch 07	Ch 08	Ch 09	Ch 10	Ch 11	Ch 12	Ch 13	Ch 14	Ch 15	Ch 16
1	46	38	42	38	42	44	46	44	45	44	46	44	44	43	43	42
2	87	94	97	91	90	71	72	89	88	79	78	88	91	87	89	94
3	85	92	95	89	94	74	85	90	96	82	82	91	96	87	91	90
4	91	97	95	95	93	79	85	93	91	87	87	94	93	91	91	96
5	91	97	95	94	93	83	84	94	92	82	82	94	91	95	89	94
6	92	97	98	93	93	88	89	95	98	85	85	96	97	97	94	92
7	94	97	98	95	93	90	90	96	93	87	88	98	96	94	96	94
8	95	97	98	96	93	90	91	97	93	89	89	99	96	93	94	94





ภาคผนวก ข

ลักษณะของพริกแห้งที่อบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ

จากการทดลองอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพริกแบบสูญญากาศ ได้ลักษณะของพริกแห้งที่  
อบที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ดังนี้



รูปที่ ข.1 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข.2 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



รูปที่ ข.3 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ ข.4 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข.5 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง



รูปที่ ข.6 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง





รูปที่ ข.7 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข.8 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง

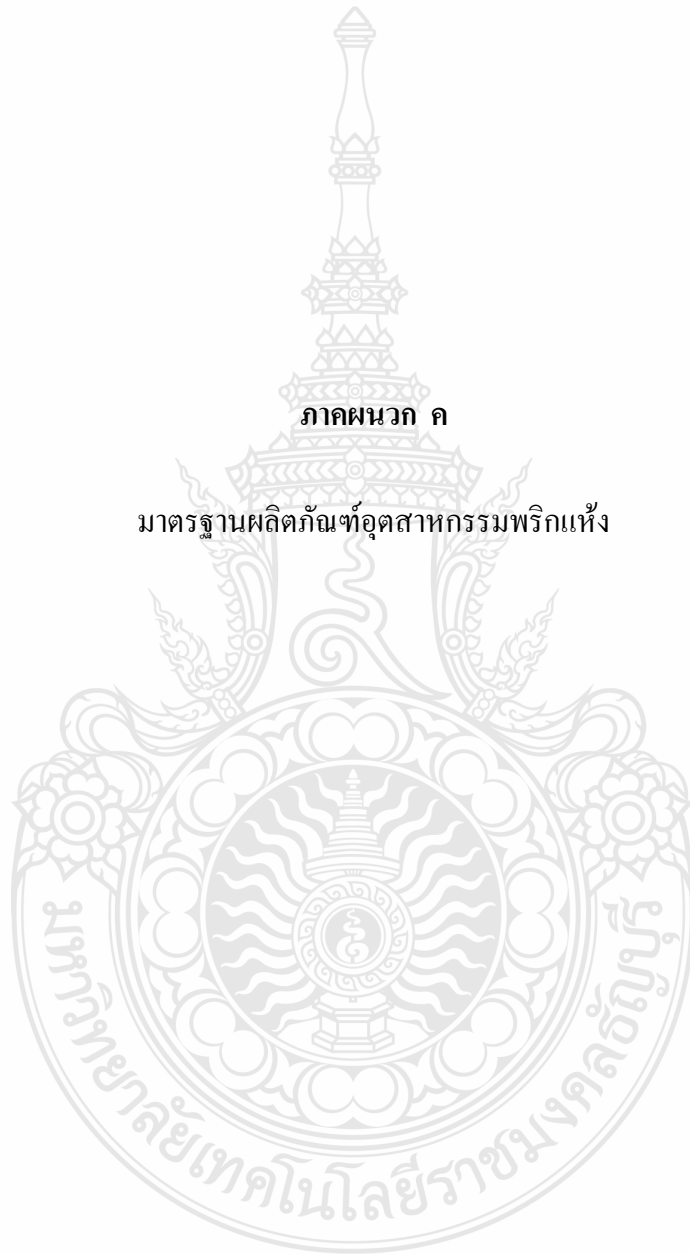


รูปที่ ข.9 พริกแห้งหลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง



ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกแห้ง



## มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม-พริกแห้ง มอก. 456-2526

### 1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิด คุณลักษณะที่ต้องการ สุขลักษณะ ภาชนะบรรจุ ปริมาณ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน และการตรวจสอบ และการวิเคราะห์พริกแห้ง

### 2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 พริกแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลของพืชสกุลพริก (*Capsicum* sp.) เช่น พริกชี้หูสวน (*Capsicum minimum* Roxb.) พริกชี้หูสวน (*Capsicum frutescens* Linn.) และพริกอ่อนหรือพริกชี้ฟ้า (*Capsicum annuum* Linn.) ที่สุกหรือแก่จัด นำมาทำแห้ง อาจมีก้านผลติดอยู่หรือไม่ก็ได้

2.2 ผลที่มีตำหนิ (Unripe or marked berries) หมายถึง พริกแห้งที่มีสีเขียวหรือสีเหลืองอ่อน เนื่องจากผลยังไม่สุก หรือแก่จัด หรือผลที่ไม่สมบูรณ์ หรือผิดปกติเนื่องจากถูกแมลงหรือโรคคุกคาม

2.3 ผลที่แตกหัก (Broken berries) หมายถึง พริกแห้งที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากการแตกหัก

2.4 สิ่งเจือปน (Extraneous matter) หมายถึง ส่วนต่างๆ ของต้นพริก เช่น กิ่ง ก้าน ใบ เมล็ด หรือช่อดอกของพริก (ยกเว้นก้านที่ติดมากับผล) และสิ่งปะปนอื่นๆ ที่ไม่ใช่ส่วนประกอบตามธรรมชาติของพริก

### 3. ชนิด

พริกแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

3.1 ชนิดผลเล็ก โดยทั่วไปมีความยาวของผลน้อยกว่า 6 เซนติเมตร

3.2 ชนิดผลใหญ่ โดยทั่วไปมีความยาวผลตั้งแต่ 6 เซนติเมตร ขึ้นไป

### 4. คุณลักษณะที่ต้องการ

4.1 ลักษณะทั่วไป

1. ผลมีลักษณะแบนเล็กน้อยและมีสีแดงถึงแดงแก่ ภายในผลมีเมล็ดสีเหลือง

2. ผลพริกชนิดเดียวกันต้องมีลักษณะรูปร่างคล้ายคลึงกัน (Uniform in shape)

3. ต้องมีกลิ่นและรสตามธรรมชาติของพริก ไม่มีกลิ่นหืน กลิ่นอับ หรือกลิ่นรส

แปลกปลอมอื่นใด

4. ต้องไม่มีรา แมลง ชิ้นส่วนของแมลง หรือมูลสัตว์ ที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

4.2 การปราศจากข้อบกพร่อง

1. ผลที่มีตำหนิ จะมีได้ไม่เกินร้อยละ 5

## 2. ผลที่แตกหัก

2.1 ชนิดผลเล็ก จะมีได้ไม่เกินร้อยละ 5

2.2 ชนิดผลใหญ่ จะมีได้ไม่เกินร้อยละ 10

## 3. สิ่งเจือปน จะมีได้ไม่เกินร้อยละ 2

การตรวจสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 10.2

4.3 คุณลักษณะทางเคมีให้เป็นไปตามที่กำหนดในตารางที่ ค.1

การวิเคราะห์ให้ปฏิบัติตามข้อ 10.3

## 5. สุขลักษณะ

สุขลักษณะในการทำพริกแห้ง ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กำหนดสุขลักษณะของอาหาร มาตรฐานเลขที่ มอก.34

## 6. ภาชนะบรรจุ

ภาชนะที่ใช้บรรจุพริกแห้งต้องสะอาด ถูกสุขลักษณะ และไม่ขัดกับประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่องภาชนะบรรจุอาหาร

ตารางที่ ค.1 คุณลักษณะทางเคมีของพริกแห้ง (ข้อ 4.3)

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	14
2	เถ้าถ่านทั้งหมด ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่เกิน	8
3	เถ้าที่ไม่ละลายในกรด ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่เกิน	
4	ส่วนที่ไม่ละลายที่สกัดได้ด้วยอีเทอร์ ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่น้อยกว่า	1.25
	ชนิดผลเล็ก	15
	ชนิดผลใหญ่	12
5	กาก ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่เกิน	28
6	อะฟลาทอกซิน ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมของตัวอย่าง ไม่เกิน	20

## 7. ปริมาณ

7.1 น้ำหนักสุทธิของพริกแห้งในแต่ละภาชนะบรรจุต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ในฉลาก

## 8. เครื่องหมายและฉลาก

8.1 ฉลากให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คำนะนำทั่วไปเกี่ยวกับฉลาก สำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก.31 และไม่ขัดกับประกาศกระทรวงสาธารณสุข ว่าด้วยเรื่องฉลาก

8.2 ที่ภาชนะบรรจุพริกแห้งทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีตัวเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

1. คำว่า “พริกแห้ง”
2. ชนิด
3. น้ำหนักสุทธิ เป็นกรัมหรือกิโลกรัม
4. เดือนปีที่ทำ
5. ชื่อผู้ทำ หรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้า หรือชื่อผู้บรรจุ หรือผู้จัดจำหน่ายพร้อมสถานที่ตั้ง
6. ประเทศที่ทำ ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศด้วย ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทย

8.3 ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้นได้ ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

## 9. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

9.1 ความหมายของคำที่ใช้ มีดังต่อไปนี้

1. รุ่น หมายถึง พริกแห้งชนิดเดียวกัน ที่บรรจุและเก็บรักษาในสภาพแวดล้อมเดียวกัน
2. ขนาดรุ่น หมายถึง จำนวนภาชนะที่บรรจุพริกแห้งในรุ่นหนึ่งๆ
3. ขนาดตัวอย่าง หมายถึง จำนวนภาชนะบรรจุพริกแห้งที่ชักตัวอย่าง เพื่อการตรวจสอบและการวิเคราะห์ในรุ่นนั้นๆ

9.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

1. การชักตัวอย่าง

ให้ทำโดยวิธีสุ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ทำขึ้นในรุ่นเดียวกัน ตามแผนการชักตัวอย่างในตารางที่

ง.2

1.1 การเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการวิเคราะห์ ให้ตรวจสอบภาชนะบรรจุ ปริมาณ เครื่องหมาย และฉลากของตัวอย่างทุกภาชนะบรรจุที่ซักได้ ตามตารางที่ ง.2 ก่อนดำเนินการ เก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ดังนี้

1.1.1 ใช้เครื่องมือที่เหมาะสม ซักตัวอย่างพริกแห้งปริมาณเท่าๆ กันจากแต่ละ ภาชนะบรรจุ นำตัวอย่างที่ซักได้ทั้งหมดมารวมกัน โดยต้องได้น้ำหนักไม่น้อยกว่า 1,500 กรัม

1.1.2 แบ่งตัวอย่างตามข้อ 1.1.1 ออกเป็นสามส่วนเท่าๆ กัน บรรจุตัวอย่างแต่ละ ส่วนลงในภาชนะที่สะอาด ปิดผนึก ลงลายมือชื่อผู้ซักตัวอย่างพร้อมทั้งวันเดือนปีที่ซักตัวอย่าง นำ ตัวอย่างส่วนหนึ่ง ไปใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ อีกสองส่วนที่เหลือให้ผู้เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็น หลักฐาน

## 2. เกณฑ์ตัดสิน

ผลการตรวจสอบและการวิเคราะห์ตัวอย่าง ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดทุก รายการ จึงจะถือว่าพริกแห้งรุ้นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานนี้

ตารางที่ ค.2 แผนการซักตัวอย่าง (ข้อ 1. การซักตัวอย่าง)

ขนาดรุ้นภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่างภาชนะบรรจุ
1 ถึง 5	ทุกหน่วย
6 ถึง 49	5
50 ถึง 100	ร้อยละ 10 ของขนาดรุ้น*
ตั้งแต่ 101 ขึ้นไป	ราคาที่ 2 ของขนาดรุ้น*

หมายเหตุ \* ถ้ามีเศษ ให้ปัดเป็นเลขจำนวนเต็มตามกฎการปัดเศษ

## 10. การตรวจสอบและการวิเคราะห์

### 10.1 ลักษณะทั่วไป

ตรวจสอบลักษณะทั่วไปตามข้อ 4.1 ก่อนตรวจสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ

### 10.2 ผลที่มีตำหนิ ผลที่แตกหัก และสิ่งเจือปน

#### 1. เครื่องมือ

##### 1.1 กระจกนาฬิกา

##### 1.2 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

#### 2. วิธีตรวจสอบ

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ( $M_1$ ) แยกผลที่มีตำหนิ ผลที่แตกหักและสิ่งเจือปนออกจากกันให้หมด แล้วแยกแต่ละรายการใส่ลงในกระจกนาฬิกาที่สะอาด แห่ง และทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว ( $M_0$ ) นำไปชั่งอีกครั้งหนึ่ง ( $M_2$ )

### 3. วิธีคำนวณ

$$C = \frac{M_2 - M_0}{M_1} \times 100$$

เมื่อ	$C$	คือ	ผลที่มีตำหนิ หรือผลที่แตกหัก หรือสิ่งเจือปน (ร้อยละของน้ำหนัก)
	$M_2$	คือ	น้ำหนักกระจกนาฬิกาและผลที่มีตำหนิ หรือน้ำหนักกระจกนาฬิกาและผลที่แตกหักหรือน้ำหนักกระจกนาฬิกาและสิ่งเจือปน (แล้วแต่กรณี) (กรัม)
	$M_0$	คือ	น้ำหนักกระจกนาฬิกา (กรัม)
	$M_1$	คือ	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

### 10.3 คุณลักษณะทางเคมี

1. การเตรียมตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างประมาณ 300 กรัม นำมาบดให้ละเอียด
2. การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้าทั้งหมด ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรด ส่วนที่ไม่ระเหยที่สกัดได้อีเทอร์ และปริมาณกาก ให้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พริกไทย มาตรฐานเลขที่ มอก. 297
3. การวิเคราะห์หาปริมาณอะฟลาทอกซิน ให้วิเคราะห์ตามวิธีที่กำหนดใน AOAC (1980) วิธีตรวจสอบแบบคอลัมน์ขนาดเล็ก (Minicolumn detection method) หรือวิธีโครมาโตกราฟี (Chromatographic method) ในกรณีที่มีปัญหาให้ใช้เดนซิโตมิเตอร์ (Densitometer) ตัดสิน



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายประสิทธิ์ โสกา
วัน เดือน ปีเกิด	7 พฤศจิกายน 2516
ที่อยู่	74 หมู่ 4 ต.เหล่าดอกไม้ อ.ชื่นชม จ.มหาสารคาม 44160
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป และแปรรูป คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อปี พ.ศ. 2539
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2540 - 2547	อาจารย์ประจำแผนกช่างกลเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
พ.ศ.2547 - 2549	อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พ.ศ.2549 - ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผลงานวิจัย	
ประสิทธิ์ โสกา, พิพัฒน์ ปราโมทย์, การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสถานะ สูญญากาศ,การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 วันที่ 25 มิถุนายน 2553 มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์	
ประสิทธิ์ โสกา, พิพัฒน์ ปราโมทย์, การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสถานะ สูญญากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 4 วันที่ 9-10 สิงหาคม 2553 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	