

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและศึกษาเครื่องทำความร้อนระบบโอห์มมิกฮีทเตอร์สำหรับน้ำผลไม้
DESIGN AND STUDY ON OHMIC HEATER FOR FRUIT JUICE



โดย

นาย ฤทธิชัย อัสวราชันย์
น.ส. จิตใส อัญชลีกิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 36731
วัน, เดือน, ปี 28 ส.ค. 2543

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
มิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและศึกษาเครื่องทำความร้อนระบบโอห์มมิกซีทีเตอร์สำหรับน้ำผลไม้

ผู้จัดทำ

นาย ฤทธิชัย อิศวราชันย์
น.ศ. จิตใส อัญชสิทธิ์

สารนิพนธ์

ผู้จัดทำ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สรรวริศ อุษวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและศึกษาเครื่องทำความร้อนระบบโอห์มมิกิเตอร์สำหรับน้ำผลไม้

นาย ฤทธิชัย อัครราชันย์

นางสาว จิตโส อัญชลีกิจ

อาจารย์ สรรวริศ อู่วัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

กระบวนการให้ความร้อนแบบ Ohmic เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับไปยังอาหารทำให้อาหารสร้างความร้อนขึ้นภายในตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อลดปัญหาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียคุณภาพอาหารที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อนแก่อาหาร

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองแบบสถิติเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ น้ำส้ม และน้ำสับปะรด ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ และ ศึกษาผลของความเข้มข้นไฟฟ้า ที่ 6 7 และ 8 โวลต์ / เซนติเมตร โดยพบว่าที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 โวลต์ / เซนติเมตร ให้ผลในการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ จึงนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการออกแบบชุดทดลอง Ohmic ระบบต่อเนื่อง

ออกแบบและสร้างชุดทดลอง Ohmic ระบบต่อเนื่องเพื่อใช้ในการสร้างความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 75 –90 องศาเซลเซียส โดยใช้ทดสอบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่อัตราการไหล 0.1 0.133 และ 0.2 ลิตร/นาที่ พบว่า ที่อัตราการไหล 0.133 ลิตร / นาที่ สามารถสร้างความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 86 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำส้มและน้ำสับปะรด ใช้อัตราการไหล 0.02 0.04 และ 0.06 ลิตร/นาที่ พบว่าที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร / นาที่ สามารถสร้างความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Study on Ohmic Heater for Fruit Juice

Mr. Rittichai Assawarachun

Miss. Jitsai Unchaleekit

Sunvaris Uywattana

Advisor

1999

Abstract

Ohmic heating is a food processing operation in which heat is internally generated within foods suddenly and uniformly by the passage of alternating electric current. Ohmic heating was developed to avoid the problem of heat transfer and quality loss in the heating of food.

The static ohmic heater used in measured electrical conductivity between 25-80 °C for 0.1 molar sodium chloride solution, orange juice and pineapple juice. The electrical conductivity could be well correlated as a linear function of temperature. And study effect of field strength at 6, 7, and 8 V/cm. The measured results of temperature distribution were found to be uniform for field strength 8 V/cm. The obtained information was then used for design the components of continuous ohmic heater.

The continuous Ohmic system were designed for generated between 75-90 °C. For 0.1 molar sodium chloride solutions used 0.1, 0.133, and 0.2 l/min flow rate and 0.133 l/min flow rate could heating generated to 86 °C. For orange juice and pineapple juice used 0.02, 0.04, and 0.06 l/min flow rate and 0.04 l/min flow rate could heating generated to 88 °C.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญรูปภาพ	ข
สารบัญตาราง	ง
รายการสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	3
บทที่ 3 ทฤษฎี	13
บทที่ 4 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	28
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์	36
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	48
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	53
ภาคผนวก ข.	55
ภาคผนวก ค.	57
ภาคผนวก ง.	58
ภาคผนวก จ.	71
ภาคผนวก ฉ.	72
กิตติกรรมประกาศ	73
เอกสารอ้างอิง	74

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงระบบพื้นฐานของกระบวนการให้ความร้อน Ohmic	15
3.2 แสดงอัตราการเกิดความร้อนของผสมที่มีค่าความนำไฟฟ้าของส่วนเนื้อหามีค่าต่ำกว่าส่วนของของเหลว	22
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณเนื้อที่ผสมอยู่	23
4.1 แสดงแผนภาพชุดเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ของ Ohmic heating ระบบสถิติ	29
4.2 แสดงภาพชุดเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารและวัดค่าการกระจาย 33 ของอุณหภูมิ	33
4.3 แสดงชุดเซลล์สร้างความร้อน Ohmic แบบสถิติ	34
4.4 แสดงภาพแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (หม้อแปลงไฟฟ้า)	34
4.5 แสดงชุดเซลล์สร้างความร้อน Ohmic แบบต่อเนื่อง	35
4.6 แสดงภาพเครื่องทำความร้อน ด้วยวิธี Ohmic ระบบต่อเนื่อง	37
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าจากการทดลองกับค่าการนำไฟฟ้า 5.1 จากเอกสารอ้างอิงของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์	41
5.2 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 6 V/cm	41
5.3 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 7 V/cm	41
5.4 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 V/cm	42
5.5 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ	44
5.6 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.1 l/min	44
5.7 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.133 l/min	44
5.8 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.2 l/min	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ง.5 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.133 ลิตร/นาที	63
ง.6 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.2 ลิตร/นาที	64
ง.7 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 ลิตร/นาที	65
ง.8 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/นาที	66
ง.9 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 ลิตร/นาที	67
ง.10 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้มประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 ลิตร/นาที	68
ง.11 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้มประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/นาที	69
ง.12 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้มประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 ลิตร/นาที	70
จ. Specific molecular conductivities – Nacl solutions (S/m)	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้หาค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร	6
2.2 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้หาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้	7
2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการที่ 2.5	8
5.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์	36
5.2 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์	36
5.3 การเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากการทดลองกับค่าการนำไฟฟ้าสมมูลจาก เอกสารอ้างอิงของสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์	37
5.4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ของน้ำส้มประรด 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์	39
5.5 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าน้ำส้มประรด 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์	39
5.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ของน้ำส้ม 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์	40
5.7 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าน้ำส้ม 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์	40
5.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวอย่างอาหารต่างๆ 42	
5.9 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์	47
5.10 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของน้ำส้มประรด 25 %	47
5.11 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของน้ำส้ม 25 %	47
ง.1 อุณหภูมิที่เวลาใดๆของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ ความเข้มสนามไฟฟ้า 6 V/cm	58
ง.2 อุณหภูมิที่เวลาใดๆของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ ความเข้มสนามไฟฟ้า 7 V/cm	60
ง.3 อุณหภูมิที่เวลาใดๆของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ เมื่อให้ ความเข้มสนามไฟฟ้า 8 V/cm	61
ง.4 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.1 ลิตร/นาที	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.9 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.0208 l/min	45
5.10 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 l/min	45
5.11 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.067 l/min	45
5.12 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 l/min	46
5.13 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 l/min	46
5.14 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 l/min	46
ก.1 แผนภาพแสดงระบบป้อนตัวอย่างอาหาร	53
จ. แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดทำโครงการ	72

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
a	=	ค่าคงที่ (S/m)
B	=	ค่าคงที่ (S/m)
C_p	=	ความร้อนจำเพาะ ($J/kg\ ^\circ C$)
E	=	ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
G	=	สภาพความนำไฟฟ้า (Siemens)
h_s	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 K$)
K	=	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ($^\circ C$) ⁻¹
K_1	=	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ($^\circ C$) ⁻¹
K_2	=	สัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง (S/m % solid)
K	=	ค่าการนำความร้อน ($W/m\ ^\circ C$)
L	=	ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรด (m)
P	=	กำลังงาน (W)
Q	=	ปริมาณความร้อน (W/m^3)
R	=	ความต้านทานไฟฟ้า (Ohm)
T	=	อุณหภูมิ ($^\circ C$)
T_0	=	อุณหภูมิเริ่มต้น ($^\circ C$)
t	=	เวลา (sec)
\dot{U}	=	ปริมาณความร้อน (W/m^3)
V	=	แรงดันไฟฟ้า (Volt)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
σ	=	ค่าการนำไฟฟ้า (S/m)
σ_{j25}	=	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (S/m)
σ_{p25}	=	ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นอาหารที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (S/m)
σ_T	=	ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ (S/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการศึกษา

ปัจจุบันกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายวิธี เช่น การใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อน ฯลฯ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยผลิตภัณฑ์ที่จะอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ใจกลางของผลิตภัณฑ์ ทำให้ที่ผิวรอบนอกของผลิตภัณฑ์ได้รับปริมาณความร้อนที่สูงเกินกว่าที่ต้องการ ทำให้คุณค่าทางอาหารก็อาจสูญเสียไป

เนื่องจากปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการ Ohmic heating จึงได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อลดปัญหาการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียคุณค่าทางอาหารที่เกิดขึ้นแก่ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในปฏิญานิพนธ์นี้จึงได้นำกระบวนการให้ความร้อนแบบ Ohmic heating มาศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผล เช่น ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร คุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร และคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยกระบวนการ Ohmic heating เพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางเพื่อใช้ออกแบบสร้างเครื่องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการ Ohmic heating

กระบวนการ Ohmic heating เป็นการให้ความร้อนที่เหมาะสมทั้งด้านการประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการออกแบบ จึงจัดเป็นวิธีการที่น่าสนใจควรศึกษาให้เข้าใจเป็นอย่างดี เพื่อที่จะนำมาเป็นแนวทางในการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหาร
2. ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสร้างความร้อนโดยกระบวนการ Ohmic heating
3. ศึกษาและออกแบบเครื่องทำความร้อนโดยกระบวนการ Ohmic heating ระบบต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อ ในอาหารเหลวอย่างต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขต

1. สร้างเครื่องมือเพื่อใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าของ สารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ น้ำส้มปีระด 25 % และ น้ำส้ม 25 % พร้อมทั้งตรวจสอบความแม่นยำและความถูกต้องของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร ได้แก่ ความเข้มข้นของไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทำความร้อนด้วยกระบวนการ Ohmic heating ต่อไป
3. ออกแบบและสร้างเครื่องทำความร้อนด้วยกระบวนการ Ohmic ระบบต่อเนื่อง และใช้ทดสอบทำความร้อนสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ น้ำส้มปีระด 25 % และ น้ำส้ม 25 %
4. ทดสอบการทำงานของเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่องที่สร้างขึ้นที่อัตราการไหลต่างๆ และวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของ เครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่อง
5. ตรวจสอบค่าความหนาแน่น pH และ เปรอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ น้ำส้มปีระด 25 % และ น้ำส้ม 25 % ที่ผ่านกระบวนการสร้างความร้อน โดยเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่อง

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบโอห์มิก

Halden, De Alwis และ Fryer [10] ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบ Ohmic ทำจากกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนขนาด $184 * 70 * 77$ มิลลิเมตร ด้านในของกล่องมีขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวกับที่ใช้ในทางการค้าติดตั้งอยู่ โดยต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ามาน (Main supply) ที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ให้เหลือ 200 โวลต์ สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (K-type thermocouples) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์

Palaniappan และ Sastry [12] สร้างเซลล์โดยใช้ท่อสแตนเลสยาว 12.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 15/16 นิ้ว ด้านในของท่อสแตนเลสมีปลอกเทฟลอนสวมอยู่ (เพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้า) ส่วนกลางท่อมีปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/16 นิ้ว สำหรับใส่ตัวอย่างและเทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นโรเดียม (Rhodium plated stainless steel electrodes) สวมอยู่กับ Teflon pressure caps และ Compression fittings

เซลล์ของ Gupta และ Jindal [13] ประกอบด้วย ท่ออคริลิก (Acrylic) ยาว 8 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 เซนติเมตร ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสติดอยู่กับซีลยางและแผ่นประกบ โดยใช้น็อตและสกรูเป็นตัวยึดให้แน่น ตามแนวยาวของท่อมีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล 3 ช่อง โดยช่องหนึ่งเสียบที่ตำแหน่งกลางท่อ ส่วนอีก 2 ช่องที่เหลืออยู่ห่างจากปลายท่อข้างละ 1 เซนติเมตร

Qihua , Jindal และ Winden [14] ได้สร้างระบบให้ความร้อน ohmic แบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย ตัวเซลล์ให้ความร้อนที่ทำจากท่ออคริลิกยาว 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้ง 2 ข้างของเซลล์มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสติดตั้งอยู่ ตามแนวยาวและแนวรัศมีของเซลล์มีช่องสำหรับเสียบสายเทอร์โมและตามแนวเส้นรอบวงที่ปลายทั้ง 2 ของเซลล์ได้ติดตั้งท่อแก้วข้างละ 3 ท่อ สำหรับต่อเข้าปั๊ม เพื่อให้การไหลเข้าและออกของตัวอย่างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของระบบควบคุมการไหลประกอบด้วย ปั๊มแบบจุ่ม (Submersible pump) ที่มีอัตราการสูบสูงสุด 10 ลิตร/นาที่ ต่อผ่านสายยางเข้าสู่ตัวเซลล์ให้ความร้อนทางท่อแก้วทั้ง 3 ท่อ โดยใช้ระบบ Bypass สำหรับปรับอัตราการไหลของตัวอย่าง

Khalaf และ Sastry [15] ใช้ท่อไพเร็กซ์ (Pyrex tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 เมตร สำหรับทำเซลล์ให้ความร้อนแบบ ohmic ในระบบต่อเนื่อง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.72 เมตร บริเวณทางเข้าและออกจากเซลล์ให้ความร้อนได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของตัวอย่างที่เข้าและออกจากเซลล์ การส่งตัวอย่างจากถังเก็บผ่านเข้าเซลล์ให้ความร้อนและออกไปยังถังเก็บ จะใช้วิธีการอัดอากาศ (Air pressure)

2.2 อุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยวิกฤต (Critical parameter) ต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารในกระบวนการ Ohmic heating ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาอุปกรณ์และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของทั้งอาหารเหลวและชิ้นอาหารดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 อุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสำหรับตัวอย่างอาหารเหลว

Fryer และคณะ [21] สร้างอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับอาหารเหลวประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ ระบบไฟฟ้าที่ป้อนที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ต หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ, สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouples) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ที่ปลายสายจะหุ้มด้วยโพลีเมอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากการผ่านไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารที่มีต่อระบบการวัดอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการบันทึกข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 7.5×7.5 เซนติเมตร เซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบ ohmic (Electric cell) ทำจากกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนขนาด $7.0 \times 7.77 \times 18.4$ เซนติเมตร

Gupta และ Jindal [13] พัฒนาเซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบ Ohmic ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากตัวอย่างอาหารสู่ภายนอก โดยตัวเซลล์ทำจากท่ออคริลิก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร ที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้สอบเทียบ (Calibration) เพื่อความแม่นยำและความถูกต้อง โดยใช้สารละลายมาตรฐานสารละลายน้ำเกลือ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลาร์ เป็นตัวอย่างในการสอบเทียบ

Palaniappan และ Sastry [16] พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลวซึ่งประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ และเซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบ Ohmic ซึ่งทำจากท่อสแตนเลสความยาว 12.5 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 15/16 นิ้ว ด้านในท่อสแตนเลสมีปลอกเพปลอนทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าสวมอยู่ ตรงกลางท่อติดตั้งท่อขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/16 นิ้ว สำหรับบรรจุตัวอย่างอาหารและเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล ที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากแผ่นโลหะโรเดียม (Rhodium plated stainless steel electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับชิ้นอาหาร

Miitchell และ De Alwis [22] พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับชิ้นอาหารที่ความถี่ 50 เฮิร์ต อุนหนุมิ 25 องศาเซลเซียส เซลล์สำหรับสร้างความร้อนแบบ Ohmic ทำจากท่อที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร วางในแนวตั้งมีตัวยึดทั้งด้านบนและด้านล่าง ปลายท่อด้านล่างมีขั้วอิเล็กโตรดยึดติดอยู่ ส่วนปลายท่อด้านบนขั้วอิเล็กโตรดถูกยึดติดไว้ที่ปลายหัวกอกที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อให้ขั้วอิเล็กโตรดสัมผัสผิวหน้าของชิ้นอาหารที่มีความยาวต่างๆ กัน

Palaniappan และ Sastry [23] สร้างเซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบ Ohmic โดยตัวเซลล์ทำจากท่อสแตนเลส และมีปลอกเทฟลอน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.35 เซนติเมตร ซ้อนอยู่ในที่ปลายทั้งสองด้านของท่อมีขั้วอิเล็กโตรดที่ทำจากแผ่นโลหะโรเดียม โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรด 1 เซนติเมตร หลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ต ผ่านตัวอย่าง จะมีการบันทึกอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกข้อมูลดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ

2.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารโดยวิธีการให้ความร้อนแบบ Ohmic

Palaniappan และ Sastry [12] ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของอาหารหลายชนิดเมื่อให้ความร้อนโดยวิธี ohmic ที่แรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ต และสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร เช่น มันฝรั่ง แครอท แยม เนื้อไก่ และเนื้อวัว ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจะแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$\sigma_T = \sigma_{P25} [1 + k(T - 25)] \quad (2.1)$$

$$T = 25 - 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma_T = \text{ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ (s/m)}$$

$$\sigma_{P25} = \text{ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 }^{\circ}\text{C (s/m)}$$

$$K = \text{สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (}^{\circ}\text{C)}^{-1}$$

$$T = \text{อุณหภูมิใดๆ (}^{\circ}\text{C)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้หาค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

Material	Treatment	σ_{p25} (S/m)	$K (^{\circ}C)^{-1}$
Potato	Raw	0.32	0.035
	Water	0.25	0.030
	0.2 % NaCl	0.37	0.028
	0.4 % NaCl	0.36	0.033
	0.8 % NaCl	0.43	0.027
Carrot	Raw	0.13	0.107
	Water	0.12	0.078
	0.2 % NaCl	0.29	0.044
	0.4 % NaCl	0.31	0.044
	0.8 % NaCl	0.25	0.062
Yam	Raw	0.11	0.094
	Water	0.09	0.079
	0.2 % NaCl	0.42	0.021
	0.4 % NaCl	0.35	0.032
	0.8 % NaCl	0.35	0.034
Chicken	Raw	0.37	0.019
Beef	Raw	0.44	0.016

Palaniappan และ Sastry [16] ยังได้ทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณของแข็งที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำมะเขือเทศและน้ำส้ม โดยใช้เซลล์ทดลองแบบ Ohmic เช่นเดียวกับที่ทดลองข้างต้นแต่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 140 โวลต์ พบว่านอกจากค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิแล้ว ปริมาณของแข็งก็มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ด้วยและได้สร้างสมการสหสัมพันธ์ขึ้นเพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิและปริมาณของแข็งต่างๆ ดังสมการที่ (2.2) และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

$$\sigma_T = \sigma_{j25} [1 + k(T - 25)] - K_2 S \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- σ_T = ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ (s/m)
 σ_{J25} = ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ ที่อุณหภูมิ 25° C (s/m)
 K_1 = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (°C)⁻¹
 K_2 = สัมประสิทธิ์ปริมาณของแข็ง (S/m % solid)
 S = ปริมาณของแข็ง (%)
 T = อุณหภูมิใดๆ (°C)

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้หาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้

Juice	σ_{25} (S/m)	K_1 (°C)	K_2 (S/m % solid)
Tomato	0.863	0.174	0.101
Orange	0.567	0.242	0.036

Gupta และ Jindal [13] ได้ศึกษาผลของความถี่, อุณหภูมิ, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายทั้งหมด (total insoluble) ที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ พบว่าความถี่ในช่วง 5 - 50 เฮิร์ต มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.05 โมลาร์และน้ำส้มคั้นมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ส่วน ความถี่ในช่วง 10-1000 เฮิร์ต ทำให้ตัวอย่างดังกล่าวมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 6 เท่านั้น นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง น้ำมะเขือเทศ, น้ำส้ม และน้ำสับปะรด ยังมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายทั้งหมด แสดงดังสมการ

$$\sigma_T = a + b * TSS + c * T + d * TSS * T \quad (2.3)$$

$$\sigma_T = a_1 + b_1 * TIS + c_1 * T + d_1 * TIS * T \quad (2.4)$$

- โดยที่ TSS = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (°Brix)
 TIS = ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายทั้งหมด (%Dry weight)
 a, b, c, d = ค่าคงที่
 a_1, b_1, c_1, d_1 = ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wang และ Sastry [24] ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของอาหารในกระบวนการให้ความร้อนแบบ Ohmic ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองได้แก่ มันฝรั่ง แครอท และแยม ซึ่งจะมีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 40 โวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอุณหภูมิตัวอย่างอาหารลงเหลือ 25 องศาเซลเซียส ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารเดิมครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ที่สภาวะเดิมตามลำดับ ศึกษาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละรอบว่าแตกต่างกันอย่างไร ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการที่ (2.5) ซึ่งเป็นรูปแบบสมการทั่วไประหว่างค่าการนำไฟฟ้าของอาหารกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการที่ 2.5

Product	Treatment	$\sigma_{30} (S/m)$	$m(^{\circ}C)^{-1}$	R^2
Carrot	Raw	0.033	0.234	0.97
	After 1 cycle	0.343	0.021	0.99
	After 2 cycle	0.763	0.015	0.96
Potato	Raw	0.08	0.218	0.98
	After 1 cycle	0.576	0.029	0.99
	After 2 cycle	0.623	0.395	0.99
Yam	Raw	0.034	0.395	0.99
	After 1 cycle	0.433	0.021	0.96
	After 2 cycle	0.393	0.023	0.99

$$\sigma_T = \sigma_{ref} [1 + m(T - T_{ref})] \quad (2.5)$$

- โดยที่ σ_T = ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ (S/m)
 T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง ($^{\circ}C$)
 σ_{ref} = ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิอ้างอิง (S/m)
 m = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการให้ความร้อนแบบ Ohmic

Fryer และ คณะ [21] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารเหลวในระบบ Ohmic heating แบบสถิตย์ รูปแบบสมการพัฒนามาจากสมการทั่วไปของการนำความร้อน โดยเพิ่มเทอมการสร้างความร้อนจากการผ่านไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหาร โดยตรงแสดงดังสมการ

$$\nabla(k \nabla T) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$Q = (\nabla V)^2 \sigma \quad (2.7)$$

ถ้าระบบใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูง พลังงานความร้อนมีปริมาณมากทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารจะเป็นผลเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารโดยตรง ดังนั้นเทอมของการนำความร้อน $\nabla(k \nabla T)$ มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา สมการจะลดรูปลงแสดงดังสมการ

$$Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Halden De Alwis และ Fryer [10] เสนอรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ ในระบบ Ohmic heating แบบสถิตย์ โดยพิจารณาว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารจะเป็นผลเนื่องมาจากการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารโดยตรง

สำหรับชิ้นอาหาร

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (\nabla V)_s^2 \sigma_s \quad (2.9)$$

สำหรับอาหารเหลว

$$(\rho C_p)_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = (\nabla V)_l^2 \sigma_l \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเหลวที่อยู่รอบๆมีค่า

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_l} = \frac{[\rho C_p]_s [\nabla V]_s^2 \sigma_s}{[\rho C_p]_l [\nabla V]_l^2 \sigma_l} \quad (2.11)$$

ในการประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อในอาหารแบบ Ohmic heating อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ จะต้องใกล้เคียงกันคือ สมการที่ (2.11) มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง [10]

De Alwis และคณะ [25] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ ในระบบ Ohmic heating แบบสถิตย์ โดยพิจารณาว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเป็นผลเนื่องมาจากการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารโดยตรง และใช้วิธี Finite element หาค่าการกระจายสนามไฟฟ้าในระบบที่มีชิ้นอาหารรูปร่างทรงกระบอก 1 ชิ้น และอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ โดยพิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเพียง 2 ทิศทางเท่านั้น และกำหนดให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ระบบไม่มีการสูญเสียความร้อน ไม่คิดการนำและการพาความร้อนในระบบ

หาค่าการกระจายสนามไฟฟ้าจาก

$$\nabla |\nabla V| = 0 \quad (2.12)$$

อัตราการเพิ่มพลังงานในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ

$$Q_s = |\nabla V|_s * |\nabla V|_s * \sigma_s \quad (2.13)$$

$$Q_l = |\nabla V|_l * |\nabla V|_l * \sigma_l \quad (2.14)$$

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ

$$\frac{\partial T_s}{\partial T_l} = \frac{4 * \sigma_l * \sigma_s}{(\sigma_s + \sigma_l)^2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของสมการที่ (2.15) คือ ทำนายได้เฉพาะอาหารเหลวที่มีชั้นอาหารแขวนลอยอยู่เพียง 1 ชั้น และทำนายได้ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มากนัก คือ ที่ช่วงเวลาเริ่มต้นเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการตั้งสมมติฐานกำหนดให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่จากการศึกษาของ Palaniappan และ Sastry [23] พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลวและชั้นอาหารเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเวลาในการให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชั้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ จะแตกต่างจากช่วงเวลาเริ่มต้นของการให้ความร้อน เนื่องจากอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารจะขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นสำคัญ

Sastry และ Palaniappan [29] ได้เสนอรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ ในกระบวนการ Ohmic heating ระบบสถิตย์ โดยแยกพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายเป็น 2 ส่วน คือ

1. สมการทางคณิตศาสตร์ใช้สำหรับทำนายอุณหภูมิของอาหารเหลว โดยคิดจากการทำสมดุลพลังงานในระบบ

$$M_1 C_p \frac{[T^{n+1} + T^n]}{\Delta t} = \hat{U}_1 V_1 + n_s h_{1p} A_s [T_{sm} - T_{lm}] - U A_w [T_{lm} - T_a] \quad (2.16)$$

โดยที่ $T_{lm} = (T^{n+1} + T^n)_l / 2$

$T_{sm} = (T^{n+1} + T^n)_s / 2$

$T_a =$ อุณหภูมิของอากาศภายนอกระบบ ($^{\circ}\text{C}$)

$\hat{U}_1 = \sigma_1 (\nabla V^2)_1$

$M_1 =$ มวลของอาหารเหลว (Kg)

$V_1 =$ ปริมาตรของอาหารเหลว (m^3)

$n_s =$ จำนวนชั้นอาหาร

$A_s =$ พื้นที่ผิวของชั้นอาหาร (m^2)

$h_{1p} =$ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

$A_w =$ พื้นที่ผิวของชุดสร้างความร้อนระบบ Ohmic (m^2)

$U =$ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวม ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สมการทางคณิตศาสตร์ใช้สำหรับทำนายอุณหภูมิชั้นอาหาร ประยุกต์ใช้สมการทั่วไปของการนำความร้อนโดยเพิ่มเทอมการสร้างความร้อน (\hat{U}) เนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารเข้าไว้ด้วยดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + \hat{U}_s \quad (2.17)$$

โดยที่ $\hat{U}_s = \sigma_s (\nabla V^2)_s$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูป หมายถึง การใช้อุณหภูมิสูงเพื่อช่วยให้อาหารมีความคงตัว จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการถนอมอาหาร เนื่องจากอาหารเสื่อมเสียได้ง่ายจากจุลินทรีย์และเอนไซม์ที่มีอยู่ในอาหารนั่นเอง อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีการพัฒนากรรมวิธีการถนอมอาหารด้วยความร้อนให้ดีขึ้น เพื่อให้คงคุณค่าทางอาหารเกิดความประหยัดและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค [30]

3.1 กระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอาหาร

กระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายวิธีขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน ได้แก่

3.1.1 การลวก (Blanching) เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การลวกผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุ มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ

- ก. เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
- ข. เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์
- ค. เพื่อทำความสะอาดผลิตภัณฑ์
- ง. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นุ่มขึ้น ง่ายต่อการบรรจุ
- จ. เพื่อกำจัดก๊าซออกจากเนื้อเยื่อ

3.1.2 การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ฆ่าจุลินทรีย์เพียงบางส่วนในอาหาร จึงจำเป็นต้องเก็บรักษาไว้ภายใต้สภาวะที่ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นไปได้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจุดประสงค์แรกๆของกระบวนการนี้คือ ฆ่าลายจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ (Pathogenic) ตัวอย่างเช่น นม ส่วนจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียบางส่วน สามารถอยู่รอดจากการให้ความร้อนแบบนี้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การถนอมอาหารแบบอื่นควบคู่ไปกับการทำพาสเจอร์ไรส์ คือ

- ก. การทำความเย็น (Refrigeration)
- ข. การใช้สารเคมี (Chemical additive) เพื่อให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อพวกจุลินทรีย์ เช่น การใส่น้ำตาลในนมข้นหวานและการใส่กรดในอาหารหมักดอง
- ค. การบรรจุหีบห่อ (Packaging)
- ง. การหมัก (Fermentation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การสเตอริไลซ์ (Sterillzation) เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส [31] เพื่อทำลายจุลินทรีย์รวมทั้งสปอร์ให้หมดไป แต่การให้ความร้อนเพื่อบรรจุวัตถุประสงคืนั้นจะทำให้คุณค่าทางอาหารสูญเสียไป ดังนั้นจึงให้ความร้อนในระดับที่เรียกว่า การสเตอริไลซ์แบบเชิงการค้า (Commercial sterillzation) คือ การใช้ระดับความร้อนเพียงพอที่จะทำลายจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อนมากที่สุด รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโทษ นอกจากนี้ยังทำให้จุลินทรีย์อื่น ๆ รวมทั้งสปอร์ที่อาจหลงเหลืออยู่ไม่สามารถเติบโตได้ในสภาวะที่เก็บ [30]

3.2 การแบ่งประเภทอาหารเพื่อพิจารณากระบวนการให้ความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ชนิดทนความร้อน มีหลายปัจจัย ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน คือ ค่าความเป็น กรด - ด่าง (pH) ของอาหาร เพราะค่าความเป็นกรด-ด่าง จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ จากการศึกษาพบว่า ถ้าอาหารมีค่า pH ต่ำ เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจะน้อย จึงได้มีการแบ่งประเภทอาหารตามความเป็นกรด-ด่าง ดังนี้ [32]

3.2.1 อาหารชนิดกรดต่ำ (Low acid foods)

อาหารชนิดนี้มี pH เท่ากับหรือสูงกว่า 4.6 ได้แก่ ปลา เนื้อสัตว์ ถั่ว ผัก และข้าวโพด เป็นต้น อาหารกลุ่มนี้เมื่อนำไปบรรจุเป็นอาหารกระป๋องชนิดกรดต่ำ (Low acid canned food : LACF) จะต้องใช้ความร้อนสูงถึง 116 หรือ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิ 10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อทำลายสปอร์ของ *Clostridium botulinum* หรือ *Clostridium sporogenes* หรือ *Bacillus stearothermophilus*

3.2.2 อาหารกรด (Acid foods)

อาหารชนิดนี้มีค่า pH ต่ำกว่า 4.6 ได้แก่ มะเขือเทศ และใบขี้เหล็ก การใช้ความร้อนขนาดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (100 องศาเซลเซียส) ภายใต้อุณหภูมิ 10-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะทำลายสปอร์บางชนิด เช่น *Bacillus coagulans*, *Clostridium pasteurianum* ซึ่งปนเปื้อนอยู่ อาหารกลุ่มนี้มักใช้ *Clostridium butyricum* เป็นจุลินทรีย์บ่งชี้ถึงกระบวนการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดนี้สามารถทนต่อความร้อนได้มากที่สุด

3.2.3 อาหารชนิดกรดสูง (High acid foods)

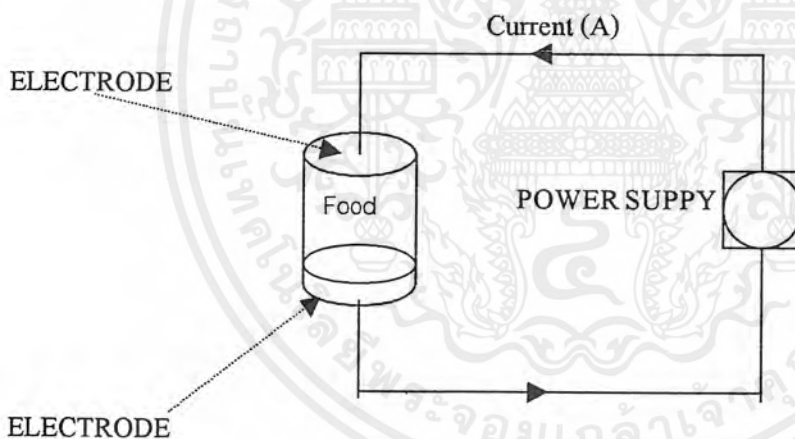
อาหารชนิดนี้มี pH ต่ำกว่า 4.1 เช่น ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวต่าง ๆ มะนาว, สับปะรด, น้ำผลไม้ และอาหารหมักคอง เป็นต้น ซึ่งต้องการความร้อนขนาดพาสเจอไรซ์ หรือ Hot fill (80 องศาเซลเซียส) เพื่อทำลายยีสต์, ราหรือแบคทีเรียทนกรด โดยทั่วไปแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ไม่สามารถ

เจริญเติบโตในอาหารชนิดกรดสูง ดังนั้นในอาหารกลุ่มนี้การทำลายยีสต์และราจึงมีความสำคัญกว่าแบคทีเรีย โดยเฉพาะ Ascospore ของยีสต์และรามีความต้านทานความร้อนมากกว่าเซลล์ธรรมดา [34]

3.3 หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนแบบ OHMIC [11] [18] [19]-[21]

กระบวนการให้ความร้อนแบบ Ohmic heating เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน โดยอาศัยค่าความต้านทานของอาหารที่มีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าได้ในรูปของคุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของอาหารนำมาประยุกต์ใช้งาน โดยให้ความสัมพันธ์ไฟฟ้าแก่อาหารเหลวจะเกิดกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านเข้าไปในอาหารเหลวนั้น ทำให้เกิดพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีปริมาณมาก ซึ่งเราจะนำประโยชน์จากกระบวนการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว

รูปแบบของระบบการให้ความร้อนแบบ Ohmic heating นี้จะประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น วางขนานกันที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงระบบพื้นฐานของกระบวนการให้ความร้อน Ohmic

ในการให้ความร้อนในกระบวนการ ohmic heating นี้ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้านี้เราจะพิจารณาได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{iL}{Av} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- σ = ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (S/m)
 A = พื้นที่หน้าตัดของขั้ว ELECTRODE (m^2)
 i = กระแสไฟฟ้า (ampere)
 L = ระยะห่างระหว่างขั้ว ไฟฟ้า (m)
 v = แรงดันไฟฟ้า (volt)

โดย พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ohmic นี้ จะเป็นไปตามสมการ

$$Q = \sigma_T E^2 \quad (3.2)$$

- โดยที่
- Q = ปริมาณความร้อน ($Watt/m^3$)
 - E = ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
 - σ_T = ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารที่อุณหภูมิใดๆ (S/m)

การที่จะคำนวณการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการ ohmic ให้ถูกต้องตรงกับความเป็นจริงต้องใช้ในการคำนวณที่ยู่ยากซับซ้อน เช่น การใช้วิธี Finite element ซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำที่มากและใช้เวลานาน [17] [20] แต่เราสามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่ายโดยสมมติสภาวะการต่างๆ เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น และเป็นไปได้ในการปฏิบัติดังนี้ คือ

- ตัวอย่างอาหารอยู่นิ่ง
- การนำและการพาความร้อนระหว่างของเหลวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอุณหภูมิทุกจุดของอาหารจะมีค่าเท่ากัน
- ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีให้แก่ระบบมีค่าคงที่
- ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีความสม่ำเสมอในทุกจุด
- ระบบไม่มีการสูญเสียความร้อน
- อัตราการเกิดความร้อนไม่ขึ้นกับตำแหน่งภายในเครื่องให้ความร้อน

จากข้อสมมติฐานเราสามารถประยุกต์ใช้กับสมการทั่วไปในการทำความร้อนที่เพิ่มเทอมการสร้างความร้อนเนื่องด้วยกระแสไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{C_p \rho} + \text{Convection} - \text{heat loss} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
 C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของ ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 t คือ เวลา (sec)
 ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
 C_p คือ ความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$)
 K คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)

เมื่อเราแทนค่า $Q = \sigma_T E^2$ ลงไปในสมการเพื่อหาค่าความร้อนที่เกิดจากกระบวนการ ohmic และสามารถตัดเทอม convection และ heat loss ทิ้งได้ เนื่องจากพิจารณาจากสภาวะสมมติ ดังนั้นการให้ความร้อนของกระบวนการ ohmic ที่ได้จะลดรูปเป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{E^2 \sigma}{C_p \rho} \quad (3.4)$$

เมื่อ σ มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงกับค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อนแบบ ohmic

$$\sigma = A + BT \quad (3.5)$$

- เมื่อ A เป็นค่าคงที่ (S/m)
 B เป็นค่าคงที่ ($\text{S/m } ^{\circ}\text{C}$)

ใส่ค่าต่างๆใน สมการ (3.4) เพื่อหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นสมการทำนายความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ohmic ของอาหารที่เวลาต่างๆในระบบการให้ความร้อนแบบ ohmic ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{E^2 (A + BT)}{C_p \rho}$$

$$\frac{\partial T}{(A + BT)} = \frac{E^2}{C_p \rho} \partial t$$

$$\int_{T=0}^{T=t} \frac{\partial T}{(A+BT)} = \int_{t=0}^{t=t} \frac{E^2}{C_p \rho}$$

$$\frac{1}{B} \ln(A+BT) \Big|_{T=0}^{T=T} = \frac{E^2 t}{C_p \rho}$$

$$\frac{1}{B} [\ln(A+BT) - \ln(A+BT_0)] = \frac{E^2 t}{C_p \rho}$$

$$\text{Exp} \frac{E^2 t b}{C_p \rho} = \frac{A+BT}{A+BT_0}$$

$$T = \frac{1}{B} \left\langle (A+BT_0) \left\{ \text{Exp} \frac{E^2 t B}{C_p \rho} \right\} - A \right\rangle \quad (3.6)$$

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการ Ohmic Heating

3.4.1 ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (Electrical conductivity)

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับ [17] ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากหรือน้อยกล่าวคือ ถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสูง กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านได้มากเช่นกันส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารต่ำกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้น้อยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างช้าๆ [23]

3.4.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า (Field strength)

De Alwis Halden และ Fryer [25] ศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร พบว่าเมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

3.4.3 ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหาร (Particle size and shape)

ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหารมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในกระบวนการ Ohmic heating [25] ซึ่งมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ

Palaniappan และ Sastry [16] ศึกษาผลของขนาดชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหาร พบว่าเมื่อขนาดของชิ้นอาหารใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยลดลง เนื่องจากอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กแขวนลอยอยู่อาจช่วยให้การกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารมีมากกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ ซึ่งมีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าผิดปกติไป

De Alwis และคณะ [25] ศึกษาผลของรูปร่างชิ้นอาหารต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ โดยทดลองในระบบสถิตย์ (Static system) ชิ้นอาหารใช้มันฝรั่ง 1 ชิ้น โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความยาวของชิ้นอาหาร (L) ที่ขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดขวาง (A) ของชิ้นอาหาร โดยปริมาตรของชิ้นอาหารคงที่ ผลการทดลองพบว่าชิ้นอาหารที่มีค่า L/A สูง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ จะต่ำกว่าชิ้นอาหารที่มีค่า L/A ต่ำกว่า

3.4.4 ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร (Particle orientation)

ชิ้นอาหารที่วางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ร้อนเร็วกว่าชิ้นอาหารที่วางในแนวขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า [26] สำหรับชิ้นอาหารที่มีรูปร่างทรงกลมและทรงลูกบาศก์ พบว่าทิศทางการจัดเรียงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร [25] อาจเป็นเพราะว่าค่า L/A ของชิ้นอาหารทั้งสองรูปร่างนี้ไม่ขึ้นกับทิศทางการจัดเรียง

3.4.5 ปริมาณชิ้นอาหาร (Particle concentration)

ปริมาณชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ แต่มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร [27] สำหรับอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารแขวนลอยในปริมาณมาก มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ สูงกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารเหลวแขวนลอยในปริมาณที่น้อยกว่า [28]

3.5 ข้อดีของระบบ Ohmic heating

1. เกิดความร้อนได้รวดเร็วและพร้อมกันทั่วทุกจุดทำให้ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อสั้นลง ลดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารได้ดี
2. ไม่ต้องใช้พื้นผิวในการถ่ายเทความร้อนจึงลดปัญหาการถ่ายเทความร้อนผ่านคราบสกปรก (fouling film)
3. ระบบ Ohmic ไม่มีส่วนของอุปกรณ์เคลื่อนไหว จึงสามารถใช้กับอาหารที่มีความละเอียดอ่อนต่อแรงเฉือนได้
4. การควบคุมกระบวนการทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. มีสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ดีเนื่องจากไม่เกิดเสียงรบกวน

3.6 ข้อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกกับกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่น

การพัฒนาาระบบ โอห์มมิกเพื่อแก้ไขปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ (ของแข็งกับของเหลว) ของกระบวนการให้ความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งความร้อนที่แพร่ผ่านเข้าไปโดยตลอดจะมีความรวดเร็วและอัตราคงที่ ดังนั้นจึงมีการพิจารณาข้อแตกต่างระหว่างระบบ โอห์มมิกกับระบบอื่น ๆ โดยสังเขปดังต่อไปนี้

3.6.1 เปรียบเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนแบบธรรมดา

ลักษณะของวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้น เป็นการเกิดความร้อนขึ้นโดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีขอบกว้างมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบ โอห์มมิก ดังนี้

1. ขนาดของเนื้อชิ้นงานมีผลต่อการกระจายความร้อนเข้าสู่ใจกลางเนื้อ ทำให้ความร้อนที่ถูกพาเข้าโดยตัวกลางจากภายนอกมีลักษณะที่ช้าเมื่อต้องการให้ความร้อนทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าเป็นการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก จะสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ขนาดใหญ่ถึง 25 mm

2. การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของชิ้นผลิตภัณฑ์ไปยังภายในชิ้นผลิตภัณฑ์ส่งผลทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไปที่บริเวณผิว ซึ่งถ้าให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจะไม่อาศัยการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเกิดความร้อนกระจายทั่วทั้งผลิตภัณฑ์พร้อม ๆ กันในขณะที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้า

3. ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของชิ้นเนื้อน้อยกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

4. เกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์มากทั้งทางด้าน โครงสร้างของชิ้นเนื้อและปริมาณของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ใจกลางผลิตภัณฑ์ ทำให้ที่ผิวรอบนอกของผลิตภัณฑ์จะได้รับปริมาณความร้อนที่สูงเกินกว่าที่ต้องการ เป็นผลให้ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง ในลักษณะเดียวกันกรณีที่เป็นของผสมส่วนของของเหลวจะเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนมาก ทำให้เกิดการระเหยของของเหลวปริมาณจึงมีการเปลี่ยนแปลงไป

5. คุณค่าทางอาหาร สี สัน รสชาติ รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ อาจสูญเสียไป

6. การควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก เนื่องจากการผ่านความร้อนให้กับตัวกลางจากแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งการควบคุมอุณหภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางเป็นสำคัญ

7. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง และอายุการใช้งานสั้นกว่าระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ง่าย เช่น เสียงในขณะที่เครื่องทำงาน ปริมาณก๊าซในอากาศ อันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน

3.6.2 ข้อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน

ลักษณะการให้ความร้อนแบบนี้ เป็นความร้อนที่ได้จากการระเหยเนื่องจากการต้มน้ำ โดยผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสถานะที่มีพื้นผิวแบบรูพรุน และส่วนด้านล่างจะเป็นน้ำที่จะต้มเพื่อทำให้เกิดไอน้ำ ซึ่งความได้เปรียบของการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน สามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนของชิ้นเนื้อและของเหลวที่อยู่รอบ ๆ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ทำให้เกิดความสูญเสียลักษณะทางกายภาพน้อยที่สุด
2. เหมาะสำหรับอาหารที่มีเปอร์เซ็นต์ปริมาณของชิ้นเนื้อสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นจากความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นอาหารโดยตรง ทำให้ลดระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากของเหลวรอบ ๆ ไปยังชิ้นเนื้อ
3. ให้รสชาติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนโดยทั่วไป
4. สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์อาหารอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องใช้ตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน
5. เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่แตกหักง่ายด้วยแรงเฉือน เพราะไม่จำเป็นต้องมีการกวนในระหว่างการให้ความร้อน

3.6.3 ข้อเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยให้ความร้อน

ลักษณะการเกิดความร้อน โดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในผลิตภัณฑ์ เมื่อโมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นก็จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นมา โดยการใช้อินไมโครเวฟมีข้อบกพร่องดังนี้

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ ดังเกิดได้จากแทนที่วางจะเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนจุดที่คลื่นไมโครเวฟกระทบแต่ถึงอย่างไรความร้อนที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ก็ยังคงกระจายไม่ทั่วผลิตภัณฑ์อยู่ดีเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก
2. อันตรายต่อผู้ใช้งานหรือผู้อยู่ใกล้เคียงเนื่องจากอาจมีปริมาณคลื่นไมโครเวฟออกมา ถ้าทำการเปิดตู้ในขณะที่เครื่องทำงานอยู่

3.7 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบ Ohmic heating

การออกแบบหรือการเลือกผลิตภัณฑ์ที่จะมาใช้กับระบบ โอห์มมิกให้เหมาะสมกับกระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีนี้ควรคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ คือ

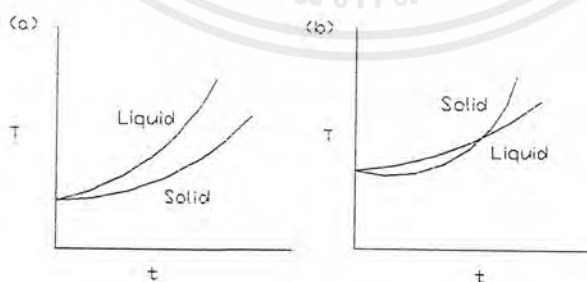
3.7.1 ค่าความนำไฟฟ้าของทั้งสองส่วน (ของแข็ง , ของเหลว) และค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิจะต้องมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากต้องการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปโดยตรงสู่ผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ส่วนพร้อมกัน

3.7.2 ถ้าค่าความนำไฟฟ้าของส่วนเนื้อหามีค่าต่ำกว่าส่วนของของเหลว ค่าปริมาณความเข้มข้นของเนื้อจะเป็นตัวกำหนดว่าส่วนใดจะเกิดความร้อนเร็วกว่ากัน โดยความเข้มข้นของเนื้อสูงจะร้อนเร็วกว่า

3.7.3 ลักษณะการวางตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ (Particle orientation) ภายในระบบซึ่งมีรูปร่างไม่สมมาตร (non - symmetry) โดยถ้าชั้นผลิตภัณฑ์วางตัวในแนวขนานกับทิศทางของกระแสทำให้อัตราการเกิดความร้อนของชั้นผลิตภัณฑ์สูงกว่าของของเหลว แต่ถ้าชั้นผลิตภัณฑ์วางตัวในแนวเดียวกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า อัตราการเกิดความร้อนของชั้นผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่า

3.7.4 เวลาที่ใช้ในการกระจายความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดพลังงานความร้อน แต่ก็ยังมีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนแบบธรรมดา

3.7.5 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ชั้นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วย ไขมัน (ค่าความนำไฟฟ้าต่ำ) ต้องควบคุมการออกแบบและระมัดระวัง เนื่องจากโมเลกุลไขมันจะระเหยเป็นไอปนอยู่ในระบบ ซึ่งเป็นที่ยุ่งยากมากขึ้นเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆ ที่เพิ่มเข้ามา



รูปที่ 3.2 แสดงอัตราการเกิดความร้อนของของผสมที่มีค่าความนำไฟฟ้าของส่วนเนื้อหามีค่าต่ำกว่า ส่วนของของเหลว โดย (a) จะมีความเข้มข้นของเนื้อต่ำ (b) จะมีความเข้มข้นของเนื้อสูง

3.8 รูปแบบโอห์มมิกฮีตเตอร์ (Ohmic heater)

โอห์มมิกฮีตเตอร์มีรูปแบบที่นำมาศึกษาอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ

3.8.1 ระบบสถิตย์ (static system)

การศึกษาผลของกระบวนการโอห์มมิกกับผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวซึ่งอธิบายเหตุผลของความน่าจะเป็นไว้หลายกรณี เช่น

1) ชั้นผลิตภัณฑ์ที่ผิวมีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยกว่าภายในชั้นผลิตภัณฑ์ซึ่งเปรียบเสมือนการหุ้มฉนวนกันความร้อน ดังนั้นขนาดและการจัดวางตัวของชั้นเนื้อจึงมีความสำคัญของการเกิดพลังงานความร้อน

2) การเพิ่มปริมาณของชั้นเนื้อที่มีความนำไฟฟ้าต่ำเข้าไปมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดความร้อนสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าของของเหลว ซึ่งมีมากกว่าความนำไฟฟ้าของชั้นเนื้อ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นอาจจะต่ำลงเนื่องจากค่าความต้านทานรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้น

3) อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นตามค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ระบบทำงาน (ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนสู่ระบบมีค่าคงที่)



$S_1, S_2, S_3 = \%$ ความเข้มข้นของเนื้อในของผสม

รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณเนื้อที่ผสมอยู่

3.8.2 ระบบไดนามิก (Dynamic system)

เป็นระบบที่นำเอาระบบสถิตย์หลายหน่วยเซลล์ (Unit cell) ต่อเข้าด้วยกัน โดยทำการผ่านผลิตภัณฑ์ไปตามท่อที่มีการควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จากป้อน โดยอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ภายในท่อจะมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนในระบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแตกต่างกันระหว่างระบบสถิตย์และระบบไดนามิก คือ ในระบบสถิตย์ผลิตภัณฑ์ที่จะให้ความร้อนจะอยู่หนึ่งกับที่ แต่ถ้าเป็นระบบไดนามิกผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในบริเวณที่เกิดกระบวนการโอห์มมิกฮีตติง

สำหรับผลิตภัณฑ์รูปร่างเป็นรูปลูกบาศก์จะมีอุณหภูมิที่ขอบมุม (Cold - spot temperature) ของชิ้นมากกว่าอุณหภูมิส่วนกลางของของเหลว ซึ่งอุณหภูมิของทั้ง 2 ส่วนเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของชิ้นผลิตภัณฑ์ก็ยังน้อยกว่า โดยผลดังกล่าวจะสังเกตได้ว่าแตกต่างกับวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดา และถ้าชิ้นเนื้อมีความนำไฟฟ้าต่ำ รูปกราฟของอัตราการเกิดความร้อนก็ยังมีแนวโน้มเหมือนเดิม ส่วนชิ้นผลิตภัณฑ์จะร้อนเร็วกว่าของของเหลว แต่โดยรวมแล้วอัตราการเกิดความร้อนก็จะช้าเนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าทั้งระบบต่ำ

3.9 การใช้ประโยชน์จากระบบ Ohmic

3.9.1 การละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (Thawing)

Naveh , Kopelman และ Mizrahi [4] ได้ทดลองการละลายชิ้นเนื้อแช่เยือกแข็งขนาด 17 * 33 เซนติเมตร โดยใช้แรงดัน 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสโดยมีน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 1000 มิลลิโอม / เซนติเมตร เป็นตัวกลาง พบว่าสามารถละลายชิ้นเนื้อแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ได้ในเวลา 160 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการละลายโดยการแช่ในน้ำที่มีการกวนและควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จะต้องใช้เวลาถึง 450 นาที ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้กระแสไฟฟ้า ในการละลายชิ้นเนื้อสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ลงได้ร้อยละ 60

Balaban และคณะ [5] ได้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดัน ไฟฟ้า 480 โวลต์ 60 เฮิร์ต ผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากสแตนเลส ในการละลายก้อนกุ้งแช่เยือกแข็ง (Frozen shrimp blocks) แทนวิธีการละลายโดยการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในน้ำเพื่อต้องการลดปริมาณการใช้น้ำในการละลายผลิตภัณฑ์และลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น พบว่า การละลายก้อนกุ้งแช่เยือกแข็งโดยใช้วิธี Ohmic นี้สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 13.9 เหรียญ / กุ้ง 1000 กิโลกรัม

3.9.2 การลวก (Blanching)

Schade [35] ได้ใช้กระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ 0.25 เมกกะเฮิร์ต ลวกมันฝรั่งปอกเปลือกที่แช่อยู่ในสารละลายไฮดรอกไซด์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสีของมันฝรั่งที่เกิดจากเอนไซม์ (Enzyme discoloration) เช่นเดียวกับ Mizrahi , Kopelman และ Perlman [6] ได้ศึกษาการลวกข้าวโพดทั้งฝักด้วยไฟฟ้าเพื่อการทำลายเอนไซม์ โดยให้ข้าวโพดแช่อยู่ในสารละลายเกลือที่ปรับค่าการนำไฟฟ้าให้เท่ากับตัวอย่างข้าวโพด เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 380 โวลต์ ผ่านขั้วไฟฟ้า

ที่ทำจากอลูมิเนียม พบว่าจะใช้เวลา 3 นาทีในการทำลายเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่วิธีการถลกข้าวโพคในน้ำเดือดต้องใช้เวลา 17 นาที ในการทำลายเอนไซม์ชนิดเดียวกัน

3.9.3. การพาสเจอร์ไรซ์และสเตอริไลซ์ (Pasteurization and sterilization)

Beattie [7] ได้ทำการพาสเจอร์ไรซ์นมสำหรับเด็กทารก โดยให้นมมีการไหลแบบต่อเนื่อง (continuous) 0.75 และ 30 แกลลอน/ชม. โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 3600-4200 โวลท์ พบว่าคุณภาพนมที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

Murphy, Powell และ Morrow [8] ให้ความร้อนกับ Sewage sludge ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิจุดเดือดด้วยวิธีให้ความร้อนแบบ Ohmic โดยให้แรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองแดงที่ค่าต่าง ๆ กัน เช่น 94, 120, 190 และ 290 โวลท์ พบว่าวิธีให้ความร้อนแบบ Ohmic นี้สามารถทำให้เกิดความร้อนใน Sewage sludge อย่างรวดเร็วสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าร้อยละ 98

Bohart [9] ได้ทดลองใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 110 โวลท์ 60 เฮิร์ตซ์ ผ่านเชื้ออาหารในกระป๋องที่ปิดสนิท

Parrot [11] ทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการใช้วิธีให้ความร้อนแบบ Ohmic ในการฆ่าเชื้ออาหาร โดยใช้ตัวอย่างเนื้อวัวและแครอทในน้ำกรวี่ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อแล้วทำการคำนวณค่า F_0 ของชิ้นเนื้อวัวและแครอทเปรียบเทียบกับค่า F_0 ของน้ำกรวี่ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 27, 33.7 และ 32 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่เวลาเดียวกันชิ้นอาหารสามารถได้รับความร้อนในระดับเดียวกับส่วนที่เป็นของเหลว ในขณะที่วิธีการให้ความร้อนแบบการถ่ายเทความร้อนทั่วไปที่เวลาเดียวกันนี้ ค่า F_0 ของชิ้นอาหารจะมีค่าเพียง 0.2 เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้ทดลองตรวจสอบความสม่ำเสมอของการเกิดความร้อนในชิ้นอาหาร โดยการเพาะสปอร์ของ *Bacillus stearothermophilus* ที่รู้จำนวนแน่นอนให้กระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทและเพาะไว้เฉพาะที่กึ่งกลางก้อนแอลจิเนท แล้วนำไปใส่ไว้ในชิ้นเนื้อวัวและแครอท จากนั้นฆ่าเชื้อโดยวิธี Ohmic ผลที่ได้คือ ค่า F_0 ของแครอทที่มีเชื้อกระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทเท่ากับ 35.6 ส่วนแครอทที่มีเชื้อเพาะไว้เฉพาะกึ่งกลางก้อนแอลจิเนทมีค่า 37.1 สำหรับในชิ้นเนื้อวัวค่า F_0 ของชิ้นที่มีสปอร์กระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทเท่ากับ 32.5 และชิ้นที่มีสปอร์เพาะกึ่งกลางมีค่า 37.0 ซึ่งเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเป็นส่วนใดของชิ้นอาหารการให้ความร้อนแบบ Ohmic สามารถทำให้อาหารได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงพร้อม ๆ กัน

3.9 แนวทางการออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหาร

การออกแบบอุปกรณ์เครื่องมือรวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ใช้เป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีหลักการทั่ว ๆ ไปดังนี้

- สามารถถอดออกและรักษาความสะอาดได้ง่าย
- พื้นผิวที่จะสัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบ ไม่เป็นหลุมเป็นบ่อหรือขรุขระ
- ตะเข็บต่าง ๆ จะต้องปิดสนิท โดยเฉพาะบริเวณที่จะสัมผัสกับอาหาร
- ไม่มีสันหรือคม รอยต่อจะต้องกลมมนหรือโค้ง
- อย่าให้มีส่วนที่ไม่ใช่ยื่นออกมา
- พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

3.10 วัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์และเครื่องมือ

วัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์และเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหารนั้นจะเป็นพวกเหล็กปลอดสนิม, เหล็กธรรมดา, เหล็กกล้า, เหล็กหล่อ, เหล็กอบสังกะสี, ดีบุก, ทองเหลือง, ทองแดง, อลูมิเนียม, แก้ว, ยาง, ฝ้าฉก, วัสดุเส้นใยและพลาสติก เป็นต้น แต่ละชนิดของวัสดุที่กล่าวมาต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ควรจะต้องมีการเลือกใช้ให้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์

3.10.1 เหล็กปลอดสนิม

เหล็กปลอดสนิมนั้นเป็นที่นิยมใช้ทั่วไปในการสร้างเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของเครื่องมือที่ต้องสัมผัสกับอาหาร โดยทั่วไปจะใช้เหล็กปลอดสนิมชนิด 304 และ 316 ในบริเวณที่มีการเชื่อมเพื่อป้องกัน Intergranular corrosion โดยเฉพาะในท่อหรือแทงค์น้ำที่มีการทำความสะอาดแบบ clean-in-place

3.10.2 เหล็กธรรมดา

เหล็กธรรมดาไม่ควรใช้ทำเครื่องมือส่วนที่ต้องสัมผัสกับอาหาร เนื่องจากปัญหาการกัดกร่อนสูง ควรใช้ทำส่วนของ Shafts และ Cams ซึ่งต้องการความแข็งแรง สำหรับเหล็กกล้าและเหล็กหล่อก็เช่นเดียวกัน จะเกิดการกัดกร่อนง่ายมากซึ่งทำให้ผิวหน้าหยาบทำความสะอาดลำบาก วัสดุเหล่านี้เหมาะที่จะใช้สำหรับงานพวก Framework เท่านั้น พวกเหล็กอบสังกะสีไม่ควรนำมาใช้ในการทำเครื่องมือผลิตอาหาร เพราะสังกะสีที่เคลือบอยู่จะลอกออกได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดในอาหาร

3.10.3 อลูมิเนียม

โลหะชนิดนี้มีประโยชน์มากสำหรับทำภาชนะบรรจุวัตถุดิบต่าง ๆ แต่ควรจะเป็นชนิดซึ่งผสมกับโลหะอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.4 ไทเทเนียม

ไทเทเนียมเหมาะในการสร้างเครื่องมือสำหรับกรณีที่มีความกดดันสูง ๆ ทั้งนี้เพราะไทเทเนียมมีความทนต่อการกัดกร่อนได้มากกว่าเหล็กปลอดสนิม สามารถรับน้ำหนักได้มากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของไทเทเนียม เหมาะสำหรับสร้างส่วนของเครื่องมือที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบาแต่รับน้ำหนักได้มาก ส่วนข้อเสียของการใช้ไทเทเนียมในการสร้างเครื่องมือคือ ราคาจะสูงมาก

3.10.5 วัสดุเคลือบ

วัสดุเคลือบไม่ควรนำมาทำพวกเครื่องมือหรือภาชนะบรรจุ ทั้งนี้เพราะเศษวัสดุเคลือบอาจจะหลุดออกมาปะปนอยู่ในอาหาร นอกจากนี้พวกแบคทีเรียอาจจะเจริญอยู่ตามรอยแตกของวัสดุเคลือบ

3.10.6 แก้ว

วัสดุพวกแก้วมีการนิยมใช้มากขึ้นในการทำท่อ มีข้อดีคือไม่มีการกัดกร่อนและสามารถตรวจสอบและทำความสะอาดโดยไม่ต้องถอดออก

3.10.7 พลาสติก

พลาสติกมีข้อดีคือ มีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อนและหลายชนิดสามารถทนต่อกรด ด่าง สามารถใช้กับอุณหภูมิต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิสำหรับการฆ่าเชื้อหรือเยือกแข็ง แต่ข้อเสียของพลาสติกคือ ถูกขีดข่วนได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุให้สิ่งสกปรกจับแน่น ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย นอกจากนี้คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิดยังอาจเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ด้วย คุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้นั้นจะแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบ วัตถุดิบและกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้อยู่ 2 ประเภทคือ

ก. Thermoplastic จะเป็นพลาสติกที่ทนต่อกรด ด่างและสารทำความสะอาดคงตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากและบางชนิดสามารถป้องกันการดูดซึมของน้ำได้ พลาสติกที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่ โพลีเอทิลีน, โพลีโพรไพลีน, โพลีไวนิลคลอไรด์, และฟลูโอคาร์บอนโพลีเมอร์ เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้พลาสติกชนิดนี้ในการทำ ได้แก่ ท่อ ข้อต่อ และสายพาน เป็นต้น

ข. Thermosets พลาสติกชนิดนี้จะต่างจากชนิดแรกคือ ไม่สามารถนำมาหลอมใหม่ได้และคงตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า แต่ทนต่อกรดและด่างได้น้อยกว่า ตัวอย่างพลาสติกชนิดนี้ได้แก่ โพลีอีเทอร์, อีพอกซีเรซิน และโพลียูรีเทน เป็นต้น

บทที่ 4

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

4.1 วัสดุคืบ

1. สารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
2. น้ำส้ม 25 % ตรา P.X. UNION
3. น้ำสัปปะรด 25 % ตรา P.X. UNION

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง
2. ชุดสร้างความร้อน Ohmic heating ระบบสวิตช์
3. ชุดสร้างความร้อน Ohmic heating ระบบต่อเนื่อง
4. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)
5. สายเทอร์โมคัปเปิล
6. เครื่องคอมพิวเตอร์
7. นาฬิกาจับเวลา
8. หม้อแปลงไฟฟ้า (Veriac - AC)
9. กระบอกตวง ขนาด 1000 มิลลิลิตร
10. เทอร์โมมิเตอร์

4.3 แนวทางการทดลอง

4.3.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลองโอห์มมิกระบบสวิตช์โดยอาศัยหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังนี้

- กำหนดค่าความเข้มของสนาม ไฟฟ้าสูงสุดในการทดลองนี้ที่ระดับความเข้มสนาม ไฟฟ้าที่ 30 โวลท์ / เซนติเมตร ซึ่งได้จากสมการ

$$T = \frac{1}{B} \left\langle (A + BT_0) \left\{ \text{Exp} \frac{E^2 t B}{C_p \rho} \right\} - A \right\rangle$$

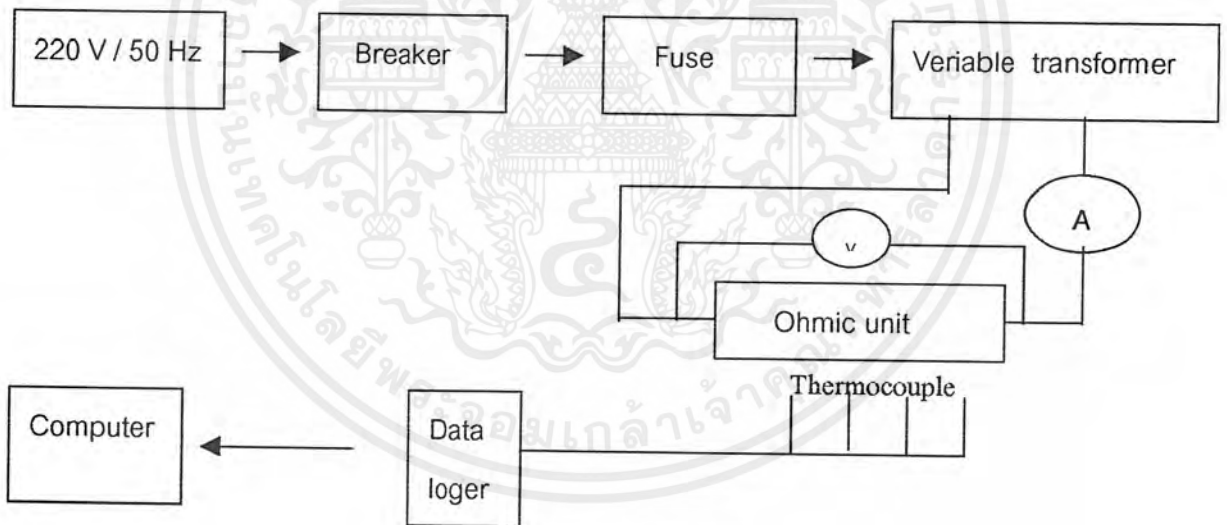
ซึ่งเป็นสมการการประมาณความร้อน จากกระบวนการให้ความร้อนในชุดสร้างความร้อน โอห์มมิกระบบสวิตช์นี้

- คำนวณความยาวของชุดสร้างความร้อนโอห์มมิกระบบสถิติ โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด} &= 30 \quad \text{โวลต์/เซนติเมตร} \\ \text{ค่าแรงดันไฟฟ้าของ Power supply} &= 220 \quad \text{โวลต์} \\ \text{ระยะห่างสูงสุดระหว่างขั้ว} &= 220/30 \\ &= 7.33 \quad \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$

อุปกรณ์สร้างความร้อนโอห์มมิกระบบสถิติ

ออกแบบเป็นท่ออคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 mm โดยมีความยาวประมาณ 7 cm ที่ปลายทั้งสองข้างมีแผ่นอิเล็กโทรดและระหว่างท่อ เจาะรูขนาด 2.5 mm จำนวน 3 รูเพื่อวัดกระจายอุณหภูมิโดย Thermocouple ชนิด K- type และเปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลโดยเครื่อง PC- Computer โดยมีแผนภาพแสดงการทำงานของชุดสร้างความร้อน ohmic heating ระบบสถิติ ดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพชุดเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ของ Ohmic heating ระบบสถิติ

การศึกษาการทำงานของเครื่องสร้างความร้อนโอห์มมิกระบบสถิติ

1. ทดสอบความถูกต้องของชุดทดลอง Ohmic heating ระบบสถิติที่สร้างขึ้นโดยการทดสอบด้วยสารละลายสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ในเครื่อง Ohmic ทำการให้ความร้อนด้วยกระบวนการ Ohmic จากอุณหภูมิห้องไปถึง 80 องศาเซลเซียส จากนั้นบันทึกผลของค่ากระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดการทดลอง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีอยู่จากเอกสารอ้างอิง

2. ศึกษาผลความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างอาหารการทดลอง ทำโดยให้ความร้อนกับสารละลายเกลือ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าต่างๆ คือ 6,7 และ 8 โวลต์/เซนติเมตร จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3. ศึกษาการนำไฟฟ้าของอาหารตัวอย่าง โดยชุดสร้างความร้อน Ohmic heating ระบบสถิตย์ โดยการทดลองนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้พร้อมดื่มทั้งสองชนิดทำการทดลองโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างอาหารจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 องศาเซลเซียส

แนวทางการวิเคราะห์ผล

1. นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง ด้วยสารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ มาคำนวณค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นหาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิที่เวลาใดๆ โดยวิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อจะนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง เพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดสร้างความร้อน Ohmic heating ระบบสถิตย์

2. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาในการให้ความร้อนที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าต่างๆ (6,7 และ 8 V/cm) เพื่อศึกษาว่าความเข้มข้นไฟฟ้ามีผลต่อเวลาในการให้ความร้อน โดยชุดสร้างความร้อน Ohmic heating ระบบสถิตย์

3. นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองด้วยอาหารเหลว ทั้ง 2 ชนิด มาคำนวณค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นหาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิที่เวลาใดๆ โดยวิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อจะนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับการทดลอง

4.3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง (Continuous ohmic heater)

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบสถิตย์มาออกแบบชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง โดยชุดทดลองระบบต่อเนื่อง มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 3 ส่วน คือ

- ตัวเครื่อง (Chamber) ออกแบบ เป็น ท่อสี่เหลี่ยม ขนาด 8 x 5 x 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 6 มิลลิเมตร และ ติดแผ่นอิเล็กโตรด ขนาด 14 x 6 เซนติเมตร² โดยที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโตรด 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบป้อนของเหลว ออกแบบเพื่อใช้ในการป้อนตัวอย่างอาหารเหลวเข้าสู่ตัวเครื่องที่ทำให้ความร้อน โดยป้อนตัวอย่างอาหารเหลวด้วยอัตราการไหลที่ต่ำมาก (ถ้าใช้ปั๊มจะไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้) ใช้หลักการของวิชากลศาสตร์ของไหลในการจัดวางตำแหน่งของถังบรรจุตัวอย่างกับตำแหน่งทางออกของตัวอย่างให้อยู่ต่างระดับกัน และสามารถปรับแต่งระดับความสูงของเหลวได้ อาศัยหลักสมการของ Bernoulli Equation คำนวณหาค่าอัตราการไหลของตัวอย่างอาหารเหลว ที่ไหลเข้าในชุดทดลองโอห์มมิก ระบบต่อเนื่อง
- ระบบไฟฟ้ากำลังออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองชุดทำความร้อนโอห์มมิก ระบบต่อเนื่องเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่ขนาดกำลัง 1000 วัตต์ โดยมีค่าแรงดันอินพุทที่ 220 โวลต์ และมีค่าแรงดันเอาท์พุทที่ 40 โวลต์ และกระแส 25 แอมแปร์

2. ศึกษาผลการทำความร้อนของชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างๆ โดยสารละลายสารละลายน้ำเกลือใช้อัตราการไหลที่ 0.2 l/min , 0.133 l/min และ 0.1 l/min ส่วนตัวอย่างอาหารเหลวที่เป็นน้ำผลไม้ ใช้อัตราการไหลที่ 0.06 l/min , 0.04 l/min และ 0.02 l/min วัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ ตำแหน่งต่างๆ ในเครื่องโอห์มมิกคือ ที่ระดับ ความสูง 5 , 9 และ 13 เซนติเมตร

3. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหารหลังผ่านเครื่องทำความร้อนโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง โดยการวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างอาหาร และนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวหลังที่ตัวอย่างอาหารผ่านเครื่องทำความร้อน Ohmic ระบบต่อเนื่อง โดยใช้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอาหาร ค่าความเป็นกรด - เบส (วัดโดยใช้เครื่อง pH scale) และเปอร์เซ็นต์ความหวาน เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

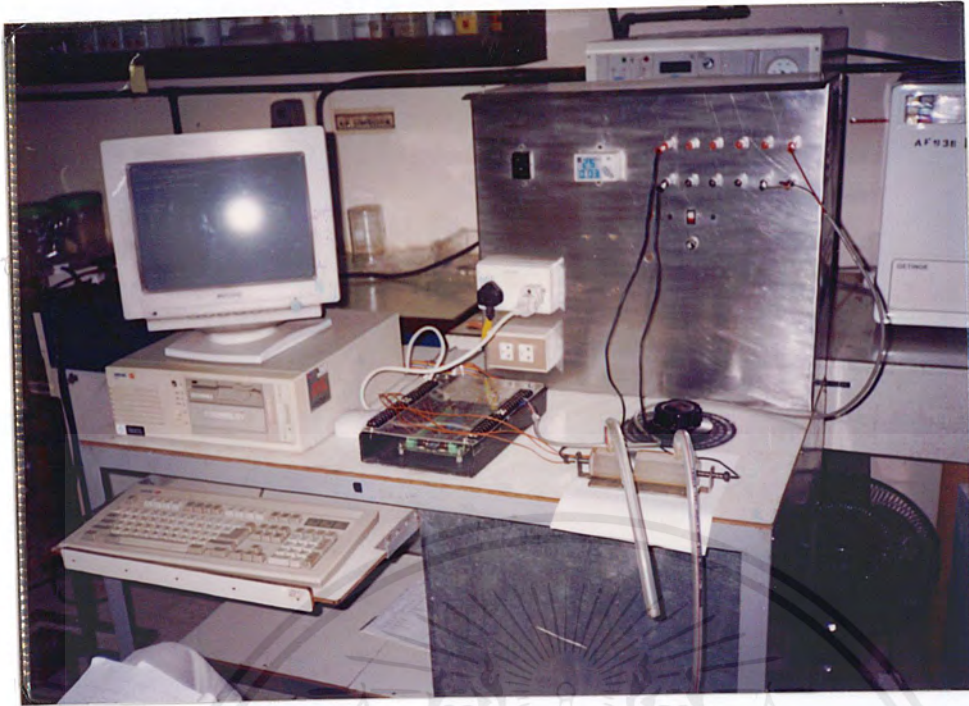
แนวทางการวิเคราะห์ผล

1. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในระหว่างการทำงานของชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังกล่าว (ความสูง 5 เซนติเมตร , 9 เซนติเมตร และ 13 เซนติเมตร) ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยสารละลายสารละลายน้ำเกลือใช้อัตราการไหลที่ 0.2 , 0.133 และ 0.1 l/min ส่วนตัวอย่างอาหารเหลวที่เป็นน้ำผลไม้ใช้อัตราการไหลที่ 0.02 , 0.04 และ 0.06 l/min ตามลำดับ

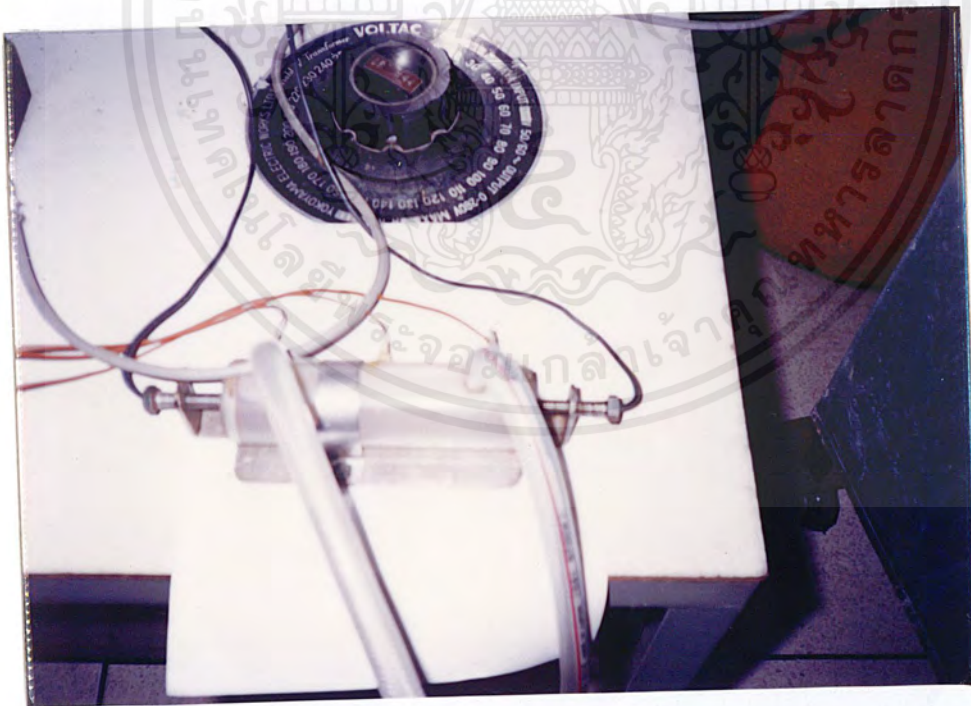
2. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป ของตัวอย่างอาหารเหลวหลังการทดลอง
เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพอาหารเหลวก่อนการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

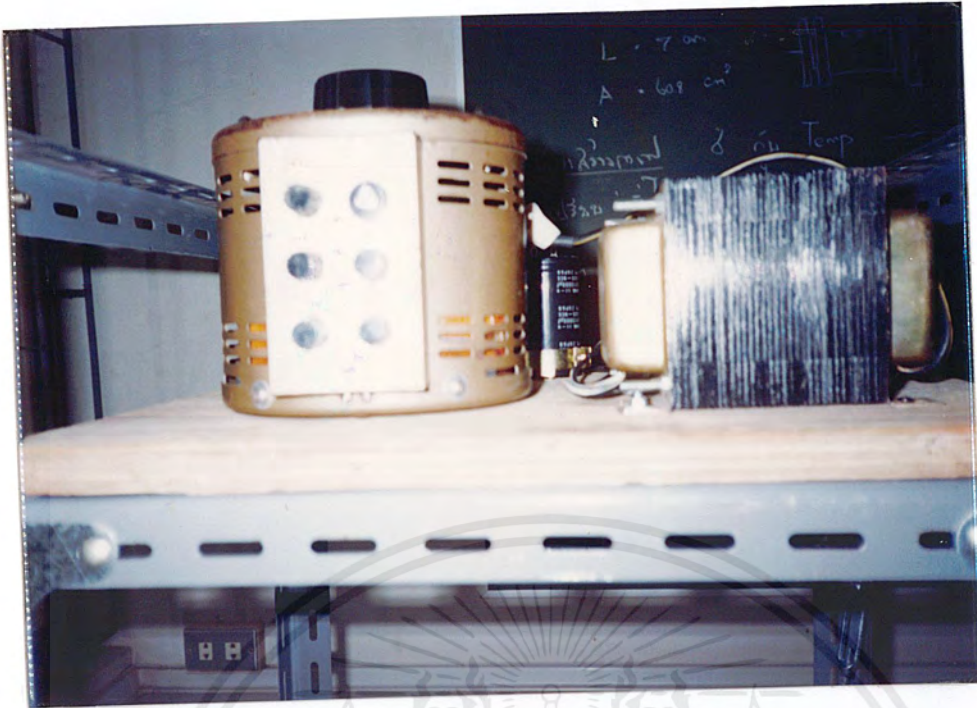


รูปที่ 4.2 ภาพเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารและวัดค่าการกระจายของอุณหภูมิ

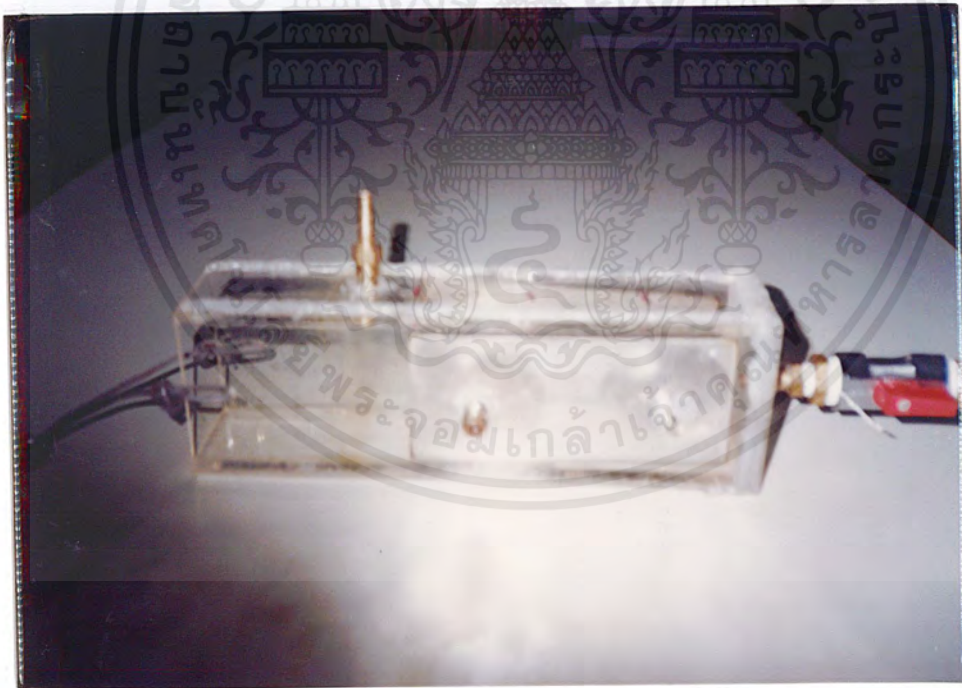


รูปที่ 4.3 ภาพชุดเซลล์สร้างความร้อน Ohmic แบบสถิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (หม้อแปลงไฟฟ้า)



รูปที่ 4.5 ชุดเซลล์สร้างความร้อน Ohmic แบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ผลการศึกษาเครื่องโอห์มมิครระบบสถิติ

5.1.1 ผลการศึกษาความถูกต้องของเครื่องโอห์มมิค

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบที่เปลี่ยนไปทุกๆ 10°C มาคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโดยใช้สมการที่ 3.1 แล้ว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1 – 5.2

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่ากระแสไฟฟ้า, I (amp)				ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, V (volt)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
40	3.05	3.01	3.02	3.027	29.00	28.80	29.10	28.967
50	3.40	3.42	3.45	3.423	28.00	28.20	28.50	28.233
60	3.96	3.91	3.97	3.947	27.80	28.00	27.60	27.800
70	4.42	4.40	4.39	4.403	27.70	27.80	27.50	27.667
80	4.81	4.79	4.84	4.813	26.90	27.00	27.20	27.033

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าน้ำเกลือ 0.1 M ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$I_{เฉลี่ย}$ (amp)	$V_{เฉลี่ย}$ (volt)	R (ohm)	σ (S/m)
40	3.027	28.967	9.570	1.451
50	3.423	28.233	8.247	1.684
60	3.947	27.800	7.044	1.972
70	4.403	27.667	6.283	2.211
80	4.813	27.033	5.616	2.473

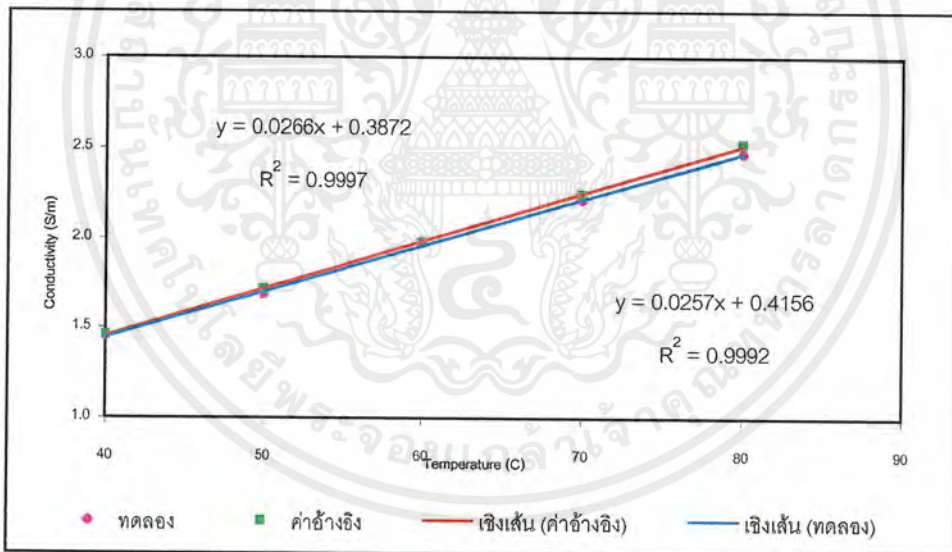
จากนั้นนำค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสารละลายน้ำเกลือมาวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าที่ได้จากการทดลองเทียบกับเอกสารอ้างอิง โดยแสดงการเปรียบเทียบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากการทดลองกับค่าการนำไฟฟ้าจากเอกสารอ้างอิงของสารละลายสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 M

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$\sigma_{\text{ทดลอง}}$ (S/m)	$\sigma_{\text{อ้างอิง}}$ (S/m)
40	1.451	1.458
50	1.684	1.713
60	1.972	1.977
70	2.211	2.242
80	2.473	2.523

นำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากตารางที่ 5.3 มาเขียนกราฟเพื่อเทียบหา % ความผิดพลาดได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าจากการทดลองกับค่าการนำไฟฟ้าจากเอกสารอ้างอิงของสารละลายสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 M

เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิงพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกันมีค่าต่ำกว่าเอกสารอ้างอิง [35] โดยเฉพาะในช่วงท้ายจะมีค่าแตกต่างมากกว่าในช่วงแรก ทั้งนี้เนื่องจากกราฟดังกล่าวได้มาจากการให้ความร้อนสารละลายสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 โวลต์/ซม. ซึ่งมีค่าต่ำ เพื่อต้องการให้การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 โวลต์/ซม. ซึ่งมีค่าต่ำ เพื่อต้องการให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเป็นไปโดยสะดวก แต่ก็มีผลทำให้ใช้เวลาในการให้ความร้อนนานขึ้นจนเกิดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ เนื่องจากไม่มีการหุ้มฉนวนและการสูญเสียความร้อนก็ยังเกิดขึ้นในส่วนของขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่นๆ ที่เป็นโลหะ ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนไป เมื่อนำค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิมาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยวิธีดลอยเชิงเส้น พบว่า

$$\text{สมการความสัมพันธ์จากการทดลอง คือ } \sigma = 0.02570T + 0.4156$$

$$\text{สมการความสัมพันธ์จากเอกสารอ้างอิง คือ } \sigma = 0.02659T + 0.3872$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหาได้จากการนำค่าความชันของทั้ง 2 สมการมาเปรียบเทียบกันดังนี้

$$\% \text{ ความผิดพลาด} = \left[\frac{0.02659 - 0.02570}{0.02570} \right] * 100 = 3.46 \%$$

5.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแบบสถิตย์

การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนของสารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 5.2 – 5.4 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนพบว่า เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของสารละลายเกลือเพิ่มจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 °C ลดลง คือ ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 6 V/cm ใช้เวลาในการให้ความร้อน 21.58 min เมื่อเปลี่ยนเป็นค่า 7 V/cm และ 8 V/cm เวลาที่ใช้ลดลงเหลือ 6.41 min และ 3.75 min ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากเวลาที่ใช้ความเข้มข้นไฟฟ้า 6 V/cm ถึง 3-6 เท่า ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย เพราะว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้สามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ายังมีผลต่อกระจายอุณหภูมิของการสร้างความร้อนระบบ Ohmic Heating เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าสูงขึ้น การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างอาหาร มีแนวโน้มในการเพิ่มอุณหภูมิ เท่ากันทุกจุด วิเคราะห์ได้จากลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นในแต่ละความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ 6 V/cm ลักษณะกราฟที่ได้ มีการกระจายของอุณหภูมิมากพอสมควร แต่ข้อมูลโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเป็น ค่า 7 V/cm การกระจายของอุณหภูมิจะลดลงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันชัดเจนขึ้น และเมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 8 V/Cm การกระจายของอุณหภูมิจะลดลงอีกและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันชัดเจนมากขึ้น ตามลำดับ

5.1.3 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของอาหารตัวอย่าง

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบที่เปลี่ยนไปทุก ๆ $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มาคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มและน้ำสับปะรดโดยใช้สมการที่ 3.1 แล้ว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4–5.7 ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างๆเมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงดังรูปที่ 5.5 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำส้ม 25 % และน้ำสับปะรด 25 % โดยตัวอย่างอาหารแต่ละชนิดมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าของน้ำสับปะรด 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่ากระแสไฟฟ้า, I (amp)				ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, V (volt)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
40	2.61	2.60	2.55	2.587	80.00	78.00	78.0	78.667
50	3.00	3.01	2.99	3.000	79.80	77.90	77.8	78.500
60	3.39	3.40	3.37	3.387	78.50	77.00	76.9	77.467
70	3.79	3.78	3.74	3.770	78.00	76.00	76.0	76.667
80	4.21	4.23	4.19	4.210	77.00	75.80	75.0	75.933

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าน้ำสับปะรด 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$I_{\text{เฉลี่ย}}$ (amp)	$V_{\text{เฉลี่ย}}$ (volt)	R (ohm)	σ (S/m)
40	2.587	78.667	30.412	0.457
50	3.000	78.500	26.167	0.531
60	3.387	77.467	22.874	0.607
70	3.770	76.667	20.336	0.683
80	4.210	75.933	18.036	0.770

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าของน้ำส้ม 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์

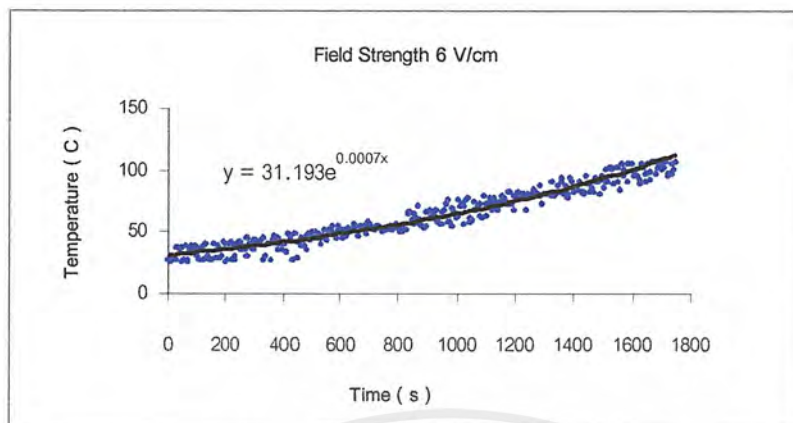
อุณหภูมิ (°C)	ค่ากระแสไฟฟ้า, I (amp)				ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, V (volt)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
40	2.58	2.57	2.60	2.583	75.00	76.00	76.20	75.733
50	3.04	3.05	3.02	3.037	75.00	75.90	75.90	75.600
60	3.43	3.41	3.49	3.443	74.00	75.00	74.50	74.500
70	3.97	3.96	4.01	3.980	73.50	74.00	74.00	73.833
80	4.4	4.3	4.50	4.400	72.00	71.80	73.00	72.267

ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าน้ำส้ม 25 % ความต่างศักย์ไฟฟ้า 80 โวลต์

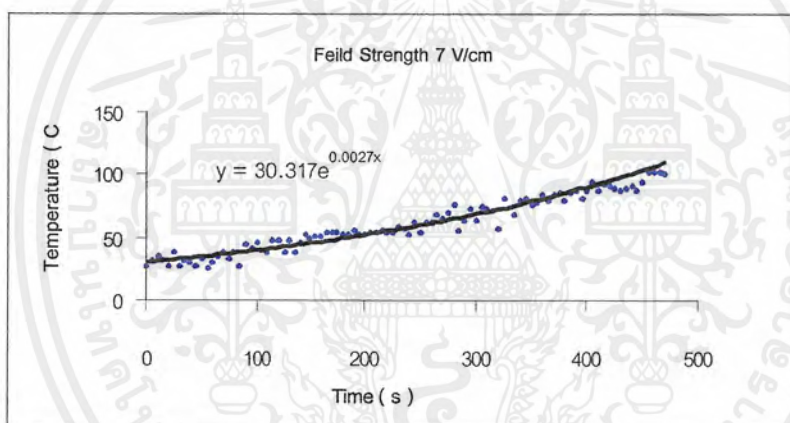
อุณหภูมิ (°C)	$I_{เฉลี่ย}$ (amp)	$V_{เฉลี่ย}$ (volt)	R (ohm)	σ (S/m)
40	2.583	75.733	29.316	0.474
50	3.037	75.600	24.896	0.558
60	3.443	74.500	21.636	0.642
70	3.980	73.833	18.551	0.749
80	4.400	72.267	16.424	0.846

ซึ่งความแตกต่างของค่าการนำไฟฟ้าในอาหาร Gupta และ Jindal [13] และ Palaniappan [16] ให้เหตุผลว่าเป็นผลมาจากองค์ประกอบค่านต่างๆ ของอาหารที่แตกต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพ ทางเคมีหรือส่วนผสมของสูตรอาหารนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบทางเคมีคือ ส่วนประกอบที่เป็นอออนของกรดหรือเกลือที่มีผลโดยตรงต่อการนำไฟฟ้าของอาหาร นั่นคือเมื่อมีอออนอยู่ในปริมาณมาก อาหารนั้นก็สมารถนำไฟฟ้าได้ดีและในทางตรงกันข้าม ถ้าอาหารนั้นมีปริมาณอออนอยู่น้อยหรือมีปริมาณสารที่ไม่ใช่อออน เช่น น้ำตาลและน้ำมันผสมอยู่ก็จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าลดลง ซึ่งนอกจากปริมาณอออนที่นำไฟฟ้าแล้วปริมาณของแข็งยังอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าได้

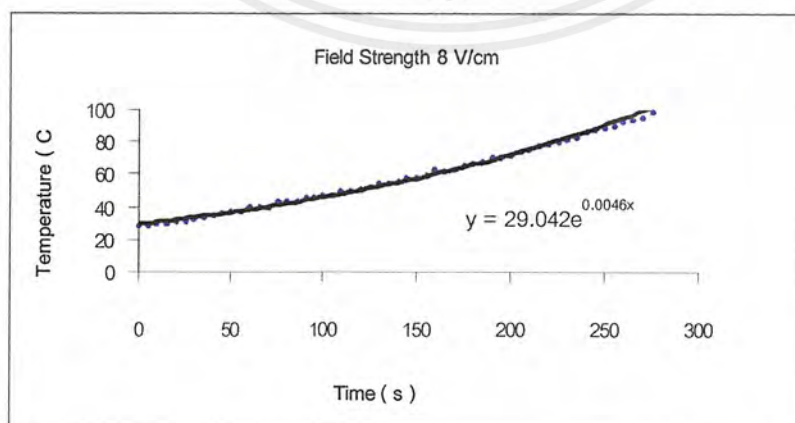
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของ NaCl 0.1 M เมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้า 6 V/cm



รูปที่ 5.3 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของ NaCl 0.1 M เมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้า 7 V/cm

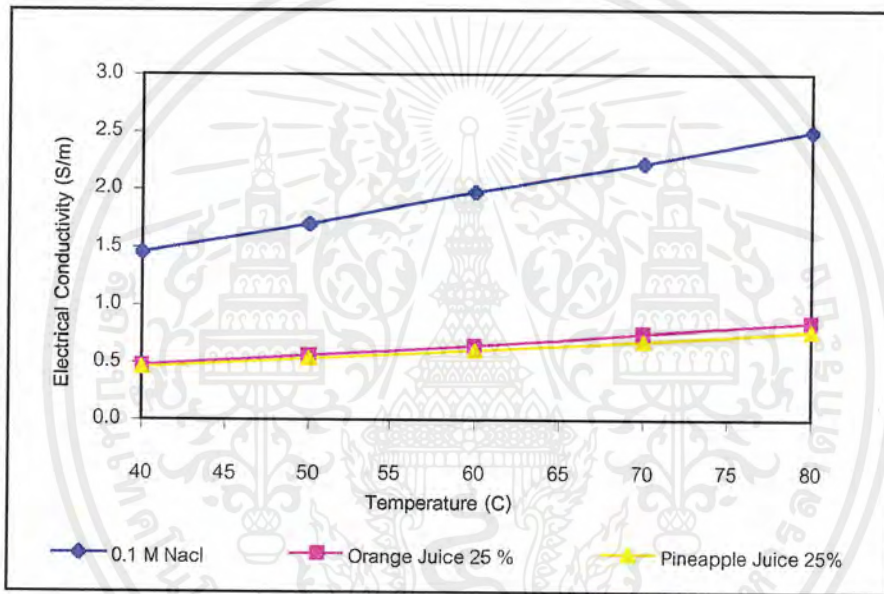


รูปที่ 5.4 แสดงผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของ NaCl 0.1 M เมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้า 8 V/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิของตัวอย่างอาหารต่างๆ

ตัวอย่างอาหาร	สมการความสัมพันธ์
สารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์	$\sigma = 0.0257T + 0.4156$
น้ำส้ม 25 % ตรา P.X. UNION	$\sigma = 0.0093T + 0.0929$
น้ำสับปะรด 25 % ตรา P.X. UNION	$\sigma = 0.0078T + 0.1422$



รูปที่ 5.5 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 ผลการศึกษาเครื่องโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง

5.2.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

ผลการทำความร้อนของเครื่อง Ohmic heating ระบบต่อเนื่องที่อัตราไหลต่างๆ กัน วัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเครื่อง Ohmic heating และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5.6 - 5.14

รูปที่ 5.6 - 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของสารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 molar ที่อัตราการไหล 0.1 , 0.133 และ 0.2 l/min ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหล 0.1 /min อุณหภูมิของสารละลายสารละลายน้ำเกลือที่วัดได้บริเวณส่วนกลางและส่วนปลายของชุดให้ความร้อนแบบ Ohmic จะสูงกว่าเมื่อใช้อัตราการไหล 0.133 l/min และ 0.2 l/min เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลายของชุดให้ความร้อนแบบ Ohmic จะสูงกว่าเมื่อใช้อัตราการไหล 0.133 l/min และ 0.2 l/min เนื่องจากการใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้เวลาที่สารตัวอย่างไหลผ่านชุดให้ความร้อนลดลง ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้บริเวณตำแหน่งต่างๆ ต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลที่ต่ำกว่า

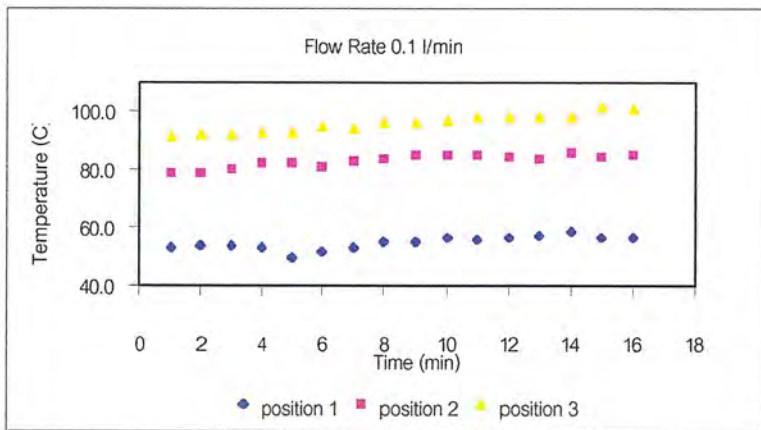
รูปที่ 5.9–5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 , 0.04 และ 0.06 l/min รูปที่ 5.12–5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 , 0.04 และ 0.06 l/min พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้น ผลที่ได้เป็นไปได้เป็นไปในทางเดียวกับสารละลายสารละลายน้ำเกลือเช่นกัน

5.2 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร

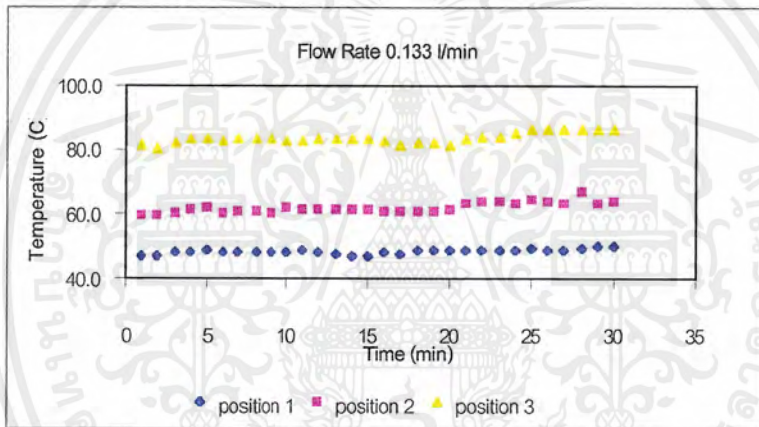
วัดค่าความหนาแน่น, ค่าความเป็นกรด-ด่าง และเปอร์เซ็นต์ความหวาน ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ก่อนที่จะทำไปให้ความร้อนโดย เครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่อง ที่อัตราไหล 0.133 ลิตร/นาที และทำการวัดคุณสมบัติดังกล่าวอีกครั้งหลังจากที่สารละลายเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ผ่านการให้ความร้อน โดยเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่องและทิ้งไว้ให้เย็นมาที่อุณหภูมิห้อง

วัดค่าความหนาแน่น, ค่าความเป็นกรด-ด่าง และเปอร์เซ็นต์ความหวานของน้ำส้ม 25 % และน้ำสับประรด 25 % ก่อนที่จะทำไปให้ความร้อน โดยเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่องที่อัตราไหล 0.04 ลิตร/นาที และทำการวัดคุณสมบัติดังกล่าวอีกครั้งหลังจากที่น้ำส้ม 25 % และ น้ำสับประรด 25 % ผ่านการให้ความร้อนโดยเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่องและทิ้งไว้ให้เย็นมาที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.9–5.11

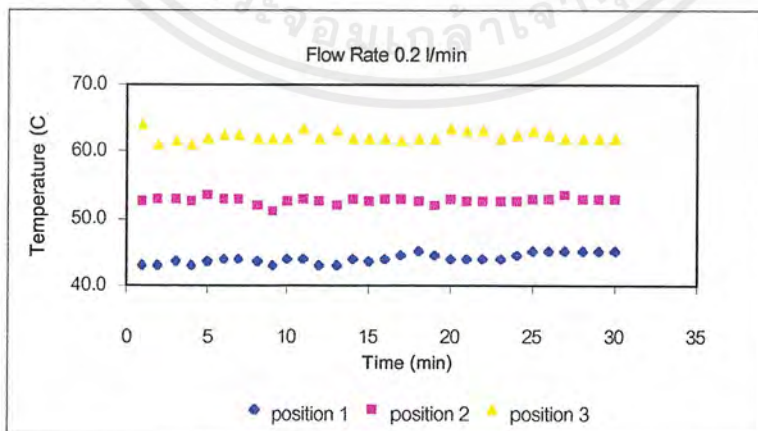
จากข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหารก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อน ดังในตารางที่ 5.9–5.11 พบว่าค่า pH มีค่าน้อยลง ค่าความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอาหารจากอุณหภูมิห้องถึง 80 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวอย่างอาหารสูญเสียองค์ประกอบของน้ำบางส่วน ทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และการที่ตัวอย่างอาหารสูญเสียองค์ประกอบของน้ำทำให้มีอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เป็นของแข็งมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix) ใช้หลักการหักเหของแสงที่ผ่านตัวอย่างอาหาร ถ้าอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เป็นของแข็งมีมากขึ้น ก็จะทำการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 5.6 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ NaCl 0.1 M ที่อัตราการไหล 0.1 l/min

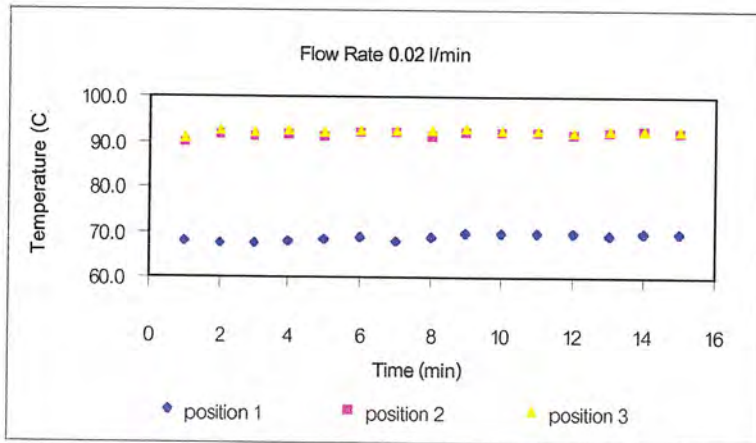


รูปที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ NaCl 0.1 M ที่อัตราการไหล 0.133 l/min

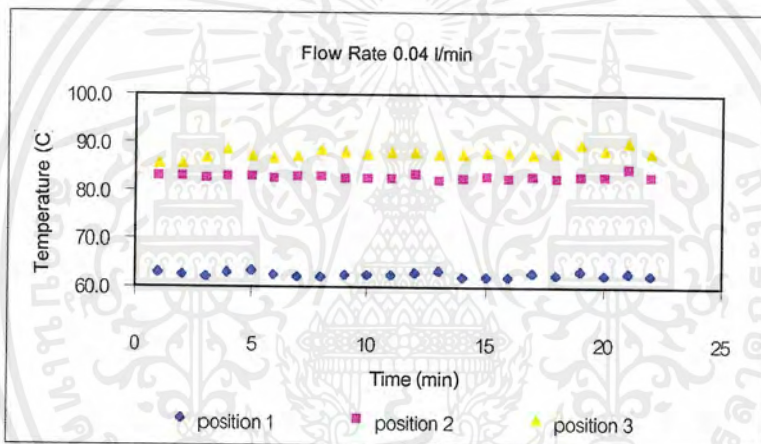


รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ NaCl 0.1 M ที่อัตราการไหล 0.2 l/min

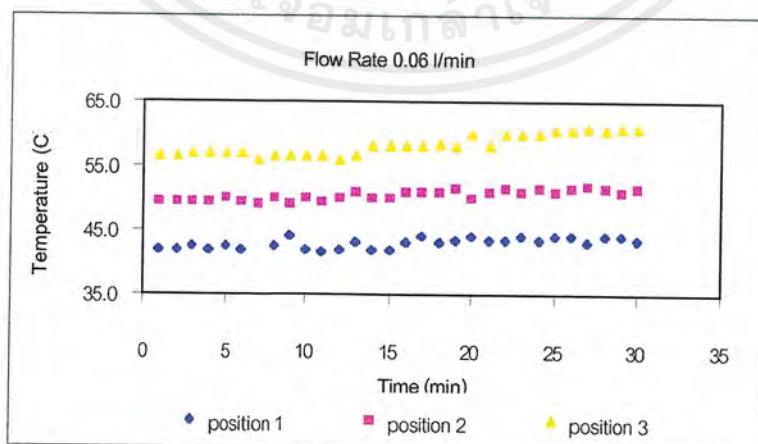
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 l/min

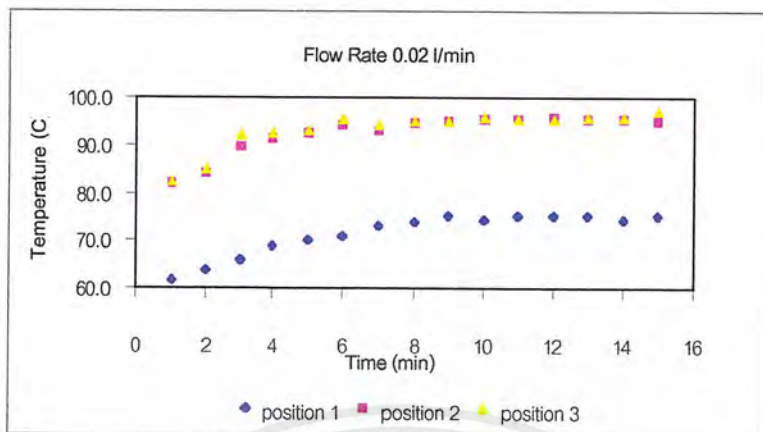


รูปที่ 5.10 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 l/min

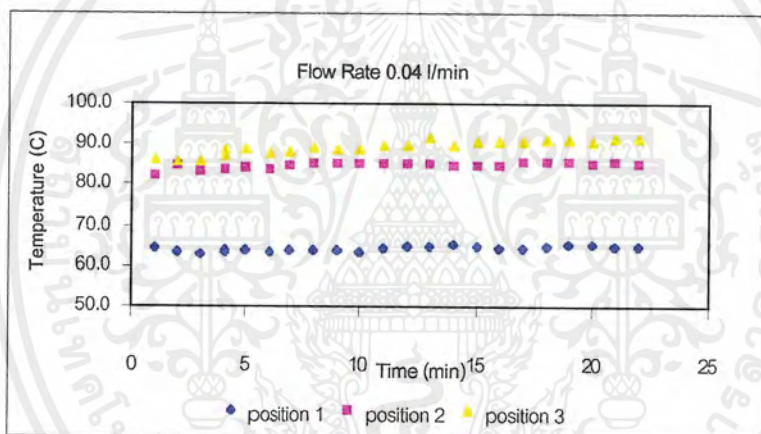


รูปที่ 5.11 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำสับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 l/min

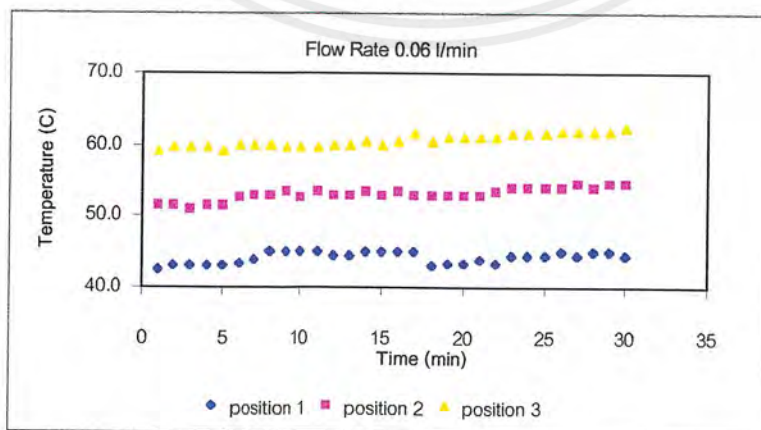
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 l/min



รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 l/min



รูปที่ 5.14 ผลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของน้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 l/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของสารละลายน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ อัตราการไหล 0.133 l/min หลังผ่านกระบวนการ Ohmic heating

	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร ก่อนให้ความร้อน	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร หลังให้ความร้อน
ความหนาแน่น (Kg/m ³)	1004.125	1009.822
pH	6.7	6.7
เปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix)	4.8	5.2

ตารางที่ 5.10 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของน้ำส้ม 25 % , อัตราการไหล 0.04 l/min หลังผ่านกระบวนการ Ohmic heating

	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร ก่อนให้ความร้อน	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร หลังให้ความร้อน
ความหนาแน่น (Kg/m ³)	1045.6	1051.3
pH	2.4	2.2
เปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix)	16.6	17.2

ตารางที่ 5.11 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของน้ำส้ม 25 % , อัตราการไหล 0.04 l/min หลังผ่านกระบวนการ Ohmic heating

	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร ก่อนให้ความร้อน	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหาร หลังให้ความร้อน
ความหนาแน่น (Kg/m ³)	1040.6	1044.3
pH	2.2	2.1
เปอร์เซ็นต์ความหวาน (% Brix)	16.6	17.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลองชุดทดลองโอห์มมิระบบสถิตย์

1. ชุดทดลองโอห์มมิระบบสถิตย์ที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดความร้อนโดยวิธีโอห์มมิต และสามารถใช้เป็นเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มาสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์จากเอกสารอ้างอิง (รูปที่ 5.1) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.46 % ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก แสดงว่าชุดทดลองโอห์มมิระบบสถิตย์ที่สร้างขึ้นมีค่าความถูกต้องและแม่นยำในระดับที่พอใจ

2. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยกระบวนการโอห์มมิตในการสร้างความร้อนแก่ตัวอย่างอาหารให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 องศาเซลเซียส คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ให้ และ คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร โดย

2.1 ผลของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิตทำให้ตัวอย่างอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง 80 องศาเซลเซียสได้โดยความเข้มสนามไฟฟ้าที่ให้แปรผันโดยตรงกับอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างอาหาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบได้กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ให้กับระบบ ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะใช้เวลาในการสร้างความร้อนน้อยกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับความเข้มสูงจะให้กำลังงานไฟฟ้ามากกว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระดับความเข้มต่ำ

2.2 ผลของค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาหาร ถ้าตัวอย่างอาหารมีค่าการนำไฟฟ้ามาก ยิ่งทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมิแนวโน้มที่มากขึ้น เนื่องจากการที่ตัวอย่างอาหารมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านตัวอย่างอาหารในปริมาณที่สูงเช่นกันและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างอาหารในปริมาณที่มาก ส่งผลให้กำลังงานที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงมากขึ้น ตัวอย่างทดลองที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด คือ สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ รองลงมาคือ น้ำส้ม 25 % และน้ำสับปะรด 25 % ซึ่งความแตกต่างของค่าการนำไฟฟ้าในอาหารแต่ละชนิดเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ของ สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ มีอัตราสูงมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำส้ม 25 % และน้ำสับปะรด 25 % ตามลำดับ

3. ค่าการกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างอาหาร ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ ของ สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ จะเกิดลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ เวลา ในรูปสมการ เอ็กโปเนนเชียล ดังรูปที่ 5.2–5.4 โดยมีรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์คือ

$$T = Ae^{\frac{E^2 t}{C_p \rho}} - B$$

เมื่อ A, B คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลอง หาค่าการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.1

T คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น จากการทำความร้อน

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งรูปแบบสมการที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ De Alwis และ Fryer สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวอย่างอาหารเนื้อเดียว ดังสมการที่ 3.6 แสดงว่าชุดทดลองโอห์มมิกระบบสถิติสามารถสร้างความร้อนแก่ตัวอย่างอาหาร ได้เช่นเดียวกับงานวิจัย ของ De Alwis และ Fryer แต่เมื่อนำสมการที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ De Alwis และ Fryer พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 30.54 % เนื่องจากการทดลองนี้ ทดลองที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ ในงานวิจัยของ Alwis และ Fryer กล่าวไว้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ จะใช้ได้ผลดีที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 และ 30 V/cm เพราะที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะต่ำและใช้เวลาในการทำความร้อนนาน ทำให้ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการโอห์มมิกสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมจำนวนมาก อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก

4.ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของสมการเส้นตรงและเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของแรงจุดการเคลื่อนที่ของอิออน เนื่องจากความร้อนไปทำลายพันธะหรือแรงที่ยึดเหนี่ยว

6.2 สรุปผลการทดลองชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง

1. การออกแบบชุดทดลองโอห์มมิกแบบต่อเนื่อง โดยใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 8 V/cm จากชุดทดลองโอห์มมิกระบบสถิติ ร่วมกับสมการการเคลื่อนที่ เพื่อใช้คำนวณหาค่าอัตราการไหลของตัวอย่างอาหาร ชุดทดลองโอห์มมิกแบบต่อเนื่องนี้ สามารถให้ความร้อนกับตัวอย่างอาหารตามสภาวะที่กำหนด สารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ป้อนเข้าสู่ชุดทดลองโอห์มมิกที่อัตราการไหล 0.133 l/min สามารถวัดค่าความร้อนที่บริเวณปากทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อุณหภูมิ 86 องศาเซลเซียส ซึ่งตรงตามสภาวะที่กำหนด และเมื่อป้อนที่อัตราการไหล 0.1 และ 0.21/min วัดค่าความร้อนที่บริเวณปากทางออก 97 และ 64 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

น้ำส้ม 25 % และ น้ำสัปปะรด 25 % ป้อนเข้าสู่ชุดทดลองที่อัตราการไหล 0.04 l / min สามารถวัดค่าความร้อนที่บริเวณปากทางออกได้อุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส ซึ่งตรงตามสภาวะที่กำหนด และเมื่อป้อนที่อัตราการไหล 0.02 และ 0.06 l / min วัดค่าความร้อนที่บริเวณปากทางออกได้ 92.5 และ 61 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงว่าชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่องนี้ สามารถควบคุมการสร้างความร้อนได้โดยการควบคุมอัตราการไหลของตัวอย่าง

2. วัดค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของชุดทดลองโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง พบว่า สารละลายน้ำเกลือที่อัตราการไหล 0.133 l/min และ น้ำส้ม น้ำสัปปะรด ที่อัตราการไหล 0.04 l/min มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1-2 องศาเซลเซียส แสดงว่าการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ แต่ถ้าทำการทดลองเป็นเวลานานค่าอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่แผ่นเหล็กเกิดความร้อนสะสมในปริมาณที่มาก ทำให้ความร้อนสะสมนี้ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมและตัวอย่างอาหารเหลว ส่งผลทำให้ตัวอย่างอาหารเกิดความร้อนมากขึ้นที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ

3. คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอาหารหลังจากผ่านกระบวนการทำความร้อนระบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอาหารหลังจากผ่านกระบวนการทำความร้อนระบบโอห์มมิค จะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการทำความร้อนระบบโอห์มมิค จะทำให้ตัวอย่างอาหารร้อนถึงจุดเกิดไอ ทำให้ตัวอย่างอาหารสูญเสียองค์ประกอบของน้ำไปปริมาณหนึ่ง ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการที่ตัวอย่างอาหารสูญเสียองค์ประกอบของน้ำไป ทำให้ตัวอย่างอาหารมีองค์ประกอบของแข็งมากขึ้น ส่งผลให้การวัดค่าเปอร์เซ็นต์บริกซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ค่ามากขึ้น เพราะหลักการทำงานของเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์บริกซ์จะใช้หลักการหักเหของสารละลายที่เกิดจากปริมาณของแข็งที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างอาหาร เมื่อตัวอย่างอาหารมีองค์ประกอบของแข็งมากขึ้นจะทำให้การหักเหแสงได้มากขึ้น เมื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์บริกซ์จะได้ผลออกมาในแนวโน้มที่มากขึ้น

ตัวอย่างอาหารอาหารที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิค นอกจากองค์ประกอบของน้ำจะลดลงแล้ว ความร้อนที่เกิดขึ้นจะไปกระตุ้นให้ตัวอย่างอาหารมีการแตกตัวของไอออนมากขึ้น เมื่อตัวอย่างอาหารมีปริมาณไอออนมาก ก็จะทำให้ตัวอย่างอาหารมีความเป็นกรดมากขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

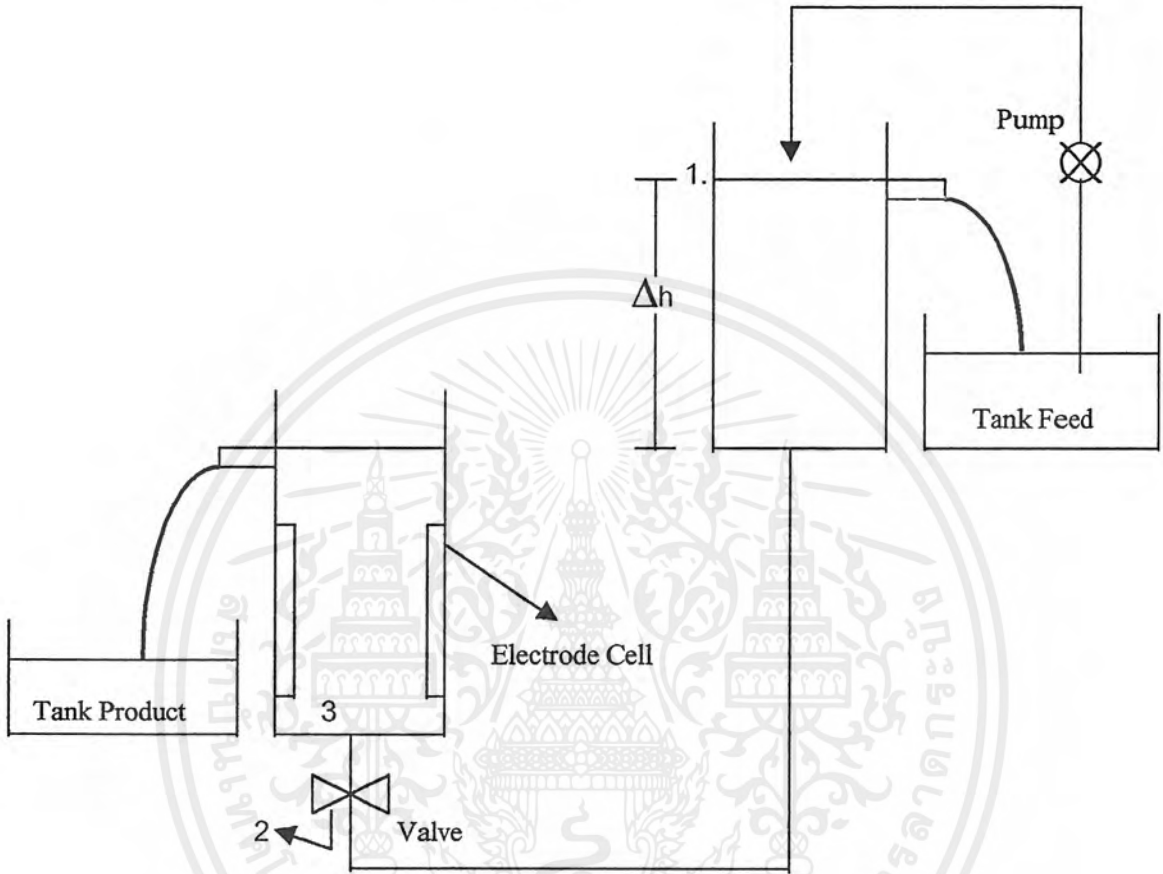
1. ชุดสร้างความร้อนระบบโอห์มมิก ควรออกแบบให้สามารถป้องกันการรั่วซึมของผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถทนความร้อนได้สูงเป็นระยะเวลานาน
2. การเลือกชนิดและขนาดของโลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด จะต้องมียุคสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดีและทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด ทนทานต่อการสึกกร่อน โดยอาจใช้โลหะต่างๆไปทำการเคลือบที่ผิวด้วยโลหะที่มีคุณสมบัติที่ดี
3. ในการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ควรใช้เครื่องมือวัดที่สามารถบันทึกค่าได้อย่างต่อเนื่องและเป็นระบบอัตโนมัติ เพื่อความสะดวกและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล
4. ควรศึกษาตัวอย่างอาหารที่มีชิ้นอนุภาค (Particle mixed) ในสารละลาย เนื่องจากเป็นจุดเด่นของการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก
5. ควรศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกร่วมกันหลายๆ ตัว เช่น ค่าการนำไฟฟ้า รูปร่างและปริมาณของอนุภาค ฯลฯ เพื่อจะได้ออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

หลักการทํางานของระบบป้อนตัวอย่างอาหาร



รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงระบบการป้อนตัวอย่างอาหาร

หลักการทํางานของระบบป้อนตัวอย่างอาหาร

หลักการทํางานของระบบป้อนตัวอย่างอาหาร โดยการจํัดตำแหน่งให้เกิดความแตกต่างของระดับของเหลวระหว่างถัง feed และ เซลล์ความร้อน และผลเนื่องจากระดับของเหลวต่างกันนี้ สามารถคำนวณความเร็วที่เกิดขึ้นของการไหลในท่อของของเหลวโดยใช้หลักสมการเบอร์นูลลี

$$P_1 + \rho gh_1 + \rho g \frac{v_1^2}{2} = P_2 + \rho gh_2 + \rho g \frac{v_2^2}{2} + f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g}$$

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า

1.ของเหลวภายในท่อไม่มีการสูญเสียแรงดันเนื่องจากความฝืดของผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(f \frac{L v^2}{D 2g} = 0 \right)$$

2. ของเหลวภายในท่อไม่มีการสูญเสียแรงดันเนื่องจากปากทางเข้าและปากทางออก

$$\left(\sum k \frac{v^2}{2g} = 0 \right)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าความเร็วได้จากสมการ

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งที่ 2 จะใช้ ball valve ควบคุมการไหลของของเหลวที่เข้า Ohmic cell สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการการไหลอย่างต่อเนื่องได้ดังนี้

$$A_3 V_3 = A_2 V_2$$

$$V_3 = \frac{A_2}{A_3} * V_2$$

เมื่อ V_2 = ความเร็วในการไหลภายในท่อที่ตำแหน่ง 2

A_2 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ

A_3 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของ Ball valve

เมื่อคำนวณหา V_3 ได้ก็คือ ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่าน Cell Ohmic จากนั้นก็สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลผ่าน Ohmic Cell ได้จาก

$$\dot{m} = \rho v A$$

โดยที่ \dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg / min)

ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่างอาหาร (kg / cm³)

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (cm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

หลักการคำนวณเพื่อหาอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองเครื่อง Ohmic ระบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในเครื่อง Ohmic แบบสถิตย์ โดยใช้ตัวอย่างสารละลายสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ความหนาแน่น $1.004125 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$) พบว่าในการให้ความร้อนสารละลายตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4.18 นาที โดยมีระยะการไหลของตัวอย่าง 17 ซม และท่อ มีพื้นที่หน้าตัด 32 ซม^2

จากสมการการเคลื่อนที่

$$S = vt$$

โดย S = ระยะการไหลของตัวอย่าง (cm)

v = ความเร็วในการไหล (cm/min)

t = เวลา (min)

$$v = \frac{17}{4.18} = 4.06 \text{ cm/min}$$

จาก

$$\dot{m} = \rho v A$$

โดยที่ \dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/min)

ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/cm³)

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (cm²)

$$\dot{m} = 1004.125 \times 10^{-3} \times 4.06 \times 32$$

$$= 0.1301 \text{ (lit/min)}$$

จากการคำนวณจะได้อัตราการไหลที่สารละลายเกลือไหลผ่านเครื่องให้ความร้อนแบบ Ohmic ระบบต่อเนื่องและร้อนขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 โวลต์/ซม. คือ 0.13 ลิตร/นาที ดังนั้นในการทดลองจึงกำหนดค่าอัตราการไหลเบื้องต้นของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายสารละลายน้ำเกลือเป็น 0.13 ลิตร/นาทีก่อน และกำหนดค่าทดลองขึ้นอีก 2 ค่า โดยให้มีทั้งในทางลดและเพิ่มขึ้นคือ 0.1 และ 0.2 ลิตร/นาทีก่อน

การคำนวณหาอัตราการไหลที่น้ำส้มและน้ำสับประคไหลผ่านเครื่องให้ความร้อนแบบ Ohmic ระบบต่อเนื่องและร้อนขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึง 80 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 โวลต์/ซม. ก็ทำเช่นเดียวกับสารละลายสารละลายน้ำเกลือ ดังนั้นในการทดลองจึงกำหนดค่าอัตราการไหลเบื้องต้นของน้ำส้มและน้ำสับประคที่เหมาะสมคือ ที่อัตราการไหล 0.02, 0.04 และ 0.06 ลิตร/นาทีก่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วิธีการเตรียมตัวอย่างในการทดลอง

ก.1 สารละลายน้ำเกลือ [35]

น้ำเกลือและภาชนะที่ใช้ในการเตรียมสารไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อคั่งน้ำออกจากเกลือและภาชนะที่ใช้ในการเตรียมสาร ชั่งน้ำหนักสารด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม โดยชั่งน้ำหนักสาร 5.84 กรัม สำหรับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หลังจากนั้นเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Demineral water) จนได้ปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร โดยขั้นตอนการเตรียมจะเตรียมที่อุณหภูมิห้อง

ก.2 น้ำส้มและน้ำสับประค

น้ำส้มที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำส้ม ตรา P.X.UNION ประกอบไปด้วย น้ำส้มคั้น 25 % น้ำตาล 10.7 % และซิทริกแอซิด 0.126 % น้ำสับประคที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำสับประค ตรา P.X.UNION ประกอบไปด้วย น้ำสับประค 25 % น้ำตาล 10.7 % และซิทริกแอซิด 0.126 %

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลอุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของตัวอย่างชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ง.1 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 6 V/cm

Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)
0	27.167	160	41.397	320	44.559	480	47.290	635	51.171
5	26.304	165	29.467	325	27.167	485	49.447	640	51.746
10	30.617	170	39.385	330	45.997	490	43.984	645	57.496
15	30.185	175	35.791	335	31.335	495	50.597	650	52.321
20	27.167	180	29.467	340	39.960	500	45.422	655	55.915
25	27.167	185	31.623	345	41.397	505	45.709	660	47.722
30	36.797	190	42.547	350	39.960	510	49.878	665	55.915
35	37.372	195	41.397	355	27.167	515	45.566	670	55.484
40	35.360	200	26.317	360	43.984	520	45.709	675	53.903
45	26.736	205	27.167	365	45.997	525	49.159	680	53.471
50	36.797	210	40.247	370	47.147	525	49.159	685	55.771
55	27.167	215	41.972	375	45.709	530	40.966	690	49.303
60	39.097	220	28.317	380	45.997	535	45.422	695	59.221
65	27.167	225	41.397	385	36.223	540	47.147	700	56.490
70	26.879	230	27.167	390	40.247	545	51.459	705	53.759
75	35.360	235	31.623	395	36.223	550	47.000	710	53.040
80	39.672	240	40.247	400	42.835	555	44.559	715	51.746
85	39.097	245	43.122	405	40.678	560	52.321	720	54.621
90	36.223	250	43.122	410	34.066	565	52.321	725	54.190
95	39.672	255	36.366	415	48.297	570	55.196	730	55.340
100	31.048	260	38.954	420	44.272	575	51.028	735	53.759
105	37.947	265	36.366	425	47.147	580	49.447	740	50.740
110	27.167	270	45.997	430	27.167	585	46.428	745	51.171
115	35.360	275	31.767	435	48.297	590	52.178	750	52.896
120	38.522	280	40.247	440	29.467	595	55.627	755	52.896
125	27.167	285	37.804	445	42.978	600	52.896	760	52.753
130	41.397	290	44.559	450	42.260	605	52.465	765	52.321
135	30.617	295	35.360	455	46.284	610	45.422	770	55.340
140	28.317	300	44.559	460	39.087	615	52.609	775	51.746
145	27.167	305	41.253	465	43.984	620	46.859	780	53.471
150	27.167	310	40.678	470	39.529	625	53.184	785	53.040
155	39.960	315	41.397	475	36.366	630	50.597	790	56.490

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)
795	54.478	980	70.72	1190	68.564	1375	81.357	1560	105.793
800	53.759	985	54.765	1195	80.494	1380	78.913	1565	96.018
805	51.315	990	67.558	1200	78.195	1385	94.294	1570	101.193
810	51.171	995	61.665	1205	82.794	1390	91.994	1575	99.181
815	54.046	1000	63.821	1210	78.051	1395	82.363	1580	91.275
820	54.478	1005	75.895	1215	80.494	1400	82.363	1585	105.793
825	51.890	1010	71.295	1220	82.219	1405	84.088	1590	105.793
830	66.695	1015	74.17	1225	81.644	1410	85.382	1595	105.793
835	64.827	1020	57.065	1230	79.345	1415	90.700	1600	99.181
840	66.695	1050	60.515	1235	68.564	1420	90.556	1605	96.162
845	61.090	1055	74.745	1240	81.644	1425	83.513	1610	101.624
850	57.640	1060	68.839	1245	80.494	1430	82.363	1615	95.875
855	65.402	1065	68.995	1250	78.195	1435	82.076	1620	89.263
860	62.096	1070	71.583	1255	80.782	1440	96.593	1625	92.137
865	71.295	1075	63.821	1260	85.094	1445	89.406	1630	105.793
870	60.371	1080	74.170	1265	81.644	1450	83.519	1635	103.349
875	57.065	1085	61.665	1270	79.345	1455	89.406	1640	98.318
880	55.915	1090	79.920	1275	82.219	1460	87.107	1645	91.850
885	53.759	1095	74.170	1280	87.394	1465	83.513	1650	106.655
890	54.621	1100	63.964	1285	80.494	1470	91.275	1655	98.875
895	66.695	1105	74.170	1290	73.451	1475	95.156	1660	92.137
900	66.695	1110	79.057	1295	82.076	1480	91.275	1665	108.380
905	68.995	1115	68.995	1300	81.788	1485	82.219	1670	107.518
910	61.521	1120	74.889	1305	81.644	1490	95.443	1675	106.943
915	61.233	1125	78.626	1310	82.219	1495	93.000	1680	97.887
920	65.545	1130	71.870	1315	81.357	1500	86.819	1685	103.493
925	68.995	1135	75.032	1320	80.494	1505	101.193	1690	108.093
930	60.371	1140	68.564	1325	91.994	1510	90.556	1695	101.624
935	58.215	1145	74.745	1330	80.638	1515	91.850	1700	106.368
940	57.496	1150	80.494	1335	82.219	1520	102.343	1705	102.487
945	57.065	1155	80.494	1340	87.538	1525	102.343	1710	106.943
950	67.27	1160	78.195	1345	82.363	1530	101.193	1715	98.462
955	68.995	1165	75.032	1350	83.082	1535	89.406	1720	96.162
960	73.595	1170	82.794	1355	94.294	1540	103.493	1725	97.312
965	75.895	1175	73.164	1360	91.994	1545	91.562	1730	97.312
970	59.365	1180	82.794	1365	80.926	1550	103.493	1735	105.793
975	59.365	1185	72.876	1370	88.256	1555	84.663	1740	100.762

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 อุณหภูมิที่เวลาใดๆของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 7 V/cm

Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)
0	27.742	95	41.253	190	56.059	285	55.627	380	79.201
5	31.192	100	46.141	195	53.040	290	63.102	385	86.819
10	34.641	105	39.960	200	53.040	295	73.307	390	88.400
15	31.910	110	38.522	205	54.046	300	63.964	395	81.501
20	27.023	115	48.584	210	53.759	305	74.457	400	87.107
25	38.522	120	47.290	215	56.202	310	73.307	405	93.719
30	26.592	125	38.379	220	54.909	315	72.301	410	87.107
35	31.623	130	48.440	225	53.471	320	57.065	415	92.569
40	30.185	135	38.666	230	59.077	325	82.000	420	90.556
45	27.598	140	47.003	235	57.784	330	219.000	425	89.406
50	34.210	145	53.184	240	53.328	335	69.139	430	87.969
55	26.304	150	49.590	245	61.808	340	80.494	435	89.981
60	30.617	155	51.459	250	54.909	345	81.644	440	90.700
65	34.354	160	51.028	255	61.808	350	77.188	445	88.256
70	37.804	165	54.190	260	61.808	355	78.770	450	93.575
75	33.204	170	54.560	265	68.995	360	83.944	455	101.624
80	38.810	175	54.909	270	64.683	365	79.920	460	102.918
85	27.742	180	51.890	275	70.145	370	84.088	465	102.630
90	43.984	185	52.321	280	75.895	375	86.819	470	101.193

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 อุณหภูมิที่เวลาใดๆของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 8 V/cm

Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)	Time (s)	Temp (C)
0	28.748	70	40.103	140	55.915	210	75.176
5	28.173	75	42.691	145	58.071	215	77.188
10	29.036	80	43.266	150	58.215	220	78.626
15	29.754	85	43.122	155	59.365	225	80.207
20	30.617	90	45.278	160	62.383	230	81.644
25	31.479	95	45.422	165	62.239	235	83.226
30	32.198	100	46.572	170	63.369	240	86.532
35	33.204	105	47.434	175	65.977	245	88.256
40	34.354	110	49.878	180	66.552	250	88.400
45	35.216	115	49.590	185	67.558	255	90.413
50	36.654	120	50.884	190	70.145	260	92.137
55	37.229	125	52.034	195	70.864	265	93.719
60	39.529	130	54.621	200	72.158	270	95.587
65	39.097	135	54.334	205	74.457	275	98.175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.1 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	53.0	79.0	91.5
2	54.0	79.0	92.0
3	54.0	80.0	92.0
4	53.0	82.0	93.0
5	50.0	82.5	93.0
6	51.5	81.0	95.0
7	53.0	83.0	94.0
8	55.0	83.5	96.0
9	55.0	85.0	96.0
10	56.5	85.0	96.5
11	56.0	85.0	98.0
12	56.5	84.5	98.0
13	57.0	84.0	98.0
14	59.0	85.5	98.0
15	56.5	84.5	101.5
16	56.5	85.0	101.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.133 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	47.0	59.5	81.0	16	48.0	60.5	82.5
2	47.0	59.5	80.0	17	47.5	60.5	81.5
3	48.0	60.0	82.0	18	49.0	60.5	82.0
4	48.0	61.5	83.0	19	48.5	60.5	82.0
5	48.5	62.0	83.0	20	49.0	61.5	81.5
6	48.0	60.0	82.5	21	48.5	63.0	83.0
7	48.0	60.5	83.0	22	49.0	63.5	83.5
8	48.0	60.5	83.0	23	49.0	63.5	84.0
9	48.0	60.0	83.0	24	49.0	63.0	85.0
10	48.0	62.0	82.5	25	49.5	64.5	86.0
11	48.5	61.0	82.5	26	49.0	63.5	86.0
12	48.0	61.0	83.0	27	48.5	63.0	86.0
13	47.5	61.0	83.0	28	49.5	67.0	86.5
14	47.0	61.5	83.0	29	50.0	63.0	86.0
15	47.0	61.0	83.0	30	50.0	64.0	86.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้สารละลายสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่อัตราการไหล 0.2 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	43.0	52.5	64.0	16	44.0	53.0	62.0
2	43.0	53.0	61.0	17	44.5	53.0	61.5
3	43.5	53.0	61.5	18	45.0	52.5	62.0
4	43.0	52.5	61.0	19	44.5	52.0	62.0
5	43.5	53.5	62.0	20	44.0	53.0	63.5
6	44.0	53.0	62.5	21	44.0	52.5	63.0
7	44.0	53.0	62.5	22	44.0	52.5	63.0
8	43.5	52.0	62.0	23	44.0	52.5	62.0
9	43.0	51.0	62.0	24	44.5	52.5	62.5
10	44.0	52.5	62.0	25	45.0	53.0	63.0
11	44.0	53.0	63.5	26	45.0	53.0	62.5
12	43.0	52.5	62.0	27	45.0	53.5	62.0
13	43.0	52.0	63.0	28	45.0	53.0	62.0
14	44.0	53.0	62.0	29	45.0	53.0	62.0
15	43.5	52.5	62.0	30	45.0	53.0	62.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 ลิตร/นาที่

เวลา (นาที่)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	61.5	82.0	82.5
2	64.0	84.0	85.0
3	66.0	89.5	92.0
4	69.0	91.0	92.5
5	70.0	92.5	93.0
6	71.0	94.0	95.5
7	73.0	93.0	94.0
8	74.0	94.5	95.0
9	75.0	95.0	95.0
10	74.5	95.5	96.0
11	75.0	95.5	95.5
12	75.0	96.0	95.5
13	75.0	95.5	96.0
14	74.5	95.5	96.0
15	75.0	95.0	97.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/นาที

เวลา(นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา(นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	63.5	84.5	85.5	12	65.0	85.0	89.5
2	63.0	83.0	85.5	13	65.0	85.0	91.5
3	63.6	83.5	87.0	14	65.5	84.5	89.5
4	64.0	83.5	88.5	15	65.0	84.5	90.5
5	64.0	84.0	88.5	16	64.5	84.5	90.5
6	63.5	83.5	87.5	17	64.5	85.5	90.5
7	64.0	84.5	88.0	18	65.0	85.5	91.0
8	64.0	85.0	89.0	19	65.5	85.5	91.0
9	64.0	85.0	88.5	20	65.5	85.0	90.5
10	63.5	85.0	88.5	21	65.0	85.5	91.5
11	64.5	85.0	89.5	22	65.0	85.0	91.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำส้ม 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	42.5	51.5	59.0	16	45.0	53.5	60.5
2	43.0	51.5	59.5	17	45.0	53.0	61.5
3	43.0	51.0	59.5	18	43.0	53.0	60.5
4	43.0	51.5	59.5	19	43.5	53.0	61.0
5	43.0	51.5	59.0	20	43.5	53.0	61.0
6	43.5	52.5	60.0	21	44.0	53.0	61.0
7	44.0	53.0	60.0	22	43.5	53.5	61.0
8	45.0	53.0	60.0	23	44.5	54.0	61.5
9	45.0	53.5	59.5	24	44.5	54.0	61.5
10	45.0	52.5	59.5	25	44.5	54.0	61.5
11	45.0	53.5	59.5	26	45.0	54.0	62.0
12	44.5	53.0	60.0	27	44.5	54.5	62.0
13	44.5	53.0	60.0	28	45.0	54.0	62.0
14	45.0	53.5	60.5	29	45.0	54.5	62.0
15	45.0	53.0	60.0	30	44.5	54.5	62.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำสลับประคด 25 % ที่อัตราการไหล 0.02 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	68.0	90.0	90.5
2	67.5	91.5	92.5
3	67.5	91.0	92.0
4	68.0	91.5	92.5
5	68.5	91.0	92.0
6	69.0	92.0	92.5
7	68.0	92.0	92.5
8	69.0	91.0	92.5
9	70.0	92.0	93.0
10	70.0	92.0	92.5
11	70.0	92.0	92.5
12	70.0	91.5	92.0
13	69.5	92.0	92.5
14	70.0	92.5	92.5
15	70.0	92.0	92.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำสลับประรด 25 % ที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	63.0	83.0	85.5	12	63.0	83.5	88.0
2	62.5	83.0	85.5	13	63.5	82.0	87.5
3	62.0	82.5	86.5	14	62.0	82.5	87.5
4	63.0	83.0	88.5	15	62.0	83.0	88.0
5	63.5	83.0	87.0	16	62.0	82.5	88.0
6	62.5	82.5	86.5	17	63.0	83.0	87.5
7	62.0	83.0	87.0	18	62.5	82.5	88.0
8	62.0	83.0	88.5	19	63.5	83.0	89.5
9	62.5	82.5	88.0	20	62.5	83.0	88.5
10	62.5	82.5	87.5	21	63.0	84.5	90.0
11	62.5	82.5	88.0	22	62.5	83.0	88.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ กันของท่อ เมื่อใช้น้ำสลับประด 25 % ที่อัตราการไหล 0.06 ลิตร/นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	เวลา (นาที)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
1	42.0	49.5	56.5	16	43.0	51.0	58.0
2	42.0	49.5	56.5	17	44.0	51.0	58.0
3	42.5	49.5	57.0	18	43.0	51.0	58.5
4	42.0	49.5	57.0	19	43.5	51.5	58.0
5	42.5	50.0	57.0	20	44.0	50.0	60.0
6	42.0	49.5	57.0	21	43.5	51.0	58.0
7	4.0	49.0	56.0	22	43.5	51.5	60.0
8	42.5	50.0	56.5	23	44.0	51.0	60.0
9	44.0	49.0	56.5	24	43.5	51.5	60.0
10	42.0	50.0	56.5	25	44.0	51.0	60.5
11	41.5	49.5	56.5	26	44.0	51.5	60.5
12	42.0	50.0	56.0	27	43.0	52.0	61.0
13	43.0	51.0	56.5	28	44.0	51.5	60.5
14	42.0	50.0	58.0	29	44.0	51.0	61.0
15	42.0	50.0	58.0	30	43.5	51.5	61.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

Specific molecular conductivities – NaCl solutions (S/m)

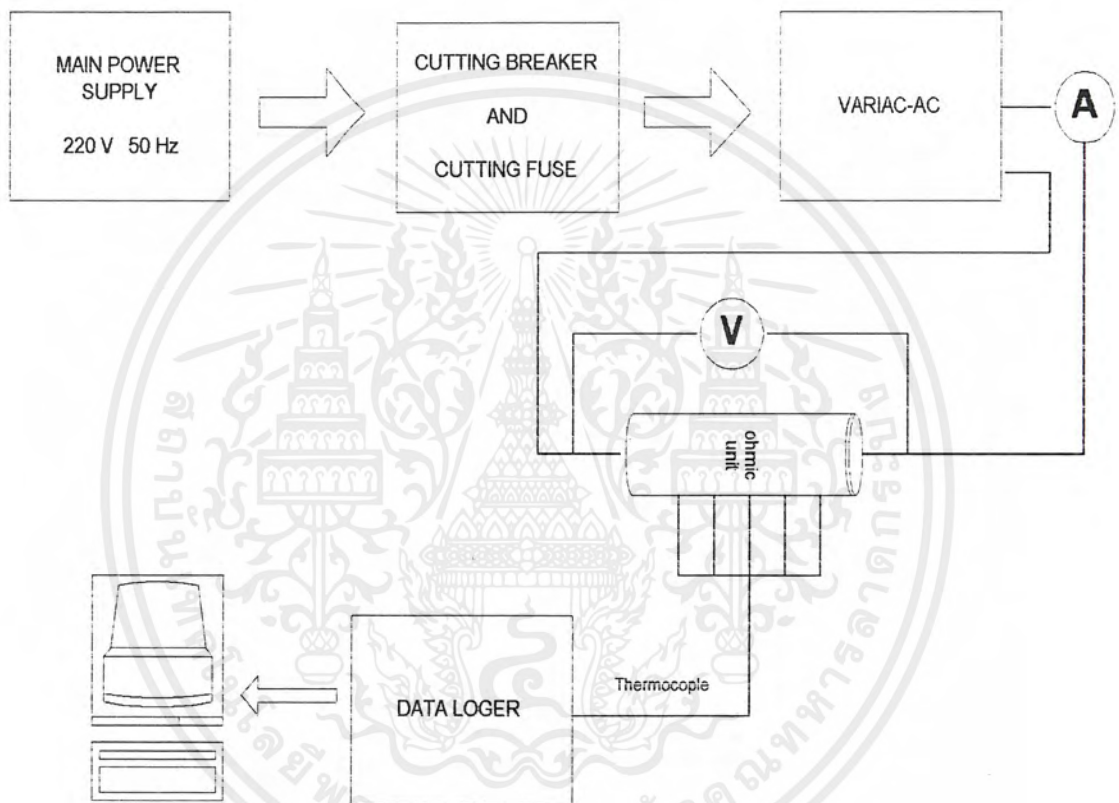
Temperature (°C)	NaCl Solutions (molar)					
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0
0	0.5938	0.5697	0.5375	0.4785	0.3978	0.3230
10	0.7848	0.7370	0.6937	0.6125	0.5411	0.4136
15	0.8854	0.8812	0.7778	0.6916	0.6060	0.4588
18	0.9476	0.8920	0.8276	0.7406	0.6443	0.4895
20	0.9888	0.9360	0.8656	0.7755	0.6710	0.5095
30	1.2215	1.1447	1.0610	0.9471	0.8028	0.6237
40	1.4580	1.3630	1.2500	1.1240	0.9447	0.7428
50	1.7130	1.5850	1.4430	1.3090	1.1070	0.8636
60	1.9770	1.8320	1.6460	1.5060	1.2930	0.9906
70	2.2420	2.0660	1.8450	1.7170	1.4850	1.1110
80	2.5230	2.3220	2.0590	1.1910	1.8330	1.2370
90	2.8100	2.5870	2.3060	2.1020	1.9610	1.3340
100	3.1410	2.2900	2.5740	2.2880	2.0480	1.4870

หมายเหตุ ที่มา T.R. Lyle and R.Hosking (The Temperature Variations of the Specific Molecular Conductivity and the Fluidity of Sodium chloride Solutions) Phil. Mag. Ser. 6,3,487 (1902)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

แผนภาพแสดงการขั้นตอนการจัดทำโครงงานส่วนของชุดทดลอง Ohmic ระบบสแตติว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จขึ้นมาได้ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายๆ ท่านดังนี้

อ.สรรวริศ อุษวัฒนา ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ รวมถึงความสะดวกในการจัดทำโครงการ ทั้งในและนอกเวลาราชการ (คีๆคั้นๆ)

ผศ.สาทิป รัตนภาสกร ที่ได้คำปรึกษารวมทั้งความห่วงใยอาทรและช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่จัดทำโครงการ

ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ สำหรับคำแนะนำและกำลังใจที่มีให้

อ.กนกต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา ที่ได้คำปรึกษาในเรื่องทฤษฎีบางส่วน

พี่แมน และพี่บุญนำ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำโครงการ

พี่ประมวล อ.ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตรที่ได้คำแนะนำและเอกสารอ้างอิงในการจัดทำโครงการ

คุณ เรืองศักดิ์ อัครราชันย์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย ด้านวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมอุปกรณ์ในการจัดทำโครงการ

ร้านสหวิศว์เครื่องเย็น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดทำแผ่นอิเล็กทรอนิกส์

คุณพ่อ คุณแม่ ของผู้จัดทำทุกท่าน ที่ได้ให้โอกาสได้ศึกษาเล่าเรียนและให้กำลังใจและกำลังใจในการศึกษาด้วยดีตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Sastry, S.K. and Palaniappan,S.,1992, "Ohmic Heating of Liquid - Particle Mixture " ,Food Technology, vol.46,No.12,pp64 - 67.
2. Skudder, P.J., 1986 , " Ohmic Heating and Its Application to Continuous Heat Treatment of Particle Food Products, " Symposium MicroWave and Resistance Heating for the Food Industry , 27 November 1986 , pp. 1 - 11.
3. De Alwis, A.A.P. and Fryer,P.J.,1990 " The Use of Direct Resistance Heating in the Food Industry " , Journal of Food Engineering , Vol.11 , No.1 , pp 3 - 27.
4. Naveh , D. ,Kopelman, I.J. and Mizrahi, S., 1983 , " Electroconductive thawing by Liquid Contact , " Journal of Food Technology, Vol.18 , No. 2 , pp. 171 - 176
5. Balaban, M.O.,Henderson, T., Teixeira, A. and Otwell, W.S.,1993, " OhmicThawing of Shrimp Blocks , " Symposium on Progress in food Preservation Process, Belgium, pp. 307 - 309.
6. Mizrahi, S., Kopelman, I.J. and Perlman, J., 1975, " Blanching by Electroconductive Heating" , Journal of Food Technology , Vol. 10 , No.3, pp. 281 - 288
7. Beattie , J.M., 1914, " Electrical Treatment of Milk for Infant Feeding " ,Journal of State Medicine , Vol. 24, No.4 , pp. 97 - 113
8. Murphy, A.B., Powell, K.J. and Morrow, R., 1991, "Thermal treatment of Sewage Sludge by Ohmic heating " , IEE Proceeding A: Science Measurement and Technology , Vol. 138, No. 4, pp.242 - 248
9. Bohart, G.S.,1993, Apparatus for Canning Foods, US Patent 1 911 879
10. Halden,K., De Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J.,1990, " Change in the Electrical Conductivity of foods During Ohmic Heating " , International Journal of Food Science and Technology, Vol. 25, No. 1,pp. 9 - 25.
11. Parrot, D.L.,1992, " Use of Ohmic heating for Aseptic processing of Food Particulates " , Food Technology , Vol. 46, No.12,pp.68 - 72.
12. Palaniappan, S. and Sastry, S.K.,1991, " Electrical conductivity of selected Solid Foods", Journal of food Process Engineering, Vol. 14,No.3,pp. 221 - 236.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Gupta, V. and Jindal, V.K. 1992 " Electrical Conductivity of Selected Fruit Juices " ,
Proceeding of the International Agricultural Engineering conference , 7 - 10 December 1992,
Bangkok, pp. 1187-1195
14. Qihua, T., Jindal, V.K. and Winden, J.V., 1992, " Design and Performance Evaluation of a
Ohmic Heating Unit for Liquid Foods " , Proceeding of the International Agricultural
Engineering conference, 7 - 10 December 1992 , Bangkok, pp. 1197 - 1206.
15. Khalaf , W.G. and Sastry , S.K. , 1996 , " Effect of Fluid Viscosity on the Ohmic Heating
Rate of Solid - Liquid Mixture, " Journal of Food Engineering , Vol.27 , No.2 , pp. 145 - 158.
16. Palaniappan , S. and Sastry , S.K. , 1991 , " Electrical conductivity of Selected Juices
Influences of Temperature, Solids Content, Applied Voltage and Partical Size: , Jour nal of
Food Process Engineering , Vol. 14, No. 3 , pp.247 - 260.
17. De Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J., 1990 , " A Finite Element Analysis of Heat Generation and
Transfer During Ohmic Heating of food , " Chemical Engineering Science , Vol. 45 , No. 6 ,
pp. 1547 - 1559.
18. Sastry, S.K., 1992 "A model for Heating of Liquid – Particle Mixtures in a Continuous Flow
Ohmic Heater “ , Journal of Food Process , Vol.15, No.4, pp 263-278
19. Skudder, P.J., 1989 “ Ohmic Heating in Food Processing “ , Asean Food Journal, Vol.4, No.4,
pp189-193
20. De Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J., 1992 “ Operability of the Ohmic Heating Process,
Electrical Conductivity Effects “ , Journal of Food Engineering, Vol.15, No.1, pp21-48
21. Fryer, P.J., De Alwis, A.A.P., Koury, E., Stapley, A.G.F. and Zhang, L., 1993, “ Ohmic
Processing of Solid – Liquid Mixture : Heat Generation and Convection Effects, “ Journal of
Food Engineering “ , Vol.18, No.2, pp 101 – 125
22. Mitchell, F.R.G. and De Alwis, A.A.P., 1989, “Electrical Conductivity Meter for Food
Sample, “Journal of Physics, Vol.22, pp 554-556
23. Palaniappan, S. and Sastry, S.K., 1991, “Electrical Conductivity of Selected Food During
Ohmic Heating, “Journal of Food Process Engineering, Vol.14, No.3, pp 221-236
24. Wang, W.C. and Sastry, S.K., 1997, “Change in Electrical Conductivity of Selected
Vegetables During Multiple Thermal Treatment “ , Journal of Food Process Engineering,
Vol.20, No.9, pp499 – 516

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. De Alwis, A.A.P., Halden, K. and Fryer, P.J.,1989, "Shape and Conductivity Effects in The Ohmic Heating of Foods", Chemical Engineering Research and Design, Vol.67, pp159 –168
26. Sastry, S.K. and Palaniappan, S.,1992 "Influences of Particle Orientation on The Effective Electrical Resistance and Ohmic Heating Rate of Liquid – Particle Mixture", Journal of Food Process Engineering, Vol.15, No.3, pp 213 – 227
27. Sastry, S.K., 1993, "Electroconductive Heating for Continuous Sterilization of Solid – Liquid Food Mixtures, " Research Project", pp 2782 – 2794
28. Palaniappan, S. and Sastry, S.K., 1991, "Modeling of Electrical Conductivity of Liquid - Particle Mixture", Food and Bioproducts Processing, Institution of Chemical Engineering, Vol.69, Part. C, pp.167 –174
29. Sastry, S.K., and Palaniappan, S., 1992, "Mathematic Modeling and Experimental Studies on Ohmic Heating of Liquid-Particle Mixtures in a Static Heater", Journal of Food Engineering, Vol.15, No.6, pp 241 – 261
30. รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535, วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร, โอเคเอ็นสโตร์, หน้า 25-26
31. ทิพาพร อยู่วิทยา, 2532, " หลักการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ", การอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง กระบวนการฆ่าเชื้ออาหารในสถานะปิดสนิทและการควบคุม, วันที่ 21-24 พฤศจิกายน 2532, ก.ท.ม., หน้า 1-2
32. ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาสึก, 2539, กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร, สงขลา, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่, หน้า 208-209
33. ศิวาพร ศิวเวชช, 2529, การสุขาภิบาลโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร, พิมพ์ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, หน้า 23-30
34. สายลม สัมพันธ์เวชโสภา, 2532, " ปัจจัยที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน", การอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่องกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารในสถานะปิดสนิทและการควบคุม, วันที่ 21-24 พฤศจิกายน 2532, กทม., หน้า 6
35. Lobo, V.M.M., 1984, Electrolyte Solution : Literature Data on Thermodynamics and Transport Properties, Portugal, Departamento de Quimica da Universidade Coimbra, p340
36. พงศธร นวมานกร, 2540, การพัฒนาระบบฆ่าเชื้อแบบ Ohmic, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37. อติศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541, คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหารที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Ohmic, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้