

สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำมิก



นางสาว สุพร กาญจนกิจสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-491-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTIVE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LOW-ACID FOODS DURING OHMIC HEATING



MISS SUPORN KANCHANAKITSAKUL

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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-491-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำขณะให้ความร้อนด้วย
วิธีโหม้มิก

โดย นางสาว สุพร กาญจนกิจสกุล

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ

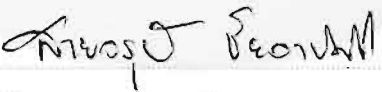
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

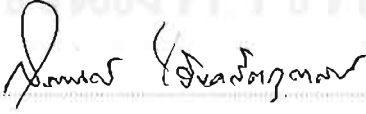
 คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. รมนี สงวนดีกุล)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์ นวงศ์ตฤศฐาน์)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

สุพร กาญจนกิจสกุล : สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำขณะให้ความร้อนด้วยวิธี
โอห์มมิก (EFFECTIVE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LOW-ACID FOODS DURING OHMIC
HEATING) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. กัลยา
เลาหงคราม, 56 หน้า. ISBN 974-333-491-2

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภท
กรดต่ำที่มีส่วนประกอบหลายชนิดและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำ
ไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกด้วยการทวนสอบแบบจำลองที่อาศัยหลัก
การพื้นฐานทางไฟฟ้าที่ว่าความต้านทานของวัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลายต่อกันแบบผสม โดยสร้างเครื่อง
ให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตยซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้แก่อาหารในเซลล์ไฟฟ้าให้
ความร้อนซึ่งทำจากท่อแก้วที่ประกบปลายท่อด้วยขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมบริสุทธิ์ และทดสอบความถูกต้องของ
เครื่องที่สร้างขึ้นด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.02 โมลาร์และสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟต 0.1 โมลาร์
พบว่า สภาพนำไฟฟ้าที่ได้ต่างจากค่าอ้างอิงเพียงร้อยละ 3.55 และ 1.54 ตามลำดับ จากนั้นให้ความร้อนแก่
อาหารที่ประกอบด้วยวัตถุดิบต่าง ๆ ได้แก่ แครอท มันฝรั่ง หัวผักกาด แครอทและมันฝรั่ง แครอทและ
หัวผักกาด มันฝรั่งและหัวผักกาด และ แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์
เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรของชิ้นวัตถุดิบในอาหารร้อยละ 20 40 และ 60 ด้วยวิธีโอห์มมิก ที่ความถี่
1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม. จนถึงอุณหภูมิ 125 °ซ

จากการศึกษาพบว่าสภาพนำไฟฟ้ายังผลของแครอท มันฝรั่ง หัวผักกาด แครอทและมันฝรั่ง
แครอทและหัวผักกาด มันฝรั่งและหัวผักกาด และ แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายเกลือโซเดียม
คลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 125 °ซ ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20 อยู่ในช่วง 0.1628-0.4655,
0.1877-0.5330, 0.1855-0.5301, 0.1745-0.5072, 0.1774-0.4943, 0.2001-0.5498 และ 0.1767-0.5319 ซีเมนส์/เมตร
ตามลำดับ ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40 อยู่ในช่วง 0.1269-0.3883, 0.1693-0.4825, 0.1634-0.4618, 0.1612-
0.4478, 0.1338-0.3910, 0.1622-0.5106 และ 0.1508-0.4686 ซีเมนส์/เมตร ตามลำดับ และที่สัดส่วนปริมาตร
ร้อยละ 60 อยู่ในช่วง 0.0981-0.3021, 0.1474-0.4097, 0.1512-0.4325, 0.1164-0.3459, 0.1170-0.3581, 0.1472-
0.4185 และ 0.1205-0.3566 ซีเมนส์/เมตร ตามลำดับ โดยที่สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้น
ตรงกับอุณหภูมิที่ทุกสัดส่วนปริมาตร และเมื่อสัดส่วนปริมาตรของชิ้นวัตถุดิบในอาหารเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้า
ยังผลของอาหารจะลดลงตลอดช่วงการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง
สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดด้วยการทวนสอบแบบจำลอง
พบว่า ค่าจากแบบจำลองมีความแตกต่างกับการทดลองไม่ถึงร้อยละ 10 ที่ทุกสัดส่วนปริมาตรของชิ้นวัตถุดิบ
ในอาหาร ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือที่อนิสิต สุพร กาญจนกิจสกุล
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือที่อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ
ปีการศึกษา 2542 ลายมือที่อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

3972177023 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: OHMIC HEATING / ELECTRICAL CONDUCTIVITY / FOOD MIXTURE

SUPORN KANCHANAKITSAKUL: EFFECTIVE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LOW-ACID FOODS DURING OHMIC HEATING . THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SAIWARUN CHAIWANICH SIRI, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASSC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM, Ph. D. 56 pp. ISBN 974-333-491-2

The purposes of this research were to study the effect of temperature on the effective electrical conductivities of multicomponent low-acid food mixtures and to study the relationship between the effective electrical conductivities of food mixtures and those of food components during ohmic heating by verifying the proposed model based on electrical circuit theory whereas each component resistance performed as combinations of series and parallel arrangements. A static ohmic heating device was assembled to generate high-frequency alternating current which then passed through food in a cell made of a 2.65 cm ID and 10 cm long glass pipe with pure titanium electrodes at both ends. The accuracy of the device was tested by using 0.02 M NaCl and 0.1 M NaH_2PO_4 solutions which showed the differences between the measured and reported electrical conductivities of 3.55% and 1.54%, respectively. The food samples used were carrot, potato, white radish, carrot and potato, carrot and white radish, potato and white radish, and carrot potato and white radish in 0.1M NaCl solution at volume fractions of 20%, 40% and 60%. All samples were heated up from 25 °C to 125 °C using electrical field strength and frequency of 30 V/cm and 1 kHz, respectively.

The results showed that the effective electrical conductivities of carrot, potato, white radish, carrot and potato, carrot and white radish, potato and white radish, and carrot potato and white radish in 0.1 M NaCl solution at 25 °C to 125 °C at volume fraction of 20% were 0.1628-0.4655, 0.1877-0.5330, 0.1855-0.5301, 0.1745-0.5072, 0.1774-0.4943, 0.2001-0.5498, and 0.1767-0.5319 S/m, respectively; while at volume fraction of 40% were 0.1269-0.3883, 0.1693-0.4825, 0.1634-0.4618, 0.1612-0.4478, 0.1338-0.3910, 0.1622-0.5106, and 0.1508-0.4686 S/m, respectively; and at volume fraction of 60% were 0.0981-0.3021, 0.1474-0.4097, 0.1512-0.4325, 0.1164-0.3459, 0.1170-0.3581, 0.1472-0.4185, and 0.1205-0.3566 S/m, respectively. The effective electrical conductivities of food mixtures increased linearly with temperature and decreased with increased volume fraction under ohmic heating. It was also found that the relationship between the effective electrical conductivities of food mixtures and the electrical conductivities of food components followed the proposed model with the difference of less than 10% for all volume fractions at any temperatures.

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่อนิสิต ศุภพร วัฒนศิริกุล
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศุภพร วัฒนศิริกุล
ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ และรองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลานสงคราม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคส์ตฤศาสน์ อาจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการต่าง ๆ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะที่ให้ประโยชน์ในงานวิจัย และช่วยตรวจและแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ในวิชาการต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนอุดหนุนการวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี
ขอขอบคุณ คุณสันติ หาญสิทธิพร คุณสมพร เขี่ยมสำอางค์ คุณนิวัฒน์ ติรวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือและช่วยประกอบเครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณพี่-น้อง เพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโททุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือ
ขอขอบคุณ พี่ ๆ และญาติสนิททุกท่าน ที่ให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี
ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่สนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

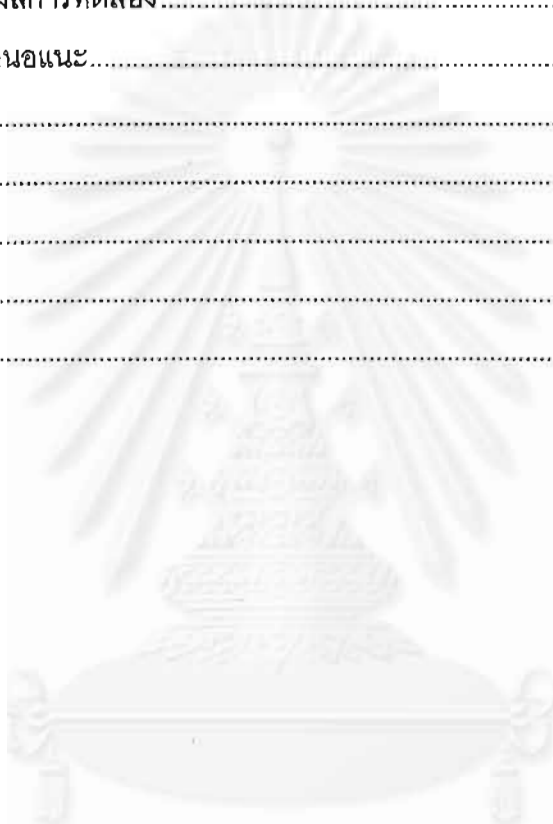
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิก.....	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิก.....	5
2.3 ข้อควรระวังในการสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิกและวิธีการแก้ไข.....	6
2.4 แบบจำลองทำนายสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหาร.....	6
3 การทดลอง.....	10
3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิก.....	10
3.2 ทดสอบการทำงานและความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิก.....	13
3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผล.....	14
3.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้า ของส่วนประกอบแต่ละชนิด.....	16
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	17
4.1 การทำงานและความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิก.....	17
4.2 ผลของอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้ายังผล.....	18
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของ ส่วนประกอบแต่ละชนิด.....	24
4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอน์หมิกที่สร้างขึ้น.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	29
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	29
รายการอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก ก.....	34
ภาคผนวก ข.....	37
ภาคผนวก ค.....	38
ประวัติผู้เขียน.....	45



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุตั้งแต่ละชนิดที่ผ่านการลวกแล้ว และ สารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอห้มิกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม.....	20
4.2 ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอห้มิกที่สร้างขึ้น.....	28
ก.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุติดสัดขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอห้มิกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม.....	35
ก.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60.....	36
ข.1 การหาเวลาในการลวกวัตถุติดก่อนนำไปให้ความร้อนด้วยวิธีไอห้มิก.....	37
ค.1 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแครอทในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	38
ค.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของมันฝรั่งในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	39
ค.3 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	40
ค.4 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแครอทและมันฝรั่งในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	41
ค.5 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแครอทและหัวผักกาดในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	42

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.6 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผล ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของมันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายไซเดียม คลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	43
ค.7 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผล ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาดใน สารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	44



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำหมัก.....	3
2.2 เซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนอาหารด้วยวิธีไอน้ำหมัก.....	4
2.3 วงจรไฟฟ้าสมมูลย์ของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด.....	7
2.4 วงจรไฟฟ้าสมมูลย์ของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด.....	8
3.1 แผนภาพการต่อระบบสร้างพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้แก่อาหาร.....	11
3.2 แผนภาพเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน.....	12
4.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอท ข) มันฝรั่ง ค) หัวผักกาด ง) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำหมักที่ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.....	19
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) มันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) หัวผักกาด ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรต่าง ๆ กัน ขณะให้ ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำหมักที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.....	22
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทและมันฝรั่งในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) แครอทและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ง) แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรต่าง ๆ กัน ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำหมักที่ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.....	23
4.4 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผล ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของ ก) แครอทในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) มันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) หัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตร แตกต่างกัน.....	25

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผล ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของ ก) แครอทและมันฝรั่งในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) แครอทและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ง) แครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน.....	26
ก.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทสด ข) มันฝรั่งสด ค) หัวผักกาดสด ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิคที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม.....	34
ก.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผล ที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดสดในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60.....	35

คำอธิบายสัญลักษณ์

a	=	ค่าคงที่
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเซลล์ (m^2)
A_{ip}	=	พื้นที่ของของเหลวที่ต่อขนานกับชั้นอาหาร (m^2)
A_{is}	=	พื้นที่ของของเหลวที่ต่ออนุกรมกับชั้นอาหารและของเหลวในชั้นอาหาร (m^2)
A_{sp}	=	พื้นที่ของชั้นอาหารซึ่งต่อขนานกับของเหลวที่อยู่ในชั้นอาหาร (m^2)
b	=	ค่าคงที่
C	=	ความร้อนจำเพาะของส่วนประกอบใด ๆ ในอาหาร ($Jg^{-1}K^{-1}$)
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะของอาหาร ($Jg^{-1}K^{-1}$)
i	=	running number
I	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหาร (A)
K_c	=	cell constant (= L/A)
L	=	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)
L_{ip}	=	ความยาวของของเหลวที่ต่อขนานกับชั้นอาหาร (m)
L_{is}	=	ความยาวของของเหลวที่ต่ออนุกรมกับชั้นอาหารและของเหลวในชั้นอาหาร (m)
L_{sp}	=	ความยาวของชั้นอาหารซึ่งต่อขนานกับของเหลวที่อยู่ในชั้นอาหาร (m)
m	=	มวลอาหารทั้งหมดในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน (g)
M	=	จำนวนชนิดของวัตถุดิบ
N	=	จำนวนชนิดของส่วนประกอบในอาหาร
P	=	กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่อาหาร (W)
P_{in}	=	กำลังงานขาเข้า (W)
P_{out}	=	กำลังงานขาออก (W)
Q	=	ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (J)
R	=	ความต้านทานไฟฟ้าของอาหาร (Ω)
R_{ip}	=	ความต้านทานของของเหลวที่ต่อขนานกับชั้นอาหาร (Ω)
R_{is}	=	ความต้านทานของของเหลวที่ต่ออนุกรมกับชั้นอาหารและของเหลวในชั้นอาหาร (Ω)
R_p	=	ความต้านทานทั้งหมดของชั้นอาหารในอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (Ω)
R_{sp}	=	ความต้านทานของชั้นอาหารซึ่งต่อขนานกับของเหลวที่อยู่ในชั้นอาหาร (Ω)
Δt	=	ระยะเวลา (s)
ΔT	=	อุณหภูมิของอาหารที่เพิ่มขึ้น (K)
V	=	ความต่างศักย์ (V)
v_{fs}	=	สัดส่วนปริมาตรของชั้นอาหารในอาหาร

- w = สัดส่วนน้ำหนักของส่วนประกอบใด ๆ ในอาหาร
 W = พลังงานไฟฟ้า (J)
 σ = สภาพนำไฟฟ้ายังผล (S/m)
 σ_i = สภาพนำไฟฟ้าของของเหลว (S/m)
 σ_s = สภาพนำไฟฟ้าของชิ้นอาหาร (S/m)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุโดยการใช้ไอน้ำ เพื่อให้ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาหารประเภทกรดต่ำ (low-acid food) ควรให้ความร้อนมากเพียงพอที่จะทำลายจุลินทรีย์ *Clostridium botulinum* และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดอาหารเป็นพิษชนิดอื่น จึงต้องใช้เวลาอย่างมากในการให้ความร้อนแก่อาหารจนกระทั่งตำแหน่งที่ร้อนช้าที่สุด (cold spot) มีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะฆ่าเชื้อ ซึ่งมีผลทำให้คุณภาพทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสเสียไป สำหรับการฆ่าเชื้อโดยใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้นด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แม้สามารถให้ความร้อนแก่อาหารได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีการสะสมความร้อนเหมือนกับการฆ่าเชื้อภายในภาชนะบรรจุโดยใช้ไอน้ำและทำให้คุณภาพของอาหารดีขึ้น แต่การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับอาหารที่เป็นของเหลวหรือของเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กมาก และสำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแม้เป็นวิธีการให้ความร้อนที่รวดเร็ว แต่ถ้าอาหารมีขนาดใหญ่หรือหนา มากเมื่อใช้ไมโครเวฟความถี่สูง คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปถึงกึ่งกลางชิ้นอาหารได้ ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั่วถึงทุกจุด การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิของอาหารสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ (Reznick, 1996) และสามารถใช้ได้กับอาหารที่ประกอบด้วยชิ้นอาหารขนาดใหญ่ได้ (Larkin and Spinak, 1996) สำหรับปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้คือ สภาพนำไฟฟ้าและสูตรอาหาร เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราการให้ความร้อน (Palaniappan and Sastry, 1991a; Larkin and Spinak, 1996) โดยธรรมชาติส่วนประกอบในอาหารแต่ละชนิดมีสภาพนำไฟฟ้าต่างกัน ส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบจะน้อยกว่าสารละลาย และแปรไปตามอุณหภูมิ จึงเป็นไปได้ที่สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิด้วย (Sastry and Palaniappan, 1992a) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด คือ วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลายเท่านั้น (Palaniappan and Sastry, 1991b; Sastry and Palaniappan, 1992b; Khalaf, 1994; Wang and Sastry, 1997) และยังไม่มียางานวิจัยที่เกี่ยวกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (วัตถุดิบหลายชนิดในสารละลาย) แต่มีผู้เสนอแบบจำลองที่อาศัยหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิดจากสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดไว้โดยไม่มีการทดลองยืนยัน (Sastry and

Palaniappan, 1992b; Sastry, n.d.) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำที่มีส่วนประกอบหลายชนิดและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดเมื่อให้ความร้อนแบบโอห์มมิกด้วยการทวนสอบ

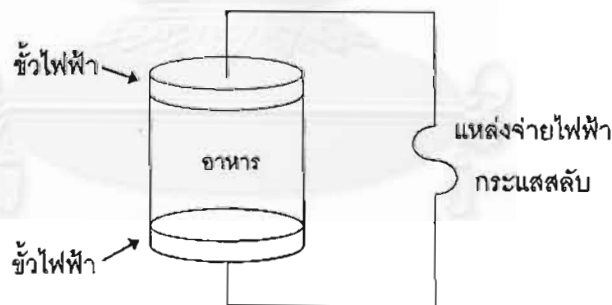


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยวิธีโหม้มิก

ในอาหารส่วนใหญ่มักมีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากและมีไอออนของเกลือหรือกรดละลายอยู่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Palaniappan and Sastry, 1991c) อาหารจึงมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังอาหาร (รูปที่ 2.1) อาหารจะยอมให้มีการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในเนื้อของมัน โดยประจุไฟฟ้าจะชนกับอะตอมภายในอาหาร เกิดการถ่ายเทพลังงานจำนวนหนึ่งให้กับอะตอม พลังงานที่อะตอมได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนตามปรากฏการณ์ของจูล (Joule effect) ดังสมการที่ (1) ถึง (4) (มงคล เดชนครินทร์, 2522; Parrott, 1992; Quarini, 1995) อาหารจะร้อนขึ้นเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางให้ความร้อน (heating medium) (Hui, 1992) หลักการนี้เป็นเทคนิคการให้ความร้อนโดยตรงแก่อาหารวิธีหนึ่ง เรียกว่า “การให้ความร้อนด้วยวิธีโหม้มิก (Ohmic heating)” การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ และ



รูปที่ 2.1 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีโหม้มิก

$$W = Q \quad \text{————— (1)}$$

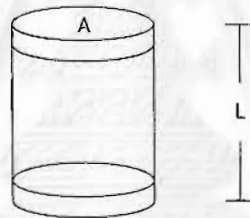
เมื่อ $W = P\Delta t \quad \text{————— (2)}$

$$Q = mC_p\Delta T \quad \text{————— (3)}$$

$$P = I^2R = IV = V^2/R \quad \text{————— (4)}$$

สามารถใช้ได้กับอาหารที่ประกอบด้วยอนุภาคชิ้นอาหารขนาดใหญ่ได้ถึง 25 มม. (Larkin and Spinak, 1996) โดยอาหารที่ผ่านกระบวนการนี้ยังรักษาคุณภาพทั้งทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสได้ดีอีกด้วย (Hui, 1992)

จากหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกจะถือว่าอาหารมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว (Palaniappan and Sastry, 1991c) ค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการ (5) ถ้ากำหนดให้อาหารที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนมีรูปทรงดังรูปที่ 2.2 หรือ หาได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ในสมการที่ (6) ถ้าทราบค่าของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานจะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าของอาหาร ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าจึงมีความสำคัญมากโดยเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดอัตราการให้ความร้อน ($\Delta T/\Delta t$) ดังสมการที่ (7) โดยส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้ามักจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะเส้นตรง ดังสมการที่ (8) (Palaniappan and Sastry, 1991c)



รูปที่ 2.2 เซลล์ให้ความร้อนอาหารด้วยวิธีโอห์มมิก

$$R = L/(A\sigma) = (1/\sigma)K_c \quad \text{————— (5)}$$

$$V = IR \quad \text{————— (6)}$$

จากสมการที่ (1) (2) (3) (4) และ (5) จะได้

$$\Delta T/\Delta t = (V^2\sigma)/(K_c m C_p) \quad \text{————— (7)}$$

ซึ่ง

$$\sigma = aT + b \quad \text{————— (8)}$$

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก มีหลายประการได้แก่ ชนิดของอาหาร ปริมาณชิ้นอาหาร ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ รูปทรงและการวางตัวของชิ้นอาหาร ในสนามไฟฟ้า และความเข้มสนามไฟฟ้า โดยที่ Mitchell (1989) และ Palaniappan และ Sastry (1991c) ได้วัดสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบและสารละลาย พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลายมีค่าไม่เท่ากัน และสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายส่วนใหญ่มีสภาพนำไฟฟ้ามากกว่าอาหารที่เป็นของแข็ง Palaniappan และ Sastry (1991b) ได้ศึกษาถึงผลของปริมาณชิ้นอาหารในอาหารต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผลหรือสภาพนำไฟฟ้าโดยรวม โดยให้ความร้อนแก่มันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $1 \times 1 \times 1$ ซม. ในสารละลายโซเดียมฟอสเฟต 0.1 โมลาร์ ที่แปรสัดส่วนปริมาตรของชิ้นอาหารเป็นร้อยละ 4.5 23 และ 34.5 ด้วยเครื่องโอห์มมิกแบบสถิตย์รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38 ซม. ยาว 10 ซม. ที่ 230 โวลต์ 60 เฮิร์ตซ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของของเหลวสูงขึ้น สภาพนำไฟฟ้ายังผลจะเพิ่มขึ้น โดยอาหารที่มีสัดส่วนปริมาตรของชิ้นอาหารมากกว่า จะมีสภาพนำไฟฟ้ายังผลน้อยกว่า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่มีอยู่ในอาหารต่อสภาพนำไฟฟ้า โดยให้ความร้อนแก่มันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ $1 \times 1 \times 1$ ซม. ในสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันเป็น 0.025 0.050 และ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 4.5 ด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15/16 นิ้ว ยาว 1 ฟุต ที่ 230 โวลต์ 60 เฮิร์ตซ พบว่า สภาพนำไฟฟ้ายังผลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมฟอสเฟตสูงขึ้น สำหรับผลของรูปทรงและการวางตัวของชิ้นอาหารทำมุมกับสนามไฟฟ้านั้น de Alwis และคณะ (1989) ได้ศึกษาผลของการวางตัวของชิ้นอาหารรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำมุมกับสนามไฟฟ้าต่อการให้ความร้อนอาหาร โดยให้ความร้อนแก่มันฝรั่งรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $40 \times 75 \times 30$ มม. ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 0.04 S/m ในของเหลวที่มีสภาพนำไฟฟ้า 0.58 S/m ด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก โดยวางในแนวยาวขนานกับสนามไฟฟ้าและตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า พบว่าเมื่อวางชิ้นอาหารให้แนวยาวขนานกับสนามไฟฟ้า ของเหลวจะร้อนเร็วกว่าชิ้นอาหาร แต่ถ้าวางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าชิ้นอาหารจะร้อนเร็วกว่าของเหลว แต่ Sastry และ Palaniappan (1992c) ได้ศึกษาผลของการวางตัวของชิ้นอาหารรูปทรงลูกบาศก์ทำมุมกับสนามไฟฟ้าต่ออัตราการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก โดยให้ความร้อนแก่มันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $1 \times 1 \times 1$ ซม. จำนวน 1 ชิ้น ซึ่งวางขนานกับสนามไฟฟ้า และวางทำมุม 45° กับสนามไฟฟ้า ในสารละลายโซเดียมฟอสเฟต 0.1 โมลาร์ ด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์ พบว่า การวางตัวของชิ้นอาหารรูปทรงลูกบาศก์ในสนามไฟฟ้า

ไม่มีผลต่ออัตราการให้ความร้อนอาหารหรือมีผลน้อยมาก และสำหรับผลของความเข้มข้นไฟฟ้า นั้น Palaniappan และ Sastry (1991a) ศึกษาในตัวอย่างแคโรทอปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ยาว 2.35 ซม. ด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก โดยใช้ความเข้มข้นไฟฟ้าต่างกันคือที่ 20 และ 40 โวลต์/ซม. ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นและทำให้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิใกล้เคียงกับเส้นตรงมากขึ้น

2.3 ข้อควรระวังในการสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกและวิธีการแก้ไข

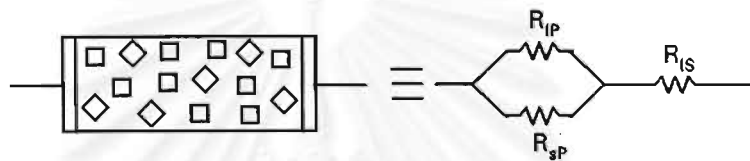
ข้อควรระวังที่สำคัญในการสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกคือ การเกิดอีเล็กโตรไลซิส หรือ การเกิดโพลาริเซชัน เนื่องจากการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ (50 หรือ 60 เฮิรตซ์) และการใช้ขั้วไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยาการขนถ่ายอิเล็กตรอนด้วยกระแสไฟฟ้าและเกิดฟองอากาศขึ้นเป็นจำนวนมากที่ขั้วไฟฟ้าขณะให้ความร้อนทำให้ความต่างศักย์ของระบบตกลงจนไม่สามารถให้ความร้อนต่อไปได้ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการปนเปื้อนของโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าลงในอาหาร ปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Bleaney and Bleaney, 1976) ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (1 ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์) หรือการใช้ขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิม เช่น แพลตินัม โรเดียม ไทเทเนียม เป็นต้น (Reznick, 1988 ; Reznick, 1996)

2.4 แบบจำลองทำนายสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหาร

Sastry (n.d.) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อใช้ในการหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารขณะให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์สำหรับอาหารที่ส่วนประกอบ 2 ชนิด (วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลาย) และ สำหรับอาหารที่มีองค์ประกอบหลายชนิด (วัตถุดิบหลายชนิดในสารละลาย) โดยคิดว่าส่วนประกอบทั้งหมดของอาหารในเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

2.4.1 อาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด (วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลาย)

อาหารจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ วัตถุดิบซึ่งเป็นส่วนกระจาย (dispersed phase) มีสภาพนำไฟฟ้า σ_s และความต้านทาน R_{sp} และ สารละลายเป็นส่วนต่อเนื่อง (continuous phase) มีสภาพนำไฟฟ้า σ_i ซึ่งส่วนของสารละลายนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ขนานกับวัตถุดิบมีความต้านทาน R_{ip} และส่วนที่ต่ออนุกรมจะมีความต้านทาน R_{is} โดยคิดว่าความต้านทานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในอาหารต่อกันเป็นวงจรไฟฟ้าสมมูลย์ (equivalent electrical circuit) แบบผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรไฟฟ้าสมมูลย์ของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด

$$R = R_{is} + \frac{R_{ip} R_{sp}}{R_{ip} + R_{sp}} \quad \text{———— (9)}$$

ซึ่ง

$$R_{is} = \frac{L_{is}}{A_{is} \sigma_i} \quad \text{———— (10)}$$

$$R_{ip} = \frac{L_{ip}}{A_{ip} \sigma_i} \quad \text{———— (11)}$$

$$R_{sp} = \frac{L_{sp}}{A_{sp} \sigma_s} \quad \text{———— (12)}$$

เมื่อ

$$A_{is} = A = A_{sp} + A_{ip} \quad \text{———— (13)}$$

$$L = L_{is} + L_{ip} \quad \text{———— (14)}$$

และ

$$L_{sp} = L_{ip} \quad \text{———— (15)}$$

ซึ่ง

$$A_{sp} = A v_f^{2/3} \quad \text{———— (16)}$$

$$L_{sp} = L v_f^{1/3} \quad \text{———— (17)}$$

โดยที่ $v_f^{2/3}$ และ $v_f^{1/3}$ เป็นสัดส่วนพื้นที่และสัดส่วนความยาวตามลำดับ

จากสมการ (13) และ (16) จะได้

$$A_{ip} = A(1 - v_f^s)^{2/3} \quad \text{———— (18)}$$

และ จากสมการ (14) (15) และ (16) จะได้

$$L_{is} = L(1 - v_f^s)^{1/3} \quad \text{———— (19)}$$

สภาพนำไฟฟ้า σ ในสมการที่ (10) ถึง (12) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิตามสมการที่ (8) ดังนั้นเมื่อทราบค่า R จากสมการ (9) นำค่า R ที่ได้ ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนมาแทนในสมการ (5) เราจะสามารถหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารได้

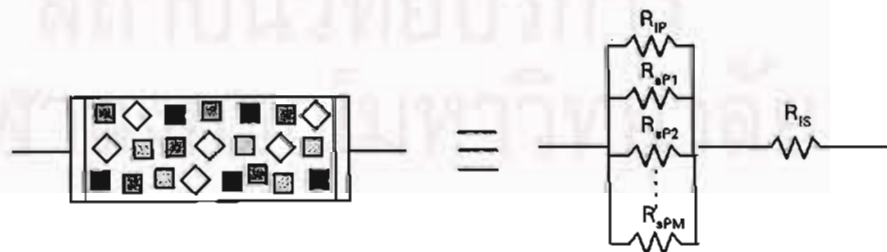
2.4.2 อาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (วัตถุดิบหลายชนิดในสารละลาย)

หลักการคล้ายกับการหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด สมมติให้อาหารมีวัตถุดิบ M ชนิด แต่ละชนิดมีความต้านทาน $R_{sp1} R_{sp2} \dots R_{spM}$ ตามลำดับ และมีสัดส่วนปริมาตรต่างกันเป็น $v_{f_{s1}} v_{f_{s2}} \dots v_{f_{sM}}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสัดส่วนปริมาตรของวัตถุดิบทั้งหมดในอาหาร (v_f^s) คำนวณได้จากสมการ (18) และสมมติว่าสัดส่วนความยาวของวัตถุดิบทุกชนิดในอาหารเป็น v_f^s

$$v_f^s = \sum_{i=1}^M v_{f_{si}} \quad \text{———— (20)}$$

โดยความต้านทานของวัตถุดิบแต่ละชนิดและของสารละลายต่อกันเป็นวงจรไฟฟ้าสมมูลย์ ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 วงจรไฟฟ้าสมมูลย์ของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด

$$R = R_{IS} + R_p \quad \text{———— (21)}$$

โดยที่

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_{IP}} + \sum_{i=1}^M \frac{1}{R_{sPi}}} \quad \text{———— (22)}$$

และหา R_{IS} R_{IP} และ R_{sPi} ได้ดังสมการที่ (23) ถึง (25) โดยใช้ A_{IS} A_{IP} A_{sPi} จากสมการ (13) (16) และ (18) และ L_{IS} L_{IP} L_{sPi} จากสมการ (14) (15) (17) และ (19)

$$R_{IS} = \frac{L(1 - v_f^s)^{1/3}}{A\sigma_1} \quad \text{———— (23)}$$

$$R_{IP} = \frac{Lv_f^s}{A(1 - v_f^s)^{2/3} \sigma_1} \quad \text{———— (24)}$$

$$R_{sPi} = \frac{Lv_f^s}{Av_{si}^{2/3} \sigma_{si}} \quad \text{———— (25)}$$

เมื่อทราบค่า R จากสมการ (21) แล้ว จะสามารถหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารได้จากสมการ (5)

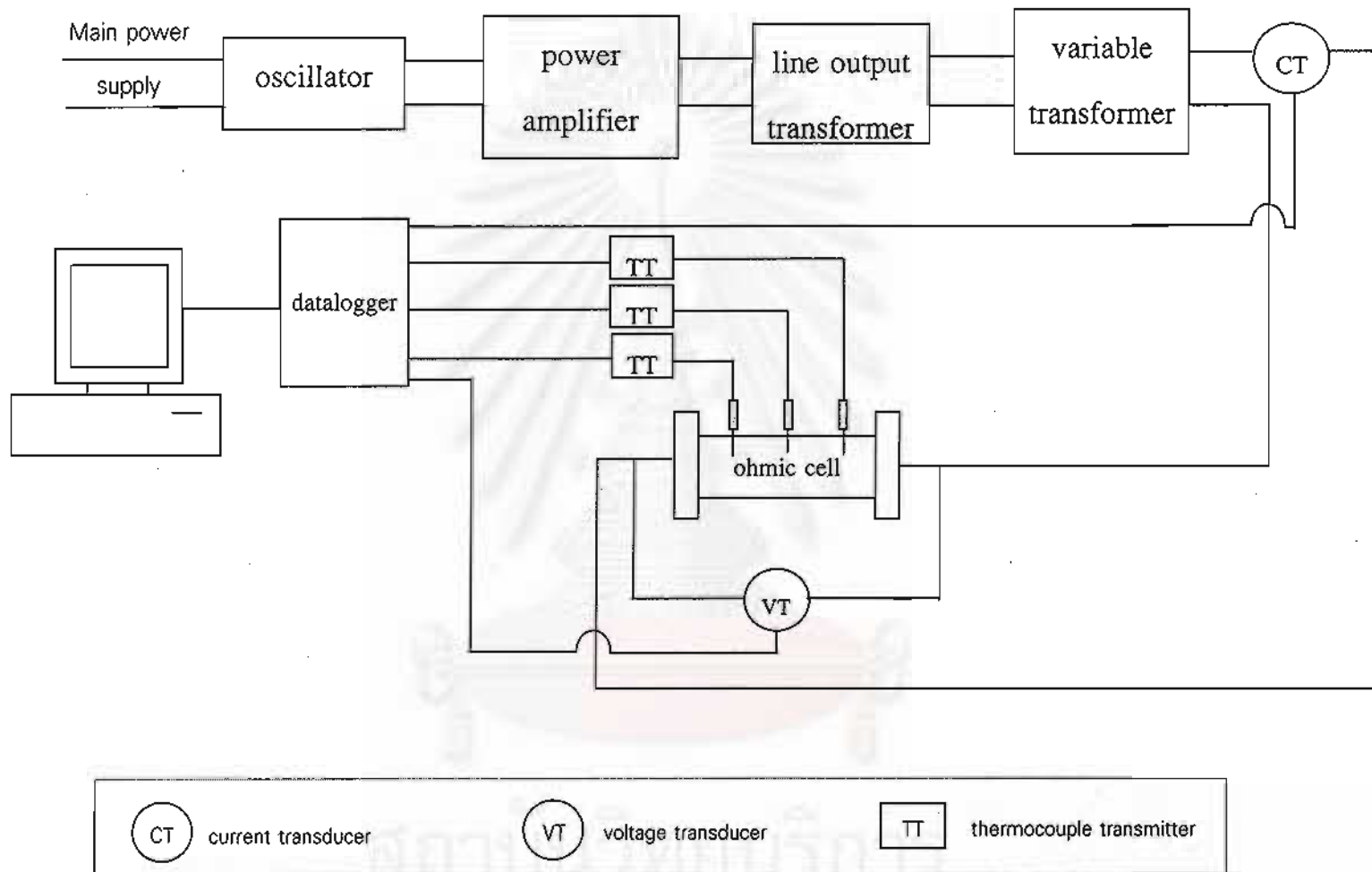
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

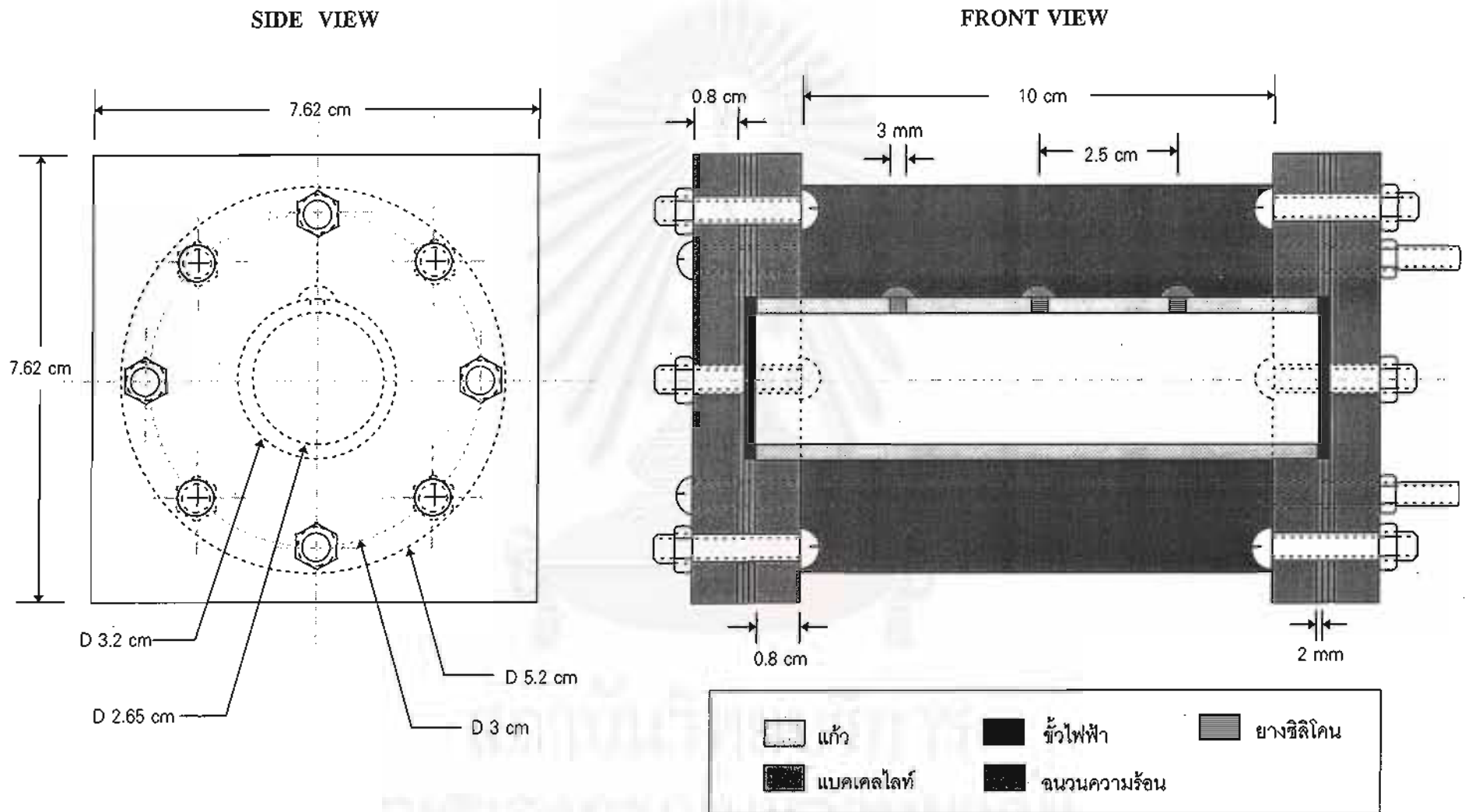
การทดลอง

3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอห์มมิก

เครื่องมือให้ความร้อนด้วยวิธีไอห์มมิกที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบสถิตย์หรือเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (รูปที่ 3.1) ซึ่งระบบสร้างพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้แก่อาหารประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณคือ ออสซิลเลเตอร์ (oscillator ยี่ห้อ KENWOOD รุ่น AG 203) ที่จะผลิตสัญญาณความถี่ทางไฟฟ้า แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกมามีกำลังอ่อนมากจึงต้องขยายกำลังโดยต่อเข้ากับเครื่องขยายกำลังไฟฟ้า (power amplifier, 500W) และต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดไลน์เอาต์พุท (line output transformer ยี่ห้อ NPE รุ่น L-600) และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเปลี่ยนค่าได้ (variable transformer ยี่ห้อ YOKOYAMA รุ่น TSB-7.5) เพื่อให้สามารถปรับและควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าของระบบก่อนจ่ายไฟฟ้าให้กับอาหารที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน สำหรับเซลล์ไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 3.2) ประกอบขึ้นจากท่อแก้วใสทนความร้อน ความดัน และเป็นฉนวนไฟฟ้ายาว 10 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.65 ซม. ความหนาท่อ 0.275 ซม. เจาะรู 3 รู ขนาด 3 มม. ห่างเท่า ๆ กันเป็นระยะ 2.5 ซม. อุดรูด้วยกาวซิลิโคนสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ปากท่อทั้งสองเชื่อมกับแผ่นแบคเคิลไลต์ (bakelite) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนความร้อนสูงและเป็นฉนวนไฟฟ้า รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 7.62x7.62x0.80 ซม. ที่เจาะตรงกลางเป็นรูวงกลมขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อแก้วโดยใช้กาวอีพอกซีและกาวซิลิโคนเป็นสารเชื่อม ปลายท่อทั้งสองด้านประกบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ติดกับแผ่นแบคเคิลไลต์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 7.62x7.62x0.80 ซม. โดยคั่นด้วยแผ่นยางซิลิโคนซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นยางกันรั่ว ทั้งแผ่นแบคเคิลไลต์ที่เชื่อมกับปากท่อหรือที่ติดกับขั้วไฟฟ้าและแผ่นยางซิลิโคนนั้นได้เจาะรูขนาด 0.6 ซม. จำนวน 8 รูเป็นวงรอบ ห่างจากจุดกึ่งกลางของแต่ละแผ่น 3 ซม. โดยรูที่ตำแหน่งกลางด้านทั้งสี่จะใช้ยึดแผ่นแบคเคิลไลต์ แต่ละข้างให้แน่น ส่วนรูที่เหลือจะใช้ยึดแบคเคิลไลต์ทั้งสองข้างให้แน่นด้วยนูนหลี เพื่อรักษาความดันภายในเซลล์เพื่อให้อาหารร้อนจนถึงอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ โดยไม่เกิดการเดือดของอาหารขึ้นขณะทดลอง อีกทั้งยังสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการระเบิดของเซลล์ไฟฟ้าเนื่องจากความดันของระบบที่สูงขึ้น และมีการป้องกันการ



รูปที่ 3.1 แผนภาพการต่อระบบสร้างพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้แก่อาหาร



รูปที่ 3.2 แผนภาพเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน

สูญเสียความร้อนจากเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน โดยใช้จนวนยางความหนา 2 ซม. หุ้มก่อนยึดแบบเคลสไลท์ทั้งสองข้างด้วยหนูลี นอกจากนี้ยังติดตั้งระบบการติดตามผลการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย current transducer voltage transducer และ thermocouple transmitter ที่รับสัญญาณอะนาล็อกของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และอุณหภูมิ ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลโดย datalogger เพื่อบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ (ทั้งนี้ควรหา calibration curve สำหรับ thermocouple transmitter แต่ละตัว ก่อนทำการทดลอง)

3.2 ทดสอบการทำงานและความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอหม่มิก

ทำการทดลองเบื้องต้นด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม. ให้กับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกัน ได้แก่ เหล็กปลอดสนิม เบอร์ 304 เหล็กปลอดสนิม เบอร์ 316 และไทเทเนียมบริสุทธิ์ สังเกตสีของขั้วไฟฟ้า ฟองอากาศและการปนเปื้อนของสนิมโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งจะไม่เกิดสีที่ขั้วไฟฟ้า ฟองอากาศและการปนเปื้อนของสนิมหรือเกิดน้อยที่สุด จากนั้นหาความถี่ที่เหมาะสมในการทดลอง โดยแปรความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ตั้งแต่ 50 เฮิร์ตซ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ และใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม. สังเกตสีของขั้วไฟฟ้าและฟองอากาศที่เกิดขึ้น (ความถี่ที่เหมาะสมจะไม่เกิดสีหรือฟองอากาศดังกล่าว)

ทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอหม่มิก โดยทดสอบการให้ความร้อนของเครื่องมือด้วยการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม. ให้กับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ แครอท มันฝรั่ง และ หัวผักกาดสดในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน และทดสอบความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอหม่มิกที่สร้างขึ้นตามวิธีของ Palaniappan และ Sasty (1991a) โดยใช้สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.02 โมลาร์ และ โมโนโซเดียมฟอสเฟต 0.1 โมลาร์ โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 4-6 โวลท์ ที่อุณหภูมิ 25.02 ± 0.54 °ซ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์นำไปคำนวณหาสภาพนำไฟฟ้าจากสมการ (5) และ (6) โดยสมมติว่าสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอ และ ขั้วไฟฟ้ากับอาหารสัมผัสกันอย่างดี เปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกับสภาพนำไฟฟ้าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง (Palaniappan and Sastry, 1991a)

3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผล

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด ได้แก่ แครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาด ซึ่งจากตลาดสดวัดกลาง ตลาดพลู โดยแครอทที่ใช้ในการทดลอง คือ แครอทพันธุ์แนนเทส (Nantes) (*Daucus carota*) ขนาดน้ำหนัก 200-240 กรัม/หัว ยาว 18-20 ซม. ความกว้างของหัว 3.4-3.8 ซม. ความชื้นร้อยละ 91.4 ± 0.2 ส่วนมันฝรั่งที่ใช้ คือ มันฝรั่งพันธุ์สปุนต้า (Spunta) (*Solanum tuberosum*) ขนาดน้ำหนัก 140-170 กรัม/หัว ยาว 8.1-9.4 ซม. ความกว้างของหัว 4.2-5.1 ซม. ความชื้นร้อยละ 84.4 ± 0.2 และหัวผักกาดที่ใช้ในการทดลองคือ หัวผักกาดพันธุ์เปา (*Raphanus salivus* L.) ขนาดน้ำหนัก 220-250 กรัม/หัว ยาว 20.5-23.3 ซม. ความกว้างของหัว 4.0-4.5 ซม. ความชื้นร้อยละ 95.5 ± 0.3

3.3.1 วัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลาย

แบ่งวัตถุดิบเป็น 2 พวก คือ วัตถุดิบสดและวัตถุดิบที่ผ่านการลวก โดยทำการทดลองเบื้องต้นกับวัตถุดิบสดทั้งสามที่ไม่ได้ผ่านการลวกก่อน

สำหรับวัตถุดิบสดเตรียมตัวอย่างโดยตัดแครอทเป็นแว่นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 ซม. หนา 3 มม. ส่วนวัตถุดิบที่ผ่านการลวกเตรียมตัวอย่างโดยหั่นแครอทเป็นท่อนหนา 2.54 ซม. นำไปลวกด้วยไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 2.5 นาที แล้วนำมาตัดเป็นแว่นรูปทรงกระบอกเช่นเดียวกับการเตรียมวัตถุดิบสด สำหรับมันฝรั่งและหัวผักกาดเตรียมตัวอย่างคล้ายกับแครอท แต่เวลาในการลวกของวัตถุดิบทั้งสองเป็น 3 นาที สำหรับสารละลายเกลือที่ใช้คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์

สำหรับตัวอย่างที่เป็นวัตถุดิบ ใส่วัตถุดิบลงในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนจนเต็มเสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลที่กึ่งกลางวัตถุดิบ ส่วนตัวอย่างที่เป็นสารละลายเกลือ เทสารละลายเกลือลงในท่อจนเต็ม เสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลที่กึ่งกลางท่อ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม. ไปยังตัวอย่างอาหารในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน บันทึกค่าความต่างศักย์ ค่ากระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ทุก ๆ 2 วินาที จากนั้นนำค่าความต่างศักย์และค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้มาคำนวณสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของวัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลาย จากสมการ (5) และ (6) เช่นเดียวกับในข้อ 3.2

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้าโดยวิธีสหสัมพันธ์ (correlation) และหาสมการความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น (Linear

Regression Analysis) เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองในข้อ 3.4 ด้วยโปรแกรม EXCEL (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2540)

หมายเหตุ การหาเวลาในการลวกของวัตถุดิบ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

3.3.2 อาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด (วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลาย)

เตรียมตัวอย่างโดยหั่นแครอทเป็นท่อน หน้า 2.54 ซม. นำไปลวกด้วยไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 2.5 นาที จากนั้นหั่นแครอทเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 0.7x0.7x0.7 ซม. สำหรับมันฝรั่งและหัวผักกาด เตรียมตัวอย่างคล้ายกับแครอท แต่เวลาในการลวกของวัตถุดิบทั้งสองเป็น 3 นาที

ใส่ตัวอย่างอาหารลงในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน แปรสัดส่วนปริมาตรของวัตถุดิบแต่ละชนิดในสารละลาย 3 ค่า คือ ร้อยละ 20 40 และ 60 (drain weight เท่ากับ 23.36 ± 0.98 46.02 ± 1.88 และ 68.11 ± 2.23 ตามลำดับ) เสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลที่กึ่งกลางวัตถุดิบและที่สารละลายเกลือในท่อ ปลดอยไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ 300 โวลต์ ผ่านตัวอย่างอาหารในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน บันทึกค่าความต่างศักย์ ค่ากระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิทุก ๆ 2 วินาที จากนั้นนำค่าความต่างศักย์และค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้มาคำนวณสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ (5) และ (6) เช่นเดียวกับในข้อ 3.2

นำอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้ายังผลมาสร้างกราฟและวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบสหสัมพันธ์ (correlation) ด้วยโปรแกรม EXCEL (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2540)

3.3.3 อาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (วัตถุดิบหลายชนิดในสารละลาย)

ตัวอย่างอาหารที่ทดลอง ได้แก่ แครอทและมันฝรั่ง แครอทและหัวผักกาด มันฝรั่งและหัวผักกาด และ แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาด ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เตรียมตัวอย่างและทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2 แต่ที่ทุกสัดส่วนปริมาตร วัตถุดิบแต่ละชนิดที่เป็นส่วนประกอบจะมีสัดส่วนปริมาตรเท่ากัน

3.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิด

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดด้วยการทวนสอบแบบจำลองที่อาศัยหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าที่ว่าความต้านทานของวัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลายต่อกันแบบผสม (Sastry, n.d.) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 โดยนำสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดในรูปของสมการเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1 มาแทนค่าในสมการที่ (10) (11) และ (12) สำหรับอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด และในสมการที่ (23) (24) และ (25) สำหรับอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด เพื่อคำนวณหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ (5) และ (9) สำหรับอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด และจากสมการ (5) (19) และ (20) สำหรับอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (โดยใช้อุณหภูมิของเหลวเป็นเกณฑ์) แล้วเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทำงานและความถูกต้องของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิก

จากการทำการทดลองเบื้องต้นด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม. ให้แก่สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้เหล็กปลอดสนิม เบอร์ 304 และ เหล็กปลอดสนิม เบอร์ 316 เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิด จะเกิดฟองอากาศขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะที่ขั้วไฟฟ้า และเกิดการปนเปื้อนของสนิมโลหะสีน้ำตาลแดงในสารละลายเป็นปริมาณมาก อีกทั้งขั้วไฟฟ้ามีสีน้ำตาลแดงของสนิมอีกด้วย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสหรือโพลาริเซชัน (Reznick, 1988) ซึ่งเมื่อเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าเป็นไทเทเนียมบริสุทธิ์ซึ่งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิม พบว่า ขั้วไฟฟ้าเริ่มมีสีม่วงที่อุณหภูมิประมาณ 80 °ซ และมีฟองอากาศเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า แต่มีจำนวนน้อยกว่าที่เกิดขึ้นจากการใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็กปลอดสนิมมาก และไม่พบการปนเปื้อนของสนิมเหล็กสีน้ำตาลแดงในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ ฉะนั้นจึงได้ใช้ไทเทเนียมบริสุทธิ์เป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสหรือโพลาริเซชันน้อยที่สุด และเมื่อแปรความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ตั้งแต่ 50 เฮิร์ตซ จนถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ พบว่า สีของขั้วไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีน้ำตาลและมีฟองอากาศลดลงมากเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น โดยเมื่อความถี่สูงขึ้น จะเกิดสีน้ำตาลน้อยลงและที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ ไม่ปรากฏสีที่ขั้วไฟฟ้าและไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ 1 กิโลเฮิร์ตซ

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนที่สร้างขึ้น ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 กิโลเฮิร์ตซ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม. ให้กับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ แครอท มันฝรั่ง และ หัวผักกาดสด พบว่า อุณหภูมิของสารละลายและวัตถุดิบดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นถึง 150 °ซ หรือมากกว่า จากการทดสอบด้วยสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.02 โมลาร์ พบว่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายทั้งสองคือ 0.620 และ 0.193 ซีเมนส์/เมตร ตามลำดับ ซึ่งต่างจากค่าที่รายงานคือ 0.63 และ 0.20 ซีเมนส์/เมตร (Palaniappan and Sastry, 1991a) เพียงร้อยละ 1.54 และ 3.55 ตามลำดับ แสดงว่า เครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิกที่สร้างขึ้นสามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 150 °ซ หรือมากกว่า อีกทั้งยังสามารถหาสภาพนำไฟฟ้าได้ผลค่อนข้างถูกต้อง

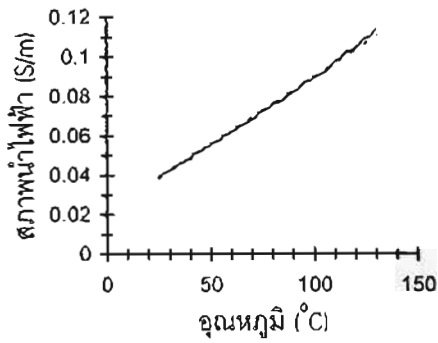
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผล

จากสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด และสารละลายที่วัดได้ นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าและหาสมการความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น และสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด (วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลาย) และของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (วัตถุดิบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในสารละลาย) ที่วัดได้จะนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลโดยวิธีสหสัมพันธ์

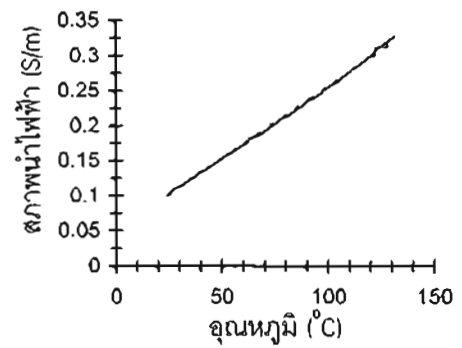
4.2.1 วัตถุดิบแต่ละชนิดและสารละลาย

จากการทดลองเบื้องต้นกับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการลวกทั้ง 3 ชนิด (รูปและตารางที่ ก.1) พบว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 60°C สภาพนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 60°C สภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เพราะภายในเนื้อเยื่อวัตถุดิบสดมีอากาศกักอยู่ระหว่างเซลล์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อากาศที่อยู่ในวัตถุดิบซึ่งเป็นตัวขัดขวางการนำไฟฟ้าจะถูกขับออก ทำให้สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60°C แต่ในแบบจำลองที่มีผู้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.4 สภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละตัวควรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ จึงนำแครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาดที่ผ่านการลวกแล้วมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้า ได้ผลดังรูปและตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบทั้งสามชนิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดปรากฏการณ์อิเล็กโทรโพเรชันขณะให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เมื่อวัตถุดิบอยู่ในสนามไฟฟ้า จะถูกชักนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่เมมเบรนมากกว่า 1 โวลต์โดยประมาณ เมมเบรนจะเกิดรูพรุน (pin hole) ภายในระยะเวลาอันสั้นเพียงไม่กี่วินาที ส่งผลให้น้ำที่อยู่รอบเซลล์ออสโมซิสเข้าไปในเซลล์ผ่านทางรูที่สร้างขึ้นเกิดความดันออสโมติก เซลล์จะขยายตัวใหญ่ขึ้นหรือแตกภายในช่วงวินาทีหรือนาทีเป็นเหตุให้ของเหลวภายในเซลล์แพร่ออกสู่ภายนอกเซลล์ โดยเหตุผลของการเกิดปรากฏการณ์อิเล็กโทรโพเรชันนี้ Charley (1986) ได้รายงานว่าการที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยัง beet root ในสารละลายเกลือ ซึ่ง beet root มีสารสีแดงของ betanine จำนวนมาก พบว่า betanine แพร่ออกสู่สารละลายภายนอกเป็นปริมาณมาก แสดงว่า สนามไฟฟ้าสามารถชักนำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของของเหลวภายในวัตถุดิบลดลง อีออน

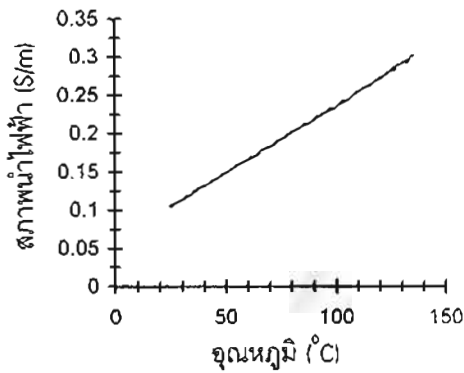
ก)



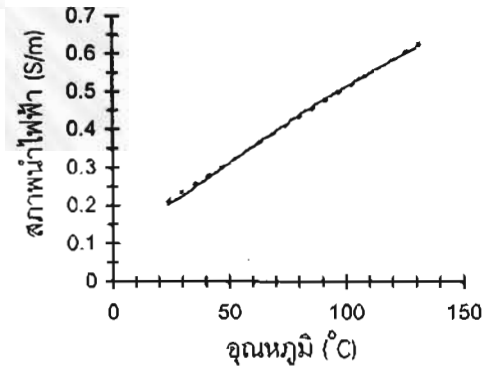
ค)



ข)



ง)



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอท ข) มันฝรั่ง ค) หัวผักกาด ง) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีอินทรีย์ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลท์/ซม.

คำอธิบายสัญลักษณ์

————— จากการทดลอง

..... จากสมการความสัมพันธ์ถดถอย

ตารางที่ 4.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ผ่านการลวกแล้ว และ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำที่มีความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มข้นน้ำไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.

ตัวอย่าง	สมการความสัมพันธ์ถดถอย	coefficient of determination
แครอท	$\sigma = 0.0007T + 0.0207$	0.9968
มันฝรั่ง	$\sigma = 0.0019T + 0.0553$	0.9988
หัวผักกาด	$\sigma = 0.0021T + 0.0487$	0.9986
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์	$\sigma = 0.0039T + 0.1195$	0.9977

ต่าง ๆ เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบแต่ละชนิดสูงขึ้น (Uemura and Noguchi, n.d.; Palaniappan and Sastry, 1991c) และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (รูปและตารางที่ 4.1) พบว่าอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายมีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลง อีออนต่าง ๆ ที่อยู่ในของสารละลายเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นหรือมี ionic mobility สูงขึ้น จึงนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ฉะนั้นสภาพนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Palaniappan and Sastry, 1991c)

จากผลที่ได้ข้างต้น สภาพนำไฟฟ้าของวัตถุดิบที่ผ่านการลวกแล้วมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วัตถุดิบที่ผ่านการลวกมาทดลองทดลองงานวิจัย

4.2.2 อาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด (วัตถุดิบ 1 ชนิดในสารละลายเกลือ)

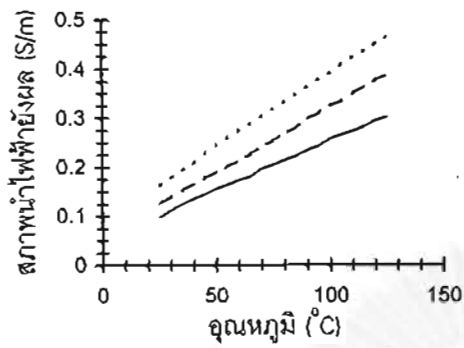
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลของแครอทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ มันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่สัดส่วนปริมาตรของชิ้นอาหารต่างกัน 3 ค่า คือ ร้อยละ 20 40 และ 60 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.2 และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่า ตัวอย่างอาหารทั้งสามที่ทุกสัดส่วนปริมาตรให้ผลคล้ายกัน คือ อุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากการเกิด electro-osmosis ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีชิ้นอาหารกระจายตัวในของเหลว โดยที่ชิ้นอาหารที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเนื้อเยื่อพืช ภายในเนื้อเยื่อมีองค์ประกอบพวกกรดอินทรีย์ ได้แก่

กรดซิตริก กรดมาลิก เป็นต้น โดยกรดอินทรีย์นี้แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และมีแร่ธาตุต่าง ๆ โดยแร่ธาตุที่มีมากที่สุดคือโปแตสเซียม (Duckworth, 1966) ซึ่งเป็นไอออนของโลหะ ฉะนั้นประจุของชั้นวัตถุติบจะเป็นประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์จะแตกตัวให้โซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งมีประจุเป็นบวก และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งมีประจุเป็นลบ เมื่อชั้นอาหารกระจายตัวอยู่ในสารละลาย ชั้นอาหารซึ่งมีประจุเป็นบวก จะจับคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบไว้ที่ผิวของชั้นอาหาร (dispersed phase) ส่วนโซเดียมไอออนจะอยู่ในส่วนของของเหลว (mobile phase) เมื่ออาหารอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โซเดียมไอออนจะวิ่งไปยังขั้วลบ (cathode) และจะวิ่งกลับไปกลับมาเนื่องจากการสลับขั้วไฟฟ้าทุก ๆ ครึ่งรอบของไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ส่วนของ mobile phase สามารถเคลื่อนที่ผ่านท่อแคปิลลารีหรือรูต่าง ๆ ในเนื้อเยื่อวัตถุติบ (Shaw, 1969) และเกิด electrokinetic ทำให้อาหารร้อนขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดของของเหลวลดลง ไอออนที่อยู่ในอาหารเคลื่อนที่ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าเมื่อสัดส่วนปริมาตรของชั้นวัตถุติบในอาหารเพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะมีค่าลดลงตลอดช่วงการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสภาพนำไฟฟ้าของวัตถุติบแต่ละชนิดกับสารละลายเกลือในข้อ 4.2.1 พบว่า เมื่อสัดส่วนปริมาตรของวัตถุติบในอาหารเพิ่มขึ้น ปริมาณชั้นวัตถุติบซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่าหรือนำไฟฟ้าได้น้อยกว่า มีปริมาณมากขึ้น และของเหลวในอาหารซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าหรือนำไฟฟ้าได้ดีกว่ามีปริมาณลดลง จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้ายังผลหรือสภาพนำไฟฟ้าโดยรวมของอาหารที่มีสัดส่วนปริมาตรของชั้นอาหารมากกว่ามีสภาพนำไฟฟ้ายังผลต่ำกว่าอาหารที่มีสัดส่วนปริมาตรของชั้นอาหารต่ำกว่าตลอดทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Palaniappan และ Sastry (1991b) ดังที่กล่าวไว้ในข้อ 2.2

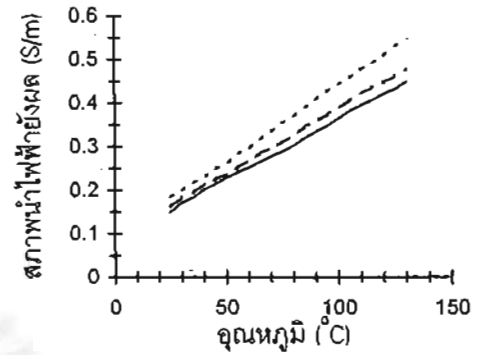
4.2.3 อาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด (วัตถุติบหลายชนิดในสารละลายเกลือ)

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิดที่ทดลอง ได้แก่ แครอทและหัวผักกาด แครอทและมันฝรั่ง หัวผักกาดและมันฝรั่ง และ แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาด ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรของวัตถุติบทั้งหมดในอาหารต่างกัน 3 ค่า คือ ร้อยละ 20 40 และ 60 (รูปที่ 4.3) พบว่า สภาพนำไฟฟ้ายังผลเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของวัตถุติบ

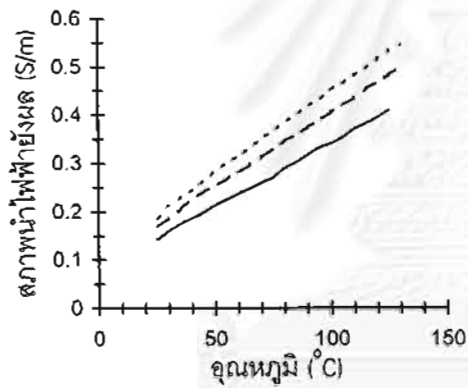
ก)



ค)



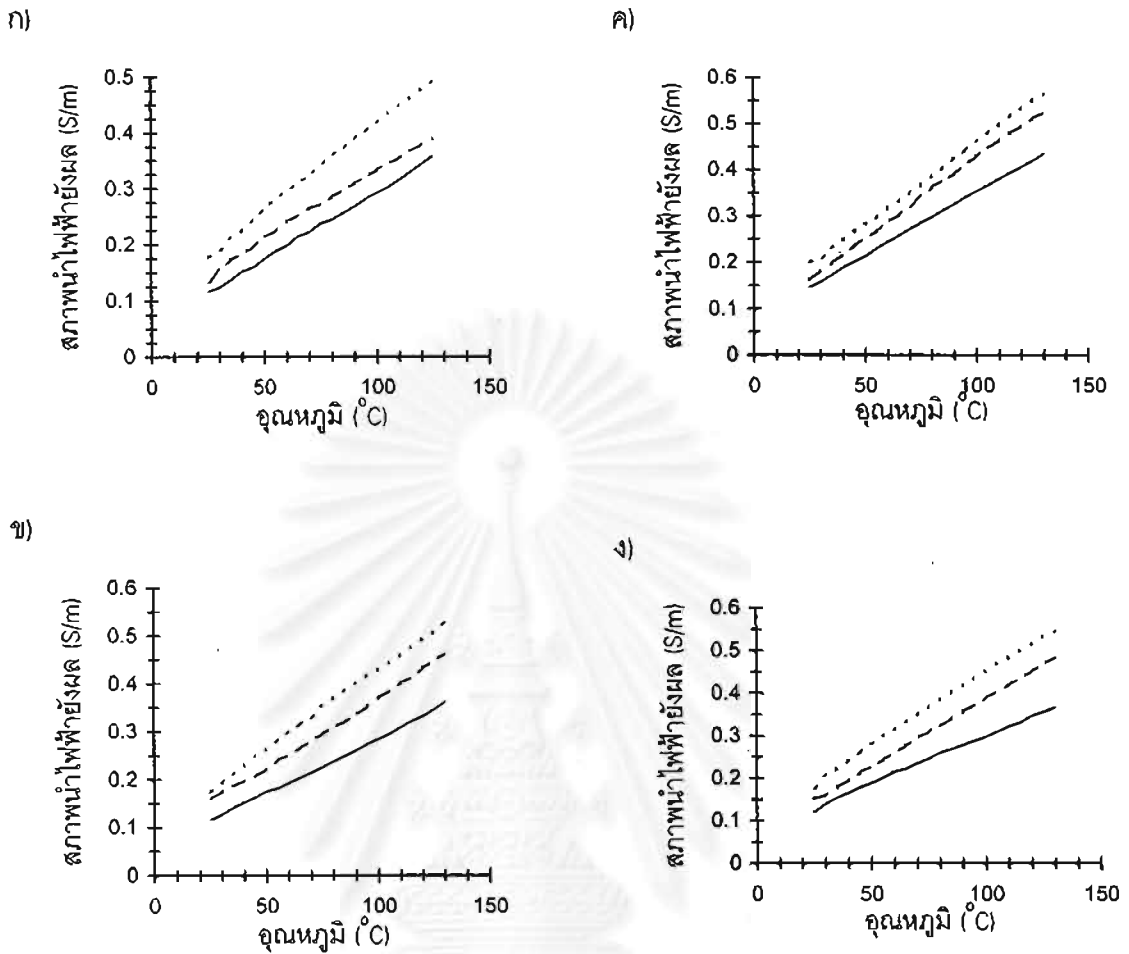
ข)



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ข) มันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค) หัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรต่าง ๆ กัน ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มข้นไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.

คำอธิบายสัญลักษณ์

- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทและมันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) แครอทและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ง) แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรต่าง ๆ กัน ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีอินหมิกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 300 โวลท์

คำอธิบายสัญลักษณ์

- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
- สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60

ทั้งหมดในอาหารให้มากขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะลดลงตลอดช่วงการให้ความร้อน ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับข้อ 4.2.2

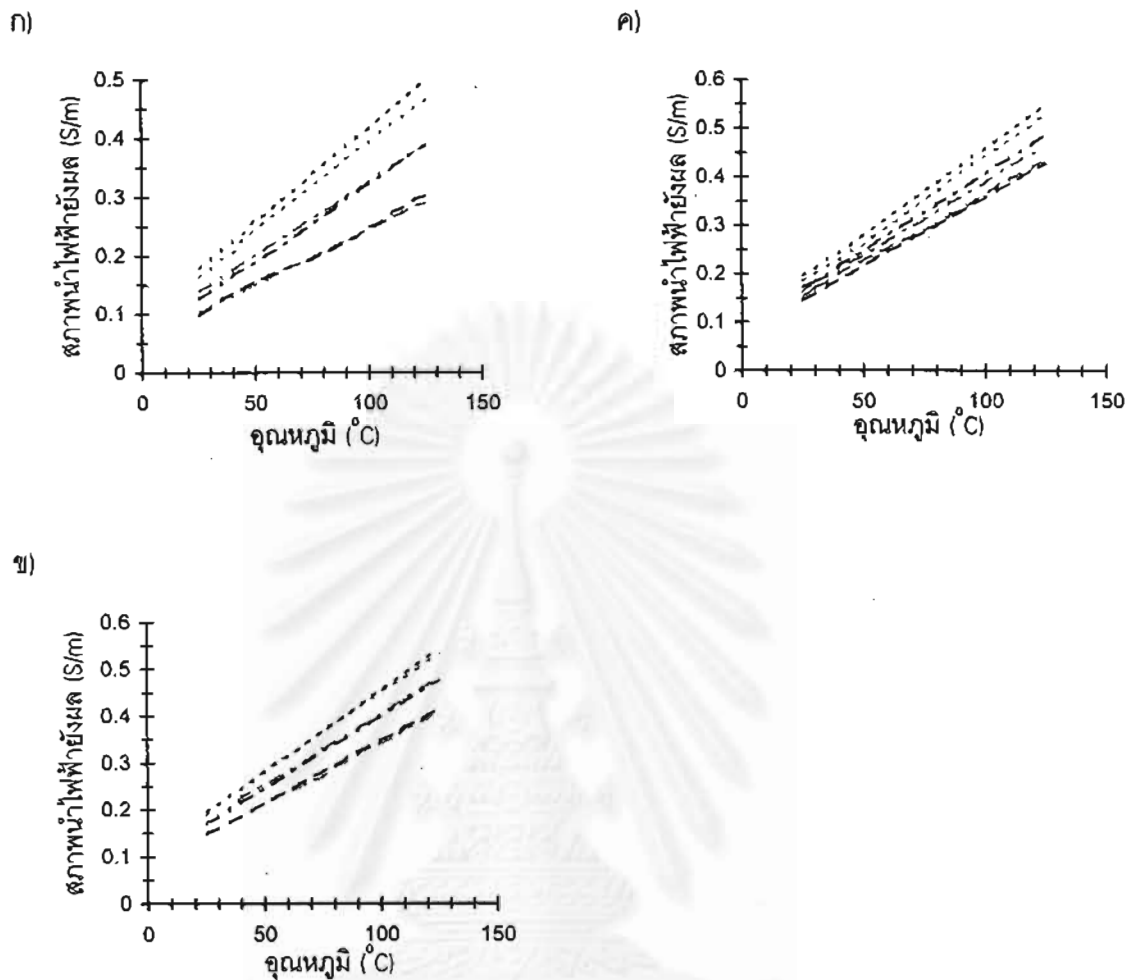
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิด

4.3.1 อาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด

จากการนำสมการความสัมพันธ์ถดถอยระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดจากตารางที่ 4.1 มาแทนค่าในสูตรจากแบบจำลองที่มีผู้เสนอไว้ตามข้อ 2.4.1 เพื่อคำนวณหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ได้ผลดังรูปที่ 4.4 และตารางในภาคผนวก ค. พบว่า สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารแต่ละชนิดจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลองโดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าแบบจำลองที่ Sastry (n.d.) เสนอไว้โดยมีแนวคิดว่าความต้านทานของวัตถุดิบและสารละลายต่อกันแบบผสมสามารถหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดได้

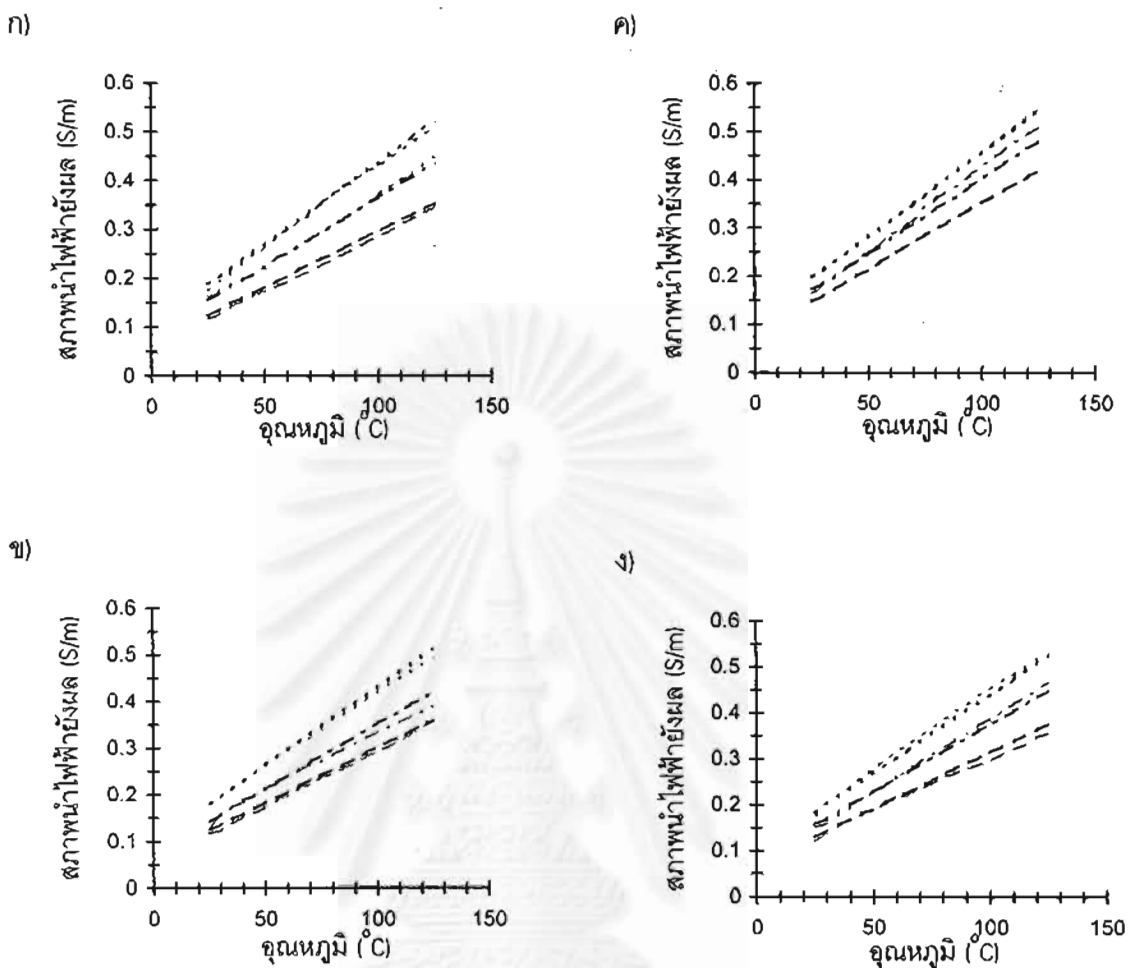
4.3.2 อาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิด

จากการนำสมการความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดจากตารางที่ 4.1 มาแทนค่าในสูตรจากแบบจำลองที่มีผู้เสนอไว้ตามข้อ 2.4.2 เพื่อคำนวณหาสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ได้ผลดังรูปที่ 4.5 และตารางในภาคผนวก ค. พบว่า สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารแต่ละชนิดจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลองโดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงว่า แบบจำลองที่ Sastry (n.d.) เสนอไว้สามารถทำนายสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารที่มีส่วนประกอบหลายชนิดได้



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของ ก) แครอท ข) มันฝรั่ง ค) หัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

- คำอธิบายสัญลักษณ์
- จากการศึกษาที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
 - จากการศึกษาที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
 - จากการศึกษาที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของ ก) แครอทและมันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ข) แครอทและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ค) มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ง) แครอท มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

- คำอธิบายสัญลักษณ์
-จากการทดลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 20
 - จากการทดลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 40
 - จากการทดลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60
 - จากแบบจำลอง ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60

ผลการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารกับสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิดที่ได้สนับสนุนแนวคิดของ Sastry (n.d.) ที่ว่าความต้านทานของวัตถุดิบและของสารละลายมีการต่อวงจรไฟฟ้าสมมูลย์แบบผสม ทั้งนี้วัตถุดิบควรผ่านการลวกมาก่อน ซึ่งหากไม่ลวกมาก่อนจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองแตกต่างจากการทดลองอย่างมากตั้งแต่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (รูปที่ ก.2 และตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก.) ทั้งนี้เพราะอากาศที่อยู่ภายในเนื้อเยื่อจะไปขัดขวางการนำไฟฟ้า

4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีอินหมิกที่สร้างขึ้น

ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีอินหมิกที่สร้างขึ้นนี้จะพิจารณาจากประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 26

$$\text{ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \quad (26)$$

$$\text{ซึ่ง } P_{\text{out}} = mC_p \Delta T / \Delta t \quad (27)$$

$$\text{เมื่อ } C_p = \sum_{i=1}^N w_i C_i \quad (28)$$

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อสัดส่วนปริมาณของชิ้นอาหารมากขึ้น ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยที่สัดส่วนปริมาณร้อยละ 20 40 และ 60 จะให้ประสิทธิภาพเป็นร้อยละ 27.15±0.18 33.19±0.58 และ 42.25±0.70 ตามลำดับ แสดงว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีอินหมิกแก่อาหารที่มีสัดส่วนปริมาณของชิ้นอาหารมากกว่า จะใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยกว่า ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีที่จะนำมาใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารที่มีชิ้นอาหารอยู่ในปริมาณมาก โดยที่การให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (conventional heating) นั้น จะต้องใช้เวลาอย่างมากในการให้ความร้อนแก่อาหารจนกระทั่งตำแหน่งที่ร้อนช้าที่สุด (cold spot) มีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะฆ่าเชื้อ ทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสไป (Duquenoey, 1983) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพที่ได้นี้ไม่สูง ทั้งนี้เนื่องจากความจำเป็นในการใช้ไฟฟ้ากระแส

สลักความถี่สูง เพื่อป้องกันปฏิกิริยาอิเล็กทรอนิกส์หรือโพลาริเซชัน ทำให้เกิดพลังงานตกคร่อมที่หม้อแปลงทั้งสอง

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีอินหมัมมิกที่สร้างขึ้น

ตัวอย่างอาหาร	สัดส่วนปริมาตร (ร้อยละ)	P_{in} (w)	P_{out} (w)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
แครอทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1M	20	500	137.00	27.40
	40	500	170.14	34.03
	60	500	215.13	43.03
มันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1M	20	500	134.11	26.82
	40	500	161.46	32.29
	60	500	207.43	41.49
หัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1M	20	500	135.56	27.11
	40	500	165.14	33.03
	60	500	207.07	41.41
แครอทและมันฝรั่งในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1M	20	500	136.08	27.22
	40	500	167.76	33.55
	60	500	210.32	42.06
แครอทและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1M	20	500	136.41	27.28
	40	500	167.85	33.57
	60	500	216.36	43.27
มันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 0.1M	20	500	135.35	27.07
	40	500	163.58	32.72
	60	500	211.02	42.20
แครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาดในสาร ละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1M	20	500	135.78	27.16
	40	500	165.86	33.17
	60	500	211.54	42.31

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำที่ผ่านการลวก โดยที่สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ
2. สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารจะลดลงตลอดช่วงการให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิก เมื่อสัดส่วนปริมาตรของวัตถุดิบทั้งหมดในอาหารเพิ่มขึ้น
3. สภาพนำไฟฟ้ายังผลของอาหารประเภทกรดต่ำสามารถคำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิด โดยแบบจำลองที่ Sastry (n.d.) เสนอไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบความถูกต้องของเครื่องในงานวิจัยใช้ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ควรทดลองวัดที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ (ความถี่ไฟบ้าน) ว่าจะให้ผลใกล้เคียงกันหรือไม่ และควรทดลองเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้าที่ความถี่แตกต่างกันตั้งแต่ 50 เฮิรตซ์ขึ้นไป เพื่อทดสอบผลของความถี่ต่อสภาพนำไฟฟ้า
2. เครื่องมือให้ความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิกที่สร้างขึ้นนี้เป็นแบบสถิตย์หรือแบบไม่ต่อเนื่อง ในการทดลองที่สัดส่วนปริมาตรสูง (ร้อยละ 60) เมื่ออุณหภูมิสูงถึงประมาณ 100 °ซ จะมีของเหลวซึมออกมาเล็กน้อย เนื่องจากอาหารขยายตัวและมีแรงดันภายในเซลล์มาก ฉะนั้นควรมีการปรับปรุงฝาปิดเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนให้ดียิ่งขึ้น เช่น ที่ปลายท่อทำเป็นฝาเกลียว เป็นต้น นอกจากนี้ควรติดตั้งระบบควบคุมความดันที่เพิ่มขึ้นตลอดการให้ความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิก เพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติการ
3. ในด้านของประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิกนั้นควรได้รับการพัฒนา โดยอาจลองใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำผสมกับความถี่สูงซึ่งจะให้ความต่างศักย์ขาออกจากหม้อแปลงสูงขึ้น ทำให้อาหารร้อนเร็วขึ้น นอกจากนี้อาจปรับขนาดของเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนด้วยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อน ทำให้ความต้านทานของอาหารลดลงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากขึ้น อาหารจะร้อนเร็วขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

มงคล เดชนครินทร์. 2522. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 165-192.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2540. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 292-344.

ภาษาอังกฤษ

Bleaney, B.I. and Bleaney, B. 1976. Electrical and Magnetism. 3rd ed., Trowbridge:Oxford University Press. pp. 90-92.

Charley, H. 1986. Food Science. 1st ed., New York:Macmillan Publishing Company. p. 157.

de Alwis, A.A.P., Halden, K., and Fryer, P.J. 1989. Shape and conductivity effects in the ohmic heating of foods. Chem. Eng. Res. Des. 67:159-168. cited in de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J. 1990. A finite element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. Chem. Eng. Sci. 45:1547-1559.

Duckworth, R.B. 1966. Fruit and Vegetables. London:Pergamon Press Ltd.

Dequenoy, A. 1983. Heat transfer in cans. In B.M. McKenna (ed.), Engineering and Food, pp. 209-216. London:Elsevier Applied Science Publishers.

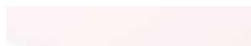
Hui, Y.H. 1992. Aseptic process:Ohmic heating. Encyclopaedia of Food Science and Technology 1:136-143.

- Isobe, S., Uemura, K., and Noguchi, A. n.d. Dewatering of soybean residue "okara" with an electro-osmosis and screw press. (Unpublished Manuscript)
- Khalaf, W.G. and Sastry, S.K. 1996. Effect of fluid viscosity on the ohmic heating rate of solid-liquid mixture. J. Food Eng. 27: 145-158.
- Larkin, J.W. and Spinak, S.H. 1996. Safety considerations for ohmically heated, aseptically processed, multiphase low-acid food products. Food Technol. 50(5): 242-245.
- Mitchell, F.R.G. and de Alwis, A.A.P. 1989. Electrical conductivity meter for food samples. J. Phys. E:Sci. Instrum. 22:554-556.
- Palaniappan, S. and Sastry, S.K. 1991a. Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. J. Food Proc. Eng. 14: 221-236.
- Palaniappan, S. and Sastry, S.K. 1991b. Modelling of electrical conductivity of liquid-particle mixtures. Trans IChemE 69: 167-173.
- Palaniappan, S. and Sastry, S.K. 1991c. Electrical conductivity of selected juices:Influence of temperature, solid content, applied voltage and particle size. J. Food Proc. Eng. 14:247-260.
- Parrott, D.L. 1992. Use of ohmic heating for aseptic processing of food particulates. Food Technol. 46(12):68-72.
- Quarini, G.L. 1995. Thermalhydraulic aspects of the ohmic heating process. J. Food Eng. 24:561-574.
- Reznick, D. 1988. Apparatus and method for electrical heating of food products, US Patent 4739140.
- Reznick, D. 1996. Ohmic heating of fluid foods. Food Technol. 50(5):250-251.

- Sastry, S.K. 1993. Electroconductive (Ohmic) heating for continuous sterilization for solid-liquid food mixtures. Ohio:The Ohio State University Research Foundation.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S. 1992a. Ohmic heating of liquid-particle mixture. Food Technol. 46(12): 64-67.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S. 1992b. Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater. J. Food Proc. Eng. 15: 241-261.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S. 1992c. Influence of particle orientation on the effective electrical resistance and ohmic heating rate of a liquid-particle mixture. J. Food Proc. Eng. 15:213-227.
- Sastry, S.K. n.d. Ohmic heating. OH:The Ohio State University. (Mimeographed)
- Shaw, D.J. 1969. Electrophoresis. London:Academic Press Inc. Ltd. pp. 1-2, 81-84.
- Uemura, K. and Noguchi, A. n.d. Ohmic heating of food materials principle and application effects of frequency on the heating rate of fish protein. Tsukuba:University of Tsukuba. (Unpublished Manuscript)
- Wang, W. and Sastry, S.K. 1997. Changes in electrical conductivity of selected vegetables during multiple thermal treatments. J. Food Proc. Eng. 20:499-516.
- Zoltai, P. and Swearingen, P. 1996. Product development considerations for ohmic heating. Food Technol. 50(5):263-266.



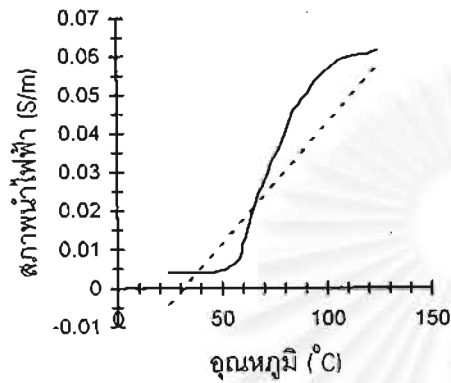
ภาคผนวก



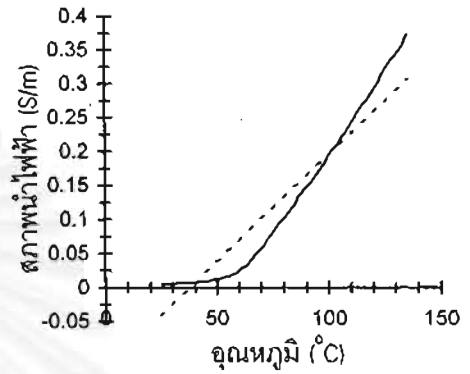
ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองสำหรับวัสดุบิสตที่ไม่ได้ผ่านการลวก

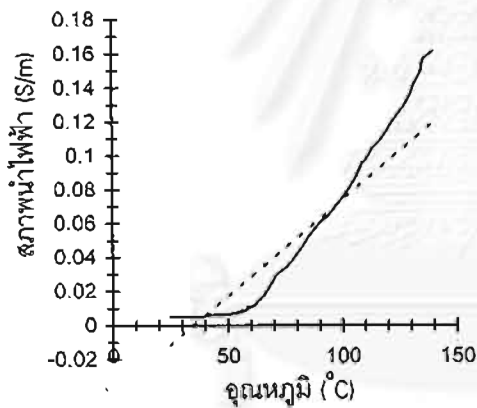
ก)



ค)



ข)



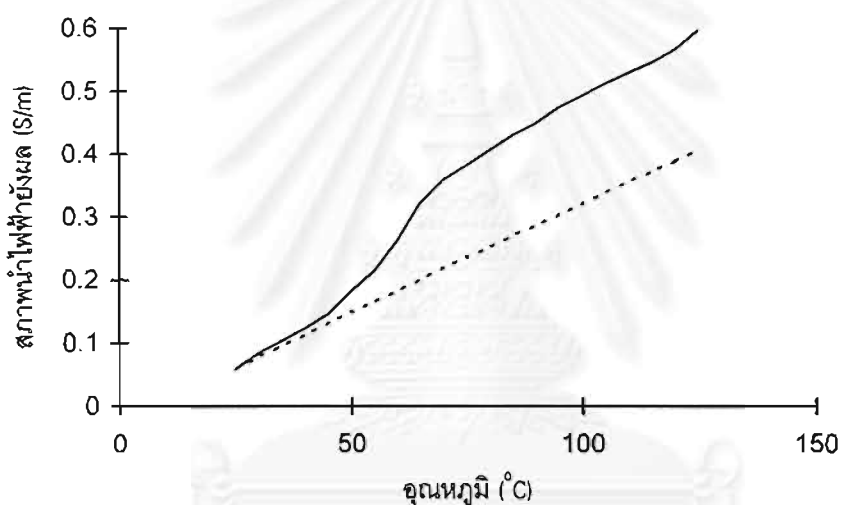
รูปที่ ก.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของ ก) แครอทสด ข) มันฝรั่งสด ค) หัวผักกาดสด
ขณะให้ความร้อนด้วยวิธีไอน้ำที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30
โวลต์/ซม.

คำอธิบายสัญลักษณ์ ———— จากการทดลอง

..... จากสมการความสัมพันธ์ถดถอย

ตารางที่ ก.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุบดขณะให้ความร้อนด้วยวิธีอินทรีย์ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 โวลต์/ซม.

ตัวอย่าง	สมการความสัมพันธ์ถดถอย	coefficient of determination
แครอท	$\sigma = 0.0006T - 0.0187$	0.7771
มันฝรั่ง	$\sigma = 0.0012T - 0.0439$	0.8674
หัวผักกาด	$\sigma = 0.0031T - 0.1109$	0.9049



รูปที่ ก.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดสดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60

คำอธิบายสัญลักษณ์ ———— จากการทดลอง
 จากสมการความสัมพันธ์ถดถอย

ตารางที่ ก.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดสดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรร้อยละ 60

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m)		ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)
	การทดลอง	แบบจำลอง	
25	0.0594	0.0583	-1.7650
30	0.0847	0.0784	-7.4565
35	0.1039	0.0955	-8.1171
40	0.1235	0.1131	-8.4333
45	0.1465	0.1318	-10.0731
50	0.1823	0.1487	-18.4613
55	0.2138	0.1648	-22.8868
60	0.2611	0.1818	-30.3642
65	0.3216	0.2000	-37.7969
70	0.3583	0.2187	-38.9541
75	0.3820	0.2356	-38.3332
80	0.4061	0.2515	-38.0579
85	0.4299	0.2702	-37.1498
90	0.4484	0.2860	-36.2230
95	0.4737	0.3032	-35.9796
100	0.4927	0.3199	-35.0823
105	0.5126	0.3388	-33.9105
110	0.5295	0.3564	-32.6986
115	0.5458	0.3725	-31.7615
120	0.5661	0.3890	-31.2876
125	0.5963	0.4068	-31.7776

ภาคผนวก ค.

การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองและจากการทดลอง

ตารางที่ ค.1 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของครอทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.1628	0.1781	0.1269	0.1395	0.0981	0.1036	9.3980	9.9291	5.6065
30	0.1784	0.1948	0.1401	0.1516	0.1133	0.1130	9.1928	8.2084	-0.2648
35	0.1947	0.2109	0.1542	0.1635	0.1263	0.1227	8.3205	6.0311	-2.8504
40	0.2074	0.2256	0.1672	0.1758	0.1364	0.1316	8.7753	5.1435	-1.4120
45	0.2293	0.2412	0.1788	0.1910	0.1456	0.1414	5.1897	6.8233	-2.8846
50	0.2459	0.2616	0.1899	0.2014	0.1573	0.1527	6.3847	6.0558	-2.9243
55	0.2614	0.2722	0.2024	0.2144	0.1649	0.1602	4.1316	5.9289	-2.8502
60	0.2754	0.2914	0.2127	0.2262	0.1747	0.1705	5.8097	6.3470	-2.4041
65	0.2901	0.3053	0.2280	0.2386	0.1810	0.1803	5.2396	4.6491	-0.3867
70	0.3047	0.3215	0.2412	0.2525	0.1878	0.1889	5.5136	4.6849	0.5857
75	0.3195	0.3403	0.2544	0.2644	0.1952	0.1978	6.5102	3.9308	1.3320
80	0.3345	0.3550	0.2678	0.2755	0.2046	0.2084	6.1286	2.8753	1.8573
85	0.3491	0.3710	0.2809	0.2877	0.2132	0.2168	6.2733	2.4208	1.6886
90	0.3645	0.3875	0.2982	0.3021	0.2245	0.2273	6.3100	1.3078	1.2472
95	0.3799	0.4033	0.3105	0.3133	0.2336	0.2346	6.1595	0.9018	0.4281
100	0.3927	0.4174	0.3252	0.3269	0.2488	0.2452	6.2898	0.5228	-1.4469
105	0.4111	0.4348	0.3352	0.3397	0.2562	0.2541	5.7650	1.3425	-0.8197
110	0.4248	0.4512	0.3507	0.3522	0.2737	0.2645	6.2147	0.4277	-3.3613
115	0.4374	0.4663	0.3640	0.3647	0.2830	0.2740	6.6072	0.1923	-3.1802
120	0.4527	0.4833	0.3771	0.3778	0.2959	0.2836	6.7594	0.1856	-4.1568
125	0.4655	0.4986	0.3883	0.3906	0.3021	0.2902	7.1106	0.5923	-3.9391

ตารางที่ ค.2 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของมันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.1877	0.1966	0.1693	0.1723	0.1474	0.1508	4.7416	1.7720	2.3066
30	0.2114	0.2111	0.1878	0.1849	0.1611	0.1603	-0.1419	-1.5442	-0.4966
35	0.2311	0.2307	0.2062	0.2006	0.1756	0.1732	-0.1731	-2.7158	-1.3667
40	0.2462	0.2444	0.2275	0.2167	0.1875	0.1866	-0.7311	-4.7473	-0.4800
45	0.2657	0.2624	0.2414	0.2317	0.1994	0.2002	-1.2420	-4.0182	0.4012
50	0.2848	0.2820	0.2536	0.2463	0.2141	0.2143	-0.9831	-2.8785	0.0934
55	0.3016	0.3005	0.2675	0.2603	0.2256	0.2282	-0.3647	-2.6916	1.1525
60	0.3147	0.3138	0.2812	0.2757	0.2376	0.2406	-0.2860	-1.9559	1.2626
65	0.3318	0.3319	0.2970	0.2932	0.2479	0.2546	0.0301	-1.2795	2.7027
70	0.3503	0.3507	0.3128	0.3076	0.2599	0.2687	0.1142	-1.6624	3.3859
75	0.3661	0.3684	0.3292	0.3248	0.2699	0.2811	0.6282	-1.3366	4.1497
80	0.3834	0.3854	0.3455	0.3388	0.2898	0.2934	0.5216	-1.9392	1.2422
85	0.3990	0.4014	0.3577	0.3529	0.3019	0.3089	0.6015	-1.3419	2.3186
90	0.4173	0.4192	0.3736	0.3678	0.3174	0.3226	0.4553	-1.5525	1.6383
95	0.4307	0.4373	0.3875	0.3844	0.3324	0.3361	1.5324	-0.8000	1.1131
100	0.4521	0.4557	0.4049	0.4001	0.3404	0.3476	0.7963	-1.1855	2.1152
105	0.4646	0.4707	0.4198	0.4152	0.3528	0.3605	1.3130	-1.0958	2.1825
110	0.4804	0.4894	0.4343	0.4298	0.3709	0.3764	1.8734	-1.0362	1.4829
115	0.4960	0.5063	0.4536	0.4467	0.3815	0.3874	2.0766	-1.5212	1.5465
120	0.5146	0.5251	0.4663	0.4616	0.3945	0.4006	2.0404	-1.0079	1.5463
125	0.5330	0.5422	0.4825	0.4761	0.4097	0.4137	1.7261	-1.3264	0.9763

ตารางที่ ค.3 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ที่สัดส่วนปริมาตร		
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
25	0.1855	0.1967	0.1634	0.1722	0.1512	0.1449	6.0377	5.3856	-4.1667
30	0.1996	0.2108	0.1840	0.1856	0.1724	0.1600	5.6112	0.8696	-7.1926
35	0.2167	0.2297	0.1948	0.1988	0.1828	0.1738	5.9991	2.0534	-4.9234
40	0.2291	0.2438	0.2140	0.2177	0.2017	0.1894	6.4164	1.7290	-6.0982
45	0.2496	0.2620	0.2250	0.2327	0.2146	0.2011	4.9679	3.4222	-6.2908
50	0.2595	0.2814	0.2373	0.2458	0.2287	0.2170	8.4393	3.5820	-5.1159
55	0.2827	0.2971	0.2531	0.2655	0.2410	0.2311	5.0937	4.8992	-4.1079
60	0.2956	0.3173	0.2676	0.2806	0.2523	0.2445	7.3410	4.8580	-3.0916
65	0.3154	0.3341	0.2842	0.2962	0.2651	0.2592	5.9290	4.2224	-2.2256
70	0.3331	0.3512	0.2966	0.3120	0.2778	0.2731	5.4338	5.1922	-4.4462
75	0.3533	0.3709	0.3102	0.3267	0.2890	0.2861	4.9816	5.3191	-1.0035
80	0.3683	0.3854	0.3259	0.3426	0.3029	0.2995	4.6430	5.1243	-1.1225
85	0.3879	0.4044	0.3447	0.3582	0.3194	0.3145	4.2537	3.9164	-1.5341
90	0.4075	0.4226	0.3575	0.3731	0.3337	0.3282	3.7055	4.3636	-1.6482
95	0.4255	0.4412	0.3733	0.3897	0.3475	0.3411	3.6898	4.3932	-1.8417
100	0.4421	0.4569	0.3869	0.4049	0.3635	0.3564	3.3477	4.6524	-1.9532
105	0.4570	0.4761	0.4055	0.4225	0.3812	0.3708	4.1794	4.1924	-2.7282
110	0.4764	0.4932	0.4205	0.4367	0.3945	0.3852	3.5264	3.8526	-2.3574
115	0.4910	0.5106	0.4350	0.4532	0.4067	0.3995	3.9919	4.1839	-1.7703
120	0.5071	0.5283	0.4464	0.4685	0.4203	0.4138	4.1806	4.9507	-1.5465
125	0.5301	0.5467	0.4618	0.4852	0.4325	0.4265	3.1315	5.0671	-1.3873

ตารางที่ ค.4 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแคโรทและมันฝรั่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.1745	0.1883	0.1612	0.1555	0.1164	0.1242	7.9083	-3.5360	6.7010
30	0.1928	0.2028	0.1750	0.1687	0.1277	0.1365	5.1867	-3.6000	6.8912
35	0.2109	0.2189	0.1869	0.1846	0.1419	0.1489	3.7933	-1.2306	4.9331
40	0.2308	0.2385	0.1977	0.1968	0.1528	0.1597	3.3362	-0.4552	4.5157
45	0.2504	0.2539	0.2073	0.2081	0.1630	0.1698	1.3978	0.3859	4.1718
50	0.2634	0.2690	0.2216	0.2232	0.1759	0.1829	2.1260	0.7220	3.9796
55	0.2832	0.2860	0.2408	0.2409	0.1819	0.1925	0.9887	0.0415	5.8274
60	0.3018	0.3034	0.2512	0.2513	0.1931	0.2050	0.5305	0.0398	6.1626
65	0.3155	0.3197	0.2654	0.2675	0.2039	0.2180	1.3312	0.7913	6.9152
70	0.3304	0.3369	0.2807	0.2798	0.2147	0.2287	1.9673	-0.3206	6.5207
75	0.3533	0.3534	0.2956	0.2932	0.2261	0.2398	0.0283	-0.8119	6.0593
80	0.3709	0.3706	0.3097	0.3075	0.2380	0.2487	-0.0809	-0.7104	4.4958
85	0.3870	0.3873	0.3203	0.3220	0.2489	0.2622	0.0775	-0.5308	5.3435
90	0.4021	0.4038	0.3345	0.3358	0.2609	0.2738	0.4228	0.3886	4.9444
95	0.4177	0.4210	0.3519	0.3508	0.2738	0.2858	0.7900	-0.3126	4.3828
100	0.4294	0.4358	0.3709	0.3645	0.2849	0.2962	1.4904	-1.7255	3.9663
105	0.4444	0.4540	0.3858	0.3776	0.2953	0.3083	2.1602	-2.1255	4.4023
110	0.4601	0.4718	0.4014	0.3933	0.3091	0.3184	2.5429	-2.0179	3.0087
115	0.4765	0.4886	0.4124	0.4060	0.3218	0.3305	2.5393	-1.5519	2.7035
120	0.4929	0.5056	0.4322	0.4200	0.3322	0.3408	2.5766	-2.8228	2.5888
125	0.5072	0.5188	0.4478	0.4339	0.3459	0.3530	2.2871	-3.1041	2.0526

ตารางที่ ค.5 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแควอทและหัวฝักกาดในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.1774	0.1815	0.1338	0.1430	0.1170	0.1260	2.3112	6.8759	7.6923
30	0.1914	0.1964	0.1572	0.1583	0.1245	0.1359	2.6123	0.6997	9.1566
35	0.2118	0.2131	0.1743	0.1739	0.1381	0.1486	0.6138	-0.2296	7.6032
40	0.2266	0.2305	0.1840	0.1881	0.1528	0.1595	1.7211	2.2283	4.3848
45	0.2458	0.2459	0.1965	0.1985	0.1603	0.1707	0.0407	1.0178	6.4878
50	0.2641	0.2657	0.2138	0.2137	0.1752	0.1845	0.6058	-0.0468	5.3082
55	0.2828	0.2820	0.2240	0.2265	0.1891	0.1938	-0.2829	1.1161	2.4855
60	0.2957	0.2966	0.2412	0.2429	0.1984	0.2063	0.3044	0.7048	3.9819
65	0.3106	0.3124	0.2527	0.2536	0.2148	0.2194	0.5795	0.3562	2.1415
70	0.3233	0.3311	0.2650	0.2709	0.2226	0.2313	2.4126	0.2264	3.9084
75	0.3418	0.3485	0.2712	0.2836	0.2380	0.2431	1.9602	4.5723	2.1429
80	0.3600	0.3644	0.2856	0.2984	0.2446	0.2537	1.2222	4.4818	3.7204
85	0.3715	0.3811	0.2974	0.3097	0.2568	0.2649	2.5841	4.1358	3.1542
90	0.3897	0.3964	0.3091	0.3243	0.2678	0.2765	1.7193	4.9175	3.2487
95	0.4035	0.4137	0.3212	0.3385	0.2819	0.2910	2.5279	5.3861	3.2281
100	0.4186	0.4303	0.3341	0.3534	0.2928	0.3017	2.7950	5.7767	3.0396
105	0.4364	0.4474	0.3444	0.3658	0.3027	0.3132	2.5206	6.2137	3.4688
110	0.4497	0.4625	0.3548	0.3774	0.3158	0.3246	2.8463	6.3698	2.7866
115	0.4634	0.4795	0.3677	0.3936	0.3299	0.3352	3.4743	7.0438	1.6065
120	0.4792	0.4978	0.3781	0.4047	0.3433	0.3488	3.8815	7.0352	1.6021
125	0.4943	0.5131	0.3910	0.4196	0.3581	0.3596	3.8034	7.3146	0.4189

ตารางที่ ค.6 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของมันฝรั่งและหัวผักกาดในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.2001	0.1968	0.1622	0.1718	0.1472	0.1474	-1.6492	5.9186	0.1359
30	0.2168	0.2096	0.1818	0.1856	0.1580	0.1583	-3.3210	2.0902	0.1899
35	0.2301	0.2288	0.1979	0.1991	0.1724	0.1727	-0.5650	0.6064	0.1740
40	0.2467	0.2459	0.2167	0.2163	0.1880	0.1883	-0.3243	-0.1846	0.1596
45	0.2660	0.2647	0.2352	0.2318	0.2011	0.2015	-0.4887	-1.4456	0.1989
50	0.2817	0.2830	0.2519	0.2475	0.2127	0.2131	-0.4615	-1.7467	0.1881
55	0.2944	0.2999	0.2648	0.2620	0.2291	0.2296	1.8682	-1.0574	0.2182
60	0.3157	0.3158	0.2857	0.2798	0.2433	0.2439	0.0317	-2.0651	0.2466
65	0.3309	0.3340	0.3001	0.2944	0.2562	0.2569	0.9368	-1.8994	0.2732
70	0.3481	0.3509	0.3179	0.3086	0.2705	0.2713	0.8044	-2.9254	0.2957
75	0.3668	0.3667	0.3422	0.3246	0.2846	0.2854	-0.0273	-5.1432	0.2811
80	0.3848	0.3854	0.3613	0.3409	0.2970	0.2979	0.1559	-5.6463	0.3030
85	0.4048	0.4040	0.3771	0.3557	0.3110	0.3119	-0.1976	-5.6749	0.2894
90	0.4254	0.4220	0.3892	0.3677	0.3246	0.3257	-0.7992	-5.5242	0.3389
95	0.4418	0.4402	0.4105	0.3873	0.3396	0.3407	-0.3622	-5.6516	0.3239
100	0.4595	0.4566	0.4285	0.4026	0.3524	0.3536	-0.6311	-6.0443	0.3405
105	0.4785	0.4743	0.4449	0.4183	0.3650	0.3664	-0.8777	-5.9789	0.3836
110	0.4959	0.4920	0.4623	0.4349	0.3786	0.3800	-0.7864	-5.9269	0.3698
115	0.5146	0.5093	0.4784	0.4492	0.3921	0.3937	-1.0299	-6.1037	0.4081
120	0.5313	0.5271	0.4942	0.4657	0.4049	0.4065	-0.7905	-5.7669	0.3952
125	0.5498	0.5452	0.5106	0.4804	0.4185	0.4203	-0.8367	-5.9146	0.4301

ตารางที่ ค.7 การเปรียบเทียบสภาพนำไฟฟ้ายังผลจากแบบจำลองกับสภาพนำไฟฟ้ายังผลที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของแครอท มันฝรั่ง และหัวผักกาดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ที่สัดส่วนปริมาตรแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	สภาพนำไฟฟ้ายังผลเฉลี่ย (S/m) ที่สัดส่วนปริมาตร						ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ) ที่สัดส่วนปริมาตร		
	ร้อยละ 20		ร้อยละ 40		ร้อยละ 60		ร้อยละ 20	ร้อยละ 40	ร้อยละ 60
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง			
25	0.1767	0.1829	0.1508	0.1581	0.1205	0.1308	3.5088	4.8408	8.5477
30	0.2050	0.2039	0.1603	0.1695	0.1397	0.1442	-0.5366	5.7392	3.2212
35	0.2231	0.2192	0.1780	0.1856	0.1544	0.1562	-1.7481	4.2697	1.1658
40	0.2419	0.2364	0.1959	0.2015	0.1661	0.1692	-2.2737	2.8586	1.8663
45	0.2624	0.2540	0.2133	0.2158	0.1793	0.1821	-3.2012	1.1721	1.5616
50	0.2793	0.2712	0.2279	0.2304	0.1888	0.1913	-2.9001	1.0970	1.3242
55	0.3002	0.2880	0.2427	0.2429	0.2021	0.2059	-3.7975	0.0824	1.8803
60	0.3143	0.3038	0.2611	0.2601	0.2151	0.2183	-3.3408	-0.3830	1.4877
65	0.3321	0.3195	0.2760	0.2731	0.2218	0.2280	-3.7940	-1.0507	2.7953
70	0.3493	0.3377	0.2950	0.2878	0.2353	0.2392	-3.3209	-2.4407	1.6575
75	0.3679	0.3562	0.3093	0.3028	0.2458	0.2531	-3.1802	-2.1015	2.9699
80	0.3839	0.3725	0.3227	0.3159	0.2601	0.2673	-2.9695	-2.1072	2.7682
85	0.4031	0.3899	0.3409	0.3312	0.2686	0.2801	-3.2746	-2.8454	4.2815
90	0.4171	0.4072	0.3563	0.3461	0.2782	0.2918	-2.3735	-2.8628	4.8886
95	0.4366	0.4233	0.3730	0.3611	0.2879	0.3017	-3.0463	-3.1903	4.7933
100	0.4518	0.4410	0.3894	0.3752	0.2974	0.3150	-2.3904	-3.6466	5.9180
105	0.4694	0.4570	0.4038	0.3895	0.3099	0.3265	-2.6417	-3.5414	5.3566
110	0.4837	0.4734	0.4199	0.4047	0.3217	0.3392	-2.1294	-3.6199	5.4399
115	0.4998	0.4912	0.4356	0.4190	0.3314	0.3521	-1.7207	-3.8108	6.2462
120	0.5165	0.5089	0.4511	0.4341	0.3472	0.3639	-1.4714	-3.7686	4.8099
125	0.5319	0.5265	0.4686	0.4486	0.3566	0.3764	-1.0152	-4.2680	5.5524

ประวัติผู้เขียน

นางสาว สุพร กาญจนกิจสกุล เกิดวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2518 ได้รับปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จากคณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.
2539

