

การให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์เพื่อการพาสเจอร์ไร้นมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับประรด



นาย ปณิตต์ พลายชุม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2834-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PASTEURIZATION OF PINEAPPLE-DRINKING YOGHURT BY OHMIC HEATING



Mr. PANITOUTT PLAICHOOM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2834-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกเพื่อการพาสเจอร์ไร้นมเปรี้ยวพร้อมดื่ม ผสมเนื้อสับประรด
โดย	นาย ปณิธต์ พลายุ้ม
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคส์ตฤศาสตร์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

ปณิตต์ พลายนุ่ม : การให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกเพื่อการพาสเจอร์ไร์นมเปรี้ยวพร้อม
 ดื่มนมเนื้อสับปะรด (PASTEURIZATION OF PINEAPPLE-DRINKING YOGHURT
 BY OHMIC HEATING) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. กัลยา เลหาสงคราม, อ. ที่ปรึกษาร่วม :
 รศ. ดร. สายวรุพ์ ชัยวานิชศิริ, 64 หน้า. ISBN 974-17-2834-4.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของ
 นมเปรี้ยวพร้อมดื่มนมเนื้อสับปะรดและศึกษาการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกเพื่อการพาสเจอร์ไร์แบบ HTST
 โดยขั้นตอนแรกออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์ แล้วทดสอบ
 การทำงานและความถูกต้องของเซลล์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 และ 0.02 โมลาร์ และ
 สารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ความต่างศักย์ 4-6 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ พบว่า
 สภาพนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิ 25°C มีความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิง 2-4% 5% และ 11-14%
 ตามลำดับ ขั้นตอนการศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด (เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 316 และ
 ไทเทเนียม) และความเข้มข้นของน้ำ (10 20 30 และ 40 โวลท์/เซนติเมตร) ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของ
 นมเปรี้ยวซึ่งประกอบด้วยโยเกิร์ต 50% น้ำสับปะรดเข้มข้น 10°Brix 15% น้ำตาลทราย 7% และน้ำ 28%
 ที่มีเนื้อสับปะรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 5%(w/w) พบว่า วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดไม่มี
 ผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ความเข้มข้นไฟฟ้ามียผลต่อสภาพนำไฟฟ้า
 ของนมเปรี้ยวอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) โดยสภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นไฟฟ้ามเพิ่มขึ้น
 ที่ความเข้มข้นไฟฟ้าน้ำ 10 โวลท์/เซนติเมตร อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดต่ำโดยไม่มี
 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับปะรด ที่ความเข้มข้นไฟฟ้าน้ำ 20 และ 30
 โวลท์/เซนติเมตร มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับปะรดเล็กน้อย และที่
 ความเข้มข้นไฟฟ้าน้ำ 40 โวลท์/เซนติเมตร มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดสูงและมี
 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับปะรดมาก ขั้นที่สามศึกษาผลของปริมาณเนื้อสับปะรด
 (0-20%,w/w) ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด โดยใช้ความเข้มข้นไฟฟ้าน้ำ 20-30
 โวลท์/เซนติเมตร พบว่า ปริมาณเนื้อสับปะรดมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดอย่างมีนัย
 สำคัญ ($p\leq 0.05$) โดยสภาพนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20%(w/w) จากการหา
 สมการความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดขนาด 1x1x1
 เซนติเมตร พบว่า สมการดังกล่าวไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 0-80 องศาเซลเซียสได้
 เนื่องจากผลของขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงของชิ้นเนื้อสับปะรดในนมเปรี้ยวพร้อมดื่ม

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....	ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา....2545....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4372321723 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD : OHMIC HEATING / ELECTRICAL CONDUCTIVITY / DRINKING YOGHURT / PINEAPPLE
PANITOUTT PLAICHOOM : PASTEURIZATION OF PINEAPPLE-DRINKING YOGHURT BY
OHMIC HEATING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM,
Ph. D., THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. SAIWARUN CHAIWANICHSIRI, Ph. D. 64 pp.
ISBN 974-17-2834-4.

The objectives of this research were to study the effect of temperature and solid content on the electrical conductivity of pineapple-drinking yoghurt during the temperature range for HTST pasteurization. A static ohmic heating cell was designed and built. The cell was tested against 0.1 M NaCl and the accuracy of the device was tested by using 0.02 M NaCl and 0.1 M NaH_2PO_4 with voltage 4–6 volt and frequency 50 hertz which showed the differences between the measured and the reported electrical conductivity at 25°C of 2-4%, 5%, and 11-14%, respectively. The effect of types of electrode material (stainless steel type 304, 316, and titanium) and voltage gradient (10, 20, 30, and 40 V/cm) on the electrical conductivity of pineapple-drinking yoghurt was studied. The pineapple-drinking yoghurt was made from 50% plain yoghurt, 15% pineapple juice (10°Brix), 7% sugar, and 28% water and then mixed with 5%(w/w) pineapple having dimension of 1×1×1 cm. It was found that type of electrode material did not significantly affect the electrical conductivity of pineapple-drinking yoghurt ($p>0.05$) while the voltage gradient did. ($p\leq 0.05$). At the 10 V/cm voltage gradient, heating rate of pineapple-drinking yoghurt was low and there was no difference between the temperature of the solid and liquid. The heating rate and the difference between the solid and liquid temperatures increased as the voltage gradient increased. Finally, the effect of pineapple content (0–20% w/w) on the electrical conductivity of drinking yoghurt was studied at the voltage gradient of 20 and 30 V/cm. The result showed that the pineapple content significantly affected the electrical conductivity of pineapple-drinking yoghurt ($p\leq 0.05$). The electrical conductivity decreased as the solid content increased. From the relationship between the temperature of pineapple in the drinking yoghurt and time during heating in ohmic, it was found that the empirical equation could not predict the temperature change in range 0-80°C due to the effect of size, shape, and solid orientation in the yoghurt.

Department.....Food..Technology.....Student's signature.....
Field of study.....Food..Technology.....Advisor's signature.....
Academic year.....2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม และรองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคส์ตฤศาสน์ อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการต่าง ๆ พร้อมทั้งขอเสนอแนะที่ให้ประโยชน์ในงานวิจัย และช่วยตรวจ แก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. พิพัฒน์ เลหาสงคราม ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับเครื่องให้ความร้อนโดยวิธีอินฟราเรด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

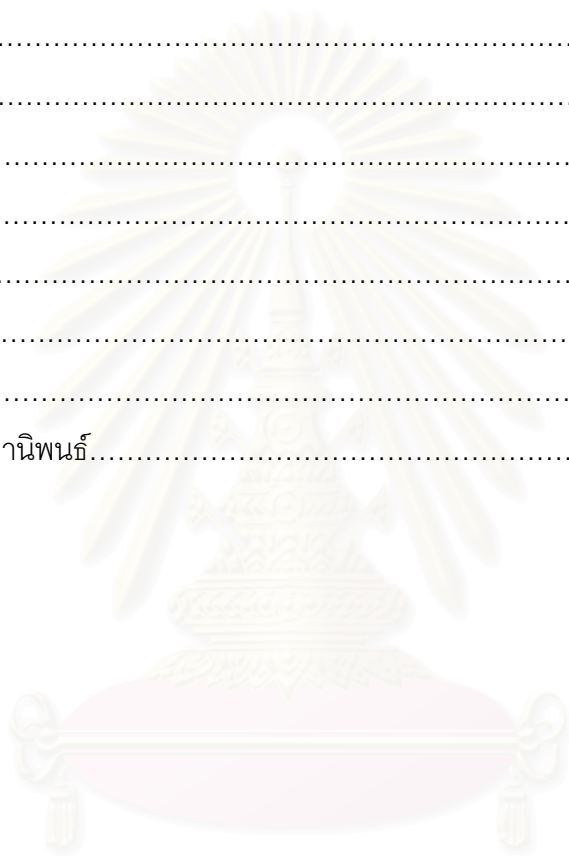
ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 สับปะรด.....	2
2.2 โยเกิร์ต.....	2
2.3 กระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารนม.....	3
2.4 หลักการของการให้ความร้อนโดยวิธีไอน้ำหมัก.....	3
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนโดยวิธีไอน้ำหมัก.....	4
2.6 สมการทำนายสภาพนำไฟฟ้า.....	7
2.7 สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	8
2.8 วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด.....	10
3 การทดลอง.....	12
3.1 การเตรียมโยเกิร์ตและนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรด.....	12
3.2 การออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีไอน้ำหมักแบบสถิตย์.....	13
3.3 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด.....	13
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	16
4.1 การเตรียมโยเกิร์ตและนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรด.....	16
4.2 การออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีไอน้ำหมักแบบสถิตย์.....	17
4.3 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด.....	21

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
รายการอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	44
ภาคผนวก ค.....	47
ภาคผนวก ง.....	62
ภาคผนวก จ.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	64



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุคิบัที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ.....9
2.2	สภาพนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง.....10
4.1	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของซั้วอิเลคโทรดแต่ละชนิด.....21
4.2	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับัประรดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของซั้วอิเลคโทรดแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นไฟฟ้าต่าง ๆ22
4.3	สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับัประรดปริมาณ 0-20% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....24
4.4	สมการแสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับัประรดปริมาณ 0-20%(w/w).....25
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับัประรดปริมาณ 0-20%(w/w).....28
4.6	สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับัประรดปริมาณ 0-20% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....31
4.7	สมการแสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมสับัประรดปริมาณ 0-20%(w/w).....32
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมสับัประรดปริมาณ 0-20%(w/w).....34
ก.1	ความแตกต่างของความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองและคำนวณ..... 43
ข.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของซั้วอิเลคโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์.....44
ข.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของซั้วอิเลคโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.02 โมลาร์.....44

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	44
ข.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นนำไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดปริมาณ 5%(w/w) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	45
ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนำไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....	45
ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนำไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....	45
ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับประรดปั่นปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนำไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....	46
ข.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับประรดปั่นปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนำไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....	46
ค.1 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 0%(w/w).....	47
ค.2 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 5%(w/w).....	49
ค.3 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 10%(w/w).....	51
ค.4 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 15%(w/w).....	53
ค.5 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 20%(w/w).....	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.6	คุณสมบัติจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณสมบัติจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0%(w/w).....57
ค.7	คุณสมบัติจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณสมบัติจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 5%(w/w)..... 58
ค.8	คุณสมบัติจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณสมบัติจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 10%(w/w).....59
ค.9	คุณสมบัติจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณสมบัติจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 15%(w/w).....60
ค.10	คุณสมบัติจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณสมบัติจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 20%(w/w).....61
ง.1	การเกิดกรดแลกติกในการผลิตโยเกิร์ต.....62
ง.2	การแขวนลอยของเนื้อสับปะรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตรในนมเปรี้ยวที่อุณหภูมิห้อง.....62

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	หลักการของการเกิดความร้อนโดยวิธีไอห์มมิก.....4
2.2	การให้ความร้อนโดยวิธีไอห์มมิกเพื่อการสเตอริไลซ์.....10
4.1	การเกิดกรดแลกติกในการผลิตโยเกิร์ต..... 16
4.2	เซลล์สำหรับให้ความร้อนโดยวิธีไอห์มมิกแบบสถิตย์..... 18
4.3	ระบบการให้ความร้อนโดยวิธีไอห์มมิก.....19
4.4	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดปริมาณ 5%(w/w).....23
4.5	ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยว ผสมเนื้อสับประดปริมาณ 0-20%(w/w).....25
4.6	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดปริมาณ 0-20%(w/w).....27
4.7	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับ อุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดที่ความเข้มข้น ไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....29
4.8	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับ อุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดที่ความเข้มข้น ไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....30
4.9	ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยว ผสมสับประดปริมาณ 0-20%(w/w)..... 32
4.10	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับประดปริมาณ 0-20%(w/w).....33
4.11	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับ อุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับประดที่ความเข้มข้น ไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....35
4.12	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับ อุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดที่ความเข้มข้น ไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร.....36

คำอธิบายสัญลักษณ์

a	= ค่าคงที่
A	= พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (m^2)
b	= ค่าคงที่
c_p	= ความร้อนจำเพาะ ($J/kg^{\circ}C$)
H_k	= ความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ ($J/^{\circ}C$)
I	= กระแสไฟฟ้า (A)
K_1	= สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ⁻¹
K_2	= สัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง (S/m%solid)
K_c	= ค่าคงที่ของเซลล์ ($K_c = L/A$)
L	= ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)
m	= มวลอาหาร (kg)
M	= สัดส่วนโดยมวลของน้ำ
P	= กำลังไฟฟ้า (W)
Q	= ปริมาณความร้อน (J)
R	= ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)
S	= ปริมาณของแข็ง (%)
Δt	= เวลาที่เปลี่ยนแปลง (s)
ΔT	= อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}C$)
t	= เวลา (s)
T	= อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
V	= ความต่างศักย์ (V)
w	= น้ำหนัก (g)
W	= พลังงานไฟฟ้า (J)
z	= การสูญเสียความร้อนหรือการได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(c_{pw}w_w + c_{pk}w_k + c_{pc}w_c)(dT/dt)_t$ โดย dT/dt เท่ากับ ความชันของเส้นตรง ช่วงหลังจากสภาวะสมดุล
σ	= สภาพนำไฟฟ้า (S/m)

Subscripts

- 0 = สภาวะเริ่มต้น
 c = ตัวอย่าง
 f = สภาวะสมดุล
 k = แคลลอรیمیเตอร์
 w = น้ำ
 T = อุณหภูมิใด ๆ



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญกับสุขภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะผลิตนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรดเพื่อใช้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากนมเปรี้ยวมีเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii ssp. lactis*, *Lactobacillus casei* หรือ *Lactobacillus acidophilus* ซึ่งช่วยรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้และช่วยลดปริมาณแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ทำให้มีสุขภาพดี นอกจากนี้นมเปรี้ยวยังประกอบด้วยโปรตีนที่สามารถย่อยได้ง่าย คาร์โบไฮเดรต ไขมัน สารอาหารต่าง ๆ และยังเป็นแหล่งของแคลเซียมและแร่ธาตุอื่น ๆ ซึ่งจำเป็นในการสร้างกระดูกและฟัน (Johnson and Peterson, 1974; Macrae, Robinson, and Sadler, 1993) ส่วนสับปะรดนั้นเป็นแหล่งของวิตามินเอและซีที่ช่วยให้ร่างกายแข็งแรง มีเอนไซม์โบรมิเลน ซึ่งช่วยในการย่อยอาหารและป้องกันโรคต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีปริมาณเส้นใยอาหารสูงช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคเบาหวาน ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและช่วยในการควบคุมน้ำหนัก (Gene, 1993) การพาสเจอร์ไร้นมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรดซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนผสมระหว่างนมเปรี้ยวและเนื้อสับปะรดโดยการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมจะต้องอาศัยการถ่ายโอนความร้อนจากตัวกลางในการให้ความร้อนผ่านภาชนะบรรจุมาสู่นมเปรี้ยวและถ่ายโอนความร้อนไปสู่เนื้อสับปะรดทำให้นมเปรี้ยวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเร็วกว่าเนื้อสับปะรด และต้องให้ความร้อนจนกระทั่งเนื้อสับปะรดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการให้ความร้อนเกินของนมเปรี้ยวได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกซึ่งเป็นกระบวนการที่นำกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังอาหารที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งขึ้นกับสภาพนำไฟฟ้าของอาหาร (Sastry and Jeffrey, 2000) และเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความร้อนโดยตรง จึงทำให้เกิดความร้อนได้รวดเร็วและสม่ำเสมอโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการให้ความร้อน มาใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและไม่เกิดปัญหาการให้ความร้อนเกิน โดยสภาพนำไฟฟ้าของอาหารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่อยู่ในอาหาร (Palaniappan and Sastry, 1991b) ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรดและศึกษาระบบการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกเพื่อการพาสเจอร์ไรซ์แบบอุณหภูมิสูงเวลาสั้น (HTST)

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 สับปะรด (Pineapple)

สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) เป็นผลไม้ที่มีแหล่งกำเนิดในประเทศบราซิล (Umberto, 2000) ต้นและใบมีลักษณะแข็งและมีหนาม มีผลเดี่ยว สับปะรดเป็นแหล่งของวิตามินเอและซี มีเอนไซม์โบรเมเลนซึ่งช่วยลดอาการบวมและเมื่อทำงานร่วมกับแมงกานีสจะช่วยในการย่อยอาหาร ละลายเลือดที่แข็งตัว ช่วยป้องกันโรคกระดูกพรุนและโรคกระดูกร่วง ช่วยป้องกัน auto-immune diseases ลดอาการแพ้และป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง นอกจากนี้ สับปะรดยังประกอบด้วยเส้นใยอาหาร 0.30–0.61% ของส่วนที่กินได้ (Hulme, 1971) ซึ่งช่วยลดอาการท้องผูกและ diverticular disease ป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง ช่วยในการดูดซึมน้ำตาล กลูโคสและควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดจึงเหมาะกับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ช่วยควบคุมอาการ Hyperlipidemia โดยดูดซึมไขมันคอเลสเตอรอลผ่านทางลำไส้เล็กและลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและช่วยในการควบคุมน้ำหนัก (Gene, 1993)

2.2 โยเกิร์ต (Yoghurt)

โยเกิร์ตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักน้ำนมด้วยเชื้อจุลินทรีย์ *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophilus* และ *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* โดยเชื้อ จุลินทรีย์ จะเปลี่ยนน้ำตาลแลคโตสเป็นกรดแลคติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก ไดอะซิติก อะซิทิลไฮด์ และสารองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอะมิโน ซึ่งจะให้กลิ่นรสที่เฉพาะตัวของโยเกิร์ต (Johnson and Peterson, 1974; Macrae, Robinson, and Sadler, 1993) โยเกิร์ตสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามกระบวนการผลิต ได้แก่ set yoghurt เป็นโยเกิร์ตที่มีการบ่มเชื้อภายในภาชนะบรรจุแล้วจึงลดอุณหภูมิลง stirred yoghurt เป็นโยเกิร์ตที่มีการบ่มเชื้อในถังหมักก่อนและลดอุณหภูมิลงก่อนการบรรจุในภาชนะบรรจุ drinking yoghurt เป็นโยเกิร์ตที่มีลักษณะคล้ายกับ stirred yoghurt แต่มีการปั่นให้เกิดการแตกตัวของ coagulum จนมีลักษณะเป็นของเหลวก่อนการบรรจุ frozen yoghurt เป็นโยเกิร์ตที่มีการบ่มเชื้อในถังหมักแล้วนำมาแช่เยือกแข็งจนมีลักษณะคล้ายไอศกรีม และ concentrated yoghurt เป็นโยเกิร์ตที่มีการบ่มเชื้อในถังหมักแล้วเทส่วนที่เป็นโปรตีนเวย์ทิ้งทำให้มี dry matter เพิ่มขึ้น และนำมาลดอุณหภูมิลงก่อนการบรรจุ (Bylund, 1995)

2.3 กระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารนม (Harding, 1995)

2.3.1 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ได้แก่ *Mycobacterium tuberculosis*, *Brucella abortus* หรือเชื้อที่ทำให้อาหารเป็นพิษ ได้แก่ *Salmonella* หรือ *Listeria* โดยที่ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมี กายภาพและประสาทสัมผัสน้อยมาก ซึ่งอาหารนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 8 องศาเซลเซียส และจะมีอายุการเก็บ 6-8 วัน การให้ความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การใช้อุณหภูมิต่ำเวลานาน (low temperature long time, LTLT) ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 62.8-65.6 องศาเซลเซียส เวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที และการใช้อุณหภูมิสูงเวลาดสั้น (high temperature short time, HTST) ซึ่งใช้อุณหภูมิ 72-74 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 15 วินาที

2.3.2 การสเตอริไลซ์ (Sterilization)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และเวลานาน โดยอาจใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 115-120 องศาเซลเซียส เวลา 15-20 นาที

2.3.3 กระบวนการให้ความร้อนแบบ UHT (Ultra – high temperature treatment)

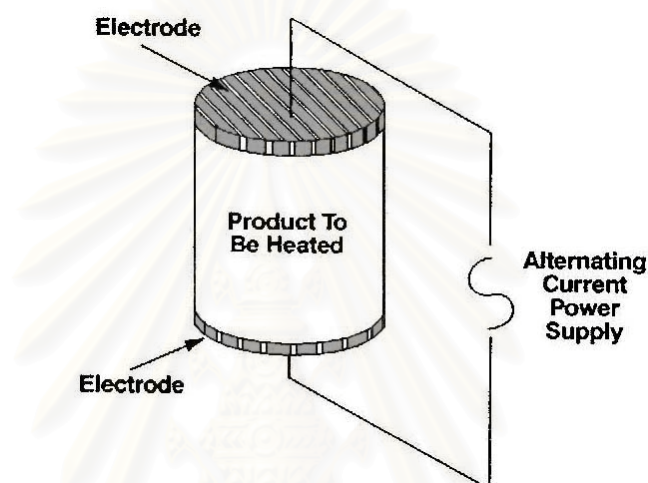
เป็นกระบวนการให้ความร้อนคล้ายการสเตอริไลซ์แต่ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาดสั้นกว่า ทำให้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเนื่องจากความร้อนได้ โดยอาจใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 135-150 องศาเซลเซียส เวลา 2-4 วินาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะมีอายุการเก็บที่ยาวนานโดยไม่ต้องแช่เย็น มีสีและรสชาติใกล้เคียงกับการพาสเจอร์ไรซ์

2.4 หลักการของการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก

กระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating) เป็นกระบวนการที่นำกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังอาหารหรือวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหาร (Sastry and Jeffrey, 2000) และการเกิดความร้อนนี้เป็นไปตามปรากฏการณ์ของจูล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1-4 และดังรูปที่ 2.1 ทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการให้ความร้อน บางครั้ง

อาจเรียกการให้ความร้อนโดยวิธีไอห้่มมิกว่า Joule heating, Electrical resistance heating, Direct electrical resistance heating, Electroheating หรือ Electroconductive heating เป็นต้น

$$\begin{aligned}
 W &= Q && \dots\dots\dots(1) \\
 \text{โดยที่} \quad W &= P\Delta t && \dots\dots\dots(2) \\
 Q &= mc_p \Delta T && \dots\dots\dots(3) \\
 P &= I^2 R = IV && \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.1 หลักการของการเกิดความร้อนโดยวิธีไอห้่มมิก

การให้ความร้อนโดยวิธีไอห้่มมิกทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นเองโดยความร้อนเกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากองค์ประกอบของอาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยอิออนต่าง ๆ เช่น อิออนของเกลือและกรดที่ละลายอยู่ในอาหารทำให้อาหารสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งอาหารแต่ละชนิดจะมีสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ที่แตกต่างกันตามองค์ประกอบของอาหาร

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนโดยวิธีไอห้่มมิก

2.5.1 สภาพนำไฟฟ้าของอาหาร

Palaniappan และ Sastry (1991a) พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าของอาหาร ถ้าอาหารชนิดนั้นมีองค์ประกอบที่สามารถนำไฟฟ้าหรือมี

สภาพนำไฟฟ้าสูงจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูง แต่ถ้าอาหารชนิดนั้นมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่ำ (สมการที่ 5)

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{V^2 \sigma}{K_c mc_p} \right) \dots\dots\dots(5)$$

Palaniappan และ Sastry (1991b) พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ และน้ำส้มขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำผลไม้เพิ่มขึ้นและปริมาณของแข็งของน้ำผลไม้ลดลง

Yongsawatdigul, Park และ Kolbe (1995) พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของ Pacific whiting surimi paste ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นและปริมาณเกลือ เมื่ออุณหภูมิและปริมาณเกลือมีค่าเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าของซูริมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนปริมาณความชื้นจะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าของซูริมิ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.5.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า

de Alwis, Halden และ Fryer (1989) พบว่า เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มกำลังงานให้แก่ระบบการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก (สมการที่ 4) ทำให้มีความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจึงทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น (สมการที่ 5)

2.5.3 ความถี่และลักษณะของคลื่น

Imai และคณะ (1995) ศึกษาการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตยกับ Japanese white radish โดยเพิ่มความถี่จาก 50–10,000 เฮิรตซ์ ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 40 โวลท์ต่อเซนติเมตร พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมี่ความสัมพันธ์กับความถี่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลดลง เนื่องจากที่ความถี่สูงจะมีการกลับขั้วเร็ว ดังนั้นอออนซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าประจุไฟฟ้าจะไม่สามารถกลับตัวได้ทันจึงทำให้อออนเคลื่อนที่ได้น้อย ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิมี่ค่าลดลง

Lima, Heskitt และ Sastry (1999) ศึกษาผลของความถี่และลักษณะคลื่นที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของ turnip พบว่า เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง และพบว่า คลื่นรูปฟันเลื่อยจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า คลื่นรูปไซน์และรูปสี่เหลี่ยม ตามลำดับ

2.5.4 ขนาดและรูปร่างของชิ้นอาหาร

Palaniappan และ Sastry (1991b) ได้ศึกษาผลของขนาดชิ้นอาหารที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวที่มีต่อการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า เมื่อขนาดของชิ้นอาหารใหญ่ขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง เนื่องจากชิ้นอาหารขนาดใหญ่จะดูดหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออน (drag for ionic movement) ทำให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำลง

Sastry (1993) ได้ศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นอาหารต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยการแปรค่า aspect ratio (radius/length) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของของเหลวขึ้นอยู่กับค่า aspect ratio ซึ่งถ้าชิ้นอาหารมีค่า aspect ratio ต่ำจะมีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าชิ้นอาหารที่มีค่า aspect ratio สูงทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า

2.5.5 ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร

de Alwis, Halden และ Fryer (1989) ได้ศึกษาผลของการจัดเรียงของชิ้นมันฝรั่งขนาด 40x75x30 มิลลิเมตร ในของเหลวที่มีสภาพนำไฟฟ้า 0.58 ซีเมนส์ต่อเมตร โดยวางในแนวขนานและตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า พบว่า การจัดเรียงในแนวตั้งฉาก ชิ้นอาหารจะร้อนเร็วกว่าของเหลว แต่ถ้าจัดเรียงในแนวขนาน ของเหลวจะร้อนเร็วกว่าชิ้นอาหาร และศึกษาการจัดเรียงของชิ้นอาหารรูปทรงกลมและลูกบาศก์ พบว่า ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหารไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากอัตราส่วนของความยาวต่อพื้นที่ตัดขวางของชิ้นอาหารไม่ขึ้นกับการจัดเรียง

Sastry และ Palaniappan (1992) ได้ศึกษาผลของการวางชิ้นมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร จำนวน 1 ชิ้น ในสารละลายโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในทิศทางขนานและวางทำมุม 45 องศา กับสนามไฟฟ้า พบว่า การวางตัวของชิ้นอาหารไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นมันฝรั่ง

Sastry (1993) ได้ศึกษาผลของการจัดเรียงชั้นอาหารที่มีต่อการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า ชั้นอาหารที่วางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าชั้นอาหารที่วางในแนวขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

2.5.6 ปริมาณของชั้นอาหาร

สุพร กาญจนกิจสกุล (2542) พบว่า สภาพนำไฟฟ้ายังผล (effective electrical conductivity) ของแครอท มันฝรั่ง หัวผักกาด และส่วนผสมของวัตถุดิบแต่ละชนิด ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในช่วงอุณหภูมิ 25-125 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20 40 และ 60 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิที่ทุกสัดส่วนปริมาตร (สมการที่ 6) และสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะลดลง เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของชั้นวัตถุดิบในอาหารเพิ่มขึ้น

$$\sigma = a + bT \quad \dots\dots\dots(6)$$

Sastry (1993) ได้ศึกษาผลของปริมาณชั้นอาหารที่มีต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลว พบว่า เมื่อปริมาณของชั้นอาหารเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลวลดลง เนื่องจากปริมาณของชั้นอาหารจะมีผลต่อการดูดหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออน เมื่อปริมาณของชั้นอาหารเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการดูดการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าต่ำลงทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง

2.6 สมการทำนายสภาพนำไฟฟ้า

Palaniappan และ Sastry (1991a) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของอาหารภายใต้การให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์โดยใช้มะเขือเทศ แครอท แยม เนื้อวัว และเนื้อไก่ ที่ตัดเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 เซนติเมตร ยาว 1.0 เซนติเมตร โดยผักมีการแช่ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 0.2, 0.4 และ 0.8% นำตัวอย่างไปให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 60 โวลท์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ขั้วอิเล็กโทรดทำจากเหล็กปลอดสนิมชุบโรเดียม ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 120 องศาเซลเซียส พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างทั้งหมดมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับอุณหภูมิกว่าคือ เมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างก็จะสูงขึ้นดังสมการที่ 7

โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับวัสดุขั้วและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ (ตารางที่ 2.1)

$$\sigma_T = \sigma_{25^\circ\text{C}} [1 + K_1 (T - 25)] \quad \dots\dots\dots(7)$$

นอกจากนี้ Palaniappan และ Sastry (1991b) ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศที่ไม่มีการเติมเกลือ และของน้ำส้ม ซึ่งมี pH เท่ากับ 4.05 และ 3.71 ตามลำดับ มีปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำตั้งแต่ 0-16.7% และ 0-21% ตามลำดับ นำไปให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 140 โวลท์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ขั้วอิเล็กโทรดทำจากเหล็กปลอดสนิมชุบโรเดียม ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 80-85 องศาเซลเซียส พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ไม่มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง สภาพนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและปริมาณของแข็งลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 8 โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิขึ้นกับชนิดของวัสดุขั้ว (ตารางที่ 2.2)

$$\sigma_T = \sigma_{25^\circ\text{C}} [1 + K_1 (T - 25)] - K_2 S \quad \dots\dots\dots(8)$$

2.7 สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Palaniappan และ Sastry (1991b) ได้หาสมการทางคณิตศาสตร์จากสมดุลความร้อนของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาใด ๆ จากสภาพนำไฟฟ้า ดังนั้นจากสมการที่ 5 และ 6 จะได้

$$T = \frac{1}{b} \left[(a + bT_0) \exp \left(\frac{bV^2 t}{K_c mc_p} \right) - a \right] \quad \dots\dots\dots(9)$$

Fryer และคณะ (1993) ได้หาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของท่อนไม้ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร และฉนวน (araldite) ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 44x23 มิลลิเมตร ในน้ำเกลือที่มีความหนืด 1 เซนติพอยซ์ ที่ 20 องศาเซลเซียส ในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 9) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 20-60 องศาเซลเซียส มีค่า

ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง แต่ในช่วงอุณหภูมิสูงนั้นสมการทางคณิตศาสตร์จะทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงกว่าการทดลอง ดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

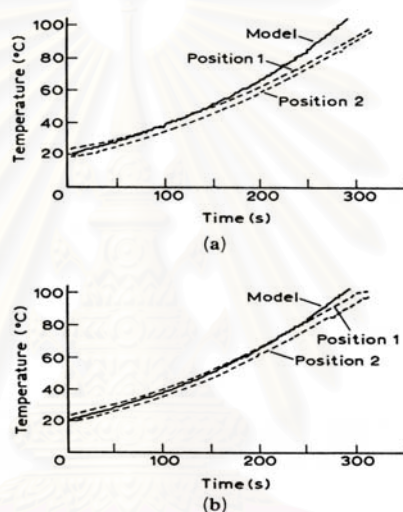
วัสดุ	การทดลอง	$\sigma_{25^{\circ}\text{C}}$ (S/m)	K ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹	R^2
มันฝรั่ง	ดิบ	0.32	0.035	0.94
	แช่น้ำ	0.25	0.030	0.96
	0.2% NaCl	0.37	0.028	0.98
	0.4% NaCl	0.36	0.033	0.88
	0.8% NaCl	0.43	0.027	0.94
แครอท	ดิบ	0.13	0.107	0.96
	แช่น้ำ	0.12	0.078	0.98
	0.2% NaCl	0.29	0.044	0.92
	0.4% NaCl	0.31	0.044	0.96
	0.8% NaCl	0.25	0.062	0.98
มันเทศ	ดิบ	0.11	0.094	0.98
	แช่น้ำ	0.09	0.079	0.98
	0.2% NaCl	0.42	0.021	0.85
	0.4% NaCl	0.35	0.032	0.94
	0.8% NaCl	0.35	0.034	0.96
เนื้อวัว	ดิบ	0.37	0.019	0.90
เนื้อไก่	ดิบ	0.44	0.016	0.96

ที่มา : Palaniappan และ Sastry (1991a)

ตารางที่ 2.2 สภาพนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง

น้ำผลไม้	$\sigma_{25^{\circ}\text{C}}$ (S/m)	K_1 ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹	K_2 (S/m%solid)	R^2
น้ำมะเขือเทศ (0-16.7% solid)	0.863	0.174	0.101	0.978
น้ำส้ม (0-21% solid)	0.567	0.242	0.036	0.984

ที่มา : Palaniappan และ Sastry (1991b)



รูปที่ 2.2 การให้ความร้อนโดยวิธีไอหม้มิกเพื่อการสเตอริไลซ์ (a) ท่อน้ำทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ในน้ำเกลือที่มีความหนืด 1 เซนติพอยซ์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (b) ฉนวนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 44x23 มิลลิเมตร ในน้ำเกลือที่มีความหนืด 1 เซนติพอยซ์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
ที่มา : Fryer และคณะ (1993)

2.8 วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด

2.8.1 เหล็กปลอดสนิม (Stainless steel)

เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 (AISI type 304) เป็นเหล็กปลอดสนิมประเภท austenitic และเป็นอัลลอยที่มีส่วนผสมของคาร์บอน 0.08% โครเมียม 18-20% และนิกเกิล

8.0-10.5% มีสมบัติในการต่อต้านการเกิดสนิมและการกัดกร่อน ทนต่อกรดต่าง ๆ เช่น กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก และกรดฮาโลเจน สามารถนำไปทำเป็นสกรู เพลา อุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนม เครื่องไฮโดรเจน วาล์วและท่อที่สัมผัสกับสารเคมี (Harvey, 1995)

เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 (AISI type 316) เป็นเหล็กปลอดสนิมประเภท molybdenum-bearing และเป็นอัลลอยที่มีส่วนผสมของคาร์บอน 0.08% โครเมียม 16-18% นิกเกิล 10-14% และโมลิบดีนัม 2.0-3.0% มีสมบัติในการทนทานต่อความร้อนและสามารถต่อต้านการเกิดสนิมได้อย่างดีเยี่ยม สามารถนำไปทำเป็นอุปกรณ์ในการผลิตอาหาร เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหม้อต้ม (Harvey, 1995)

2.8.2 ไทเทเนียม (Titanium)

ไทเทเนียมบริสุทธิ์ (ASTM B 265) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำทำให้มีน้ำหนักเบาและมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าอัลลอย มีความแข็งแรงและความเหนียว มีสมบัติในการต่อต้านการกัดกร่อนสูงและไม่เป็นพิษ สามารถนำไปใช้ในการป้องกันปัญหาการกัดกร่อนในการผลิตอาหาร (Budinski and Budinski, 1999)

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมโยเกิร์ตและนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรด

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สับปะรดพันธุ์ศรีราชา (*Ananas comosus* (L.) Merr.) ขนาดน้ำหนัก 1.2-1.5 กิโลกรัมต่อหัว นำมาปอกเปลือกและตัดเป็นชิ้นรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร และนมเปรี้ยวรสสับปะรด ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด $15.20 \pm 0.12\%$ และมีปริมาณกรดแลคติก $0.72 \pm 0.02\%$

เตรียมโยเกิร์ตโดยใช้น้ำนมที่เตรียมจากนมผงไขมันต่ำปริมาณ 17% ละลายในน้ำอุ่น นำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส เติมเจลาตินปริมาณ 0.5% และให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 85-95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-30 นาที แล้วลดอุณหภูมิ เป็น 40-46 องศาเซลเซียส เติม bacterial starter (Nestle plain yoghurt, *Lactobacillus* LC1) 15% ของปริมาณน้ำนม นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40-46 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้กรดแลคติกประมาณ 1.0-1.1% หลังจากนั้นนำไปกวนและลดอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียส นำโยเกิร์ตมาแปรปริมาณ 4 ระดับ คือ 50 60 70 และ 80%(w/w) เตรียมน้ำสับปะรดจากน้ำสับปะรดตรา Brook เข้มข้น 10°Brix 30% (w/w ของน้ำสับปะรด) และน้ำตาลทราย 14% (w/w ของน้ำสับปะรด) และน้ำ 56% (w/w ของน้ำสับปะรด) เติมน้ำสับปะรดลงในโยเกิร์ตจนครบ 100% (w/w ของนมเปรี้ยว) ผสมให้เข้ากันและให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำไปโฮโมจีไนซ์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ Ystral GmbH D-7801 Model X1020 ที่ความเร็วรอบ 16,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที นำนมเปรี้ยวปริมาณ 20 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จะมีความสูงประมาณ 1.7 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความสูงประมาณครึ่งหนึ่งของเซลล์สำหรับให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก หลังจากนั้นนำเนื้อสับปะรดที่เตรียมไว้เติมในนมเปรี้ยวโดยกำหนดปริมาณเนื้อสับปะรดคงที่ที่ 5%(w/w) จับเวลาที่เนื้อสับปะรดแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อเลือกปริมาณโยเกิร์ตที่จะใช้เตรียมนมเปรี้ยวที่มีเนื้อสับปะรดแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวอย่างน้อย 10 นาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเนื้อสับปะรดจะแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวในช่วงเวลาการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก หาความหนาแน่นของเนื้อสับปะรดและโยเกิร์ตโดยการชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรของตัวอย่าง

3.2 การออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์แบบสติดิตย

ออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์แบบสติดิตย ซึ่งประยุกต์วิธีการออกแบบจากข้อเสนอแนะของสุพร กาญจนกิจสกุล (2542) และส่วนประกอบของฝาปิดและ thermocouple port จาก Palaniappan และ Sastry (1991a) โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316

ทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์ที่สร้างขึ้น โดยผ่านไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/เซนติเมตร ให้กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ และบันทึกอุณหภูมิของน้ำเกลือที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 5-80 องศาเซลเซียส

ทดสอบความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์ที่สร้างขึ้นตามวิธีของ Palaniappan และ Sastry (1991a) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.02 โมลาร์ และสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักย์ 4-6 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ และบันทึกอุณหภูมิของน้ำเกลือที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 5-80 องศาเซลเซียส แล้วคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าตามสมการที่ 10 โดยค่า K_c คือ อัตราส่วนของระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดต่อพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 107.81 เมตร^{-1} เปรียบเทียบค่าที่ได้กับเอกสารอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Palaniappan and Sastry, 1991a)

$$\sigma = \left(\frac{IL}{VA} \right) = K_c \left(\frac{I}{V} \right) \quad \dots\dots\dots(10)$$

3.3 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด

3.3.1 การศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดและความเข้มสนามไฟฟ้าต่อสภาพนำไฟฟ้า

เตรียมนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดที่มีปริมาณสับประรดขนาด $1 \times 1 \times 1$ เซนติเมตร 5%(w/w) โดยเสียบเนื้อสับประรดติดกับเทอร์โมคัปเปิลที่บริเวณจุดศูนย์กลางเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์จำนวน 1 ชิ้น นำไปให้ความร้อนโดยวิธีอินทรีย์แบบสติดิตยที่มีขั้ว

อิเล็กโทรดทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 แปรค่าความเข้มข้นของไฟฟ้า 4 ระดับ คือ 10, 20, 30 และ 40 โวลต์/เซนติเมตร โดยใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์ บันทึกกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ เพื่อใช้คำนวณสภาพนำไฟฟ้าและบันทึกอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 5–80 องศาเซลเซียส วางแผนการทดลองแบบ Factorial ขนาด 3x4 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS แล้วเลือกใช้อิเล็กโทรดจากการสังเกตการกัดกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดในการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกและการปั่นเปื้อนในนมเปรี้ยว และเลือกความเข้มข้นไฟฟ้าที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดที่ใกล้เคียงกันเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

3.3.2 การหาความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง

นำนมเปรี้ยวมาแปรปริมาณเนื้อสับประรดขนาด 1x1x1 เซนติเมตร 5 ระดับ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20%(w/w) แล้วนำไปให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์ โดยเสียบเนื้อสับประรดติดกับเทอร์โมคัปเปิลที่บริเวณจุดศูนย์กลางเซลล์ ใช้ขั้วอิเล็กโทรดและความเข้มข้นไฟฟ้าที่เลือกจากข้อที่ 3.3.1 ความถี่ 50 เฮิรตซ์ บันทึกกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 5–80 องศาเซลเซียส ทำการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าจากสมการที่ 10

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (K_1) และสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง (K_2) ในสมการความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง (สมการที่ 8) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistica

3.3.3 การหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการทวนสอบ

หาสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 5 (Palaniappan and Sastry, 1991b) และหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งจากสมการที่ 8 ในรูปสมการที่ 11

$$\sigma = a + bT - K_2S \quad \dots\dots\dots(11)$$

แทนค่าสมการที่ 11 ในสมการที่ 5 และอินทิเกรตสมการที่ 5 จะได้

$$T = \frac{1}{b} \left[(a + bT_0 - K_2 S) \exp \left(\frac{bV^2 t}{K_c mc_p} \right) - a + K_2 S \right] \dots\dots\dots(12)$$



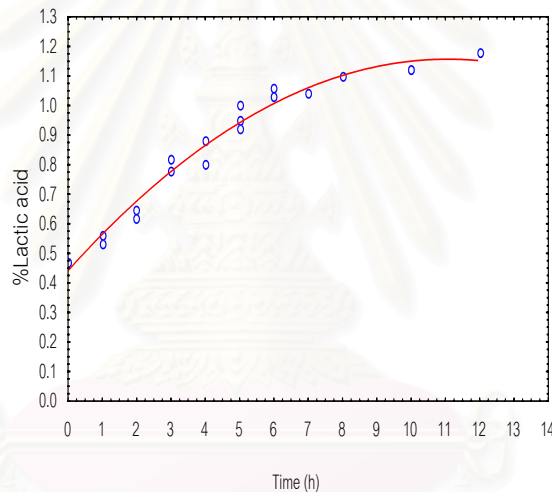
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การเตรียมโยเกิร์ตและนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรด

จากการเตรียมโยเกิร์ตซึ่งใช้ bacterial starter (Nestle plain yoghurt, *Lactobacillus* LC1) และบ่มในช่วงอุณหภูมิ 40–46 องศาเซลเซียส จนได้ปริมาณกรดแลคติกในโยเกิร์ต 1.0–1.1% พบว่า ต้องใช้เวลาในการบ่ม 6-9 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1 และตารางที่ ง.1) โยเกิร์ตที่ได้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด $18.11 \pm 0.04\%$ และมี pH เท่ากับ 4.42 ± 0.02 ซึ่งมีการเกิดการแยกชั้นของเวย์โปรตีนน้อยมาก



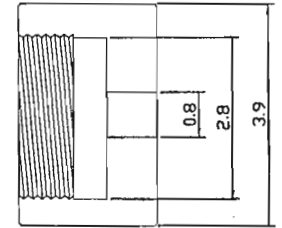
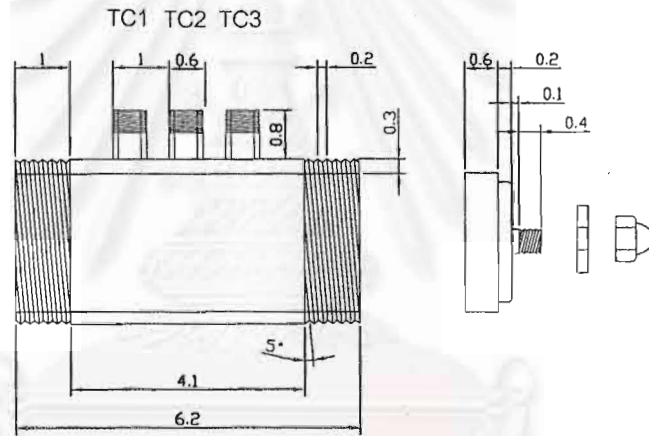
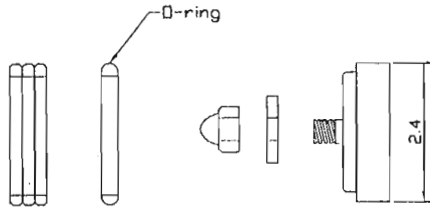
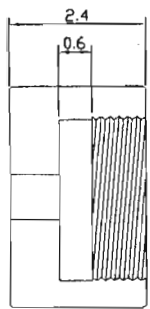
รูปที่ 4.1 การเกิดกรดแลคติกในการผลิตโยเกิร์ต

จากการนำโยเกิร์ตมาแปรปริมาณ 4 ระดับ คือ 50 60 70 และ 80%(w/w) แล้วเตรียมเป็นนมเปรี้ยวรสสับปะรด หลังจากนั้นนำเนื้อสับปะรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ซึ่งพบว่ามีน้ำหนัก 1.20 ± 0.03 กรัมต่อชิ้น มีปริมาณของแข็งทั้งหมด $12.04 \pm 0.16\%$ ปริมาณความชื้น $87.96 \pm 0.25\%$ และมีปริมาณกรด (เทียบเป็นปริมาณกรดแลคติก) $0.98 \pm 0.01\%$ เติมนมเปรี้ยวปริมาณ 5%(w/w) แล้วจับเวลาที่เนื้อสับปะรดแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยว พบว่า สับปะรดสามารถแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวที่เตรียมจากโยเกิร์ตปริมาณ 50, 60, 70 และ 80% (w/w) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลายาวนานน้อย 10 นาที ทุกความเข้มข้นของโยเกิร์ต ดังนั้นจึงใช้นมเปรี้ยวที่เตรียมจากโยเกิร์ตปริมาณ 50%(w/w) ในการทดลองต่อไปเนื่องจากสามารถทำให้เนื้อสับปะรดแขวนลอยอยู่ได้เป็นเวลานานกว่า 10 นาที และจากการหาความหนาแน่นของ

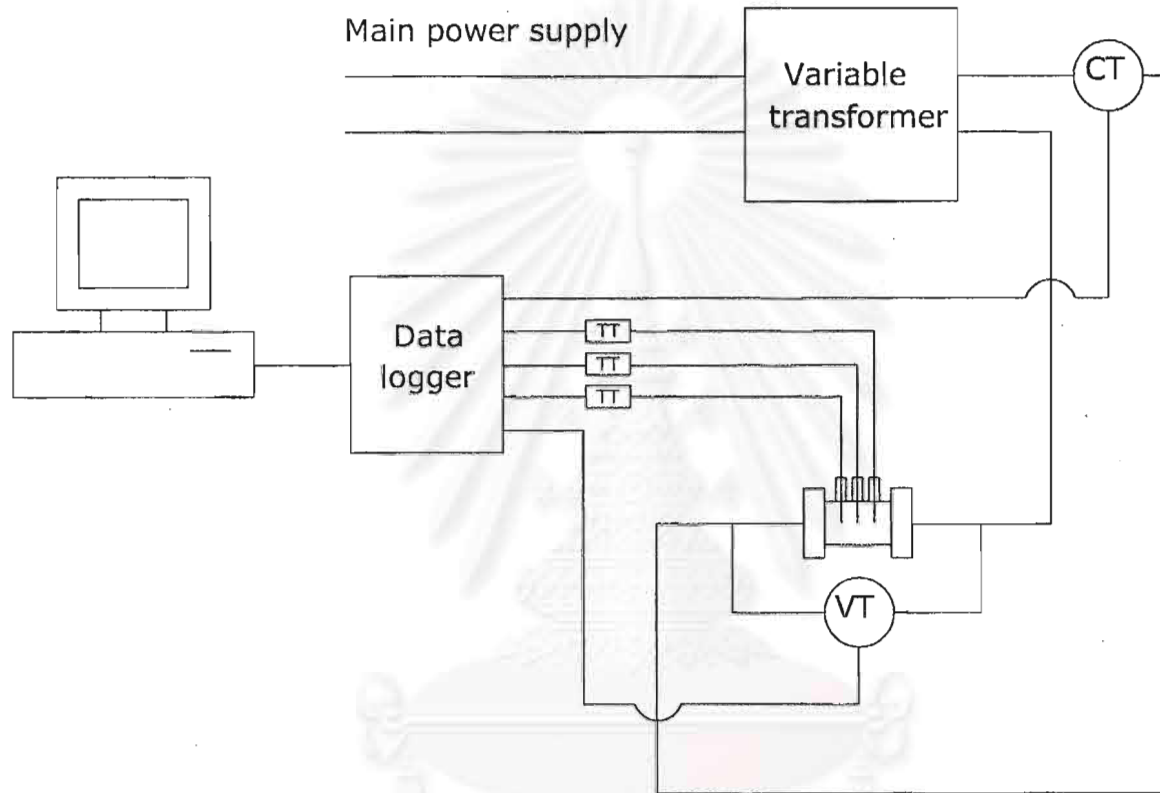
เนื้อสับประรดและนมเปรี้ยวที่เตรียมจากโยเกิร์ตปริมาณ 50%(w/w) พบว่า เนื้อสับประรดมีความหนาแน่นเฉลี่ย 0.99 ± 0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นเฉลี่ยของนมเปรี้ยวที่เตรียมจากโยเกิร์ตปริมาณ 50%(w/w) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นเนื้อสับประรดจึงสามารถแขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวได้ในระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงจมลงเนื่องจากการแพร่ของสารประกอบต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อสับประรดและนมเปรี้ยวจนความหนาแน่นของเนื้อสับประรดมีค่ามากกว่านมเปรี้ยว

4.2 การออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์

ออกแบบและสร้างเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร ความหนา 0.6 เซนติเมตร เซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวเซลล์และส่วนที่เป็นฝาปิด ซึ่งส่วนที่เป็นตัวเซลล์ทำจากท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.4 เซนติเมตร ยาว 6.2 เซนติเมตร ความหนาของท่อ 0.3 เซนติเมตร นำมาลึงเกลียวบริเวณปลายท่อทั้งสองด้านระยะห่างจากปลายท่อ 1 เซนติเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางท่อ 1 รู และบริเวณห่างจากจุดศูนย์กลางตามความยาวท่อระยะห่าง 1 เซนติเมตร จำนวน 2 รู เพื่อติดตั้ง thermocouple port ที่ทำจากท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.6 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร นำมาลึงเกลียวระยะห่างจากปลายท่อ 0.5 เซนติเมตร ส่วนที่เป็นฝาปิดทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 2.4 เซนติเมตร นำมาลึงเป็นฝาปิดรูป้องกันและเกลึงเกลียวด้านในระยะห่างจากปลายเปิด 0.6 เซนติเมตร เจาะรูที่บริเวณจุดศูนย์กลางขนาด 0.8 เซนติเมตร (รูปที่ 4.2) ส่วนระบบจ่ายไฟฟ้าใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเปลี่ยนค่าได้ (variable transformer ยี่ห้อ YOKOHAMA รุ่น TSB-7.5) ที่สามารถปรับและควบคุมความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับเซลล์สำหรับการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกและมีระบบการติดตามผลการทดลองประกอบด้วย current transducer, voltage transducer, thermocouple transmitter และมี data logger ใช้แปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อใช้ติดตามค่ากระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์และอุณหภูมิ (รูปที่ 4.3)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4.2 เซลล์สำหรับให้ความร้อนโดยวิธีไอหม้มิกแบบสติดิตย์



(CT) Current transducer (VT) Voltage transducer (TT) Thermocouple transmitter

รูปที่ 4.3 ระบบการให้ความร้อนโดยวิธีไดโอดหีมิก

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกซึ่งใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่า เมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไทเทเนียมจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีของขั้วอิเล็กโทรดเป็นสีม่วงตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้เหล็กปลอดสนิมทั้งสองชนิดเป็นขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดสนิมสีน้ำตาลแดงขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสเนื่องจากปฏิกิริยาอ็อกซิไดรไลเซชัน (สุพร กาญจนกิจสกุล, 2542) และมีการปนเปื้อนในน้ำเกลือเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 พบว่า การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 มีน้อยกว่าเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 โดยสังเกตได้จากปริมาณสนิมที่เกิดขึ้นและการปนเปื้อนในน้ำเกลือ แต่เมื่อทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกกับนมเปรี้ยวรสสับปะรด พบว่า ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 จะเริ่มมีการเกิดการกัดกร่อนตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงอาจใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดในการทดลองได้เนื่องจากการพาสเจอไรซ์ใช้อุณหภูมิประมาณ 72 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 และ 0.02 โมลาร์ และสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายทั้งสามชนิดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิด (ตารางที่ 4.1) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.1-ข.3) และสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายทั้งสามชนิดมีความคลาดเคลื่อนจากสภาพนำไฟฟ้าที่รายงานไว้ (Palaniappan and Sastry, 1991a) ประมาณ 2-4%, 5% และ 11-14% ตามลำดับ เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิดมีการเกิดการกัดกร่อนที่ต่างกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดความต้านทานได้ จึงทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายเปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 พบว่า การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 มีน้อยกว่าเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 จึงอาจทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 มีค่าน้อยกว่าเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 ส่วนสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงอาจเนื่องมาจากค่าอ้างอิงที่ใช้ได้มาจากการเตรียมและวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า (Palaniappan and Sastry, 1991a) แต่ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดในการหาค่าสภาพนำไฟฟ้าในการทดลองได้

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของ
ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิด

ขั้วอิเล็กโทรด	สภาพนำไฟฟ้า (S/m)		
	การทดลอง	ค่าอ้างอิง	% ความแตกต่าง
สารละลาย 0.1 M NaCl			
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304	0.99±0.01	1.03	3.9
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316	1.01±0.01		2.9
ไทเทเนียม	1.02±0.01		1.9
สารละลาย 0.02 M NaCl			
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304	0.19±0.00	0.20	5.0
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316	0.21±0.00		5.0
ไทเทเนียม	0.19±0.00		5.0
สารละลาย 0.1 M NaH₂PO₄			
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304	0.55±0.01	0.63	12.7
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316	0.56±0.01		11.1
ไทเทเนียม	0.54±0.00		14.3

4.3 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด

4.3.1 การศึกษาผลของชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดและความเข้มข้นนมไฟฟ้าต่อ
สภาพนำไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด
ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 5%(w/w) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ขั้วอิเล็กโทรด
ที่ทำจากไทเทเนียมและเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 และ 316 ที่ความเข้มข้นนมไฟฟ้า 10, 20,
30 และ 40 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดไม่มีผลอย่างมี
นัยสำคัญ ($p>0.05$) ต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด (ตารางที่ ข.4) กล่าวคือ
ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลองทั้งสามชนิดนั้นให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดที่

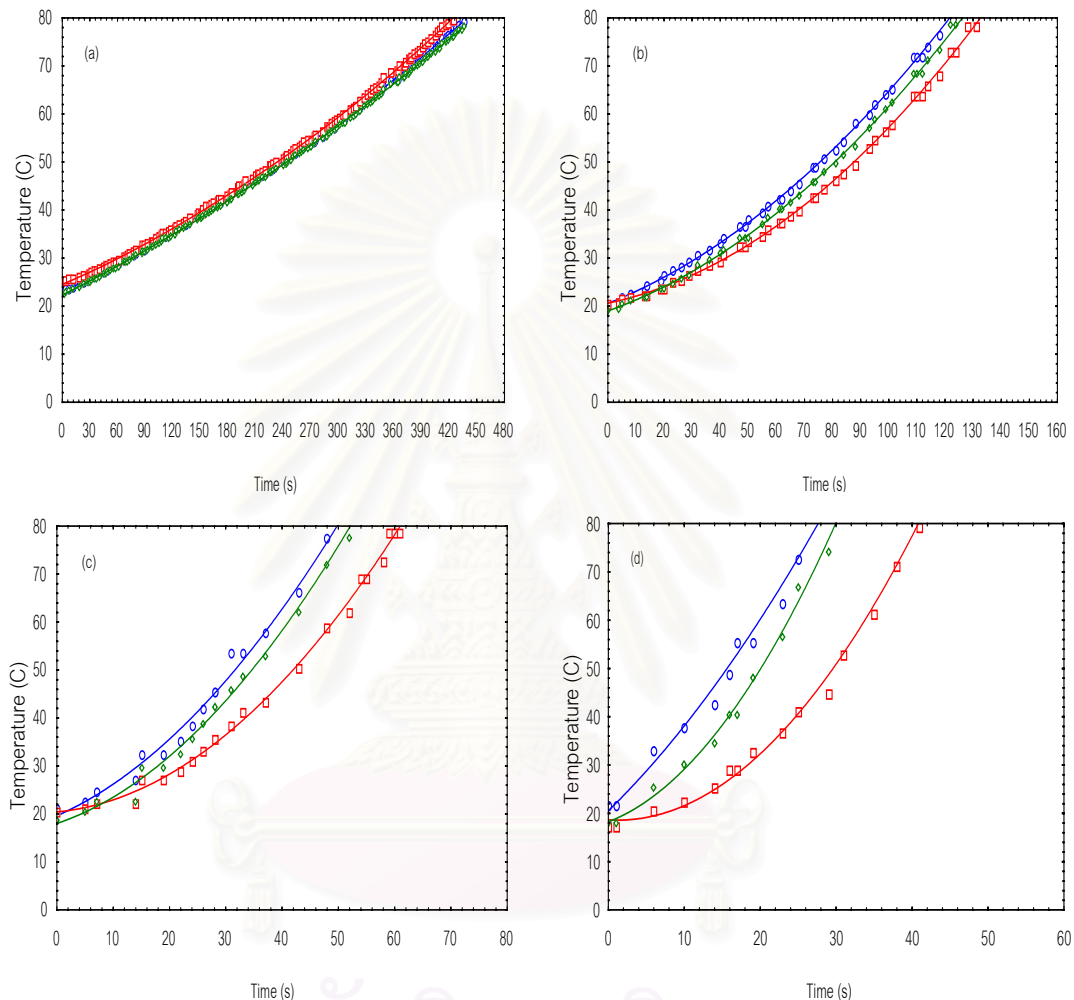
ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.2) ดังนั้นจึงเลือกเหล็กปลอดสนิมในการทดลอง เนื่องจากเหล็กปลอดสนิมมีราคาต่ำกว่าไทเทเนียมมาก และเลือกใช้เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนในขณะให้ความร้อนโดยวิธีไอหม้มิกน้อยกว่าเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304 ในทุก ๆ ความเข้มข้นไฟฟ้าที่ศึกษา และพบว่าความเข้มข้นไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด (ตารางที่ ๔.4) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าจะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเกิด electro-osmosis dehydration เมื่อความเข้มข้นไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะเร่งการปลดปล่อยสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในอาหารออกมามากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น (Halden, de Alwis, and Fryer, 1990) จึงทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้ความเข้มข้นไฟฟ้าที่ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นไฟฟ้าต่าง ๆ

ขั้วอิเล็กโทรด	สภาพนำไฟฟ้า (S/m) ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า			
	10 V/cm	20 V/cm	30 V/cm	40 V/cm
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 304	0.4261±0.0365	0.4405±0.0164	0.4656±0.0065	0.5762±0.0785
เหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316	0.4265±0.0150	0.4568±0.0135	0.4526±0.0204	0.5168±0.0938
ไทเทเนียม	0.4176±0.0104	0.4405±0.0073	0.4502±0.0031	0.4682±0.0164

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดปริมาณ 5% (w/w) ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 10-40 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่า ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร (รูปที่ 4.5(a)) มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดใกล้เคียงกันมาก แต่ใช้เวลานานถึง 6 นาที ในการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 72 องศาเซลเซียส ส่วนที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (รูปที่ 4.5(b) และ 4.5(c)) พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดมีค่าใกล้เคียงกัน และใช้เวลาในการให้ความร้อนจนเนื้อสับประรดมีอุณหภูมิถึง 72 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 และ 1 นาที ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 40 โวลต์ต่อเซนติเมตร (รูปที่ 4.5(d)) พบว่า ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้นมากแต่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวและเนื้อสับประรดมีค่าแตกต่างกันมาก

โดยเมื่อให้ความร้อนจนเนื้อสัตว์ประดมีอุณหภูมิถึง 72 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของนมเปรี้ยวก็จะมีค่าสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้นมเปรี้ยวเกิดการไหม้และเสื่อมคุณภาพ ดังนั้นจึงเลือกความเข้มสนามไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้น และมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างนมเปรี้ยวและเนื้อสัตว์ประदन้อย



รูปที่ 4.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสัตว์ประदन 5%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า (a) 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร (b) 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (c) 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ (d) 40 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดย \circ นมเปรี้ยว ตำแหน่งที่ 1 \square สัตว์ประदन \diamond นมเปรี้ยวตำแหน่งที่ 3

จากการทดลอง พบว่า เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสัตว์ประदनมีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มกำลังงานให้แก่ระบบการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกทำให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามสมการที่ 5 (de Alwis, et al., 1989)

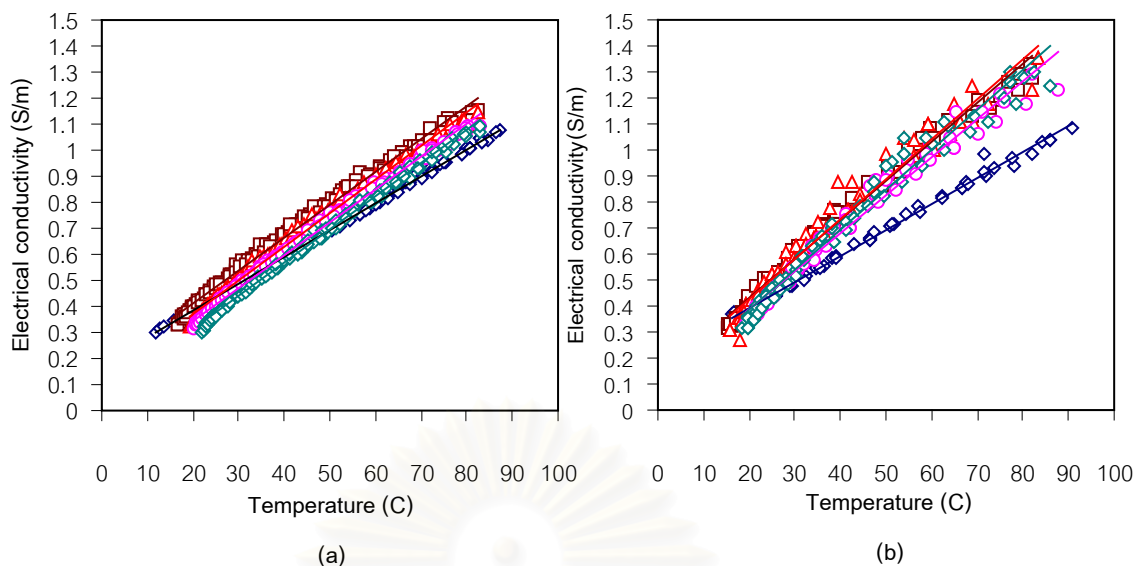
เมื่อนำเหล็กปลอดสนิมเบอร์ 316 มาทดสอบการใช้งานโดยให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกกับนมเปรี้ยวรสสับปะรดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 20-100 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถใช้ขั้วอิเล็กโทรดในการทดลองได้มากกว่า 10 ครั้งโดยไม่ต้องขัดขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวรสสับปะรดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.4392 ± 0.0073 ซีเมนส์ต่อเมตร

4.3.2 การหาความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง

จากการนำนมเปรี้ยวมาแปรปริมาณเนื้อสับปะรด 5 ระดับ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20%(w/w) พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ตารางที่ 4.3) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ข.5-ข.6) ซึ่งผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.5(a) และ 4.5(b) ตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) ตามสมการที่ 6 แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	สภาพนำไฟฟ้า (S/m) ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า	
	20 V/cm	30 V/cm
นมเปรี้ยว	0.4396 ± 0.0079	0.4438 ± 0.0009
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 5%	0.4735 ± 0.0033	0.5063 ± 0.0063
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 10%	0.4390 ± 0.0055	0.5021 ± 0.0250
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 15%	0.4120 ± 0.0051	0.4567 ± 0.0137
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 20%	0.3729 ± 0.0054	0.4584 ± 0.0212



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า (a) 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (b) 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดย — นมเปรี้ยว — นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 5% — นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 10% — นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 15% — นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 20%

ตารางที่ 4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w)

ตัวอย่าง	สมการ	R ²
ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 V/cm		
นมเปรี้ยว	$\sigma=0.0102T+0.1821$	0.998
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 5%	$\sigma=0.0126T+0.1576$	0.994
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 10%	$\sigma=0.0128T+0.1173$	0.993
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 15%	$\sigma=0.0126T+0.0965$	0.995
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 20%	$\sigma=0.0128T+0.0514$	0.996
ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 V/cm		
นมเปรี้ยว	$\sigma=0.0100T+0.1938$	0.995
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 5%	$\sigma=0.0150T+0.1302$	0.986
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 10%	$\sigma=0.0154T+0.1160$	0.969
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 15%	$\sigma=0.0147T+0.0933$	0.975
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 20%	$\sigma=0.0154T+0.0721$	0.976

จากการนำข้อมูลมาหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งจากความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ 8 สามารถหาค่า K_1 และ K_2 ของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (รูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.5) และจากการนำค่า K_1 และ K_2 แทนลงในสมการที่ 8 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนี้

$$\sigma = 0.1366 + 0.0120T - 0.0011S \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\sigma = 0.0999 + 0.0138T + 0.0033S \quad \dots\dots\dots(14)$$

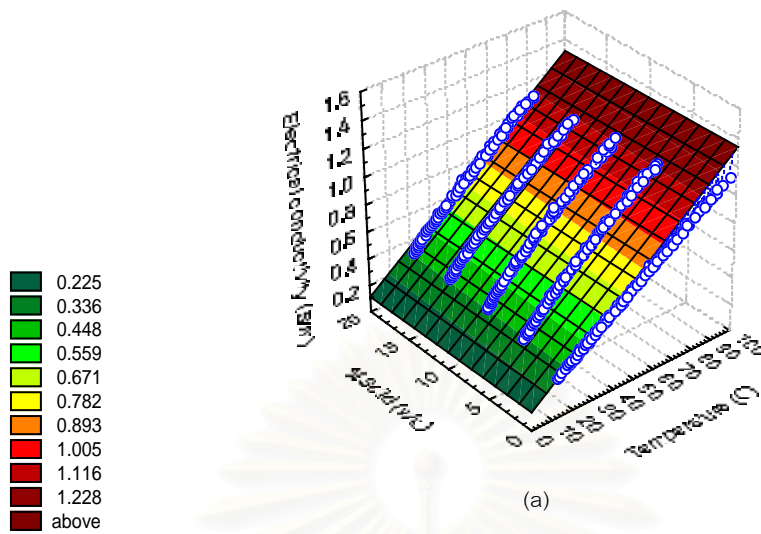
4.3.3 การหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการทวนสอบ

นำสมการที่ 13 และ 14 แทนในสมการที่ 5 แล้วอินทิเกรตจะได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนี้

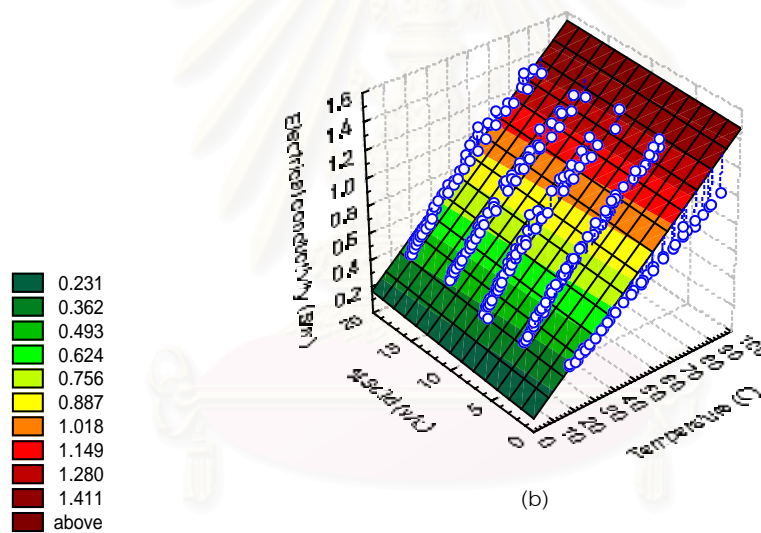
$$T = \frac{1}{0.0120} \left[(0.1366 + 0.0120T_0 - 0.0011S) \exp\left(\frac{0.0120V^2 t}{K_c mc_p}\right) - 0.1366 + 0.0011S \right] \dots\dots\dots(15)$$

$$T = \frac{1}{0.0138} \left[(0.0999 + 0.0138T_0 - 0.0033S) \exp\left(\frac{0.0138V^2 t}{K_c mc_p}\right) - 0.0999 + 0.0033S \right] \dots\dots\dots(16)$$

$$\text{Model : } E=(E0*(1+(K1*(T-25))))-(K2*S)$$



$$\text{Model : } E=(E0*(1+(K1*(T-25))))-(K2*S)$$

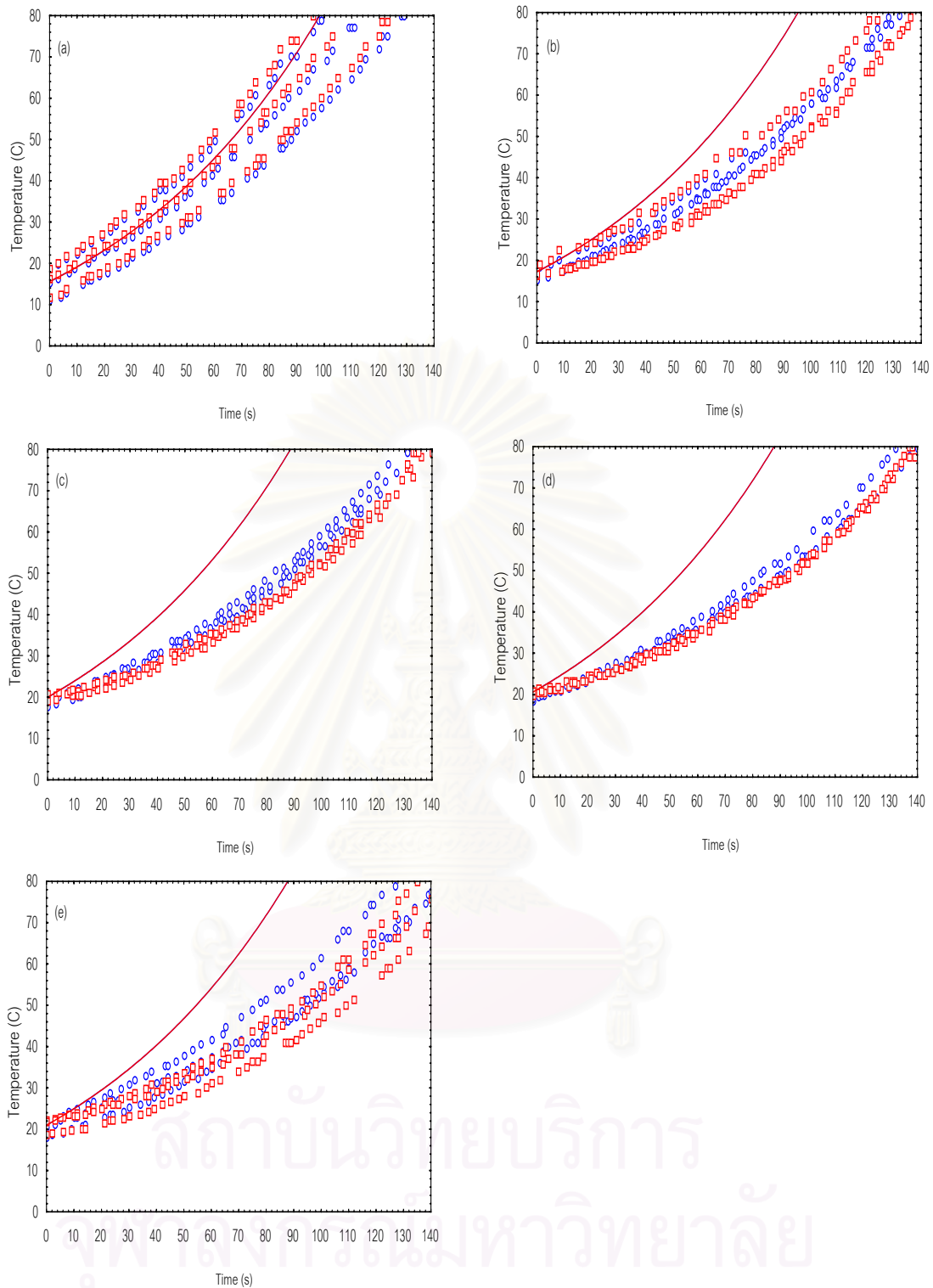


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด ปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า (a) 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (b) 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร

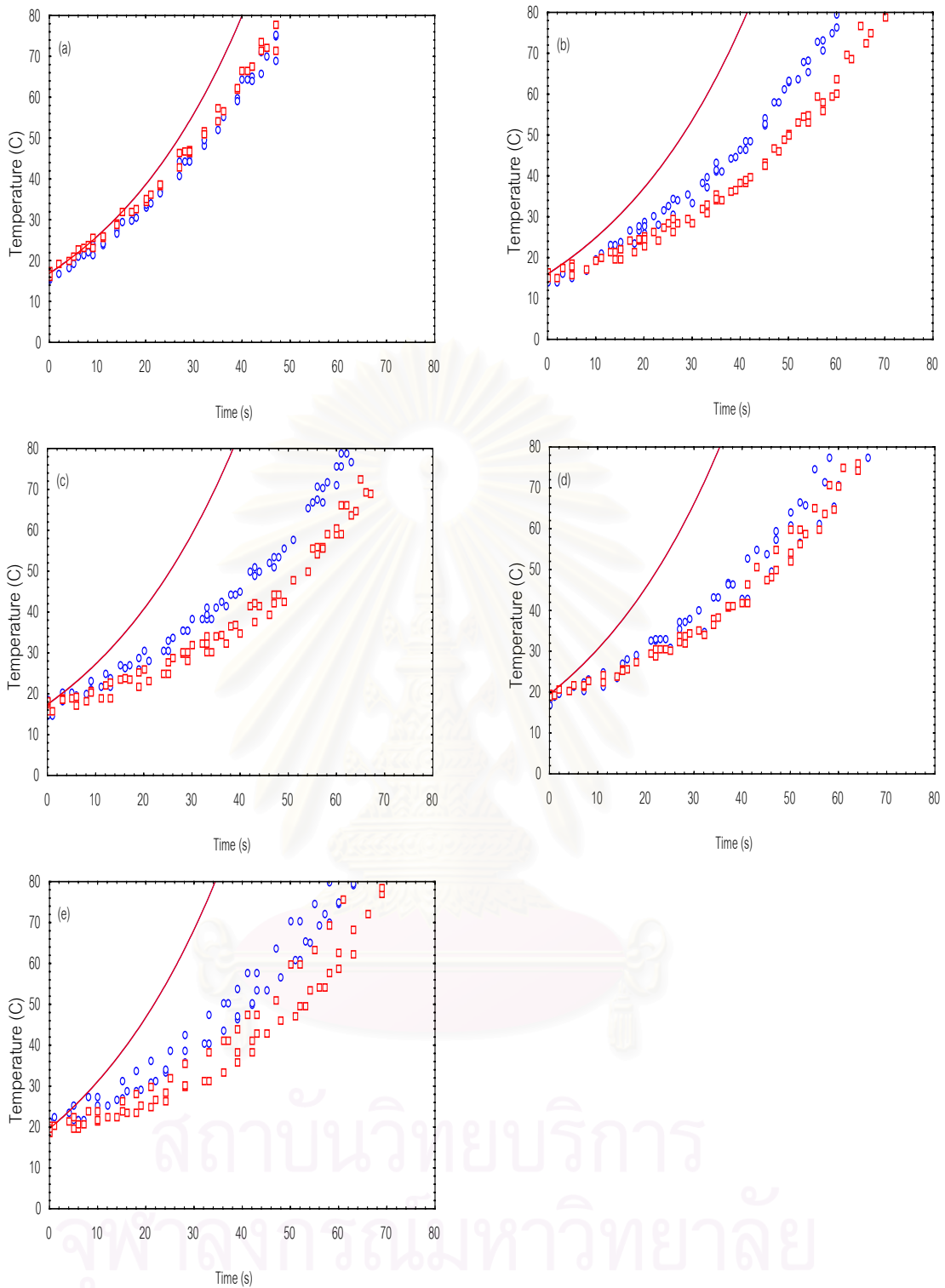
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมเนื้อ
สับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w)

ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/cm)	$\sigma_{25^{\circ}\text{C}}$	$K_1 (^{\circ}\text{C})^{-1}$	$K_2 (\text{S/m}\%\text{solid})$	R^2
20	0.4396	0.0275	0.0011	0.98
30	0.4438	0.0310	-0.0033	0.96

เมื่อนำอุณหภูมิจากการสมการทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจากการทดลอง (รูปที่ 4.7 และ 4.8) พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากการสมการทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของเนื้อสับปะรดในนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดจากการทดลอง โดยมีความแตกต่างประมาณ 0-101% ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ 0-173% ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ตารางที่ ค.1-ค.5) และความแตกต่างจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากการทำนายและจากการทดลองอาจเนื่องมาจากค่าความร้อนจำเพาะของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะก็จะมีค่าสูงขึ้นจึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มอุณหภูมิจากการทำนายและจากการทดลองของ Fryer และคณะ (1993) พบว่า การทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดจากการสมการมีความแตกต่างจากการทดลองมาก อาจเนื่องมาจากค่าความร้อนจำเพาะของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดมีค่าสูงกว่าก่อนไม้และฉนวน และอาจแปรผันตามอุณหภูมิได้มากกว่าเนื่องจากมีส่วนประกอบของน้ำมากกว่า ดังนั้นจึงอาจทำให้การทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า หรืออาจเนื่องมาจากผลของขนาดและรูปร่างของเนื้อสับปะรด ตลอดจนการเรียงตัวของชิ้นสับปะรดที่อาจจุดการเคลื่อนที่ของอิออนทำให้สภาพนำไฟฟ้าที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงช้ากว่าที่คาดคะเนจากการสมการ (Palaniappan and Sastry, 1991b)



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลท์ ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณสับปะรด (a) 0%(w/w) (b) 5%(w/w) (c) 10%(w/w) (d) 15%(w/w) และ (e) 20%(w/w) โดย ○ นมเปรี้ยว □ สับปะรด — สมการ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณสับปะรด (a) 0%(w/w) (b) 5%(w/w) (c) 10%(w/w) (d) 15%(w/w) และ (e) 20%(w/w) โดย \circ นมเปรี้ยว \square สับปะรด $—$ สมการ

ดังนั้นจึงทำการศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงของเนื้อ สับปะรด โดยใช้สับปะรดพันธุ์ศรีราชาขนาดน้ำหนัก 1.2-1.5 กิโลกรัมต่อหัว มาปอกเปลือกและ ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปปั่นด้วยเครื่องบดเนื้อ Waring ที่ความเร็วระดับต่ำจนเนื้อสับปะรด ละเอียด เตรียมนมเปรี้ยวรสสับปะรดตามสูตรที่ใช้ในการทดลอง และแปรปริมาณสับปะรดปั่น ปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20%(w/w) แล้วนำไปให้ความร้อนเช่นเดียวกับนมเปรี้ยวผสมเนื้อ สับปะรด ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ปริมาณสับปะรดปั่นมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยว ผสมสับปะรดปั่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ ๗.7-๗.8) โดยสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเนื้อสับปะรดปั่นลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9) และสมการ แสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่น ปริมาณ 0-20%(w/w) แสดงดังตารางที่ 4.7

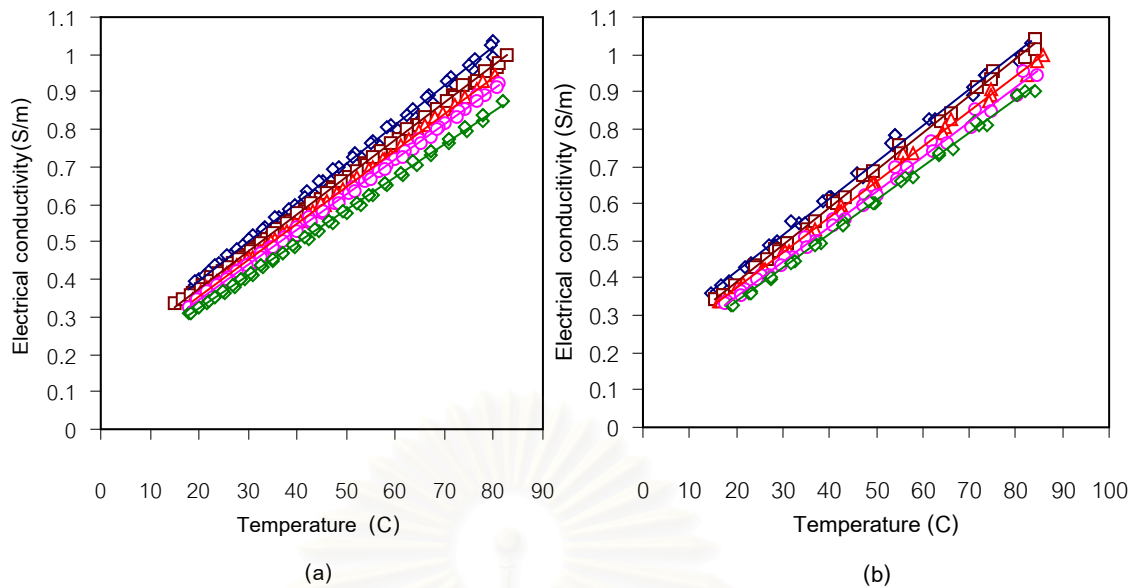
ตารางที่ 4.6 สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20% ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	สภาพนำไฟฟ้า (S/m) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า	
	20 V/cm	30 V/cm
นมเปรี้ยว	0.4475±0.0076	0.4656±0.0068
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 5%	0.4230±0.0004	0.4390±0.0056
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 10%	0.4061±0.0014	0.4191±0.0035
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 15%	0.3920±0.0044	0.3993±0.0073
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 20%	0.3678±0.0024	0.3806±0.0025

จากการนำข้อมูลมาหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งจาก ความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ 8 สามารถหาค่า K_1 และ K_2 ของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (รูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.8) และจากการนำค่า K_1 และ K_2 แทนลงในสมการที่ 8 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนี้

$$\sigma = 0.2040 + 0.0098T - 0.0048S \quad \dots\dots\dots(17)$$

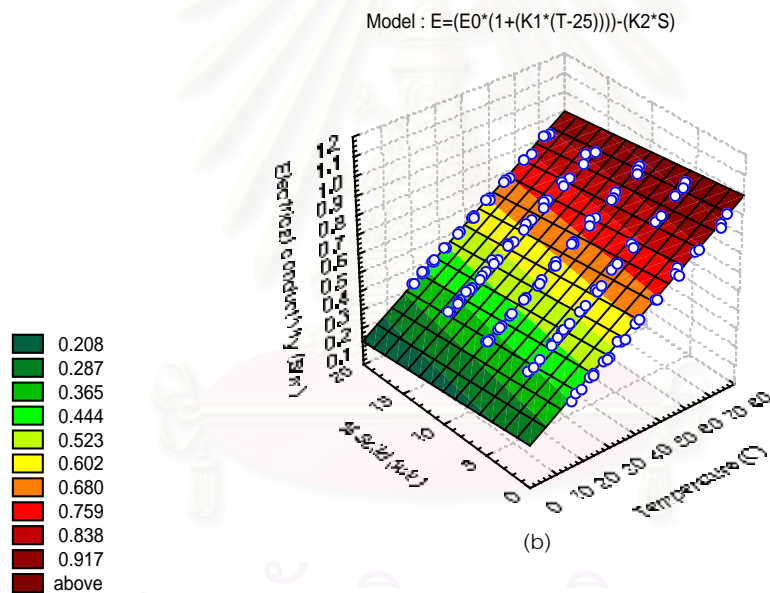
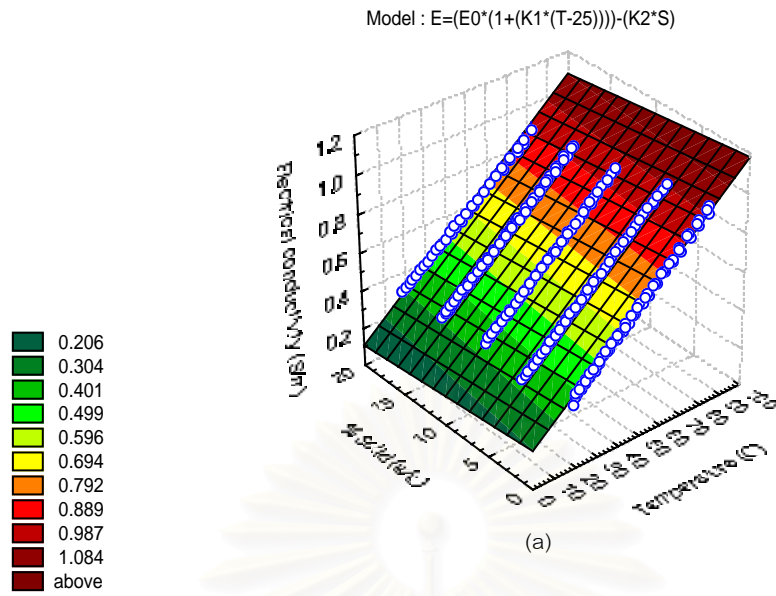
$$\sigma = 0.2263 + 0.0096T - 0.0049S \quad \dots\dots\dots(18)$$



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า (a) 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (b) 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดย — นมเปรี้ยว — นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 5% — นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 10% — นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 15% — นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 20%

ตารางที่ 4.7 สมการแสดงความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 0-20%(w/w)

ตัวอย่าง	สมการ	R ²
ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 V/cm		
นมเปรี้ยว	$\sigma=0.0104T+0.1884$	0.997
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 5%	$\sigma=0.0099T+0.1756$	1.000
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 10%	$\sigma=0.0097T+0.1638$	1.000
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 15%	$\sigma=0.0094T+0.1563$	0.999
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 20%	$\sigma=0.0088T+0.1466$	0.999
ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 V/cm		
นมเปรี้ยว	$\sigma=0.0098T+0.2216$	0.995
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 5%	$\sigma=0.0100T+0.1881$	0.998
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 10%	$\sigma=0.0095T+0.1805$	0.999
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 15%	$\sigma=0.0930T+0.1658$	0.995
นมเปรี้ยวผสมสับปะรดบับปริมาณ 20%	$\sigma=0.0091T+0.1534$	0.999



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า (a) 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (b) 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมสับปะรด
ปั่นปริมาณ 0-20%(w/w)

ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/cm)	$\sigma_{25^{\circ}\text{C}}$	$K_1 (^{\circ}\text{C})^{-1}$	$K_2 (\text{S/m}\%\text{solid})$	R^2
20	0.4475	0.0218	0.0048	0.997
30	0.4656	0.0206	0.0049	0.998

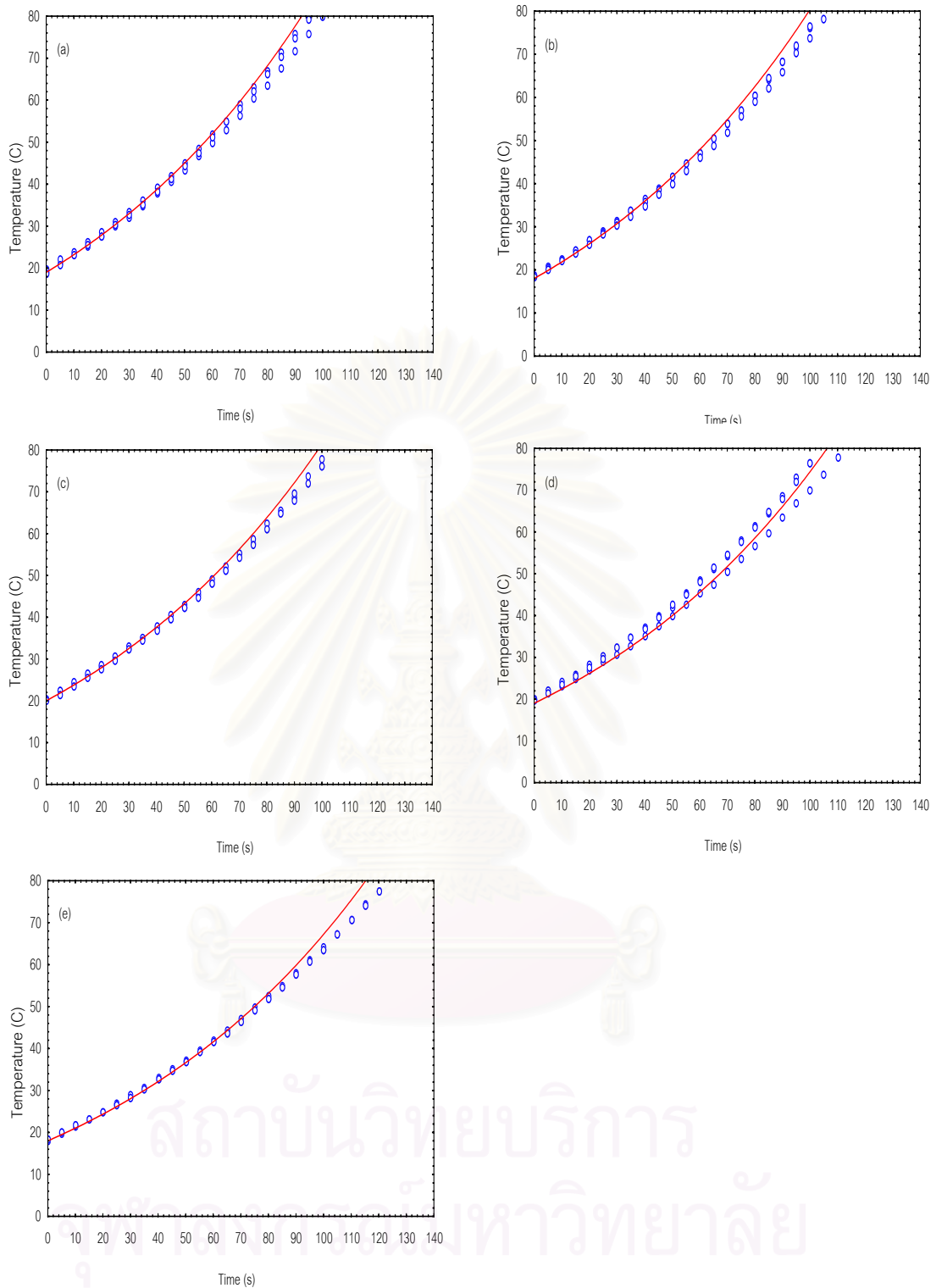
นำสมการที่ 17 และ 18 แทนในสมการที่ 5 แล้วอินทิเกรตเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20%(w/w) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 และ 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนี้

$$T = \frac{1}{0.0098} \left[(0.2040 + 0.0098T_0 - 0.0048S) \exp\left(\frac{0.0098V^2t}{K_c mc_p}\right) - 0.2040 + 0.0048S \right] \dots\dots\dots(19)$$

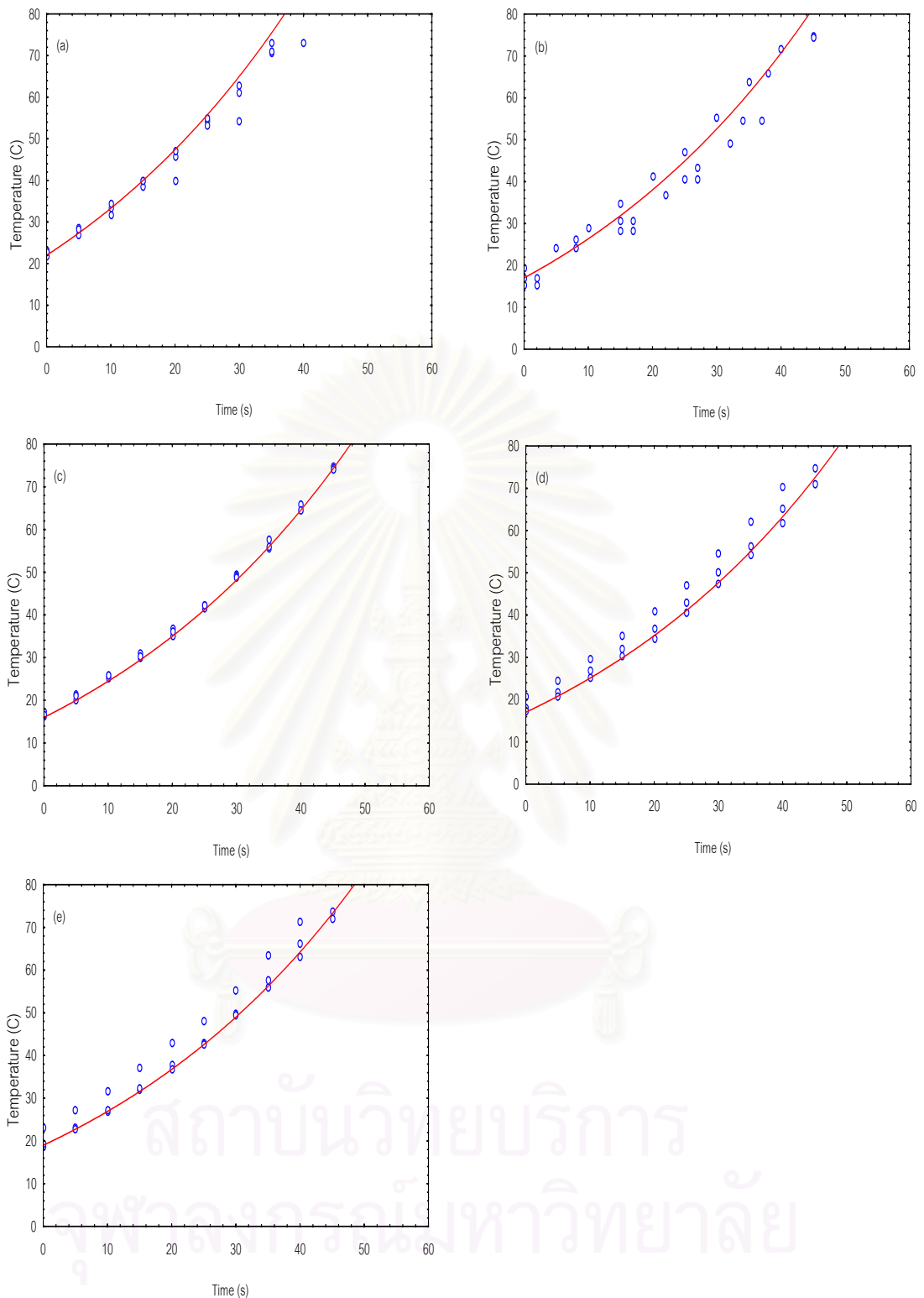
$$T = \frac{1}{0.0096} \left[(0.2263 + 0.0096T_0 - 0.0049S) \exp\left(\frac{0.0096V^2t}{K_c mc_p}\right) - 0.2263 + 0.0049S \right] \dots\dots\dots(20)$$

เมื่อนำอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจากการทดลอง (รูปที่ 4.11 และ 4.12) พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันกับนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นจากการทดลอง โดยมีความแตกต่างประมาณ 0-10% ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ 0-15% ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ตารางที่ ค.6-ค.10) และความแตกต่างจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณสับปะรด (a) 0%(w/w) (b) 5%(w/w) (c) 10%(w/w) (d) 15%(w/w) และ (e) 20%(w/w) โดย \circ นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่น — สมการ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ปริมาณสับปะรด (a) 0%(w/w) (b) 5%(w/w) (c) 10%(w/w) (d) 15%(w/w) และ (e) 20%(w/w) โดย \circ นมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่น — สมการ

เมื่อพิจารณาผลของการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่น พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากการทดลองมาก และจากการหาความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่น พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับอุณหภูมิและปริมาณของแข็ง กล่าวคือ สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและปริมาณสับปะรดปั่นลดลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการที่สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกไม่สามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อสับปะรดขนาด 1x1x1 เซนติเมตรที่แขวนลอยอยู่ในนมเปรี้ยวได้ เนื่องจากผลของขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงของชิ้นสับปะรดในนมเปรี้ยว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส
2. อุณหภูมิและปริมาณของแข็งมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นจาก 5-20% สภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 0-70 องศาเซลเซียส
3. สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ไม่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรดได้ อย่างไรก็ตามสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้าสามารถใช้ได้กับนมเปรี้ยวพร้อมดื่มผสมเนื้อสับปะรดปั่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับผลของรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงของเนื้อสับปะรดที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของสมการทางคณิตศาสตร์มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สุพร กาญจนกิจสกุล. 2542. สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำขณะให้ความร้อนด้วยวิธีอินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

แสงสวัสดิ์ อุดมเดชาวัฒน์. 2537. สมบัติทางความร้อนของกล้วยไข่ (*Musa suerier*) และกล้วยน้ำว้า (*Musa sapientum*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Budinski, K.G. and Budinski, M.K. 1999. Engineering Materials Properties and Selection. UK : Prentice Hall International. 472 pp.

Bylund, G. 1995. Dairy Processing Handbook. Sweden : Tetra Pak Processing Systems AB. 241 pp.

de Alwis, A.A.P., Halden, K., and Fryer, P.J. 1989. Shape and conductivity effects in the ohmic heating of foods. Chem. Eng. Res. Des. 67 : 159-168.

Fryer, P.J., de Alwis, A.A.P., Koury, E., Stapley, A.G.F., and Zhang, L. 1993. Ohmic processing of solid-liquid mixtures : Heat generation and convection effects. J. Food Eng. 18 : 101-125.

Gene, A.S. 1993. CRC Handbook of Dietary Fiber in Human Nutrition. 2nd ed. London : CRC Press. 7 pp.

Halden, K., de Alwis, A.A.P., and Fryer, P.J., 1990. Changes in the electrical conductivity of foods during ohmic heating. Int. J. Food Sci. Technol. 25 : 9-25.

Harding, F. 1995. Milk Quality. UK : Blackie Academic&Professional. 112 pp.

Harvey, P.D. 1995. Engineering Properties of Steel. US : American Society for Metals. 273 pp.

Hulme, A.C. 1971. The Biochemistry of Fruits and Their Products. Vol. 2. London : Academic Press. 306 pp.

- Imai, T., Uemura, K., Ishida, N., Uoshizaki, S., and Noguchi, A. 1995. Ohmic heating of Japanese white radish *Rhaphanus sativus*. L. Int. J. Food Sci. Technol. 30 : 461-472.
- Johnson, A.H. and Peterson, M.S. 1974. Encyclopedia of Food Technology. Connecticut : The AVI Publishing Company. 977 pp.
- Lima, M., Heskitt, B., and Sastry, S.K. 1999. The effect of frequency and waveform on the electrical conductivity-temperature profile of turnip tissue. J. Food Eng. 22(1) : 41-54.
- Macrae, R., Robinson, R.K., and Sadler, M.J. 1993. Encyclopaedia of Food Science, Food Technology and Nutrition. London : Academic Press. 4868 pp.
- Palaniappan, S. and Sastry, S.K. 1991a. Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. J. Food Proc. Eng. 14 : 221-236.
- Palaniappan, S. and Sastry, S.K. 1991b. Electrical conductivity of selected juices : Influence of temperature, solid content, applied voltage and particle size. J. Food Proc. Eng. 14 : 247-260.
- Sastry, S.K. 1993. Electroconductive (Ohmic) Heating for Continuous Sterilization for Solid-Liquid Food Mixtures. Ohio : The Ohio State University Research Foundation.
- Sastry, S.K. and Jeffrey, T.B. 2000. Ohmic and inductive heating. J. Food Sci. Supplement. 65(4) : 42-46.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S. 1992. Influence of particle orientation on the effective electrical resistance and ohmic heating rate of a liquid-particle mixture. J. Food Proc. Eng. 15 : 213-227.
- Toledo, R.T. 1991. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd ed. New York : Van Nostrand Reinhold. 135 p.
- Umberto Quattrocchi, F.L.S. 2000. CRC World Dictionary of Plant Names. Common Names, Scientific Names, Eponyms, Synonyms, and Etymology. Vol. 2. London : CRC Press. 129 p.
- Yongsawatdigul, J., Park, J.W., and Kolbe, E. 1995. Electrical conductivity of Pacific Whiting surimi paste during ohmic heating. J. Food Sci. 60(5) : 922-925.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. การหาค่าความร้อนจำเพาะ

1. การวัดค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ (แสงสวัสดิ์ อุดมเดชาวัฒน์, 2537)

ในการวัดค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ใช้น้ำเป็นสารอ้างอิง (ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ $4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$) ทำโดยเติมน้ำ 260 กรัมในแคลอริมิเตอร์ ปล่อยให้อุณหภูมิของน้ำและแคลอริมิเตอร์คงที่ที่อุณหภูมิห้อง และเติมน้ำ 90 กรัมในถุงพอลิเอทิลีน แช่ถุงน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 65°C จนอุณหภูมิของน้ำในถุงเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์และในถุงพอลิเอทิลีนก่อนการผสมโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำถุงที่บรรจุน้ำใส่ลงในแคลอริมิเตอร์และปิดฝาทันที บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์และในถุงพอลิเอทิลีนทุก 15 วินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีการเขย่าแคลอริมิเตอร์อย่างสม่ำเสมอ แล้วสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับเวลาและคำนวณความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์จากสมการที่ 21

$$c_{pc}w_cT_{0c} + c_{pw}w_wT_{0w} + H_kT_{0k} = c_{pc}w_cT_{fc} + c_{pw}w_wT_{fw} + H_kT_{fk} - z \quad \dots\dots\dots(21)$$

2. การวัดค่าความร้อนจำเพาะของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด

ทำการทดลองเหมือนกับการหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ แต่ใช้ตัวอย่างนมเปรี้ยวรสสับปะรดและนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดใส่ในถุงพอลิเอทิลีนแทนน้ำ ซึ่งการเตรียมนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดเตรียมโดยนำเนื้อสับปะรดมาปั่นละเอียดและแปรปริมาณสับปะรด 5 ระดับ คือ 0 5 10 15 และ 20%(w/w) ในนมเปรี้ยว

3. การหาค่าความร้อนจำเพาะของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดโดยการคำนวณ

การหาค่าความร้อนจำเพาะโดยการคำนวณหาได้จากสมการของ Siebel (Toledo, 1991) ดังสมการที่ 22

$$C_p = 3349M + 837.36 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} \quad \dots\dots\dots(22)$$

จากการหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ พบว่า ค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์มีค่าเท่ากับ $793.57 \text{ J/}^{\circ}\text{C}$ และนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรดปริมาณ 0-20%(w/w) มีค่าความร้อนจำเพาะแสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ความแตกต่างของความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองและคำนวณ

ตัวอย่าง	C_p (ทดลอง) ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)	C_p (คำนวณ) ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)	% ความแตกต่าง
นมเปรี้ยว	3649.04	3676.31	0.74
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด 5%	3704.24	3680.66	0.64
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด 10%	3588.82	3690.04	2.74
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด 15%	3630.21	3695.06	1.76
นมเปรี้ยวผสมเนื้อสับปะรด 20%	3699.49	3710.47	0.30
สับปะรด	3729.96	3783.14	1.41

นำค่า C_p จากการคำนวณไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจากสภาพนำไฟฟ้า

ภาคผนวก ข.
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	2	5.444×10^{-4}	16.333	0.004
Within groups	6	3.333×10^{-5}		
Total	8			

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.02 โมลาร์

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	2	4.206×10^{-4}	73.669	0.00
Within groups	6	5.710×10^{-5}		
Total	8			

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	2	2.967×10^{-4}	13.256	0.006
Within groups	6	2.239×10^{-5}		
Total	8			

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของชั่วอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นนาไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดปริมาณ 5% (w/w) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Source	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Type	2	3.284×10^{-3}	2.205	0.132
Voltage gradient	3	1.558×10^{-2}	10.458	0.000
Type x Voltage gradient	6	2.009×10^{-3}	1.349	0.275
Error	24	1.489×10^{-3}		
Total	36			

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด ปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนาไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	4	4.208×10^{-3}	132.781	0.00
Within groups	10	3.169×10^{-5}		
Total	14			

ตารางที่ ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับประรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรด ปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นนาไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	4	2.466×10^{-3}	9.470	0.002
Within groups	10	2.604×10^{-4}		
Total	14			

ตารางที่ ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับปะรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	4	2.744×10^{-3}	160.788	0.000
Within groups	10	1.706×10^{-5}		
Total	14			

ตารางที่ ข.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปริมาณเนื้อสับปะรดต่อสภาพนำไฟฟ้าของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 0-20% ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร

	Degree of Freedom	Mean square	F	Significant
Electrical conductivity				
Between groups	4	3.317×10^{-3}	111.226	0.000
Within groups	10	2.982×10^{-5}		
Total	14			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.
การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก
สมการทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
 เนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 0%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
22.2	22.2	0.0	16.4	16.4	0.0
22.6	23.4	3.5	20.2	19.6	2.9
23.0	24.6	7.0	23.0	21.4	6.7
23.6	25.5	8.0	25.8	24.3	5.8
23.9	26.8	11.8	25.8	26.4	2.3
24.6	28.6	16.0	32.2	31.0	3.8
25.3	29.5	16.7	34.6	37.6	8.8
26.0	31.5	21.1	38.3	42.2	10.2
26.8	32.5	21.4	46.5	49.0	5.2
27.6	34.6	25.6	46.5	52.7	13.2
28.1	36.3	29.2	51.1	58.7	15.1
29.0	37.4	29.3	54.2	65.4	20.6
29.8	39.8	33.3	66.5	78.1	17.4
30.8	41.0	33.1	66.5	80.8	21.5
31.8	44.2	39.1	72.2	92.9	28.8
31.8	44.9	41.2			
32.7	46.9	43.5			
35.1	51.2	45.7			
36.3	53.5	47.4			
37.4	56.6	51.4			
38.6	60.0	55.4			

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 0%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
39.9	60.8	52.6			
41.6	66.2	59.3			
43.8	70.0	59.8			
45.2	73.0	61.6			
46.6	75.0	61.0			
48.1	79.2	64.8			
48.1	81.4	69.4			
49.6	84.9	71.2			
51.2	89.6	75.1			
53.4	94.6	77.3			
55.1	98.5	78.7			
59.4	106.7	79.8			
61.3	109.6	78.8			
61.3	112.5	83.6			
64.7	121.8	88.4			
67.5	125.1	85.3			
67.5	126.7	87.7			
69.9	131.8	88.8			
72.2	140.8	95.0			

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
เนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 5%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
16.5	16.5	0.0	16.3	16.3	0.0
17.0	17.9	5.6	17.5	18.8	7.0
18.0	20.1	12.0	18.6	20.5	10.2
18.5	20.9	12.8	19.4	25.4	30.9
18.5	21.3	15.0	22.2	31.0	40.0
18.5	21.7	17.1	24.4	33.6	37.8
19.1	22.1	15.6	24.4	36.3	48.9
19.1	22.9	19.9	25.5	37.7	47.7
19.8	24.2	22.1	27.4	43.8	59.6
20.5	25.5	24.6	29.5	47.1	59.9
21.3	26.4	23.9	29.5	52.5	78.3
22.2	27.8	25.7	33.2	60.6	82.6
22.8	29.3	28.8	35.7	65.0	82.1
23.6	30.8	30.4	38.4	77.3	101.2
24.5	32.9	34.2	38.4	80.0	108.2
25.5	34.0	33.5	43.5	91.8	111.2
26.5	36.3	37.0	46.9	98.2	109.5
27.5	37.5	36.1	50.5	108.6	114.9
28.7	39.9	39.2	54.8	124.0	126.2
29.4	41.2	40.2	59.5	132.5	122.6
31.8	45.2	42.1	59.5	146.3	145.7
33.0	47.3	43.3	68.8	166.8	142.5
33.8	49.5	46.3	75.1	189.9	153.0
35.1	51.8	47.5			
36.5	54.2	48.5			

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 5%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
37.9	57.4	51.5			
40.9	61.8	51.1			
40.9	62.7	53.3			
42.5	65.5	54.1			
44.1	68.4	55.1			
45.8	71.3	55.8			
47.5	73.4	54.4			
49.3	76.6	55.3			
50.5	79.9	58.1			
52.5	83.3	58.8			
54.5	86.8	59.5			
56.5	90.5	60.3			
56.5	94.4	67.1			
60.9	99.7	63.7			
63.3	102.4	62.0			
65.7	109.7	67.0			
67.4	112.7	67.2			
70.0	115.7	65.3			
72.9	122.2	67.7			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
เนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 10%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
20.0	20.0	0.0	15.9	15.9	0.0
20.4	21.2	3.8	15.9	16.7	5.1
21.0	22.8	8.5	17.4	21.1	21.6
21.5	24.4	13.7	18.4	23.1	25.5
22.5	27.1	20.3	19.2	26.3	37.0
23.9	30.0	25.6	19.2	28.6	49.1
24.7	30.5	23.5	21.9	36.5	66.7
25.2	32.0	27.3	23.4	39.4	68.8
25.2	33.1	31.5	25.0	44.2	77.0
26.0	34.2	31.5	25.0	45.9	83.8
27.8	37.6	35.2	28.1	53.3	89.6
27.8	38.2	37.4	30.2	61.6	104.1
27.8	38.8	39.5	30.2	63.8	111.6
30.8	42.6	38.2	32.5	71.0	118.5
30.8	43.9	42.5	34.9	78.9	126.0
30.8	44.6	44.7	37.6	87.6	133.2
31.5	46.6	48.0	39.4	97.1	146.1
32.6	48.8	49.7	42.5	107.5	152.8
34.1	51.0	49.5	49.9	127.2	154.7
34.9	54.9	57.4	54.2	136.0	151.1
36.1	55.7	54.3	59.4	155.3	161.4
37.7	58.2	54.2	59.4	160.5	170.2
38.6	60.8	57.5	64.9	177.1	173.0
39.9	64.4	61.2	69.0	195.4	183.3
41.3	66.2	60.4	83.2	222.5	167.5

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 10%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
43.2	70.1	62.3			
44.2	74.2	67.9			
45.6	77.4	69.5			
47.7	81.8	71.6			
49.2	82.9	68.6			
49.2	85.3	73.3			
50.9	88.9	74.6			
52.5	92.6	76.3			
54.2	96.5	78.0			
56.1	100.5	79.2			
58.0	104.7	80.5			
59.9	109.0	81.9			
61.9	113.5	83.3			
63.3	118.2	86.7			
65.5	123.0	87.7			
68.6	129.7	89.1			
72.8	138.6	90.4			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
เนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 15%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
21.1	21.1	0.0	19.5	19.5	0.0
21.6	21.8	1.2	19.5	20.5	4.9
22.1	23.4	6.2	20.6	23.5	14.3
23.4	26.0	10.9	21.4	26.9	25.6
23.4	26.9	14.8	24.2	31.9	31.6
23.4	27.3	16.7	25.9	39.1	50.8
24.7	29.7	20.3	29.5	47.4	60.8
24.7	30.2	22.3	29.5	49.3	67.0
25.4	31.2	23.1	33.7	59.4	76.0
28.2	38.3	35.9	33.7	61.6	82.6
29.1	39.5	36.1	35.4	68.7	94.0
29.1	40.1	38.2	38.1	76.4	100.7
30.0	41.4	38.1	41.0	84.9	107.0
30.0	42.7	42.3	46.6	97.6	109.3
30.7	43.3	41.3	50.6	104.5	106.5
31.6	46.0	45.5	55.0	119.8	117.9
32.7	48.1	47.3	59.8	132.6	121.5
33.7	49.6	47.1	59.8	141.7	136.9
34.8	54.1	55.7	65.1	156.6	140.5
36.6	58.2	58.9	70.9	173.0	144.0
37.8	59.0	56.3	75.1	190.9	154.3
39.0	61.6	58.0			
40.3	64.3	59.8			
41.5	67.1	61.8			
42.3	70.0	65.4			

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 15%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
43.7	74.0	69.5			
45.0	76.1	69.2			
46.5	79.4	70.8			
48.0	83.9	74.8			
48.0	86.2	79.7			
52.2	93.6	79.1			
52.2	94.8	81.6			
53.9	97.4	80.7			
55.7	104.3	87.1			
57.5	105.7	83.9			
59.2	111.5	88.3			
60.5	117.6	94.5			
62.4	119.2	90.9			
65.2	127.4	95.3			
65.2	129.1	97.9			
67.5	134.3	99.1			
69.8	139.7	100.3			
72.3	145.4	101.2			

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
เนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 20%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
22.2	22.2	0.0	20.5	20.5	0.0
22.6	23.4	3.5	20.5	21.5	5.0
23.0	24.6	7.0	21.4	24.8	15.6
23.6	25.5	8.0	22.6	25.9	14.6
23.9	26.8	11.8	23.9	29.6	23.7
24.6	28.6	16.0	23.9	32.3	34.8
25.3	29.5	16.7	26.4	39.7	50.3
26.0	31.5	21.1	28.1	44.8	59.4
26.8	32.5	21.4	30.1	50.3	67.4
27.6	34.6	25.6	32.1	58.6	82.6
28.1	36.3	29.2	35.7	65.4	83.2
29.0	37.4	29.3	38.3	78.5	104.9
29.8	39.8	33.3	41.2	87.3	112.1
30.8	41.0	33.1	41.2	90.4	119.7
31.8	44.2	39.1	44.2	97.0	119.5
31.8	44.9	41.2	47.6	104.0	118.6
32.7	46.9	43.5	47.6	111.4	134.2
33.7	49.0	45.3	51.3	127.7	149.1
35.1	51.2	45.7	60.1	141.4	135.2
36.3	53.5	47.4	60.1	151.2	151.6
37.4	56.6	51.4	63.6	167.1	162.8
39.9	60.8	52.6	69.3	184.6	166.3
41.6	66.2	59.3	75.7	203.8	169.2
43.8	70.0	59.8			
45.2	73.0	61.6			

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมเนื้อสับประรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ปริมาณ 20%(w/w)

อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของเนื้อสับประรดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
46.6	75.0	61.0			
48.1	79.2	64.8			
48.1	81.4	69.4			
49.6	84.9	71.2			
51.2	89.6	75.1			
53.4	94.6	77.3			
55.1	98.5	78.7			
59.4	106.7	79.8			
61.3	109.6	78.8			
61.3	112.5	83.6			
64.7	121.8	88.4			
67.5	125.1	85.3			
67.5	126.7	87.7			
69.9	131.8	88.8			
72.2	140.8	95.0			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 คุณหมึกจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณหมึกจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
 สับปะรดปั่นปริมาณ 0%(w/w)

คุณหมึกของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			คุณหมึกของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
19.2	19.2	0.0	14.7	14.7	0.0
21.4	19.1	10.4	23.3	21.1	9.4
23.4	21.2	9.2	28.7	27.5	4.2
25.4	23.4	8.1	33.5	33.4	0.2
27.7	25.6	7.6	40.2	37.4	7.0
30.2	28.0	7.2	40.2	43.0	7.1
32.2	30.6	5.3	54.3	52.5	3.3
35.0	33.2	5.1	54.3	59.5	9.7
37.9	36.0	5.0	73.3	73.5	0.2
40.6	38.9	4.2			
43.4	42.0	3.3			
46.7	45.2	3.2			
50.0	48.6	2.8			
52.9	52.2	1.2			
56.6	56.0	1.1			
60.4	59.9	0.8			
63.6	64.1	0.7			
67.6	68.5	1.3			
71.9	73.1	1.6			
75.9	77.9	2.7			

ตารางที่ ค.7 คุณภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
 สับปะรดปั่นปริมาณ 5%(w/w)

คุณภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			คุณภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
15.1	15.1	0.0	15.4	15.4	0.0
16.8	16.8	0.1	15.4	17.0	10.7
18.8	18.6	0.9	24.2	20.5	15.3
20.8	20.5	1.7	28.4	29.6	4.3
22.6	22.5	0.4	28.4	31.9	12.3
24.8	24.6	0.8	40.8	42.1	3.0
27.0	26.8	1.0	40.8	44.9	10.0
29.1	29.1	0.3	54.9	55.9	1.8
31.4	31.5	0.4	54.9	61.1	11.4
34.0	34.1	0.3	75.0	76.9	2.6
36.6	36.7	0.4			
38.8	39.6	1.9			
41.8	42.5	1.9			
44.8	45.6	1.8			
47.3	48.9	3.4			
50.6	52.4	3.5			
54.0	56.0	3.8			
57.1	59.8	4.7			
60.5	63.8	5.5			
64.4	68.0	5.6			
68.5	72.4	5.8			
71.8	77.1	7.4			

ตารางที่ ค.8 คุณหมึกจากสมการทางคณิตศาสตร์กับคุณหมึกจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
 สับปะรดปั่นปริมาณ 10%(w/w)

คุณหมึกของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			คุณหมึกของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
18.5	18.5	0.0	17.6	17.6	0.0
20.5	20.3	1.0	21.6	21.8	0.9
22.4	22.2	1.3	26.0	26.4	1.9
24.1	24.1	0.1	31.2	31.6	1.4
26.2	26.1	0.4	37.1	37.5	1.1
28.5	28.3	0.6	42.4	44.0	3.8
30.2	30.6	1.1	49.6	51.2	3.2
32.6	32.9	1.1	57.8	59.3	2.7
34.9	35.4	1.4	65.9	68.3	3.7
37.2	38.0	2.1	74.7	78.4	4.9
39.7	40.8	2.8			
42.5	43.7	2.9			
45.6	46.7	2.6			
48.1	49.9	3.9			
51.2	53.3	4.0			
54.6	56.9	4.2			
57.8	60.6	4.8			
61.1	64.5	5.6			
64.8	68.6	5.8			
68.8	72.9	5.9			
72.0	77.4	7.5			

ตารางที่ ค.9 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสม
 สับปะรดปั่นปริมาณ 15%(w/w)

อุณหภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
18.0	18.0	0.0	18.1	18.1	0.0
19.8	19.6	0.8	22.0	22.1	0.1
21.5	21.3	1.1	26.9	26.5	1.6
23.2	23.1	0.5	32.2	31.4	2.4
24.9	24.9	0.0	36.8	36.9	0.2
27.0	26.9	0.5	43.1	43.0	0.4
29.1	28.9	0.5	50.2	49.8	0.8
30.8	31.1	0.9	56.5	57.4	1.7
32.9	33.4	1.3	65.2	65.9	1.2
35.4	35.8	1.2	74.9	75.4	0.7
37.6	38.3	1.8			
39.8	40.9	2.7			
42.6	43.7	2.5			
45.3	46.6	2.9			
47.7	49.7	4.2			
50.7	52.9	4.4			
53.7	56.3	4.8			
56.7	59.9	5.5			
59.7	63.6	6.5			
63.5	67.5	6.4			
67.1	71.7	6.7			
70.2	76.0	8.3			
74.0	80.6	8.9			

ตารางที่ ค.10 อุณหภูมิจากสมการทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิจากการทดลองของนมเปรี้ยวผสมสับปะรดปั่นปริมาณ 20%(w/w)

อุณหภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)			อุณหภูมิของนมเปรี้ยวที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์ต่อเซนติเมตร (°C)		
การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง	การทดลอง	สมการ	% ความแตกต่าง
18.0	18.0	0.0	19.0	19.0	0.0
19.8	19.5	1.5	23.3	23.5	0.7
21.7	21.1	3.0	27.1	26.9	0.9
23.4	22.7	2.9	32.3	31.5	2.4
25.1	24.4	2.7	38.0	36.7	3.5
27.1	26.2	3.3	43.0	42.5	1.3
29.2	28.1	3.8	50.0	48.9	2.1
30.9	30.1	2.6	57.7	56.1	2.8
33.0	32.2	2.6	66.3	64.1	3.3
35.2	34.4	2.4	73.9	73.1	1.1
37.2	36.7	1.3			
39.6	39.1	1.4			
42.2	41.6	1.3			
44.6	44.3	0.6			
47.1	47.1	0.1			
49.9	50.1	0.3			
52.8	53.2	0.8			
55.2	56.5	2.3			
58.2	59.9	3.0			
61.3	63.5	3.5			
64.2	67.3	4.7			
67.4	71.3	5.8			
70.9	75.4	6.4			
74.7	79.8	7.0			

ภาคผนวก ง.
ผลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 การเกิดกรดแลกติกในการผลิตโยเกิร์ต

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณกรดแลกติก (%)		
	1	2	3
0	0.47	0.47	0.47
1	0.53	0.56	0.56
2	0.62	0.62	0.65
3	0.82	0.82	0.78
4	0.88	0.88	0.80
5	0.92	1.00	0.95
6	1.03	1.06	1.03
7	1.04	-	-
8	-	1.10	1.10
9	-	-	-
10	-	1.12	1.12
11	-	-	-
12	-	1.18	-

ตารางที่ ง.2 การแขวนลอยของเนื้อสับปะรดรูปลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร ในนมเปรี้ยวที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณโยเกิร์ต (% w/w)	เวลาในการแขวนลอย (ชั่วโมง)
50	> 24
60	> 24
70	> 24
80	> 24

ภาคผนวก จ.
การอินทิเกรตสมการทางคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากสมการของ Palaniappan และ Sastry (1991a)

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{V^2 \sigma}{K_c mc_p} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

โดยที่ $\sigma = a + bT - K_2S$ \dots\dots\dots(11)

จากสมการที่ 5 จะได้ $\frac{1}{\sigma} dT = \left(\frac{V^2}{K_c mc_p} \right) dt$

แทนสมการที่ 11 ในสมการที่ 5 แล้วอินทิเกรต จะได้

$$\int \frac{1}{\sigma} dT = \int \left(\frac{V^2}{K_c mc_p} \right) dt$$

$$\int \left(\frac{1}{a + bT - K_2S} \right) dT = \int \left(\frac{V^2}{K_c mc_p} \right) dt$$

$$\frac{1}{b} \left[\ln \left(\frac{a + bT - K_2S}{a + bT_0 - K_2S} \right) \right] = \left(\frac{V^2}{K_c mc_p} \right) t$$

$$\ln \left(\frac{a + bT - K_2S}{a + bT_0 - K_2S} \right) = \left(\frac{bV^2 t}{K_c mc_p} \right)$$

$$a + bT - K_2S = (a + bT_0 - K_2S) \exp \left(\frac{bV^2 t}{K_c mc_p} \right)$$

$$T = \frac{1}{b} \left[(a + bT_0 - K_2S) \exp \left(\frac{bV^2 t}{K_c mc_p} \right) - a + K_2S \right] \quad \dots\dots\dots(12)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปณิตต์ พลายชุม เกิดวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย