


แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของระบบอาหารจำลอง ระหว่างการให้ความร้อน  
ด้วยวิธีไอห้หมกในช่วงอุณหภูมิสเตอริไลซ์



นางปัทมา ระตะนะอาพร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5093-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODELLING FOR TEMPERATURE PREDICTION OF MODEL-FOOD SYSTEM  
DURING OHMIC HEATING IN STERILIZATION TEMPERATURE RANGE

Mrs.Pathma Ratana-arporn



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

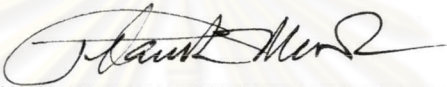
Academic year 2003

ISBN 974-17-5093-5

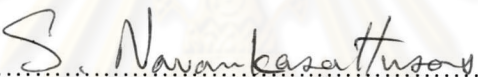
Thesis Title MATHEMATICAL MODELLING FOR TEMPERATURE  
PREDICTION OF MODEL-FOOD SYSTEM DURING OHMIC  
HEATING IN STERILIZATION TEMPERATURE RANGE  
By Pathma Ratana-arporn  
Field of Study Food Technology  
Thesis Advisor Associate Professor Kalaya Laohasongkram, Ph.D.  
Thesis Co-advisor Associate Professor Saiwarun Chaiwanichsiri, Ph.D.

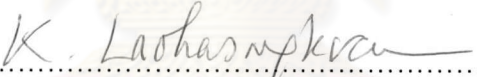
---

Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment  
of the Requirements for the Doctor's Degree

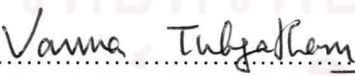
  
..... Dean of the Faculty of Science  
(Professor Piamsak Menasveta, Ph.D.)

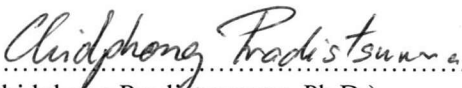
THESIS COMMITTEE


  
..... Chairman  
(Assistant Professor Surapong Navankasattusas, Ph.D.)

  
..... Thesis Advisor  
(Associate Professor Kalaya Laohasongkram, Ph.D.)

  
..... Thesis Co-advisor  
(Associate Professor Saiwarun Chaiwanichsiri, Ph.D.)

  
..... Member  
(Associate Professor Vanna Tulyathan, Ph.D.)

  
..... Member  
(Chidphong Praditsuwana, Ph.D.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Tipaporn Yoovidhya, Ph.D.)

ปีหมา ระตะนะอาพร : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของระบบอาหารจำลองระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกในช่วงอุณหภูมิสเตอริไลซ์ (MATHEMATICAL MODELLING FOR TEMPERATURE PREDICTION OF MODEL-FOOD SYSTEM DURING OHMIC HEATING IN STERILIZATION TEMPERATURE RANGE)

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ. ดร.กัลยา เลานหงศกรม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: รศ. ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ 145 หน้า.

ISBN 974-17-5093-5.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของระบบอาหารจำลองและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายสภาพนำไฟฟ้ายังผลและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบอาหารที่เป็นของผสมของของเหลวและชิ้นของแข็งระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกในช่วงอุณหภูมิสเตอริไลซ์ โดยเซลล์ให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแบบสถิตย์ทำจากท่อเทพลอนเจาะให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.65 เซนติเมตร ประกอบปลายท่อด้วยขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมบริสุทธิ์ และตรวจสอบโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 และ 0.02 โมลาร์ และสารละลายโมโนโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าสภาพนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิ 25°C มีความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิง 6.75, 2.64 และ 0.87% ตามลำดับ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของอาหารประเภทของแข็ง พบว่าความเข้มข้นของน้ำ (7-16 โวลต์/เซนติเมตร) และความถี่ไฟฟ้า (50-1000 เฮิรท์) ไม่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของมันฝรั่งและหัวผักกาดที่ผ่านการลวกแล้ว เนื้อหมู และซูริมิ อย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของอาหารประเภทของเหลว พบว่าความเข้มข้นของน้ำ (18.2 - 47.3 โวลต์/เซนติเมตร) และความถี่ไฟฟ้า (50-1000 เฮิรท์) ไม่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) เช่นกัน แต่ความเข้มข้นของเกลือ (0-1.5%) น้ำตาล (0-15%) และแป้งมันฝรั่ง (0-8%) มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยเกลือ มีผลทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขณะที่น้ำตาล และแป้งมันฝรั่งมีผลทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลง จากการพัฒนาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและองค์ประกอบดังกล่าวพบว่า  $\sigma = 0.379 + 0.871S_a - 0.0371S_t - 0.0298S_u + 0.00164T + 0.0251S_aT$  ( $R^2 = 0.994$ ) เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า (S/m),  $T$  คือ อุณหภูมิ (°C),  $S_a$  คือ ปริมาณเกลือ (%w/w),  $S_u$  คือ ปริมาณน้ำตาล (%w/w) และ  $S_t$  คือ ปริมาณแป้ง (%w/w) และสมการนี้สามารถทำนายสภาพนำไฟฟ้าได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 3

ในระบบอาหารที่ประกอบด้วยชิ้นของแข็งในของเหลวโดยแปรสัดส่วนปริมาตรของชิ้นของแข็งเป็น 0.2 0.4 และ 0.6 และให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกที่ความถี่ 50 เฮิรท์ ความเข้มข้นของน้ำ 15 โวลต์/เซนติเมตร จนถึงอุณหภูมิ 125°C จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้ายังผลพบว่าค่าของสภาพนำไฟฟ้ายังผลขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าและสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิและสามารถคำนวณได้จากค่าสภาพนำไฟฟ้าของส่วนประกอบแต่ละชนิด ปริมาตรชิ้นอาหาร และขนาดของเซลล์ไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองที่พิจารณาการจัดเรียงตัวของชิ้นของแข็งในสารละลายเสมือนการต่อกันของความต้านทานไฟฟ้า (circuit-analogy model) โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 และผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นของแข็งและของเหลวในอาหารที่ประกอบด้วยชิ้นอาหารในของเหลวที่สัดส่วนปริมาตร 0.2 0.4 และ 0.6 พบว่าชิ้นของแข็งร้อนขึ้นได้ใกล้เคียงกับของเหลว แม้ว่าสภาพนำไฟฟ้าของของแข็งจะต่ำกว่าของเหลว และในระหว่างการให้ความร้อนอุณหภูมิของของแข็งจะต่ำกว่าอุณหภูมิของของเหลวที่สัดส่วนปริมาตรต่ำ แต่สูงกว่าของเหลวเมื่อสัดส่วนปริมาตรของของแข็งเพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารสอดคล้องกับค่าสภาพนำไฟฟ้ายังผล กล่าวคือการเพิ่มปริมาณของแข็งซึ่งนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่าทำให้สภาพนำไฟฟ้ายังผลต่ำลง ของผสมอาหารทั้งหมดร้อนได้ช้าลง นอกจากนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองในการทำนายอุณหภูมิของอาหารส่วนที่ร้อนช้าที่สุด โดยคำนวณจาก สภาพนำไฟฟ้ายังผล ความเข้มข้นของน้ำ ความสัมพันธ์ทางกายภาพและทางความร้อนเฉลี่ยของระบบ และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิส่วนที่ร้อนช้าที่สุดของอาหารส่วนใหญ่ ได้ต่ำกว่าการทดลองร้อยละ 11

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4273847623 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: OHMIC HEATING/SOLID-LIQUID MIXTURE/STERILIZATION/  
 MATHEMATICAL MODEL/ ELECTRICAL CONDUCTIVITY  
 PATHMA RATANA-ARPN: MATHEMATICAL MODELLING FOR  
 TEMPERATURE PREDICTION OF MODEL-FOOD SYSTEM DURING  
 OHMIC HEATING IN STERILIZATION TEMPERATURE RANGE. THESIS  
 ADVISOR: ASSOC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM, Ph.D., THESIS  
 COADVISOR: ASSOC. PROF. SAIWARUN CHAIWANICHSIRI, Ph.D., 145  
 pp. ISBN 974-17-5093-5.

The objectives of this research were to investigate factors affecting the electrical conductivity ( $\sigma$ ) of model food system and to develop empirical models for  $\sigma$  and heat distribution during ohmic heating in sterilization temperature range. A static ohmic heating cell consisted of a cylindrical sample chamber made of teflon drilled with 2.65 cm inside diameter and titanium electrodes at both ends. The ohmic cell was tested with 0.1 and 0.02 M sodium chloride and 0.1 M monosodium phosphate at 25°C and it was found that the differences between the measured and the reported  $\sigma$  were 6.75, 2.64 and 0.87%, respectively.

The effect of voltage gradient (7-16V/cm) and frequency (50-1000 Hz.) on  $\sigma$  of potato, blanched white radish, pork, and surimi were investigated. It was found that the  $\sigma$ s of the solid foods were not significantly affected by voltage and frequency ( $p > 0.05$ ). For model liquid food system, investigated factors were voltage gradient (18.2-47.3 V/cm), frequency (50-1000 Hz.), salt concentration (0-1.5%), sugar concentration (0-15%), and potato starch concentration (0-8%). The results showed that voltage and frequency did not significantly affect the  $\sigma$  of the system ( $p > 0.05$ ) while salt, sugar and starch concentration did ( $p \leq 0.05$ ). Addition of salt increased the  $\sigma$  of the system while sugar and starch would decrease. The empirical correlation between  $\sigma$  of the system ( $\sigma$ , S/m), temperature (T, °C), and salt (Sa), sugar (Su), and starch (St) in %w/w was  $\sigma = 0.379 + 0.871Sa - 0.0371St - 0.0298Su + 0.00164T + 0.0251SaT$  ( $R^2 = 0.994$ ). The model gave the best prediction with 3% average error.

Ohmic heating of liquid-particle food mixture of selected combinations of solid and liquid with the volume fraction of 0.2, 0.4, and 0.6 at 50 Hz. and 15 V/cm were investigated. The effective  $\sigma$  ( $\sigma_{\text{eff}}$ ) of the mixture was linear relationship with temperature and the value depended on the  $\sigma$  and volume fraction of solid (vf). The  $\sigma_{\text{eff}}$  could be possibly calculated from the  $\sigma$  of individual components, vf of solids and dimensions of ohmic cell based on circuit-analogy concept with 10% error. During heating, it was found that the solid could heat as fast as the liquid even though it was less conductive than the liquid. Increasing vf of solid from 0.2 to 0.6, caused the heat profile to change from particle-lagging to particle leading in most cases. The heating rates of the mixture decreased as the  $\sigma_{\text{eff}}$  decreased due to more low-conductive solids in the mixture. Mathematical model for temperature prediction of the slowest heating phase could be calculated from the  $\sigma_{\text{eff}}$ , electric field strength and average thermophysical properties of the mixture. The model gave satisfactory agreement with 11% underprediction in most cases.

Department of Food Technology  
 Field of study Food Technology  
 Academic year 2003

Student's signature..... *P. Ratana-arpan*  
 Advisor's signature..... *K. Lahasongkram*  
 Co-advisor's signature..... *Saiwarun Chaiwanichsiri*

## ACKNOWLEDGMENTS

I would first like to express my deepest gratitude to my advisor, Assoc. Prof. Dr. Kalaya Laohasongkram and my co-advisor, Assoc. Prof. Dr. Saiwarun Chaiwanichsiri for their excellent supervision, encouragement, support and valuable guidance throughout my study. I also wish to thank my thesis committee Asst. Prof. Dr. Surapong Navankasattusas, Assoc. Prof. Dr. Vanna Tulyathan, and Asst. Prof. Dr. Tipaporn Yoovidhya for their valuable suggestions. I would particularly like to extend my sincere thanks to Dr. Chidphong Pradistsuwana and Assoc. Prof. Pipat Laohasongkram who always gave me valuable suggestions whenever I got problems in chemical and electrical engineering.

While there are too many to mention individually, I wish to thank all friends and officers in the department of Food Technology and Department of Fishery Products for their help and encouragement.

Finally, I can say that without family, I wouldn't have been able to achieve the Ph.D. degree. I would like to forward my special thanks to my parents, husband, and sons who give me an opportunity, always stand by me and support me in every way they can do.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## TABLE OF CONTENTS

	<b>Page</b>
ABSTRACT (Thai).....	iv
ABSTRACT (English).....	v
ACKNOWLEDGMENT.....	vi
TABLE OF CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	x
LIST OF FIGURES .....	xii
NOMENCLATURE.....	xiii
<b>CHAPTER</b>	
I INTRODUCTION .....	1
II LITERATURE REVIEW.....	3
2.1 Ohmic heating process .....	3
2.2 Electrical Conductivity .....	4
2.3 Factors affecting the ohmic heating rate .....	4
2.3.1 Electrical conductivity of food .....	5
2.3.1.1 Temperature .....	5
2.3.1.2 Ionic constituent .....	9
2.3.1.3 Food structure .....	11
2.3.1.4 Voltage gradient .....	12
2.3.1.5 pH .....	14
2.3.2 Electric field strength or current density .....	14
2.3.3 Frequency and wave form .....	14
2.3.4 Fluid viscosity .....	15
2.3.5 Particle size .....	16
2.3.6 Particle shape and orientation .....	16
2.3.7 Particle concentration .....	17
2.3.8 Thermal properties of the food .....	20
2.3.8.1 Specific heat .....	21
2.4. Ohmic heating of liquid-particle mixture in static heater .....	22
2.4.1 Effective electrical conductivity .....	22
2.4.1.1 The circuit analogy concept .....	23
2.4.1.2 Unit cell theory .....	26
2.4.2 Temperature distribution .....	28
2.4.3 Experimental studies of temperature prediction .....	29
III MATERIALS AND METHODS .....	36
3.1 The ohmic heating apparatus .....	36
3.1.1 Design of the ohmic heating cell .....	36
3.1.1.1 Factors for consideration .....	36
3.1.1.2 Experimental device.....	37
3.1.2 Experimental setup .....	39
3.1.3 Test for accuracy of the device .....	42
3.2 Electrical conductivity measurement .....	42
3.3 Factors affecting the electrical conductivity of solid foods .....	43

## TABLE OF CONTENTS(CON'T)

	<b>Page</b>
3.3.1 Solid sample preparation.....	43
3.3.2 Effect of voltage and frequency on electrical conductivity of solid foods .....	44 45
3.4 Factors affecting the electrical conductivity of liquid foods .....	45
3.4.1 Liquid sample preparation .....	
3.4.2 Effect of investigating factors on electrical conductivity of liquid foods .....	45
3.5 Correlation between ingredients and electrical conductivity of model liquid	46
3.5.1 Starch paste preparation .....	46
3.5.2 Data analysis .....	46
3.6 Effective electrical conductivity and heat distribution of solid-liquid food mixture .....	46
3.6.1 Sample preparation .....	46
3.6.2 Experimental setup.....	47
3.7 Relationship between effective electrical conductivity and electrical conductivities of both phases.....	48
3.8 Mathematical models for temperature prediction .....	49
3.9 The efficiency of energy conversion from electrical energy to thermal energy .....	51
<b>IV RESULTS AND DISCUSSION.....</b>	<b>52</b>
4.1 Design of the ohmic heating cell.....	52
4.2 Effect of voltage and frequency on electrical conductivity of solid foods	53
4.2.1 Effect of voltage.....	53
4.2.2 Effect of frequency.....	58
4.3 Factors affecting electrical conductivity of model liquid foods.....	61
4.3.1 Effect of voltage.....	61
4.3.2 Effect of frequency.....	61
4.3.3 Effect of salt.....	64
4.3.4 Effect of starch.....	65
4.3.5 Effect of sugar.....	66
4.4 Correlation between ingredients and electrical conductivity of model liquid .....	69
4.5 Effective electrical conductivity of the solid-liquid mixture .....	75
4.5.1 Electrical conductivity of individual phases.....	75
4.5.2 Effective electrical conductivity.....	77
4.5.2.1 Single-type solid in liquid.....	77
4.5.2.2 Two-type solids in liquid.....	80
4.6 Prediction of effective electrical conductivity of solid-liquid mixture .....	83
4.7 Temperature prediction from the developed mathematical model.....	87
4.7.1 Single-type solid in liquid.....	87
4.7.2 Two-type solids in liquid.....	95



## TABLE OF CONTENTS(CON'T)

	<b>Page</b>
4.8 The efficiency of energy conversion from electrical energy to thermal energy.....	103
V CONCLUSION.....	106
REFERENCES.....	108
<b>APPENDICES</b>	
APPENDIX A.....	113
APPENDIX B.....	117
APPENDIX C.....	120
APPENDIX D.....	121
APPENDIX E.....	132
APPENDIX F.....	143
VITA.....	145


  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF TABLES

TABLE	Page
2.1	The temperature dependence electrical conductivity equations of food materials..... 7
2.2	The temperature and composition dependence electrical conductivity equations of food materials..... 8
2.3	Parameters of the electrical conductivity equations of vegetable soaked in various solutions ..... 10
3.1	The properties of mixture for temperature prediction ..... 50
4.1	Comparison of conductivities at 25°C between reference and measured value..... 52
4.2	Means of regression parameters of electrical conductivity as a function of temperature of solid samples at various voltage gradients..... 55
4.3	Means of regression parameters of electrical conductivity as a function of temperature of solid samples at various frequency..... 60
4.4	Means of estimated parameters of electrical conductivity as a function of temperature of 1% salt solution at various voltage..... 62
4.5	Means of estimated parameters of electrical conductivity as a function of temperature of 1% salt solution at various frequency..... 63
4.6	Means of estimated parameters of electrical conductivity as a function of temperature of 1% salt solution at different concentration at 50Hz. and 9.1 V/cm..... 64
4.7	Means of estimated parameters of electrical conductivity as a function of temperature of 1% salt solution with starch at various concentration at 50Hz. and 9.1 V/cm..... 67
4.8	Means of estimated parameters of electrical conductivity a function as of temperature of 1% salt solution with sugar at various concentration at 50 Hz. and 9.1 V/cm..... 68
4.9	Means of estimated parameters of electrical conductivity as a function of temperature..... 71
4.10	Electrical conductivity equation and conductivity ratio of solid to liquid at 25°C and 125°C of individual phases..... 76
4.11	Effective electrical conductivity of solid in liquid at various solid fractions( $R^2 = 0.99$ )..... 79
4.12	Equations predicting effective electrical conductivity of solid-liquid mixtures during ohmic heating from 25-125°C..... 84

## LIST OF FIGURES

FIGURE	Page
2.1 Principle of Ohmic heating.....	4
2.2 Electrical conductivity curves of raw and vacuum diffused potato in 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 % salt solution.....	10
2.3 Variations in electrical conductivities of turnip tissues among six trials of experiment under identical condition.....	11
2.4 Electrical conductivity curves for carrot(parallel to stem axis)subjected to various voltage gradients.....	13
2.5 Effect of voltage gradients on electrical conductivity of orange juice....	13
2.6 Temperature of liquid and particle according to orientation of electric field (a) perpendicular (b) parallel .....	17
2.7 Ohmic heating for a suspension of potato particles in sodium phosphate solution.....	19
2.8 Equivalent circuit theory of two component mixture.....	23
2.9 Equivalent circuit theory of multi-component mixture.....	25
2.10 'Unit cell model' for overall electrical conductivity.....	28
2.11 Heating of lamb meat in brine.....	31
2.12 Comparison of the experimental and modeled temperature of a potato piece in brine.....	31
2.13 Ohmic heating of an insulating materials in salt solution.....	33
2.14 Temperature of a potato piece (1.4x 6.2x 0.35cm) in sodium phosphate solution.....	35
3.1 Schematic drawing of ohmic heating device for solid sample.....	38
3.2 Schematic drawing of ohmic heating cell for liquid sample.....	39
3.3 Schematic diagram of ohmic heating device.....	40
3.4 Schematic diagram of ohmic heating device to generate high frequency alternate current.....	41
4.1 Effect of voltage gradient on electrical conductivity of solid food.....	54
4.2 Effect of voltage gradient on electrical conductivity of raw solid foods.	56
4.3 Effect of frequency on electrical conductivity of solid foods.....	59
4.4 Effect of voltage on electrical conductivity of 1% salt solution.....	62
4.5 Effect of frequency on electrical conductivity of 1% salt solution.....	63
4.6 Effect of salt on the electrical conductivity of salt solution.....	65
4.7 Effect of starch concentration on electrical conductivity of 1% salt solution.....	67
4.8 Effect of sugar concentration on electrical conductivity of 1% salt solution.....	68
4.9 Effect of salt and sugar on electrical conductivity of starch paste.....	70
4.10 The change in electrical conductivity of starch paste with temperature..	74
4.11 Mean electrical conductivity with temperature of individual components.....	76

## LIST OF FIGURES (CON'T)

FIGURE	Page
4.12	Effective electrical conductivity of single-type solid in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid with various volume fraction..... 78
4.13	Effective electrical conductivity of two-type solids in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid with various volume fraction..... 81
4.14	Effective electrical conductivity of single-type solid in liquid mixtures at various volume fractions..... 85
4.15	Effective electrical conductivity of two-type solids in liquid mixtures at various volume fractions..... 86
4.16	Temperature changes of unsalted potato in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 88
4.17	Temperature changes of salted potato in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 89
4.18	Temperature changes of unsalted white radish in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 90
4.19	Temperature changes of salted white radish in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 91
4.20	Temperature changes of surimi in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 92
4.21	Temperature changes of unsalted potato and white radish in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions..... 97
4.22	Temperature changes of unsalted potato and surimi in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions..... 98
4.23	Temperature changes of unsalted white radish and surimi in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions..... 99
4.24	Temperature changes of salted potato and salted white radish in 0.75% salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions..... 100
4.25	Temperature changes of salted potato and surimi in 0.75salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 101
4.26	Temperature changes of salted white radish and surimi in 0.75salt-2% sugar-4% starch liquid at various volume factions ..... 102
4.27	Comparisons between the thermal energy from temperature rises to the electrical energy input, for single-type solid in liquid mixtures..... 104
4.28	Comparisons between the thermal energy from temperature rises to the electrical energy input, for two-type solids in liquid mixtures..... 105

## NOMENCLATURE

$\rho$	=	Density ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma$	=	Electrical conductivity (S/m)
$\sigma_{\text{eff}}$	=	Effective electrical conductivity (S/m)
$\sigma_{\text{ref}}$	=	Electrical conductivity at reference temperature (S/m)
$\sigma_T$	=	Electrical conductivity at any temperature (S/m)
$\Delta t$	=	Time interval (s)
$\nabla V$	=	Voltage gradient (V/m)
$A$	=	Cross-sectional area ( $\text{m}^2$ )
$a$	=	Regression constant (S/m)
$b$	=	Regression constant ( $\text{S/m}^\circ\text{C}$ )
$C_p$	=	Specific heat of the material ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )
$E$	=	Electric field strength (V/m)
$G$	=	Inherent heating rate ( $\text{K/s}$ )
$I$	=	Electric current (A)
$k$	=	Thermal conductivity ( $\text{W/m.K}$ )
$K_c$	=	Cell constant = $L/A$
$L$	=	Length of the sample (m)
$m$	=	Temperature coefficient ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )
$M_w$	=	Moisture content (% wet basis)
$N$	=	Types of solid
$P$	=	Electric power (W)
$Q$	=	Energy-generation rate per unit volume ( $\text{W/m}^3$ )
$Q_e$	=	Electrical energy input (J)
$Q_t$	=	Thermal energy (J)
$R$	=	Resistance ( $\Omega$ )
$R^2$	=	Coefficient of determination
$S$	=	Solid content (% w/w)
$S_a$	=	Salt content (% w/w)
$S_t$	=	Starch content (%w/w)
$S_u$	=	Sucrose content (%w/w)
$t$	=	Time (s)
$T$	=	Temperature ( $^\circ\text{C}$ )
$T_0$	=	Initial temperature ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{\text{ref}}$	=	Reference temperature ( $^\circ\text{C}$ )
$V$	=	Voltage (V)
$vf$	=	Volume fraction

### Subscripts

$i$	=	Number index
$l$	=	Liquid phase
$P$	=	Parallel
$s$	=	Solid phase
$S$	=	Series