

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รายงานฉบับสมบูรณ์

เครื่องผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยเทคนิคโอห์มมิกเพื่ออุตสาหกรรม
CONCENTRATED FRUIT JUICE MACHINE BY OHMIC TECHNIQUE
FOR INDUSTRY

โดย

ดร. นวภัทรา หนูนา
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RC4
TP
562
๒๕๓๗ค

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....115578
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2554

ได้รับการสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้งบประมาณเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2552

b. 12 ๒1 26 ๕๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2552

- ขอขอบคุณ - คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- บุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
 - นางสาวณัฐรส วิบูลรังสรรค์, นางสาวธาริณี ศยามล, นางสาวพิชามญช์ พัฒนจิรานันท์ นางสาวฐรินดา สุภาจรรยา, นางสาวรุ่งรัมย์ ศรีมะเรียง และ นางสาวรภัที สระบัว นักศึกษาประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

นวกัทรာ หนูนาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยเทคนิคโอโซนมีคและนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้นในกระบวนการระเหยน้ำออก ในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกายภาพ และทางเคมี ดังนี้ เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่า EC และ ค่า pH ลดลง โดยพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดค่า EC มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าที่วัด ($P \leq 0.5$) พิจารณากระบวนการระเหยน้ำออกด้วยการให้ความร้อนแบบโอโซนมีคพบว่าชนิด จำนวนและการจัดเรียงตัวของอิเล็กโทรดมีผลอย่างยิ่งต่อค่าการกระจายความร้อน โดยอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกจำนวน 4 ท่อสามารถกระจายความร้อนโดยมีจุดบอด (blind zone) น้อยที่สุด และมีระยะห่างแต่ละอิเล็กโทรดเท่ากับ 6 cm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ	
บทคัดย่อภาษาไทย	
สารบัญ	
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1.ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2.วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3.ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4.ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
2.1 การแปรรูปน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น.....	4
2.2 การแปรรูปอาหารทำให้เข้มข้น.....	5
2.3 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร.....	7
2.4 กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....	12
2.5 การประยุกต์ใช้ค่าการนำไฟฟ้าในอุตสาหกรรมอาหาร.....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 การออกแบบ สร้างเครื่องผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยเทคนิคโอห์มมิกและวิธีการทดสอบ.....	25
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	25
3.2 วงจรที่ใช้ในการให้ความร้อนกับระบบโอห์มมิก.....	25
3.3 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น.....	27
3.4 การออกแบบระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....	27
3.5 การวิเคราะห์.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า.....	35
4.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น.....	36
4.3 อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการแปรรูปน้ำเจี๊ยบเข้มข้น.....4
2.2	ปลั๊กการหาค่าความนำในของเหลว.....8
2.3	หลักการของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....13
2.4	ตัวอย่างของ Ohmic cell แบบต่าง ๆ.....16
2.5	แผนภาพแสดงรูปแบบการทำงานของ Ohmic heating แบบไดนามิก.....17
3.1	วงจรที่ใช้ในระบบโอห์มมิก.....26
3.2	การวัดระยะห่างที่มีผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้.....28
3.3	ชุดทดลองการวัดระยะห่างที่มีผลต่างอุณหภูมิ.....28
3.4	การจัดวางอิเล็กโทรด.....29
3.5	ภาพชุดทดลองการจัดเรียงของอิเล็กโทรด.....29
3.6	ภาพจำลองอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....30
3.7	ภาพเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....31
3.8	ภาพส่วนให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....31
3.9	ภาพเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....32
3.10	ผังวิธีการทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....33
3.11	ภาพการวัดค่าการนำไฟฟ้า.....34
3.12	ภาพการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง.....34
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....35
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำกระเจี๊ยบที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ.....37
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ของอิเล็กโทรดแบบ ทรงสี่เหลี่ยม.....39
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ของอิเล็กโทรดแบบ ทรงกระบอก.....39
4.5	ภาพถ่ายความร้อนของการใช้อิเล็กโทรดแบบทรงสี่เหลี่ยม.....40
4.6	ภาพถ่ายความร้อนของการใช้อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอก.....41
4.7	ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากสแนมแม่เหล็ก.....41
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำกระเจี๊ยบที่เวลาต่าง ๆ.....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจี๊ยบกับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ.....	35
4.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำกระเจี๊ยบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	37
4.3 สมการการกระจายอุณหภูมิของอิเล็กโทรดแต่ละชนิด.....	40
4.4 เวลาในการให้ความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิของการจัดวางอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ...	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันการแปรรูปผลไม้เป็นน้ำผลไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำน้ำผลไม้เข้มข้น เป็นที่นิยมของผู้บริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศจีน ได้มีการนำน้ำผลไม้ไทยเข้าไปวางจำหน่ายในห้างสรรพสินค้าเป็นจำนวนมาก [1] ประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนที่มีผลไม้สดมากมายหลากหลายชนิด โดยผลไม้เหล่านั้นมีองค์ประกอบที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงในแง่น้ำตาล วิตามินและเกลือแร่ [2] การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าของผลไม้ เก็บรักษาได้นานรวมทั้งช่วยลดต้นทุนในด้านการขนส่ง น้ำผลไม้เข้มข้นสามารถนำมาผสมน้ำเพื่อเป็นเครื่องดื่มโดยตรงหรือใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารและเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ การพัฒนาอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำผลไม้ให้เข้มแข็งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของหน่วยงานสำคัญหลายหน่วยงานในประเทศ ดังนี้ สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ที่ 1 ของกระทรวงอุตสาหกรรม และสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของสกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการผลักดันเพื่อให้อุตสาหกรรมมีความเข้มแข็ง ช่วยป้องกันและแก้ไขปัญหาของเกษตรกรในการช่วยพยุงราคาของผลไม้ในช่วงที่ผลผลิตออกสู่ตลาดมาก ซึ่งจัดเป็นการช่วยแก้ปัญหาทางเศรษฐกิจของประเทศแนวทางหนึ่ง [2] สอดคล้องนโยบายและยุทธศาสตร์ที่ 2 เป้าประสงค์ที่ 2 ของสถาบัน การพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสร้างความเป็นเลิศในระดับชาติและนานาชาติ งานวิจัยนี้เป็นการสร้างเพื่อพัฒนาในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ การพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทนี้ยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 ในข้อที่ 3.1 และ 3.2 ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน โดยการปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพและคุณค่าของสินค้าเพื่อสร้างสินค้าที่มีคุณภาพและมูลค่าสูงการใช้พลังงานให้คุ้มค่าการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อลดการพึ่งพิงการนำเข้าพลังงานและประหยัดเงินตราต่างประเทศ

ประเทศไทยส่งออกน้ำผลไม้ไปหลากหลายเขตของโลก โดยตลาดสหภาพยุโรปเป็นตลาดส่งออกน้ำผลไม้ที่ใหญ่ที่สุดของไทย มีปริมาณส่งออก 78,446 ล้านบาทในปี 2548 มูลค่ามากถึง 53.36 ล้านยูโร คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 34.8 ของปริมาณการส่งออกทั้งหมด [3] ในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น กระบวนการที่สำคัญคือการลดปริมาณน้ำบริสุทธิ์หรือการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยวิธีการแยกน้ำบริสุทธิ์ออกจากน้ำผลไม้ทำได้หลากหลายวิธี เช่น วิธีการแช่แข็งด้วยระบบ Freeze Concentration วิธีการระเหยโดย Osmotic Evaporation วิธีการระเหยโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Conventional Evaporation) วิธีการระเหยโดยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating) และอื่น ๆ แต่

ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดในหลายด้าน ในสภาวะการทำงานของแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ที่ต้องการนำมาแปรรูป โดยสามารถแบ่งกลุ่มผลไม้ได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มที่ทนต่อความร้อนและกลุ่มที่ไม่ทนต่อความร้อน ซึ่งหากให้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดกลิ่น รสไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค วิธีการที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารในประเทศไทยคือ การเพิ่มความเข้มข้นโดยวิธีการระเหยโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตาม เครื่องกำเนิดไอน้ำในปัจจุบันทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิง (น้ำมัน) เป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำเพื่อให้ไอน้ำออกมา ที่นิยมแพร่หลายคือ เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบหลอดไฟ (Fire tube Conventional Type Boiler) จากสภาพความผันผวนทางเศรษฐกิจของโลก รวมทั้งราคาน้ำมันซึ่งมีการปรับตัวสูงขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจัดเป็นปัญหาสำคัญส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไอน้ำดังกล่าว ดังนั้น การนำเอาเทคโนโลยีทางเลือกเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต (การให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการโอห์มมิก) จะสามารถช่วยแก้ปัญหาและลดต้นทุนทางพลังงาน ซึ่งเป็นปัญหาในปัจจุบันและอาจเป็นปัญหาในระยะยาว

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นการให้ความร้อนกับอาหารโดยการปล่อยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่อาหารที่ต้องการให้ความร้อน โดยอาหารทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวต้านทาน ปริมาณการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกเกิดขึ้นน้อยมาก การให้ความร้อนด้วยหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานแปรรูปอาหารได้อย่างหลากหลาย เช่น การละลาย (thawing) การลวก (blanching) การระเหย (evaporation) การลดปริมาณน้ำ (dehydration) การหมัก (fermentation) และการสกัด (extraction) เป็นต้น ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถเพิ่มอุณหภูมิในอาหารได้อย่างรวดเร็วและการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ

จากกระแสความใส่ใจในสุขภาพส่งผลให้ผู้บริโภคหันมานิยมเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพมากขึ้น แนวโน้มในการเติบโตของผลิตภัณฑ์นี้จึงอยู่ในทิศทางที่ดี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปัจจัยหลักสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจคือ เชื้อเพลิง ซึ่งกำลังเป็นปัญหาในปัจจุบัน ส่งผลกระทบโดยตรงกับกรรมวิธีการผลิตแบบปัจจุบันของผู้ประกอบการ ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น หากปัญหานี้ได้รับการแก้ไขและได้รับการสนับสนุนในการพัฒนากระบวนการผลิต จะสามารถทำให้ให้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นนี้สามารถแข่งขันระดับนานาชาติได้อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของโครงการคือ เพื่อศึกษาและออกแบบชุดระเหยน้ำด้วยหลักการโอห์มมิกเพื่อผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดระเหยน้ำด้วยหลักการโอห์มมิกเพื่อผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องระเหยน้ำด้วยหลักการโอห์มมิกเมื่อนำมาใช้ผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างชุดระเหยน้ำด้วยหลักการโอห์มมิกเพื่อผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น
- 1.3.2 ทาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นโดยอาศัยหลักการโอห์มมิก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ชุดผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นโดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกและสภาวะการทำงานที่เหมาะสม



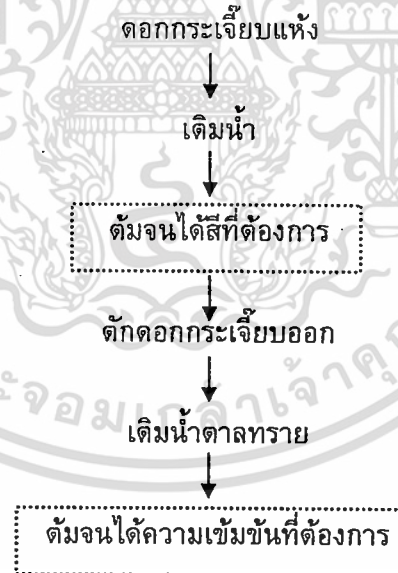
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 การแปรรูปน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น

กระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa* L.) มีชื่อสามัญ Roselle เป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่ง นิยมบริโภคในรูปของผลิตภัณฑ์ชาชง เครื่องดื่มหรือนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสีผสมอาหารและอุตสาหกรรมอาหาร โดยส่วนใหญ่ผู้บริโภคมักรู้จักกระเจี๊ยบแดงในรูปของน้ำกระเจี๊ยบ ซึ่งมีรสเปรี้ยวอมหวาน ชุ่มคอ แก้กะหายได้ดี ซึ่งได้จากส่วนของกลีบเลี้ยงและกลีบรองของดอกกระเจี๊ยบ โดยกลีบรองของดอกกระเจี๊ยบแดงเป็นแหล่งของสารต้านออกซิเดชั่นที่ดี เนื่องจากมีรงควัตถุแอนโทไซยานินและกรดแอสคอร์บิก นอกจากนี้ยังมีกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดซิตริก กรดออกซาลิก กรดมาลิก กรดซัคซินิก และกรดทาเทาริก ซึ่งกรดเหล่านี้ทำให้กระเจี๊ยบมีรสเปรี้ยวและยังพบวิตามินเอ เพคติน และแร่ธาตุอื่นๆ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม เป็นต้น กระบวนการแปรรูปน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้นในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม ทำโดยวิธีการต้มโดยใช้เตาแก๊สซึ่งใช้ดอกกระเจี๊ยบแห้งต้มกับน้ำในอัตราส่วนดอกกระเจี๊ยบแห้ง 100 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จนได้สีตามที่ต้องการ จากนั้นตัดดอกกระเจี๊ยบออกแล้วเติมน้ำตาลทรายขาวจากนั้นต้มไปเรื่อย ๆ จนได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการแปรรูปน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การแปรรูปอาหารทำให้เข้มข้น

การแปรรูปอาหารด้วยการทำให้เข้มข้น มีความสำคัญในการช่วยเก็บรักษาอาหารไม่ให้เน่าเสีย เก็บรักษาได้นาน เก็บง่าย และใช้สะดวก และยังมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจในการลดการนำเข้า และเพิ่มการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่

2.2.1 กระบวนการทำให้เข้มข้นโดยผ่านการซึมผ่านเยื่อ (Membrane Process for Concentration)

กระบวนการทำให้เข้มข้นวิธีนี้ อาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความแตกต่างของความดัน ซึ่งทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน ทำให้เกิดการไหลของตัวทำละลายผ่านเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ยอมให้ตัวทำละลายผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้ตัวถูกละลายผ่านหรือสามารถผ่านได้น้อย มีข้อดี คือ วิธีนี้ไม่ต้องรับความร้อนจึงไม่มีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารและกลิ่นรส และเมมเบรนจะกักโปรตีน ไขมันและพอลิแซคคาไรด์ ไว้ใช้แรงงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้สูงกว่าประมาณ 25-30°Brix ได้ (วรรณุตังเจตจรสและคณะ, 2550) เมื่อความเข้มข้นที่ป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย ต้นทุนสูงกว่าการระเหย ถ้าเลือกเยื่อแผ่นไม่เหมาะสม สารที่ให้กลิ่นรสก็สามารถไหลผ่านเยื่อแผ่นกรองไปได้ มีคราบสกปรกที่เกิดจากการเกาะตัวของพอลิเมอร์เมมเบรน ทำให้เสียเวลาในการล้างทำความสะอาด วิธีนี้เหมาะสำหรับสารที่มีราคาสูงปริมาณไม่มาก

2.2.2 กระบวนการทำให้เข้มข้นโดยวิธีการแช่แข็ง (Freeze Concentration)

การทำให้น้ำบริสุทธิ์ที่เป็นองค์ประกอบในสารละลายแข็งตัวเป็นน้ำแข็ง ทำให้สารละลายอยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้นผสมน้ำแข็งจนมีลักษณะคล้ายโคลน หลังจากนั้นจึงทำการแยกน้ำแข็งและสารละลายเข้มข้นออกจากกัน จะได้สารละลายเข้มข้นขึ้น มีข้อดี คือ ลดการเสื่อมเสียที่เกิดจากความร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูง การใช้อุณหภูมิต่ำทำให้การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและปฏิกิริยาของเอนไซม์ช้าลง สามารถเก็บรักษากลิ่นหอมระเหยไว้ได้มากกว่าวิธีการระเหยอื่นๆ น้ำแข็งกลับมาใช้ในกระบวนการได้ เช่น นำกลับมาควั่นแน่นสารทำความเย็น มีข้อจำกัด คือ เพิ่มความเข้มข้นได้ค่อนข้างจำกัดไม่เกินร้อยละ 50 ของของแข็งที่ละลายน้ำได้ ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเหย มีการสูญเสียส่วนที่เป็นของแข็งทั้งที่ละลายในน้ำได้และส่วนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำไปพร้อมๆ กับการแยกผลึกน้ำแข็ง ใช้พลังงานมาก ไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ ปริมาณของน้ำผลไม้เข้มข้นที่ได้จะน้อยกว่าวิธีการระเหย (จีสุดา เกตุกรายและนางนุช พรหมลา, 2542) วิธีนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มความเข้มข้นสารที่มีราคาปานกลางแต่มีปริมาณมาก

2.2.3 การทำให้เข้มข้นโดยใช้ไมโครเวฟ – สูญญากาศ (Microwave Vacuum)

การทำให้เข้มข้นวิธีนี้จะเป็นการทำความเข้มข้นที่สภาวะสูญญากาศ เพื่อให้ในผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการระเหย

มีข้อจำกัด คือ การออกแบบในระบบสุญญากาศค่อนข้างยุ่งยาก (สุระกิต จิระสานต์และปรารถนา วันพระแก้ว, 2543) ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ อันตรายต่อผู้ใช้งาน ข้อดีคือ ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำ ซึ่งจะเป็นการลดพลังงานความร้อนที่เป็นความร้อนสัมผัส สามารถคงคุณค่าของอาหาร เนื่องจาก กระทำที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการทำน้ำผลไม้เข้มข้นสูง ส่วนมากจะใช้วิธีการระเหยน้ำ เพราะเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว ประหยัดกว่าการแยกน้ำโดยผ่านแผ่นเยื่อ

2.2.4 กระบวนการทำให้เข้มข้นด้วยการระเหยน้ำแบบเปิดในระดับครัวเรือน

การระเหยน้ำแบบเปิด หมายถึง การใช้ความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้เป็นไอน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100°C น้ำจะค่อยๆ ระเหยออกไปจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ซึ่งเป็นวิธีที่โรงงานใช้อยู่ปัจจุบัน ข้อดี คือ สามารถทำได้ทันที ภาชนะใช้แบบง่ายๆ ต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถมองเห็นตัวสินค้าได้ ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ได้ทันที ข้อเสีย คือ ไม่สามารถทำได้ครั้งละมากๆ เพราะถ้าใช้เวลาจนหรือเคี่ยวนานเกินไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสี มีสีคล้ำ กลิ่นรสเปลี่ยนไป อาจมีกลิ่นน้ำตาลไหม้ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีได้ การควบคุมอุณหภูมิทำได้ยาก ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง อายุการใช้งานสั้น เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ง่าย

2.2.5 กระบวนการทำให้เข้มข้นด้วยการระเหยน้ำแบบปิดในระดับอุตสาหกรรม

การระเหยน้ำแบบปิด หมายถึง การใช้ความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอแล้วให้ระเหยออกมาจากอาหารทำให้สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีความแตกต่างระหว่างการระเหยแบบเปิดและแบบปิด คือ การระเหยแบบเปิดจะทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ ส่วนมากใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน ข้อดี คือ ต้นทุนการผลิตต่ำ เมื่อคำนึงถึงผลทางเศรษฐกิจ ค่าใช้จ่ายการติดตั้งเครื่องมือและการดำเนินการต่ำ ดูแลรักษาง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้เข้มข้น และถ้าเลือกเครื่องมือระเหยให้เหมาะสม ก็สามารถใช้ได้กับน้ำผลไม้ทุกชนิด และระเหยได้จนถึงความเข้มข้นสูงระดับใดก็ได้ ตามความต้องการผู้ผลิต ข้อเสีย คือ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพลดลง ความร้อนมีผลทำให้เกิดการสูญเสียของสารระเหยกลิ่นรส และอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของวิตามินและสารอาหารที่สำคัญบางอย่าง ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติตามธรรมชาติของอาหารไม่ว่าจะเป็นความหนืด ความเป็นกรด การเกิดฟองและการกัดกร่อน เป็นต้น การระเหยโดยใช้อุณหภูมิสูงและเวลายาว วิธีจะใช้ความร้อนสูงประมาณ $105-205^{\circ}\text{C}$ และมีระบบทำความเย็นด้วยสุญญากาศ ซึ่งข้อดีและข้อเสียก็จะคล้ายกับวิธีการระเหยแบบเปิดและแบบเปิด

2.2.6 กระบวนการทำให้เข้มข้นด้วยการเพิ่มส่วนที่เป็นของแข็ง

วิธีการนี้เป็นการเพิ่มส่วนที่เป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้กับอาหารโดยตรง เช่น การเพิ่มน้ำตาลในน้ำผลไม้ กระบวนการผลิตแยม กระบวนการผลิตนมข้นหวาน เป็นต้น

2.2.7 กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating)

เป็นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในอาหารโดยตรง ทำให้อาหารร้อนขึ้นเนื่องจากความต้านทานของตัวอาหารเองอย่างรวดเร็วพร้อมกันทุกจุด มีข้อดี คือ อาหารยังมีกลิ่นรสดี สามารถให้ความร้อนอาหารอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ การควบคุมกระบวนการทำได้ง่าย สามารถเริ่มต้นหรือหยุดเครื่องได้ทันที ไม่ต้องใช้เวลาในการอุ่นเครื่องหรือรอให้เครื่องเย็นก่อนปิดเครื่อง มีศักยภาพสูงในการลดค่าใช้จ่ายเรื่องการแปรรูปและบรรจุภัณฑ์ ป้องกันการให้ความร้อนแก่ของเหลวมากเกินไป แม้ว่าต้นทุนทางด้านไฟฟ้าสูง แต่ต้นทุนการให้ความร้อนแก่น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย ไม่แตกต่างจากวิธีการให้ความร้อนทั่วไป เพราะว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนไฟฟ้าไปเป็นความร้อนสูงนั่นเอง ข้อดีในด้านความปลอดภัย สามารถเก็บได้ยาวนานขึ้นภายใต้สภาวะปกติหรืออุณหภูมิห้องและไม่ต้องการระบบทำความเย็นที่มีราคาแพง เมื่อใช้ร่วมกับภาชนะที่ปลอดภัยกระบวนการนี้สามารถผลิตอาหารสำเร็จรูปที่มีคุณค่าเพิ่มขึ้น (high added value) ไม่จำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งช่วยลดโอกาสที่จะเกิดคราบที่ผิว (deposit formation) ปลอดภัยจากจุลินทรีย์ในระดับสูง เป็นการให้ความร้อนที่เหมาะสมทั้งด้านการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ มีสภาพแวดล้อมในการที่ดีเนื่องจากไม่เกิดเสียงรบกวน

2.3 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร

2.3.1 หลักการของค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด เป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติของสารที่จะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นปริมาณที่แสดงถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านภายในช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้นสำหรับสารละลายที่มีอิเล็กตรอนหรือไอออนอิสระอยู่มากก็จะมีค่าการนำไฟฟ้ามากด้วย ค่าการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นซีเมนตต่อเมตร (S/m) สารที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง จะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากกว่าสารที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันและค่าการนำไฟฟ้าของสารบางประเภทอาจมีค่าแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง (Palaniappan and Sastry, 1992)

ปัจจุบันค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีบทบาทสำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น โดยเฉพาะระบบฆ่าเชื้อในอาหารด้วยเทคนิคกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยวิกฤตที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร (วีรเชษฐ์ จิตตานิษฐ์, 2544)

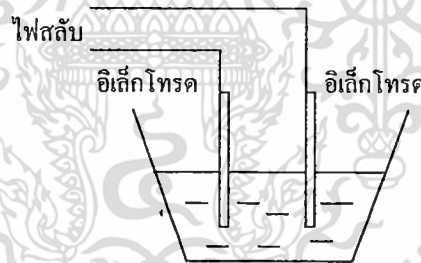
ค่าการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ชนิดของไอออน ปริมาณไอออนที่แตกตัว รวมทั้งอุณหภูมิ ถ้ากำหนดให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ A และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ L เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าคงที่แก่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากไอออนที่เคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ถ้าเปลี่ยนขนาด

พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดให้ใหญ่ขึ้น แต่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่าเดิม พบว่าปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดจะมากขึ้น ผลคือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในสภาวะเดียวกัน ถ้าเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้น แต่ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดเท่าเดิม พบว่าปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดลดลง ผลคือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะน้อยลงเช่นกัน (American Public Health, 1981)

สรุปได้ว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย ดังนั้นเพื่อให้ระบบการวัดเป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงกำหนดค่าการนำไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งหมายถึงค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างเป็นระยะทางใดๆ เทียบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและค่าการนำไฟฟ้า (Palaniappan and Sastry, 1991)

หลักการวัดค่าการนำไฟฟ้า

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ที่วางขนานกันและจุ่มอยู่ในของเหลว จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างแท่งอิเล็กโทรด ซึ่งเหมือนกับกรณีกระแสไหลผ่านตัวนำโลหะ แต่ในตัวนำโลหะนั้นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนตัวนำของเหลวนั้นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของไอออน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการหาค่าความนำในของเหลว

$$\sigma = \frac{IL}{AV} \quad (2.1)$$

โดยที่	σ	= ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (s/m)
	A	= พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (m^2)
	I	= กระแสไฟฟ้า (Ampere)
	L	= ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)
	V	= แรงดันไฟฟ้า (volt)

Fryer et al., (1993) สร้างอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับอาหารเหลวประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ คือ ระบบไฟฟ้าที่ป้อน (Main supply) ที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เครื่องบันทึกอุณหภูมิ สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouples) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ที่ปลายสายหุ้มจะปิด (Shrunk) ด้วยโพลีเมอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับไปยังอาหารที่มีต่อระบบวัดอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกอุณหภูมิและควบคุมกระบวนการทำงานของระบบ ขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 7.5*7.5 เซนติเมตร เซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Electrical cell) ทำจากกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนขนาด 7.0*7.77*18.4 เซนติเมตร

Palaniappan and Sastry (1991) พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลวซึ่งประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ และเซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งทำจากท่อสแตนเลสความยาว 12.5 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 15/16 นิ้ว ด้านในท่อสแตนเลสมีปลอกเทฟลอนทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าสวมอยู่ ตรงกลางท่อติดตั้งท่อขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5/16 นิ้ว สำหรับบรรจุตัวอย่างอาหารเหลวและเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล ที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากแผ่นโลหะโรเดียม (Rodium plated stainless steel electrodes)

2.3.2 องค์ประกอบที่สำคัญของการวัดค่าการนำไฟฟ้า

2.3.2.1 เซลล์สำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้า

ประกอบด้วยอิเล็กโทรด (Electrode) ตั้งแต่ 2 อันขึ้นไป โดยระบบต้องการอุปกรณ์พื้นฐานคือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าและอิเล็กโทรด ซึ่งการเลือกใช้เซลล์สำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้ารูปแบบใดขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารที่ต้องการวัด

2.3.2.2 แนวทางการออกแบบหัววัดและเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหาร

การออกแบบอุปกรณ์เครื่องมือรวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ใช้เป็นสิ่งจำเป็น และเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีหลักการทั่ว ๆ ไปดังนี้

- สามารถถอดออกและรักษาความสะอาดได้
- พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบไม่เป็นหลุมและเป็นบ่อหรือขรุขระ
- ตะเข็บต่าง ๆ จะต้องปิดสนิท โดยเฉพาะบริเวณที่สัมผัสกับอาหาร
- ไม่มีสันหรือคม รอยต่อจะต้องกลมมนหรือโค้ง
- พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์และเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหารนั้นจะเป็นพวกเหล็กปลอดสนิม เหล็กธรรมดา เหล็กกล้า เหล็กหล่อ เหล็กอาบสังกะสี ดีบุก ทองเหลือง ทองแดง

อะลูมิเนียม แก้ว ยาง ผ้าถัก วัสดุเส้นใยและพลาสติก เป็นต้น แต่ละชนิดของวัสดุที่กล่าวมาต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ควรจะต้องมีการเลือกใช้ให้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ (ฤทธิ์ชัย อัครราชันย์ และจิตโส อัญชลีกิจ, 2542)

เหล็กปลอดสนิม

เหล็กปลอดสนิมนั้นเป็นที่นิยมใช้ทั่วไปในการสร้างเครื่องมือในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของเครื่องมือที่ต้องสัมผัสกับอาหาร โดยทั่วไปจะใช้เหล็กปลอดสนิมชนิด 304 และ 316 ในบริเวณที่มีการเชื่อมเพื่อป้องกัน Intergranular corrosion โดยเฉพาะในท่อหรือแท่งก้นน้ำที่มีการทำความสะอาดแบบ clean-in-phase

เหล็กธรรมดา

เหล็กธรรมดาไม่ควรใช้ทำเครื่องมือส่วนที่ต้องสัมผัสกับอาหาร เนื่องจากปัญหาการกัดกร่อนสูง ควรใช้ทำส่วน Shafts และ Cams ซึ่งต้องการความแข็งแรง สำหรับเหล็กกล้าและเหล็กหล่อก็เช่นเดียวกัน จะเกิดการกัดกร่อนง่ายมาก ซึ่งทำให้ผิวหน้าหยาบ ทำความสะอาดลำบาก วัสดุเหล่านี้เหมาะที่จะใช้สำหรับงานพวก Framework เท่านั้น พวกเหล็กอบสังกะสีไม่ควรนำมาใช้ในการทำเครื่องมือผลิตอาหาร เพราะสังกะสีที่เคลือบอยู่จะลอกออกได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดในอาหาร

อะลูมิเนียม

โลหะชนิดนี้มีประโยชน์มากสำหรับทำภาชนะบรรจุวัตถุต่าง ๆ แต่ควรจะเป็นชนิดซึ่งผสมกับโลหะอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อน

ไทเทเนียม

ไทเทเนียมเหมาะในการสร้างเครื่องมือสำหรับกรณีที่มีความกัดกร่อนสูง ๆ ทั้งนี้เพราะไทเทเนียมมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้มากกว่าเหล็กปลอดสนิม สามารถรับน้ำหนักได้มากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของไทเทเนียม เหมาะสำหรับสร้างส่วนของเครื่องมือคือราคาสูงมาก

วัสดุเคลือบ

วัสดุเคลือบไม่ควรนำมาทำพวกเครื่องมือหรือภาชนะบรรจุ ทั้งนี้เพราะเศษวัสดุเคลือบอาจจะหลุดออกมาปะปนอยู่ในอาหาร นอกจากพวกแบคทีเรียจะเจริญอยู่ตามรอยแตกของวัสดุเคลือบ

แก้ว

วัสดุพวกแก้วมีการนิยมใช้มากขึ้นในการทำท่อ มีข้อดีคือไม่มีการกัดกร่อนและสามารถตรวจสอบและทำความสะอาดโดยไม่ต้องถอดออก

พลาสติก

พลาสติกมีข้อดีคือ มีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อนและหลายชนิดสามารถทนต่อกรด ด่าง สามารถใช้กับอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ

สำหรับการฆ่าเชื้อหรือเยือกแข็ง แต่ข้อเสียของพลาสติกคือ ถูกขีดข่วนได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุให้สิ่งสกปรกจับแน่น ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย นอกจากนี้คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิดอาจยังเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ด้วย คุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้นั้นจะแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบ วัตถุดิบและกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปในทางอุตสาหกรรมมีการใช้อยู่ 2 ประเภท คือ

Thermoplastic จะเป็นพลาสติกที่ทนต่อกรด ต่างและสารทำความสะอาดคงตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากและบางชนิดสามารถป้องกันการดูดซึมของน้ำได้ พลาสติกที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่ โพลีเอทิลีน โพลีโพรไพลีน โพลีไวนิลคลอไรด์ และฟลูออโรคาร์บอนโพลีเมอร์ เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้พลาสติกชนิดนี้ในการทำ ได้แก่ ท่อ ข้อต่อ และสายพาน เป็นต้น

Thermosets พลาสติกชนิดนี้จะต่างจากชนิดแรกคือ ไม่สามารถนำมาหลอมใหม่ได้และคงตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ทนต่อกรดและด่างได้น้อยกว่า ตัวอย่างพลาสติกนี้ได้แก่ โพลีอีเทอร์, อีพอกซีเรซิน, และโพลียูรีเทน เป็นต้น

2.3.2.3 ระบบไฟฟ้า

มาจากระบบไฟฟ้าหลัก (Main power supply) อุปกรณ์ต่างๆคือ สวิตช์ ปิด-เปิด (Circuit breaker) เครื่องตัดไฟฟ้าอัตโนมัติ (Safety cut) หม้อแปลงไฟฟ้า (Variable transfer) สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้า มิเตอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า และระบบการควบคุม ซึ่งมีไมโครโปรเซสเซอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบตัวแปรต่างๆ และคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

2.3.2.4 ระบบบันทึกข้อมูล

ประกอบด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลสำหรับรับส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างอาหาร ไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger) ซึ่งเชื่อมสัญญาณต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

งานวิจัยที่ผ่านมา ได้รายงานถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ

ทุกงานวิจัยที่ผ่านมารายงานผลที่สอดคล้องกันว่า ค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Palaniappan and Sastry, 1991; อติศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; พงศ์รนวนานกร, 2540; Gupta and Jindal, 1992; Marcotte et al., 1998; Palaniappan and Sastry, 1991; Wang and Sastry, 1997; Marybeth et al., 1999) เหตุผลคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้จำนวนของไอออนที่เคลื่อนที่ภายในอาหารเพิ่มมากขึ้น และการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้ก็คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

ปริมาณของแข็งในอาหารเหลว

การนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น (Palaniappan and Sastry, 1991) และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายได้ทั้งหมด (Gupta and Jindal, 1992) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่า ปริมาณของแข็งในอาหารเหลวมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าอย่างไร เนื่องจากของแข็งแต่ละชนิดที่อยู่ในอาหารเหลวมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณไอออนที่แตกตัวได้

ความเข้มข้นของสารละลาย Hydrocolloid

ค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย Hydrocolloid (Marcotte et al., 1998) โดยการแปรผันดังกล่าวขึ้นกับชนิดของสารละลาย Hydrocolloid ด้วย เนื่องจากสารละลาย Hydrocolloid แต่ละชนิดแตกตัวให้ชนิดและปริมาณไอออนที่แตกต่างกัน

ปริมาณเถ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณเถ้า (%db) (Marcotte et al., 1998) เพราะปริมาณเถ้าแปรผันตามปริมาณของอินทรีย์สารที่อยู่ในอาหาร ซึ่งปริมาณและชนิดของอินทรีย์สารที่อยู่ในอาหารมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า pH (Marcotte et al., 1998) เนื่องจากการวัดค่า pH เป็นการวัดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในอาหารเท่านั้น แต่ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารขึ้นอยู่กับทุกไอออนที่มีอยู่ในอาหาร ไม่ใช่เฉพาะไฮโดรเจนไอออน

ความถี่ของไฟฟ้า

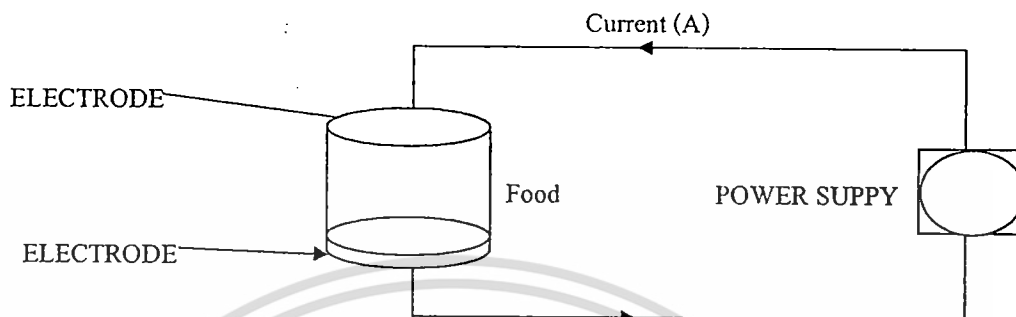
การเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความถี่ของไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาหาร แต่รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับกับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารนั้น ยังไม่สามารถสรุปได้แน่นอน (Gupta and Jindal, 1992; Marybeth et al., 1999)

2.4 กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating)

2.4.1 หลักการของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เกิดจากการเปลี่ยนพลังงานในรูปของกระแสไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน โดยความต้านทานของอาหารที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัวอาหารเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางให้ความร้อนและพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากในอาหารส่วนใหญ่มีไอออนของเกลือและกรดเป็นส่วนประกอบ จึงมีลักษณะเป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าแก่อาหาร กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านได้

ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแต่ละประเภท (Parrot, 1992; Skudder, 1989; de Alwis and Fryer, 1992; Biss et al., 1989; พงศ์ธร นวมานกร, 2540) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

ในการให้ความร้อนแบบธรรมดา กระบวนการมักถูกควบคุมโดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร เช่น การนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะ แต่ในกระบวนการให้ความร้อนแบบ โอห์มมิก ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้านี้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้น

การทำให้อาหารร้อนขึ้นโดยกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เกิดจากการผ่านไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารทำให้อาหารร้อนขึ้นภายในตัวเองอย่างรวดเร็วและพร้อมกันทุกจุดสรุปคือพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนนั่นเอง จากกฎข้อที่ 2 ของโอห์ม (สมการที่ 2.2) สามารถอธิบายการร้อนขึ้นของอาหารเนื่องจากการผ่านไฟฟ้ากระแสสลับไปยังอาหารได้ดังนี้ (de Alwis and Fryer, 1989)

$$P = IV \quad (2.2)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้า (Watt)

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้า V แก่ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่มีพื้นที่หน้าตัด A และวางห่างกันเป็นระยะ L จะเกิดกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารดังสมการที่ 2.3 (อดิศักดิ์, 2541)

$$I = \frac{AV\sigma}{L} \quad (2.3)$$

แทนค่า I ในสมการที่ 2.4 จะได้

$$P = \frac{A\sigma V^2}{L} \quad (2.4)$$

เนื่องจากปริมาตรของอาหารทั้งหมดเท่ากับ LA ดังนั้นอัตราการเกิดพลังงานความร้อน (Q) หาได้จาก

$$Q = \frac{P}{LA} = \frac{\sigma V^2}{L^2} = \sigma E^2 \quad (2.5)$$

โดยที่	Q	=	อัตราการเกิดพลังงานความร้อน (W/m^3)
	E	=	ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/cm)
	σ	=	ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ (S/m)

2.4.2 รูปแบบของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

2.4.2.1 องค์ประกอบของอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

คอลัมน์ของอุปกรณ์ความร้อนแบบโอห์มมิก ประกอบด้วยหม้อครอบอิเล็กโทรด (electrode housing) ซึ่งเป็นคู่ เช่น 2 คู่ ซึ่งเชื่อมต่อกันโดยใช้ท่อที่เป็นเหล็กปลอดสนิม การประกอบอุปกรณ์ความร้อนแบบโอห์มมิก จะจัดวางในลักษณะที่ให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างทั่วหน้าขณะที่ผลิตภัณฑ์ไหลผ่านระหว่างคู่อิเล็กโทรดอย่างต่อเนื่อง อิเล็กโทรดและท่อทำความร้อนของอิเล็กโทรดมักจะถูกหุ้มเพื่อป้องกันการรั่ว และมีการควบคุมอัตราการให้ความร้อนโดยการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของมวลของผลิตภัณฑ์หรือจำนวนโวลต์ที่ใส่เข้าไป

เครื่องจักรสำหรับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ในทางอุตสาหกรรมที่ใช้จะมีระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ การเปลี่ยนแปลงที่จุดเข้าซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ สุดท้ายที่จุดออกคือ

- การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เข้า
- อัตราการไหลของมวล
- ความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์

โดยในระบบการควบคุม จะมีไมโครโปรเซสเซอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบตัวแปรเหล่านี้ และคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอตามต้องการ (สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2545)

Palaniappan and Sastry (1991) สร้างเซลล์โดยใช้ท่อสแตนเลสยาว 12.5 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลาง 15/16 นิ้ว ด้านในของท่อสแตนเลสมีปลอกเทฟลอนสวมอยู่ (เพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้า) ส่วนกลางท่อมียปล่องเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/16 นิ้ว สำหรับใส่ตัวอย่างและ

เทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) ที่ปลายทั้งสองด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่มาจากแผ่นโรเดียม (Rhodium plated stainless steel electrodes) สวมอยู่กับ Teflon pressure caps และ Compression fittings

Gupta and Jinda (1992) เซลล์ประกอบด้วยท่อคริลิก (Acrylic) ยาว 8 cm เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 cm ที่ปลายทั้งสองด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่มาจากแผ่นสแตนเลส ติดอยู่กับซีลยางและแผ่นประกบ โดยใช้น็อตและสกรูเป็นตัวยึดให้แน่น ตามแนวยาวท่อมีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล 3 ช่อง โดยช่องหนึ่งเสียบที่ตำแหน่งกลางท่อ ส่วนอีก 2 ช่องเหลืออยู่ห่างจากปลายท่อข้างละ 1 เซนติเมตร

พงศ์ธร นวมานกร (2540) สร้างอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับอาหารเหลวซึ่งมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

เซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ทำจากท่อคริลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3.3 เซนติเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร ที่ปลายท่อทั้งสองข้างมีขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิมเบอร์ 316 ติดอยู่กับซีลยางและแผ่นประกบซึ่งถูกยึดให้แน่นด้วยสกรูและน็อตเพื่อป้องกันการรั่วซึม ตามแนวยาวและแนวรัศมีของท่อมีช่องสำหรับบรรจุตัวอย่างอาหารและเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล ผนังท่อด้านนอกถูกหุ้มด้วยฉนวนยางความหนา 0.5 นิ้ว เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

ระบบไฟฟ้า มาจากระบบไฟฟ้าหลัก (Main power supply) แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆคือ สวิตช์ ปิด-เปิด (Circuit breaker) เครื่องตัดไฟฟ้าอัตโนมัติ (Safety cut) หม้อแปลงไฟฟ้า (Variable transfer) สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้า 220/260 โวลต์ มิเตอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า

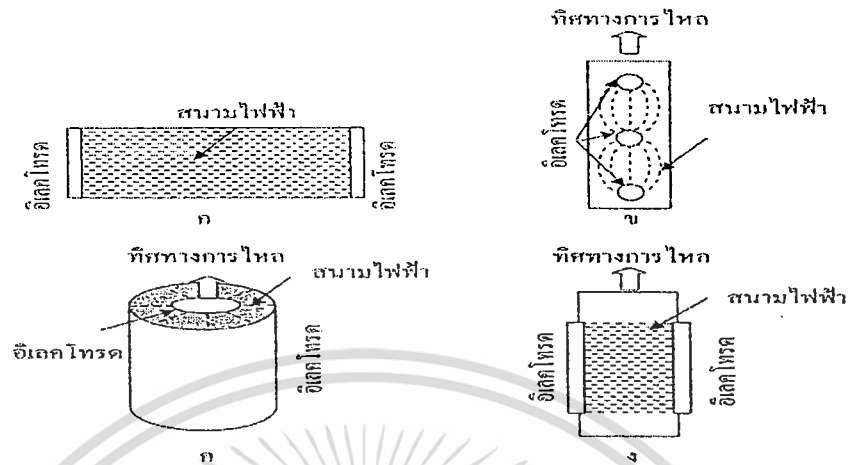
ระบบบันทึกข้อมูลประกอบด้วย สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouples) สำหรับรับส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างอาหาร ไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger) ซึ่งเชื่อมสัญญาณต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

2.4.2.2 รูปแบบทั่วไปของ Ohmic cell

ระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีทั้งแบบสถิตและแบบต่อเนื่อง ทั้งสองระบบต้องการอุปกรณ์พื้นฐาน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า อิเล็กโทรดและ Ohmic cell การเลือกใช้ Ohmic cell รูปแบบใดขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารที่ต้องการให้ความร้อนและวัตถุประสงค์ของกระบวนการ (Palaniappan and Sastry, 1991)

รูปแบบของ Ohmic cell ที่ทำงานแบบสถิตมักประกอบด้วยท่อทรงกระบอกและคู่อิเล็กโทรดที่ปลายแต่ละด้านของท่อทรงกระบอกนั้น รูปที่ 2.4 ก ส่วนระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ชนิดต่อเนื่องนั้นนิยมใช้กับอาหารเหลว Ohmic cell ที่ใช้แบ่งเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆตามทิศทางการไหลเทียบกับสนามไฟฟ้า คือ แบบ In-field และ แบบ Cross-field ใน Ohmic cell แบบ In-field ทิศทางการไหลของมวลกับสนามไฟฟ้าจะอยู่ในทิศทางเดียวกัน รูปที่ 2.4 ข ส่วน

Ohmic cell แบบ Cross-field ทิศทางการไหลของมวลกับสนามไฟฟ้าจะอยู่ในทิศตั้งฉากกัน รูปที่ 2.4 ค และ 2.7 4 (Halden et al., 1990)



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่าง Ohmic cell แบบต่าง ๆ (ก) Ohmic cell แบบสถิต (ข) Ohmic cell แบบ In-field (ค) และ (ง) Ohmic cell แบบ Cross-field

ภายใน Ohmic cell แบบ In-field ตามรูปที่ 2.4 ข อาหารจะถูกทำให้ร้อนขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ หากระยะห่างและค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดแต่ละคู่มีค่าเท่าๆกัน อัตราการเกิดความร้อนในอาหารในช่วงปลายจะเกิดสูงกว่าช่วงต้น กรณีที่ต้องการให้อัตราการเกิดความร้อนไม่แตกต่างกัน สามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างหรือลดค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ปลายทางออก มีผลทำให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ส่วนปลายลดลง จึงลดความแตกต่างของอัตราการเกิดความร้อนที่ช่วงต้นและช่วงปลายได้ สิ่งที่ต้องระวังอีกประการหนึ่ง คือ เมื่อพิจารณาช่วงบริเวณระหว่างอิเล็กโทรดคู่ใดคู่หนึ่ง ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออาหารเหลวที่อยู่ภายในช่วงที่พิจารณาจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารเหลวที่อยู่ระหว่างคู่อิเล็กโทรดจะมีค่าเท่ากันตลอดช่วงตามกฎของ Kirchhoff ค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นผลหารระหว่างกระแสกับความนำไฟฟ้าที่ช่วงต้นจึงสูงกว่าช่วงปลาย ดังนั้นความเข้มข้นสนามไฟฟ้าภายในคู่อิเล็กโทรดหนึ่ง ๆ จึงมีค่ามากในช่วงต้นและน้อยลงในช่วงปลาย ส่วนความเข้มข้นสนามไฟฟ้าในเซลล์แบบ Cross-field จะมีค่าคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิแต่ละช่วงหน้าตัดจะมีค่าเท่ากัน จึงไม่เกิดความแตกต่างของค่าการนำไฟฟ้า (Vicente et al., 2006)

2.4.2.3 รูปแบบของ Ohmic heater

เครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีรูปแบบที่นำมาศึกษาอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ

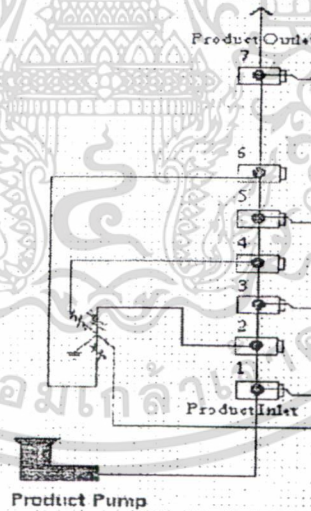
1. ระบบสถิต (static system) ระบบสถิตผลิตภัณฑ์ที่ให้ความร้อนจะอยู่หนึ่งกับที่

Halden et al., (1990) ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ทำจากกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนขนาด 184*70*77 มิลลิเมตร ด้านในของกล่องมีขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวกับที่ใช้ในทางการค้าติดตั้งอยู่ โดยต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลัก (Main supply) ที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ให้เหลือ 200 โวลต์ สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouples) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์

Gupta and Jindal (1992) พัฒนาเซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากตัวอย่างอาหารสู่ภายนอกเซลล์ โดยตัวเซลล์ทำจากท่ออคริลิก (Acrylic tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร ที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นเหล็กไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้สอบเทียบ (Calibrate) เพื่อดูความแม่นยำและความถูกต้อง โดยใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลาร์ เป็นตัวอย่างในการสอบเทียบ

2. ระบบไดนามิก (Dynamic system)

เป็นระบบที่นำเอาระบบสถิติหลายหน่วยเซลล์ (Unit cell) ต่อเข้าด้วยกัน โดยทำงานผ่านผลิตภัณฑ์ไปตามท่อที่มีการควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จากบีม โดยอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ภายในท่อจะมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนในระบบด้วย ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงรูปแบบการทำงานของ Ohmic heating แบบไดนามิก

ระบบไดนามิกผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในบริเวณที่เกิดกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (ฤทธิชัย และ จิตใส, 2542)

Qihua et al., (1992) ได้สร้างระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก แบบต่อเนื่องประกอบด้วย ตัวเซลล์ให้ความร้อนที่ทำจากท่อคริลิกยาว 300 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองข้างของเซลล์มีขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากแผ่นสแตนเลสติดตั้งอยู่ ตามแนวยาวและแนวรัศมีของเซลล์มีช่องสำหรับเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลและตามแนวเส้นรอบวงที่ปลายทั้งสองของเซลล์ได้ติดตั้งท่อแก้วข้างละ 3 ท่อ สำหรับต่อเข้าปั๊ม เพื่อการไหลเข้าและออกของตัวอย่าง เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของระบบควบคุมการไหลประกอบด้วย ปั๊มแบบจุ่ม (Submersible pump) ที่มีอัตราการสูบสูงสุด 10 ลิตรต่อนาที ต่อผ่านสายยางเข้าสู่ตัวเซลล์ให้ความร้อนทางท่อแก้ว ทั้ง 3 ท่อ โดยระบบ Bypass สำหรับปรับอัตราการไหลตัวอย่าง

Khalaf and Sastry (1991) ใช้ท่อไพเรกซ์ (Pyrex tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.05 เมตร สำหรับทำเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ในระบบต่อเนื่อง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.72 เมตร บริเวณทางเข้าและทางออกเซลล์ให้ความร้อนได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของตัวอย่างที่เข้าและออกจากเซลล์ การส่งตัวอย่างจากถังเก็บผ่านเข้าเซลล์ให้ความร้อนและออกไปยังถังเก็บ จะใช้วิธีการอัดอากาศ (Air pressure)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเป็นผลสืบเนื่องมาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (Electrical conductivity)

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับ (de Alwis and Fryer, 1989) ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวบ่งชี้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากหรือน้อย กล่าวคือถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสูง กระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านอาหารได้มากส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกัน ถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารต่ำ กระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านอาหารได้น้อยทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Palaniappan and Sastry, 1991; อติศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541)

สำหรับอาหารที่เป็นของผสม พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแต่ละเฟส มีผลมากต่อความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่อาหารแต่ละเฟสสร้างขึ้นจากสนามไฟฟ้า (Local Electrical Generated Heat) ซึ่งมีผลโดยตรงต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารในแต่ละเฟส (Benabderrahmane and Pain, 2000; Zhang and Fryer, 1993)

2. ความเข้มสนามไฟฟ้า (Field Strength)

เมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารสูงขึ้นเช่นกัน เพราะว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า เปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบ ทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (อติศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; de Alwis et al., 1989)

3. ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหาร (Particle size and Shape)

ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหารมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ พบว่าเมื่อชิ้นอาหารขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยลดลง อาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ อาจช่วยให้การกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารมีมากกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ ซึ่งมีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าผิดปกติ (Palaniappan and Sastry, 1991) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยใช้ตัวอย่างเป็นชิ้นของแข็งที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแขวนลอยอยู่ในของเหลวที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีค่าความหนืดต่ำ ซึ่งพบว่าชิ้นของแข็งหนา 3 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใจกลางของของแข็งจะใกล้เคียงกับของเหลว แต่เมื่อชิ้นของแข็งมีความหนามากขึ้นเป็น 10 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใจกลางของชิ้นของแข็งจะต่ำกว่าอุณหภูมิของของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ (Davies et al., 1999)

อัตราส่วนระหว่างความยาวของชิ้นอาหาร (L) ที่ขนานกับทิศทางกระแสวิกขจรของกระแสไฟฟ้า ต่อพื้นที่หน้าตัดขวางของชิ้นอาหาร (A) โดยปริมาตรของชิ้นอาหารคงที่ พบว่า มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นอาหาร กล่าวคือ ชิ้นอาหารที่มี L/A สูง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ ต่ำกว่าชิ้นอาหารที่มี L/A ต่ำ เพราะชิ้นอาหารที่มี L/A ต่ำ มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านส่วนที่เป็นชิ้นอาหารจึงมากกว่าชิ้นอาหารที่มี L/A สูงกว่า (อดิศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; de Alwis et al., 1989)

4. ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร (Particle Orientation)

ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหารมีผลต่อค่า L/A ของชิ้นอาหาร ถ้าชิ้นอาหารมีค่า L/A สูง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ จะต่ำกว่าชิ้นอาหารที่มีค่า L/A ต่ำ ดังนั้นเมื่อ L/A มีค่ามากกว่า 1 ชิ้นอาหารที่วางในแนวตั้งฉากกับทิศทางกระแสวิกขจรของกระแสไฟฟ้าจะร้อนเร็วกว่าชิ้นอาหารที่วางในแนวขนานกับทิศทางกระแสวิกขจรของสนามไฟฟ้า (Sastry and Palaniappan, 1992) แต่สำหรับชิ้นอาหารที่มีรูปร่างทรงกลมและทรงลูกบาศก์ พบว่า ทิศทางการจัดเรียงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร เพราะค่า L/A ของชิ้นอาหารทั้งสองรูปร่างนี้ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียง (de Alwis et al., 1989)

5. ปริมาณชิ้นอาหาร (Particle Concentration)

เมื่อสัดส่วนปริมาตรชิ้นอาหารต่อปริมาตรอาหารทั้งหมดมีค่ามาก อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ มีค่าสูงกว่ากรณีที่สัดส่วนโดยปริมาตรของชิ้นอาหารมีค่าน้อย เนื่องจากสัดส่วนโดยปริมาตรของชิ้นอาหารที่เพิ่มมากขึ้นเปรียบเสมือนเป็นการลดค่า L/A ในส่วนของชิ้นอาหาร ผลคือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านส่วนที่เป็นชิ้นอาหารได้มากกว่าส่วนที่เป็นอาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ มีผลทำให้ชิ้นอาหารร้อนขึ้นได้เร็วกว่าอาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ (อดิศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; Palaniappan and Sastry, 1991)

การศึกษาพฤติกรรมทางด้านความร้อนของอาหารที่เป็นของผสมในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Ohmic แบบระบบต่อเนื่องโดยใช้ Slip Phase Model (Benabderrahmane and Pain, 2000) หาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชั้นอาหาร และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของชั้นอาหารกับอาหารเหลว โดยกำหนดค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของอาหารในแต่ละเฟสให้ขนาดชั้นอาหารคงที่ และค่าการนำไฟฟ้าของชั้นอาหารเท่ากับอาหารเหลว แล้วเปลี่ยนสัดส่วนโดยปริมาตรของชั้นอาหาร ($\phi_{del} = 1 - 55\%$) พบว่า เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของชั้นอาหารเพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในชั้นอาหารลดลง และ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิชั้นอาหารกับอาหารเหลวจะลดลงด้วยเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ 2 แนวทาง แนวทางที่หนึ่งคือ เกิดจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเฟสของแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นอาหารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น และอีกแนวทางหนึ่งคือ การลดลงของปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทให้กับของเหลวต่อหนึ่งหน่วยชั้นอาหาร ซึ่งทั้ง 2 แนวทาง แสดงให้เห็นถึงผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟส (Benabderrahmane and Pain, 2000)

6. ความหนืดของอาหารเหลว

ความหนืดของของเหลว มีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก ในของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยใช้ตัวอย่างเป็นชั้นมันฝรั่งทรงลูกบาศก์ขนาด 7 มิลลิเมตร แขนงลอยในของเหลวที่มีความเข้มข้นของ Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC) 3 ระดับ คือ 0, 0.3 และ 0.6 % เพื่อให้มีค่าความหนืดแตกต่างกัน และเติมโซเดียมคลอไรด์ เพื่อปรับค่าการนำไฟฟ้า พบว่าหากการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟสแบบอาศัยการพาความร้อนมีค่าต่ำ โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูง ดังนั้นในระบบสถิต อัตราการเกิดความร้อนของของเหลวและของแข็ง ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนืดของของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ใน Vibrating Ohmic Heater และ Continuous Flow Ohmic Heater พบว่า อัตราการเกิดความร้อนของของเหลวและของแข็งสูงขึ้นตามความหนืดของของเหลว เนื่องจากในระบบสถิต การเคลื่อนที่ของของเหลวถูกจำกัดอย่างมาก ดังนั้นผลของความหนืดของของเหลวที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟสจึงน้อยกว่าในระบบ Vibrating Ohmic Heater และ Continuous Flow Ohmic Heater ซึ่งของเหลวมีการเคลื่อนที่มาก (Khalaf and Sastry, 1991)

7. การถ่ายเทความร้อนระหว่างชั้นอาหารและของเหลว

กรณีที่อาหารเหลวมีค่าความหนืดต่ำ การเคลื่อนที่ของอาหารเหลวอันเนื่องมาจากการพาความร้อนระหว่างชั้นอาหารและอาหารเหลว จะมีผลทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างชั้นอาหารและอาหารเหลวในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อทดลองชั้นของแข็งที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแขวนลอยอยู่ในของของเหลวที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีค่าความหนืดต่ำ ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่ผิวของชั้นของแข็งใกล้เคียงกับของเหลวที่อยู่รอบ ๆ ส่วนอุณหภูมิใจกลางของชั้นของแข็งจะต่ำกว่าอุณหภูมิ

ของของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ชั้นของของแข็งที่ใช้ทดลอง มีค่าการนำความร้อนต่ำ (Davies et al., 1999)

8. ความแปรปรวนของสนามไฟฟ้าภายในอาหาร

กรณีที่ในของเหลวมีชั้นของของแข็ง 1 ชั้น แขนงลอยอยู่ โดยค่าการนำไฟฟ้าของชั้นของแข็งแตกต่างจากของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งกรณีที่ชั้นของแข็งมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าและต่ำกว่าของเหลว ล้วนมีผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก ในระบบทั้งสิ้น กรณีที่ค่าการนำไฟฟ้าของชั้นของแข็งมีค่าสูงกว่าของเหลว เช่นชั้นของแข็งเป็นโลหะ จะดูคุณสมบัติสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ในทางตรงข้ามสภาวะที่ค่าการนำไฟฟ้าของชั้นของแข็งมีค่าต่ำกว่าของเหลว สนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นจะเกิดการเบี่ยงเบน ความแปรปรวนของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 กรณีนี้จะทำให้เกิดบริเวณที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำขึ้น ซึ่งทำให้บริเวณนั้นเกิดความร้อนน้อยมาก เรียกบริเวณดังกล่าวว่า "Local Shadow Regions of Low Electric Field Strength" (Davies et al., 1999; Fryer et al., 1993)

2.4.4 ข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

ข้อดี (ฤทธิชัย อัครราชันย์ และจิตติโส อัญชลีกิจ, 2542)

1. เกิดความร้อนได้รวดเร็วและพร้อมกันทั่วทุกจุดทำให้เวลาในการฆ่าเชื้อสั้นลง ลดลงการสูญเสียคุณค่าทางอาหารได้ดี
2. ไม่ต้องใช้พื้นผิวในการถ่ายเทความร้อน จึงลดปัญหาการถ่ายเทความร้อนผ่านคราบสกปรก (fouling film)
3. ระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ไม่มีส่วนของอุปกรณ์เคลื่อนไหว จึงสามารถใช้กับอาหารที่มีความละเอียดอ่อนต่อแรงเฉือนได้
4. การควบคุมกระบวนการทำได้ง่าย

ข้อด้อย (Destinee, 2008)

1. ราคาต้นทุนของระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีราคาแพง
2. สามารถใช้ได้กับอาหารที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่านั้น
3. ไม่สามารถใช้กับอาหารที่มีไขมันสูงๆได้ เนื่องจากจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าน้อยลง ทำให้เกิดความร้อนได้ช้า อาจทำให้มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้

2.5 การประยุกต์ใช้ค่าการนำไฟฟ้าในอุตสาหกรรมอาหาร

2.5.1 การพัฒนาเครื่องมือวัด

Mitchell and De Alwis (1989) พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับชั้นอาหารที่มีความถี่ 50 เฮิร์ต อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับสร้างความร้อนแบบโอห์มมิก ทำจากท่อที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร วางในแนวตั้งมีตัวยึดทั้งด้านบนและด้านล่าง ปลายท่อด้านล่างมีขั้วอิเล็กโทรดยึดติดอยู่ ส่วนปลายท่อด้านบนมีขั้วอิเล็กโทรดถูก

ยึดติดไว้ที่ปลายหัวกดที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อให้หัวอิเล็กโทรดสัมผัสผิวหน้าของชิ้นอาหารที่มีความยาวต่างๆกัน

Palaniappan and Sastry (1991) ได้ศึกษาการนำไฟฟ้าของอาหารแข็ง ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบ Ohmic โดยออกแบบเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ซึ่งประกอบไปด้วย ท่อเหล็กทรงกระบอกที่มีความยาว 12.5 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 15/16 นิ้ว โดยใส่แผ่นขั้วไฟฟ้าวงกลมที่เป็นโลหะโรเดียม (rhodium) ลงไปที่ปลายเปิดของท่อทั้ง 2 ด้าน และเจาะรูตรงกลางท่อเพื่อสอดคู่ความต้านทานชนิด T (T-type copper constantan) เคลือบคู่ความร้อนด้วยเทฟลอนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการให้ความร้อน ใช้ระบบคอมพิวเตอร์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยมีเครื่องบันทึกแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวอย่างอาหาร

2.5.2 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และการสเตอริไลซ์ (Sterilization) เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ฆ่าจุลินทรีย์เพียงบางส่วนในอาหาร จึงจำเป็นต้องเก็บรักษาไว้ภายใต้สภาวะที่ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นไปได้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจุดประสงค์แรกของกระบวนการนี้ คือทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ (Pathogenic microorganisms) ตัวอย่างเช่น นม ส่วนจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียบางส่วนสามารถอยู่รอด จากการให้ความร้อนแบบนี้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การถนอมอาหารแบบอื่นควบคู่ไปกับการทำพาสเจอร์ไรซ์ ได้แก่ การใช้ความเย็น (Refrigeration) การใช้สารเคมี (Chemical additive) เพื่อให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อพวกจุลินทรีย์ เช่น การใส่น้ำตาลในนมข้นหวานและการใส่กรดในอาหารหมักดอง การบรรจุหีบห่อ (Packaging) การหมัก (Fermentation)

Beattie (1914) ได้ทำการพาสเจอร์ไรซ์นมสำหรับเด็กทารก โดยให้นมมีการไหลแบบต่อเนื่อง (Continues) 0.75 และ 30 แกลลอนต่อชั่วโมง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 3600-4200 โวลต์ พบว่า คุณภาพนมที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

Murphy et al., (1991) ให้ความร้อนกับ Sewage sludge ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิจุดเดือด ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยให้แรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าที่มาจากทองแดงค่าต่างๆกัน ได้แก่ 94 120 190 และ 290 โวลต์ พบว่าวิธีให้ความร้อนแบบโอห์มมิก นี้สามารถทำให้เกิดความร้อนใน Sewage sludge อย่างรวดเร็ว สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าร้อยละ 98

Bohart (1933) ได้ทดลองใช้กระแสไฟฟ้าสลับ 110 โวลต์ 60 เฮิร์ต ฆ่าเชื้ออาหารในกระป๋องปิดสนิท

Parrot (1992) ทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการใช้วิธีให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ในการฆ่าเชื้ออาหาร โดยใช้ตัวอย่างเนื้อวัวและแครอทในน้ำเกรวี เมื่อสิ้นสุด

กระบวนการหาเชื้อแล้วทำการคำนวณค่า F_0 ของชิ้นเนื้อวัวและแครอทเปรียบเทียบกับค่า F_0 ของน้ำเกรวี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคือ 27 33.7 และ 32 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาเดียวกันชิ้นอาหารสามารถได้รับความร้อนในระดับเดียวกับส่วนที่เป็นของเหลว ในขณะที่วิธีการให้ความร้อนทั่วไป ที่เวลาเดียวกันนี้ ค่า F_0 ของชิ้นอาหารจะมีค่าเพียง 0.2 เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้ทดลองตรวจสอบความสม่ำเสมอของการเกิดความร้อนในชิ้นอาหาร โดยการเพาะสปอร์ของ *Bacillus stearothermophilus* ที่รู้จำนวนแน่นอน ให้กระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทและเพาะไว้เฉพาะที่กึ่งกลางก้อนแอลจิเนท แล้วนำไปใส่ไว้ในชิ้นเนื้อวัวและแครอท จากนั้นฆ่าเชื้อด้วยวิธีโอห์มมิด ผลที่ได้คือ ค่า F_0 ของแครอทที่มีเชื้อกระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทเท่ากับ 35.6 ส่วนแครอทที่มีเชื้อเพาะไว้เฉพาะกึ่งกลางก้อน แอลจิเนทมีค่า 37.1 สำหรับในชิ้นเนื้อวัวค่า F_0 ของชิ้นที่สปอร์กระจายทั่วทั้งก้อนแอลจิเนทเท่ากับ 32.5 และชิ้นที่สปอร์เฉพาะกึ่งกลางมีค่า 37.0 ซึ่งเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเป็นส่วนใดของชิ้นอาหาร การให้ความร้อนแบบโอห์มมิด สามารถทำให้อาหารได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงพร้อมๆกัน

2.5.3 การลวก (Blanching)

เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C การลวกผลิตภัณฑ์ก่อนบรรจุ มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ ได้แก่ กำจัดก๊าซออกจากเนื้อเยื่อ เพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ ทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์นุ่มขึ้น ง่ายต่อการบรรจุ กระตุ้นหรือหยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์

Schade (1951) ได้ใช้กระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ 0.25 เมกกะเฮิร์ต ลวกมันฝรั่งปอกเปลือกที่แช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสีของมันฝรั่งที่เกิดจากเอนไซม์ (Enzymic discoloration)

Mizrahi et al. (1975) ได้ศึกษาการลวกข้าวโพดทั้งฝักด้วยไฟฟ้าเพื่อทำลายเอนไซม์ โดยให้ข้าวโพดแช่อยู่ในสารละลายเกลือที่ปรับค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับตัวอย่างข้าวโพด เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 380 โวลต์ ผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียม พบว่าจะใช้เวลา 3 นาที ในการทำลายเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่วิธีการลวกข้าวโพดในน้ำเดือดต้องใช้เวลา 17 นาทีในการทำลายเอนไซม์ชนิดเดียวกัน

2.5.4 การละลายอาหารแช่แข็ง (Thawing)

Naveh et al., (1983) ได้ทดลองการละลายชิ้นเนื้อแช่เยือกแข็งขนาด 17×33 เซนติเมตร โดยใช้ไฟฟ้าแรงดัน 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ผ่านขั้วไฟฟ้าทำจากสแตนเลส โดยมีน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 1000 มิลลิโห์มต่อเซนติเมตร เป็นตัวกลาง พบว่าสามารถละลายชิ้นเนื้อแช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -20°C ได้ในเวลา 160 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการละลายโดยการแช่ในน้ำที่มีการกวนและการควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่เท่ากับ 20°C จะต้องใช้เวลาถึง 450 นาที ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้กระแสไฟฟ้าในการละลายชิ้นเนื้อสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ลดลงได้ร้อยละ 64

Balaban et al., (1993) ได้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า 480 โวลต์ 60 เฮิร์ต ผ่าน ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากสแตนเลส ในการละลายก้อนกุ้งแช่เยือกแข็ง (Feozen shrimp blocks) แทนวิธีการละลายโดยการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในน้ำเพื่อต้องการลดปริมาณการใช้ น้ำในการละลาย ผลิตภัณฑ์และลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น พบว่าการละลายก้อนกุ้งแช่เยือกแข็งโดยวิธีโอห์มมิก นั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 13.9 เหรียญต่อกุ้ง 1000 กิโลกรัม

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhong และ Lima (2003) ทำการทดลองให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการโอห์มมิกแก๊สมันฝรั่ง หวานจากนั้นนำไปอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ พบว่า มันฝรั่งหวานที่ผ่านการให้ความ ร้อนแบบโอห์มมิกเมื่อนำมาอบแห้งต่อมีค่าอัตราการทำแห้งสูงกว่ามันฝรั่งหวานที่ไม่ได้ผ่าน กระบวนการเบื้องต้นใด ๆ

Shirsat และคณะ (2004) และ Sarang และคณะ (2008) ออกแบบเครื่องให้ความร้อนโดย อาศัยหลักการโอห์มมิกเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของผลไม้ชนิดต่าง ๆ ดังนี้ ลูกพีช สตอเบอร์รี่ แอปเปิ้ล แพร์ สับปะรด และเนื้อในส่วนที่เป็นไขมันและส่วนกล้ามเนื้อ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ โดยค่าการนำไฟฟ้าของผลไม้มีค่าต่ำ กว่าของเนื้อ ค่าการนำไฟฟ้าของลูกพีชและสตอเบอร์รี่มีค่าต่ำกว่าผลไม้ชนิดอื่น ๆ ที่เหลือและ เนื้อบริเวณกล้ามเนื้อมาค่าสูงกว่าบริเวณไขมัน

Wang และคณะ (2007) ใช้หลักการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก 2 ขั้นตอนในกระบวนการ ผลิตเต้าหู้ เพื่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีนในถั่วเหลือง โดยทำการเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนแบบพื้นฐาน พบว่า การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก 2 ขั้นตอนให้เต้าหู้ที่มีคุณภาพดี สามารถนำไปใช้ได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตเต้าหู้

บทที่ 3

การออกแบบ สร้างเครื่องผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น ด้วยเทคนิคโอห์มมิกและวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.1.1 การเตรียมน้ำกระเจี๊ยบ

ใช้ดอกกระเจี๊ยบแห้งจากบริษัท คันทรส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จังหวัดปทุมธานี จากนั้น นำขนส่งทางรถมาที่สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง(25°C) เมื่อต้องการทำการทดลอง ให้เตรียมน้ำบริสุทธิ์และดอกกระเจี๊ยบแห้งในอัตราส่วน น้ำบริสุทธิ์ 1 ลิตร ต่อ ดอกกระเจี๊ยบแห้ง 0.1 กิโลกรัม

3.1.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 molar โดยใช้ ความสัมพันธ์

$$\frac{y}{Mw} = \frac{CV}{1000} \quad (3.1)$$

โดยที่ y = น้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (gram)

C = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องการ (mol/l)

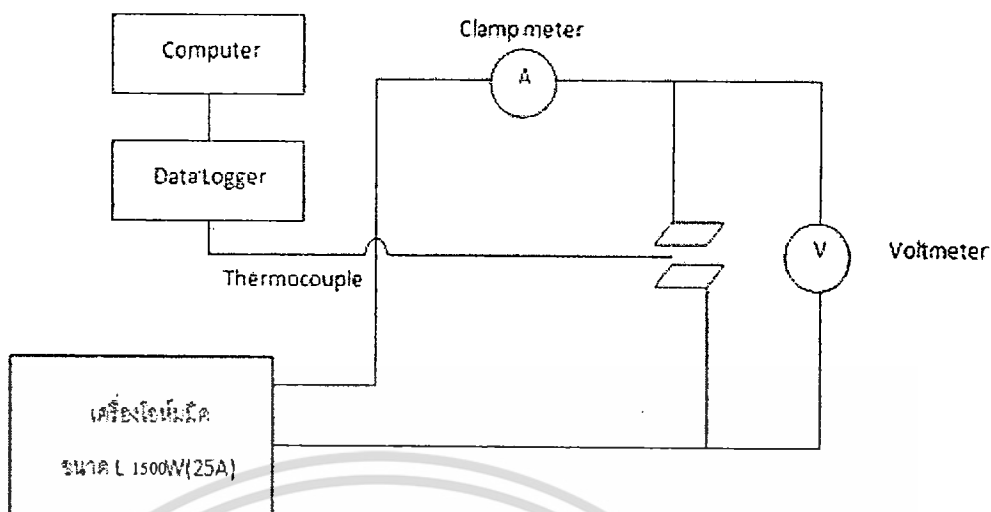
V = ปริมาตรตัวทำละลาย ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

Mw = Molecular Weight NaCl = 58.5

โดยเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่นำมาใช้จะถูกนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาผลของชนิดและการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่มีต่อลักษณะการกระจายอุณหภูมิ

3.2 วงจรที่ใช้ในการให้ความร้อนกับระบบโอห์มมิก

วงจรที่ใช้ในการให้ความร้อนกับระบบโอห์มมิกเพื่อให้ความร้อนกับน้ำกระเจี๊ยบในกระบวนการทำน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรที่ใช้ในระบบโอห์มมิต

เครื่องโอห์มมิต คือ เครื่องที่ทำการส่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ให้กับระบบ

Voltmeter คือ อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าที่ติดคร่อมระหว่างขั้ว Electrodes

Clamp meter คือ อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าสลับ ความต้านทาน แรงดันไฟฟ้า

Data logger คือ เครื่องวัดอุณหภูมิจากสาย Thermocouple Type K โดยต่อเข้า

คอมพิวเตอร์

Ohmic cells คือ ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเป็นส่วนประกอบด้วยขั้ว Electrodes ทำด้วยแผ่น

โลหะสแตนเลส AISI 304

ขั้นตอนการทำงาน

วงจรประดิษฐ์เพื่อให้ความร้อนแบบโอห์มมิตขนาดแรงดันไฟฟ้า 1500 วัตต์ ต่อเข้ากับขั้วของอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับชุด Ohmic cells ทำให้น้ำกระเจียบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นเปรียบเสมือน น้ำกระเจียบคือตัวต้านทานไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนขึ้น สามารถวัดแรงดันที่เกิดขึ้นที่ ขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ Voltmeter และกระแสไฟฟ้าจาก Clamp meter อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการละลายวัดจากสาย Thermocouple Type K ต่อ port กับเครื่องวัดอุณหภูมิ Data logger และบันทึกอุณหภูมิที่ได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

34970A DATA LOGGER

การบันทึกอุณหภูมิจากการทดลอง

1. ใช้ปลายสาย Thermocouple Type K ฉนวน Teflon แฉงลงในน้ำกระเจียบ
2. ต่อสายอีกข้างเข้าเครื่อง Data Logger แล้วต่อเครื่อง Data Logger เข้ากับคอมพิวเตอร์

3. ตั้งค่าการวัดโดยใช้โปรแกรม 34970A DATA LOGGER โดยเลือกจำนวนช่องที่ใช้วัดค่าระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบค่าและชนิดของ Thermocouple จากนั้นกดปุ่ม Start/stop ใน Tab Scan and Log Data เพื่อทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ
4. เมื่อเสร็จการทดลองให้ทำการ Export Data โดยกดปุ่ม Export Data เพื่อบันทึกข้อมูลที่ได้

3.3 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำกระเจียบเข้มข้น

กระเจียบที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 130 นาที มาปรับระดับความเข้มข้นโดยผสมน้ำกระเจียบกับน้ำตาลทรายแดง (บริษัทมิตรผล ซื้อมาจาก Super market) ปรับความเข้มข้นทั้งสิ้น 11 ระดับ ดังนี้ 12 16 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 °Brix จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

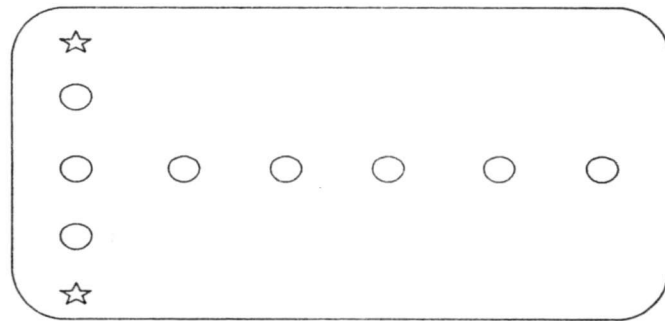
3.4 การออกแบบระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

3.4.1 ชนิดและการจัดเรียงตัวของฮีลิกโทรด

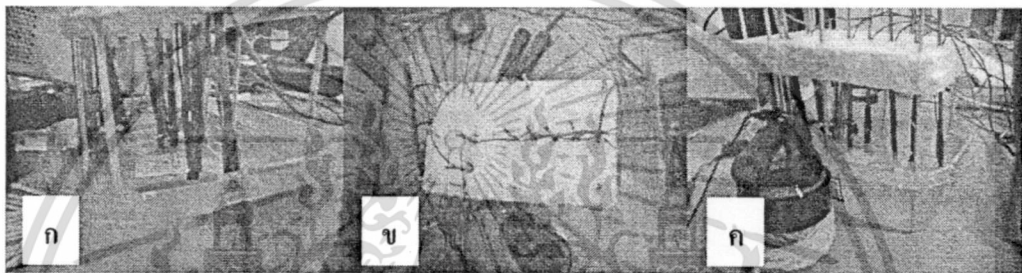
การศึกษาประกอบไปด้วยฮีลิกโทรด 2 แบบคือแบบแผ่นสี่เหลี่ยมและแบบท่อ โดยนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.1.2 มาใช้ทดสอบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 การกระจายอุณหภูมิ

ใช้ภาชนะทรงสี่เหลี่ยม ขนาด $12.5 \times 19.5 \times 5.5 \text{ cm}^3$ ทดสอบดูลักษณะของการกระจายอุณหภูมิด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ขนาด 25A 1500 W โดยใช้ฮีลิกโทรดที่ทำจาก สแตนเลส AISI 304 แบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 รูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 แผ่น แบบที่ 2 รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 cm ยาว 10 cm จำนวน 2 ท่อ จัดเรียงตัวฮีลิกโทรดที่ระยะ 4 cm และ 6 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สัญลักษณ์รูปดาวแสดงฮีลิกโทรด สัญลักษณ์รูปวงกลมแสดงจุดที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารละลาย ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLUKE Ti25 THERMAL IMAGER) จนอุณหภูมิของสารละลายทุกๆ จุดถึง 80°C ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทำการบันทึกค่า อุณหภูมิ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปวิเคราะห์หาระยะที่การกระจายอุณหภูมิมี่ความเหมาะสมต่อไป



รูปที่3.2 แสดงการวัดระยะห่างที่มีผลต่างอุณหภูมิที่ยอมรับได้



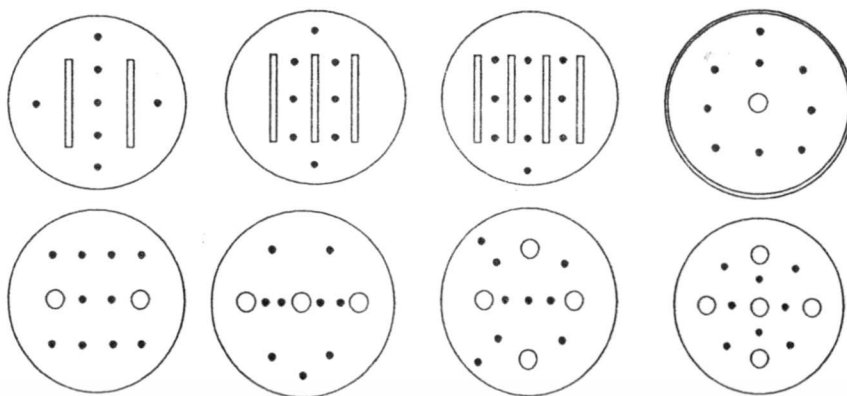
รูปที่3.3 แสดงชุดทดลองการวัดระยะห่างที่มีผลต่างอุณหภูมิ

(ก) ด้านบน (ข) ด้านข้าง (ค) ด้านหน้า

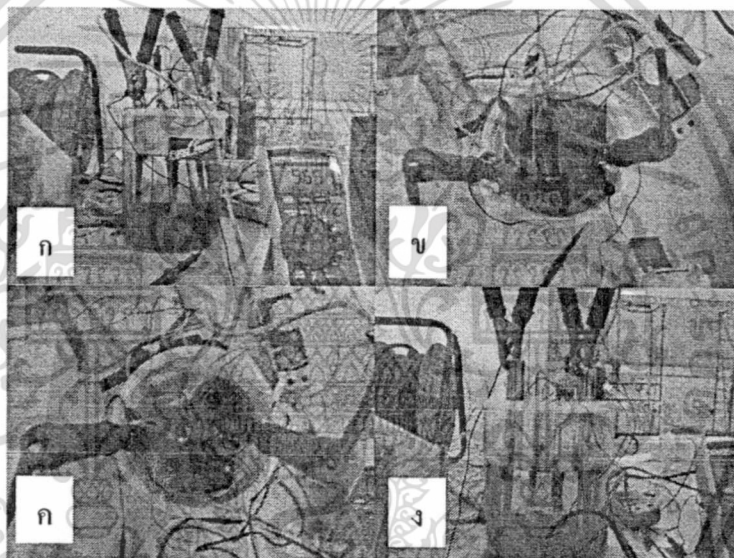
กลุ่มที่ 2 การจัดเรียงอิเล็กโทรด

ใช้ภาชนะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 cm สูง 19 cm ทดสอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ขนาด 25A 1500 W โดยใช้อิเล็กโทรดที่ทำจาก สแตนเลส AISI 304 แบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 รูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $8 \times 20 \text{ cm}^2$ จำนวน 2 แผ่น แบบที่ 2 รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 cm ยาว 20 cm จัดเรียงตัวอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 3.4 วงกลม หรือแท่งสี่เหลี่ยมยาวแสดงอิเล็กโทรด ส่วนจุดสีดำแสดงจุดที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารละลายในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน จนอุณหภูมิของสารละลายทุก ๆ จุดถึง 80°C ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทำการบันทึกค่า อุณหภูมิ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปวิเคราะห์หาการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดวางอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.5 แสดงภาพชุดทดลองการจัดเรียงของอิเล็กโทรด

- (ก) แบบแผ่นด้านบน (ข) แบบแผ่นด้านข้าง
(ค) แบบท่อด้านบน (ง) แบบท่อด้านข้าง

3.4.2 อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

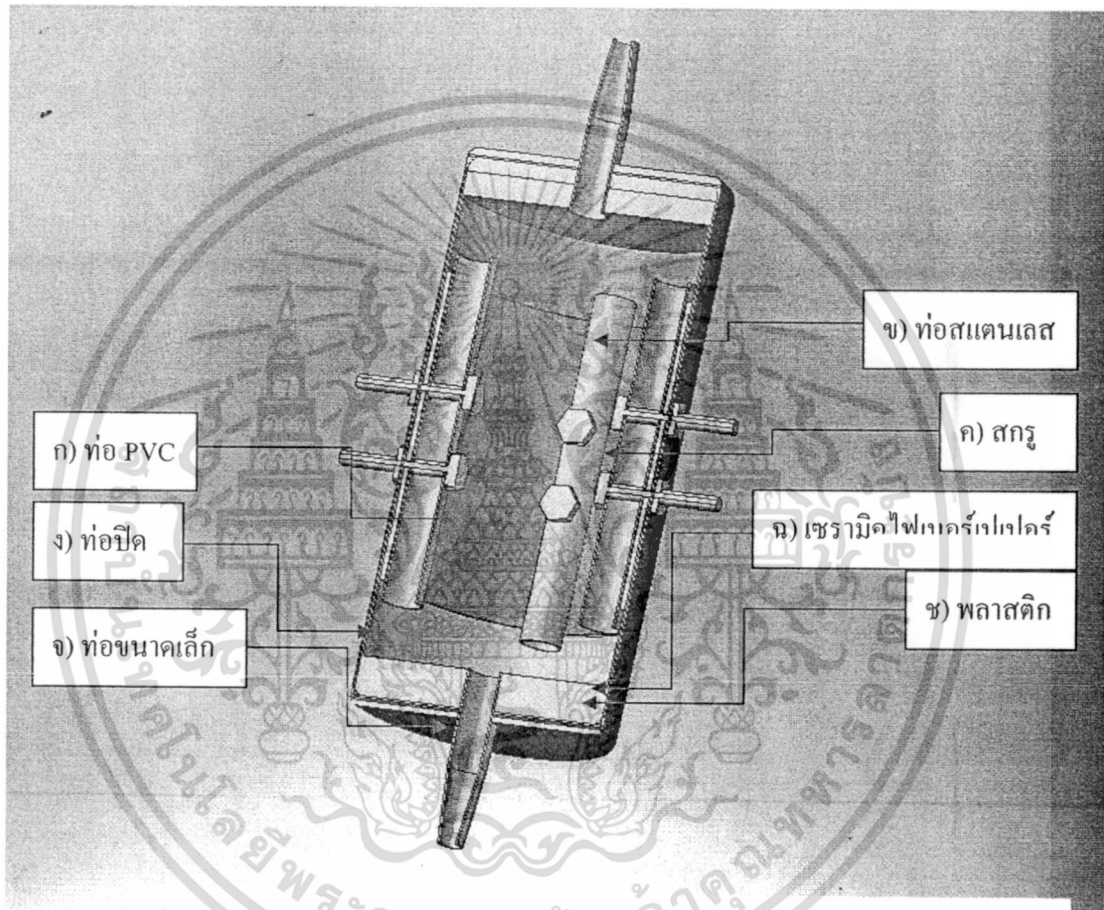
3.4.2.1 การสร้างอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแสดงดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ก) ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 cm มีขนาดความยาว 16 cm
ข) ท่อสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 cm ยาว 18 cm

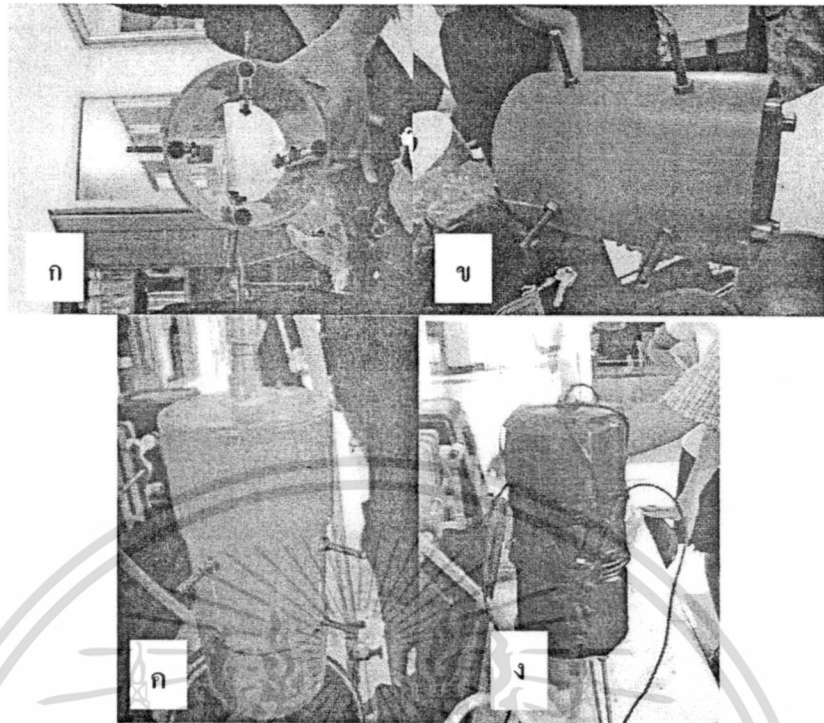
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค) สกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm
- ง) ท่อปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 cm ยาว 10 cm
- จ) ท่อขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ยาว 10 cm
- ฉ) เซรามิกไฟเบอร์เปเปอร์
- ช) พลาสติก
- ญ) กาวเชื่อมท่อน้ำแรงดันสูง (ตราช้าง น้ำยาประสานท่อพีวีซีแข็งและข้อต่อพีวีซีแข็ง)



รูปที่ 3.6 แสดงภาพจำลองอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบ โอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงภาพเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

(ก) ด้านใน

(ข) ด้านข้าง

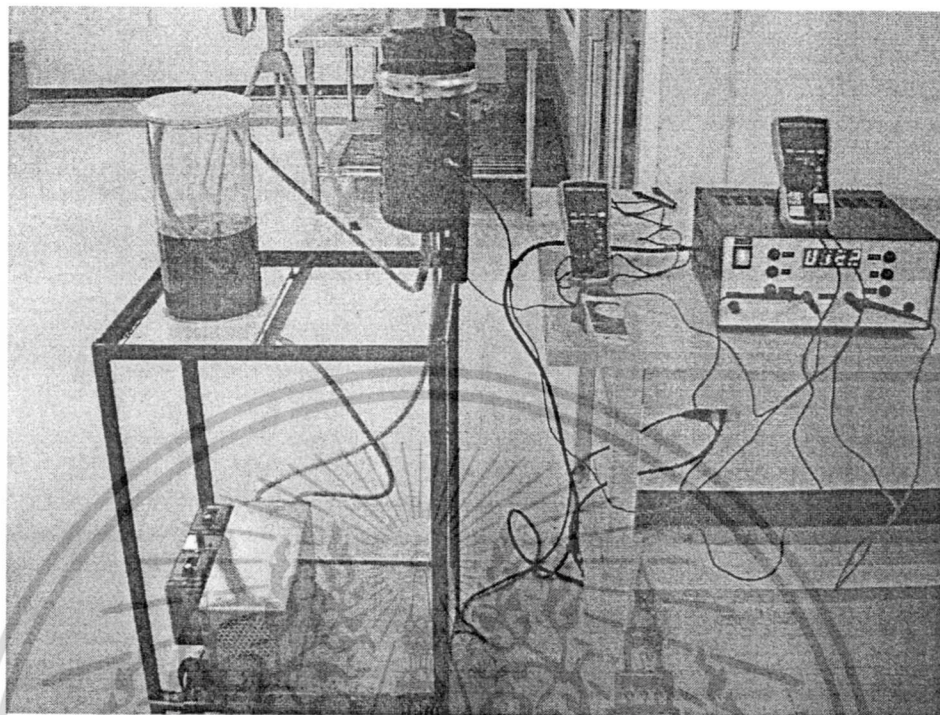
(ค) หลังปิดท่อนทั้งสองด้าน

(ง) หลังหุ้มด้วยฉนวนและถุงดำ



รูปที่ 3.8 แสดงภาพส่วนให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงภาพเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

3.4.2.2 การทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

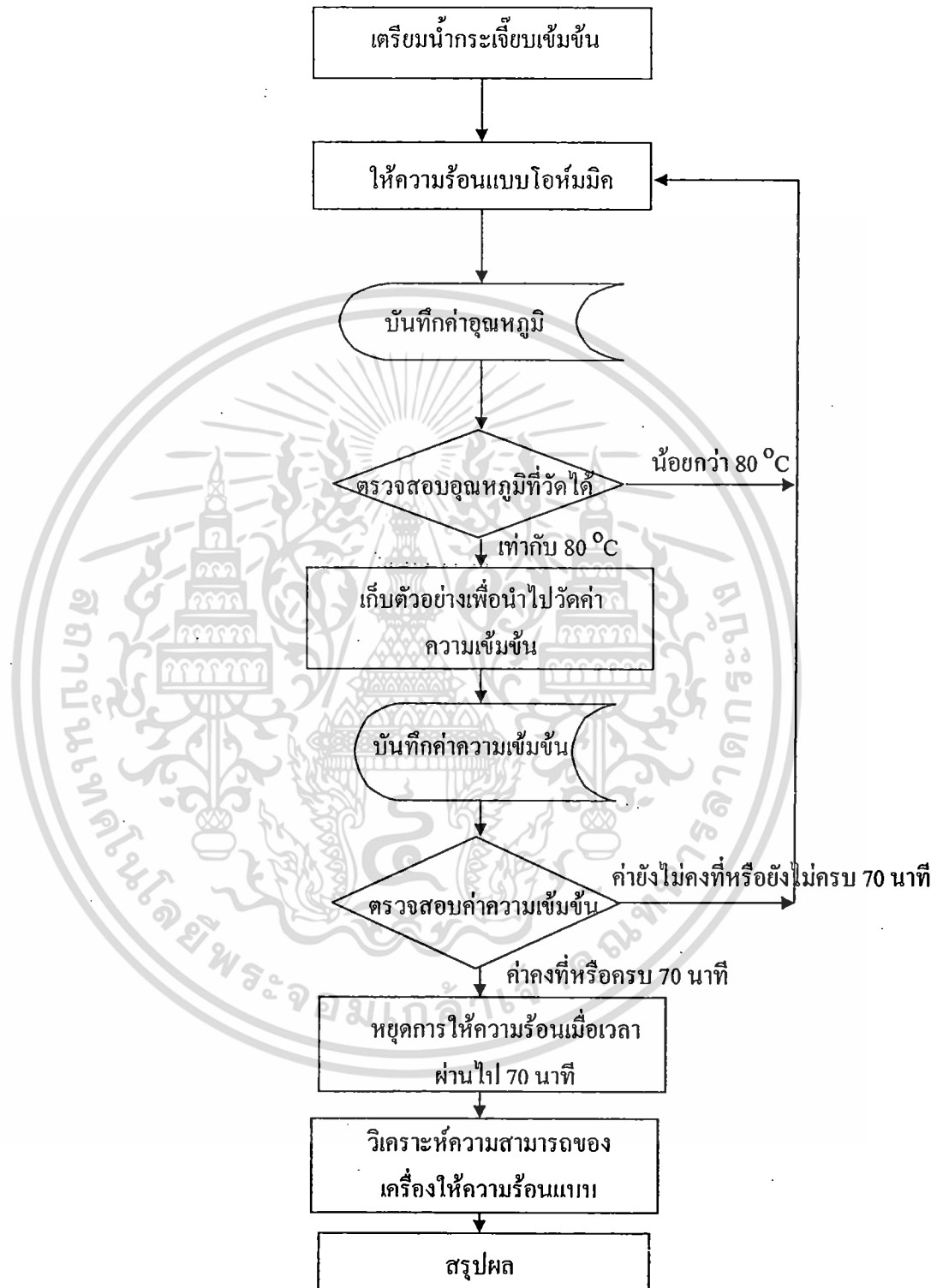
บรรจุน้ำกระเจี๊ยบลงถึงบ่อนวดฤดูติบ จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 6-9 แอมแปร์ เพื่อทำให้เกิดความร้อนกับน้ำกระเจี๊ยบ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ 30-40 โวลต์ บันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำกระเจี๊ยบในถังบ่อนวดฤดูติบ เมื่ออุณหภูมิถึง 80°C เริ่มเก็บตัวอย่าง ทุก ๆ 5 นาที พร้อมบันทึกค่าความเข้มข้นของน้ำกระเจี๊ยบ เมื่อผ่านไป 70 นาทีหรือค่าความเข้มข้นของน้ำกระเจี๊ยบคงที่จึงหยุดการให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์และความสามารถของเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิกต่อไป

3.5 การวิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า

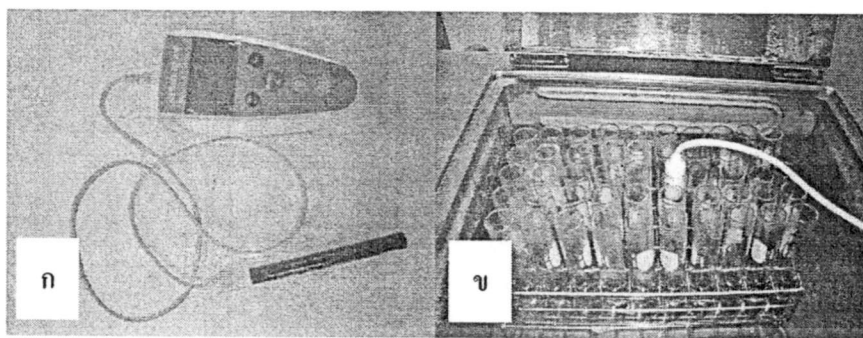
วิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Electrical Conductivity meter (Mettler Toledo FiveGo Ft3) แสดงดังรูปที่ 3.11 เปรียบเทียบค่าด้วยสารละลายมาตรฐานซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 12.88 mS/cm โดยกำหนดค่าชดเชยอุณหภูมิไว้ที่ 25°C (ตั้งค่าชดเชยอุณหภูมิที่ 2%)

และเมื่อทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องให้ตั้งค่าชดเชยอุณหภูมิที่ 0.02%



รูปที่ 3.10 แสดงผังวิธีการทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

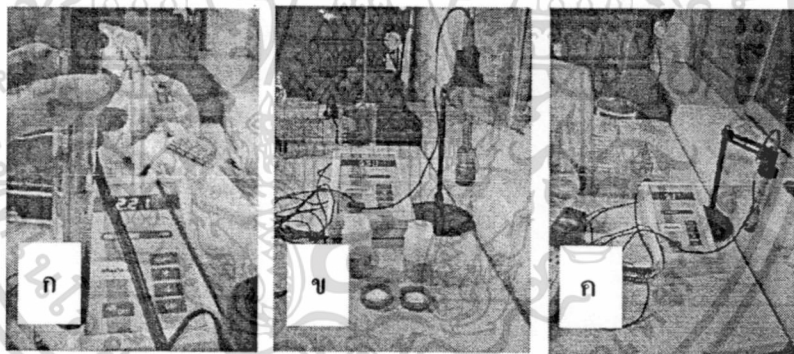


รูปที่ 3.11 แสดงภาพการวัดค่าการนำไฟฟ้า

(ก) แสดงภาพเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (ข) แสดงภาพการใช้งานเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

3.5.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด - ด่าง

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter (multi-parameter analyzer consort C380 Belgium) โดยทำการปรับเทียบค่าจากสารละลายมาตรฐานซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ pH 7 และ pH 4 ตามลำดับ และทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ลักษณะการใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ภาพการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

(ก) ภาพเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

(ข) ภาพเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่างและสารที่ใช้ในการปรับเทียบ

(ค) ภาพการใช้งานเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

3.5.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วย Duncan's Multiple rang test ($P \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

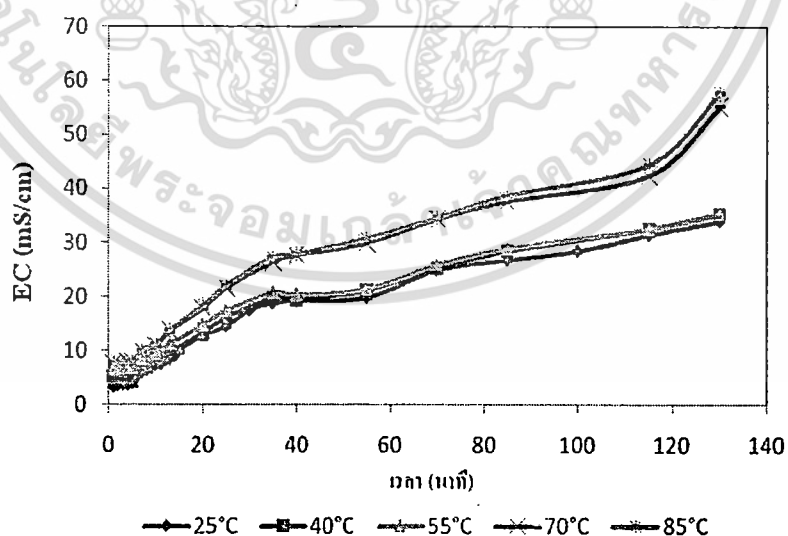
4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจียบกับอุณหภูมิต่างๆ ในที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจียบกับอุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนต่างๆ

เวลา (นาที)	EC (mS/cm)				
	25°C	40°C	55°C	70°C	85°C
1	3.288±0.09a	5.252±0.11b	6.629±0.16c	7.537±0.39d	7.638±0.18d
7	6.071±0.03 a	7.155±0.08 b	8.543±0.05 c	9.843±0.21d	10.038±0.21d
13	8.532±0.01 a	9.704±0.26 b	11.281±0.04 c	13.576±0.31d	13.719±0.29d
20	12.759±0.86 a	13.292±0.05 b	14.766±0.04 c	17.758±0.17d	18.327±0.03d
35	18.750±0.27 a	19.810±0.12 b	20.773±0.03 c	26.381±0.09d	27.238±0.08d
40	19.182±0.05 a	19.401±0.14 b	20.321±0.04 c	27.630±0.05d	27.780±0.22d
70	24.836±0.05 a	25.211±0.13 b	25.856±0.02 c	34.321±0.07d	34.572±0.23d
115	31.333±0.03 a	32.443±0.16 b	32.564±0.02 c	42.491±0.01d	44.499±0.11d
130	33.910±0.01 a	35.234±0.16 b	35.320±0.06c	55.282±0.07d	57.700±0.17d

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวนอน (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พิจารณาการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจี๊ยบที่อุณหภูมิได้แก่ 25°C 40°C 55°C 70°C และ 85°C พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้จำนวนไอออนแตกตัวเพิ่มขึ้นและไอออนเคลื่อนที่เร็วขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (Palaniappan and Sastry, 1991; อติศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; พงศ์ธร นวมานกร, 2540; Gupta and Jindal, 1992; Marcotte et al., 1998; Palaniappan and Sastry, 1991; Wang and Sastry, 1997; Marybeth et al., 1999) ซึ่งสำหรับการทดลองนี้ อุณหภูมิที่ 85°C เป็นค่าอุณหภูมิสูงสุด สามารถวัดค่าการนำไฟฟ้าได้มากที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสุดจะทำให้ไอออนแตกตัวได้มากและเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด จึงทำให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้ามากที่สุด ค่าการนำไฟฟ้าจึงมากที่สุด

พิจารณาจากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่า อุณหภูมิขณะวัดค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหารส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยแบ่งค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าตามอุณหภูมิต่อออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 25°C 40°C 55°C และ 70°C กับ 85°C ในช่วงอุณหภูมิสูง (70°C และ 85°C) ค่าการนำไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ส่วนช่วงอุณหภูมิต่ำค่าการนำไฟฟ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมในการวัดค่าการนำไฟฟ้าจึงควรเป็นช่วงอุณหภูมิที่คงที่ ในการทดลองนี้ การวัดค่าการนำไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องปรับเทียบอุณหภูมิที่วัดมาที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อให้ได้ค่าออกมาถูกต้องที่สุด

4.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น

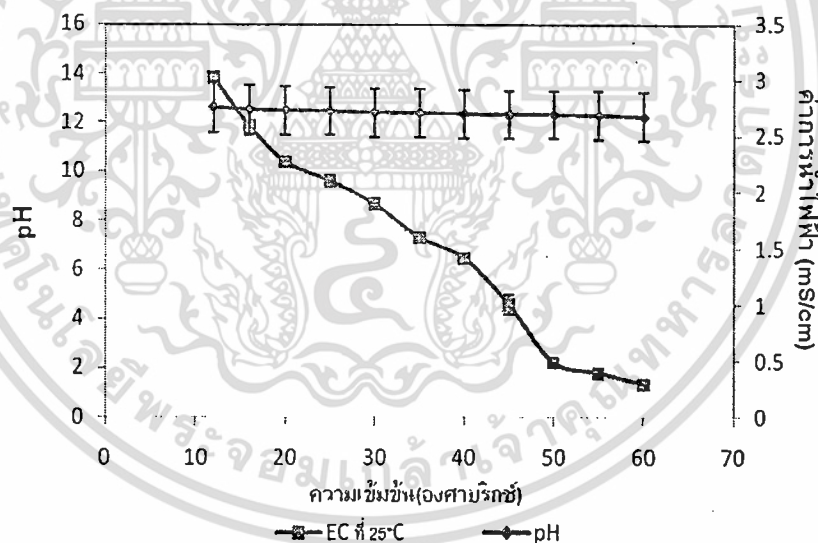
ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำกระเจี๊ยบเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีต่าง ๆ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้น เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำกระเจี๊ยบที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ และที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่า pH จะลดลงเล็กน้อย โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 12 องศาบริกซ์ มีค่า pH เท่ากับ 2.76 และความเข้มข้นสุดท้ายที่ 60 องศาบริกซ์ มีค่า pH เท่ากับ 2.67 ซึ่งพบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่า pH ลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ส่วนค่า EC จะลดลงโดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 12 องศาบริกซ์ มีค่า EC เท่ากับ 13.83 mS/cm และความเข้มข้นสุดท้ายที่ 60 องศาบริกซ์ มีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 1.34 mS/cm ซึ่งค่า EC มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจี๊ยบที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (°Brix)	pH	EC
12	2.763±0.22a	13.834±0.02i
16	2.739±0.22a	11.836±0.21h
20	2.733±0.21a	10.387±0.02g
25	2.727±0.21a	9.611±0.21f
30	2.714±0.21a	8.659±0.12e
35	2.711±0.21a	7.304±0.22d
40	2.701±0.21a	6.468±0.16c
50	2.693±0.21a	2.239±0.15b
60	2.673±0.21a	1.345±0.01a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละตัว (a b c d e f g h และ i) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกระเจี๊ยบที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ

เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นโดยการเติมน้ำตาลทราย จะทำให้จำนวนไอออนลดลงและเคลื่อนที่ได้ช้าลง จึงทำให้น้ำไฟฟ้าได้น้อยลง Palaniappan and Sastry (1991) และ Qihua and Jindal (1992) ให้เหตุผลว่าเป็นผลมาจากองค์ประกอบด้านต่าง ๆ ของอาหารที่แตกต่างกัน

ไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพ ทางเคมีหรือส่วนผสมของสูตรอาหารนั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบทางเคมี คือส่วนประกอบที่เป็นอ็อกซิเจนของกรดหรือเกลือที่มีผลโดยตรงต่อการนำไฟฟ้าของอาหาร นั่นคือเมื่อมีอ็อกซิเจนอยู่ในปริมาณมากอาหารนั้นก็สมารถนำไฟฟ้าได้ดีและในทางตรงกันข้ามถ้าอาหารนั้นมีปริมาณอ็อกซิเจนน้อยหรือมีปริมาณสารที่ไม่ใช่อ็อกซิเจน เช่น น้ำตาลและน้ำมันผสมอยู่ก็จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าลดลง

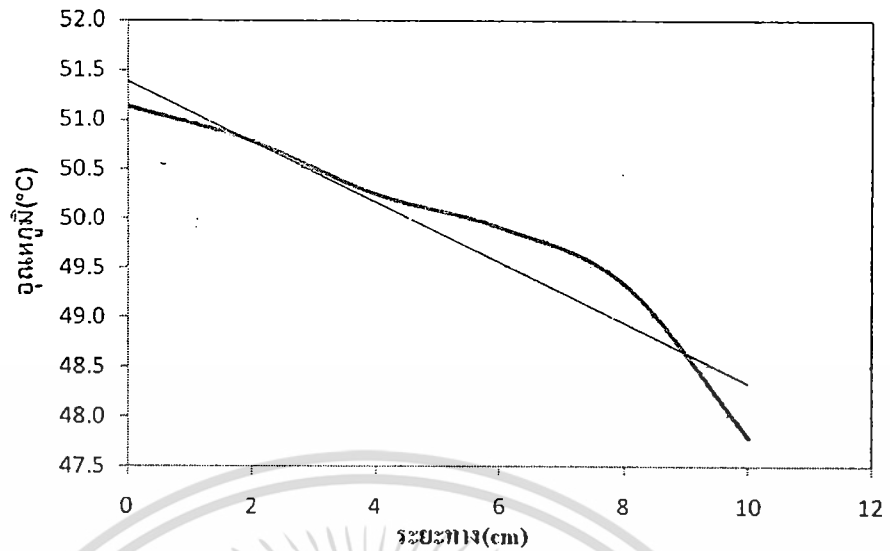
4.3 อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

การออกแบบอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยทำการหาชนิดและการจัดเรียงตัวของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของความร้อน

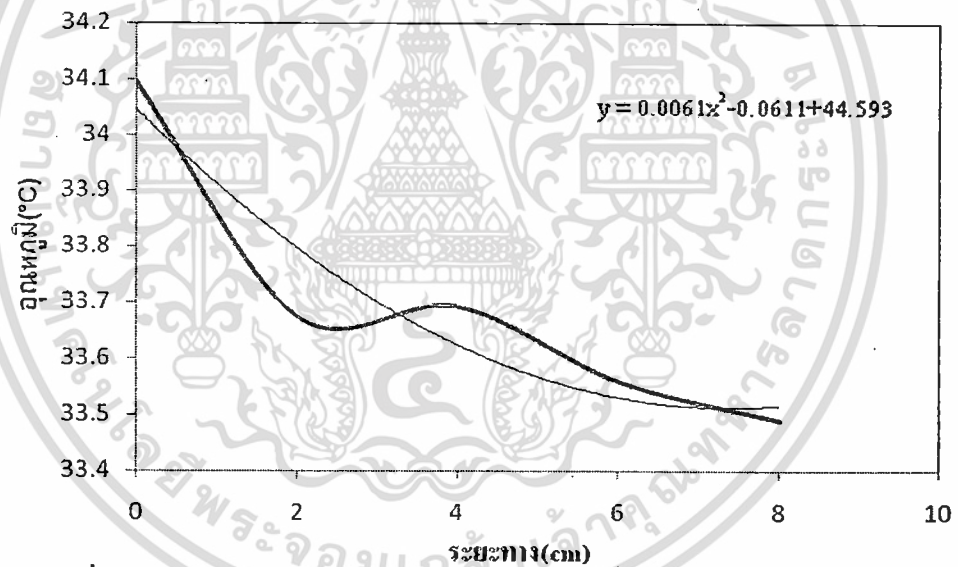
4.3.1 ชนิดและการจัดเรียงตัวของอิเล็กโทรด

4.3.1.1 การกระจายความร้อน

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงภาพการกระจายความร้อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกโดยใช้อิเล็กโทรดแบบทรงสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอกติดตั้งอิเล็กโทรดที่บริเวณริมและกึ่งกลางภาชนะ การกระจายความร้อนในสารละลายสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารละลายมีค่าต่ำมาก พิจารณาว่าอยู่ในช่วงการพาความร้อนตามธรรมชาติ โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอิเล็กโทรดแบบทรงสี่เหลี่ยมมีค่า $548.31 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกมีค่า $245.66 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ซึ่งจากตาราง Typical values of the convection heat transfer coefficient (Frank, 2002) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการพาความร้อนตามธรรมชาติของของไหล มีค่า $50\text{-}1000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ การเคลื่อนที่ของของไหลแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติเป็นผลมาจากแรงลอยตัวในของไหลซึ่งมีผลมาจากการแตกต่างของความหนาแน่นในของไหล และการแตกต่างของความหนาแน่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิในของไหล แต่ความเร็วในการไหลจะมีค่าน้อยกว่าการไหลแบบบังคับหรือไหลช้ามาก ซึ่งมีผลน้อยมากในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงถือได้ว่าตัวกลางอยู่กับที่และเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการหาค่าการกระจายความร้อนของอิเล็กโทรดแบบทรงสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอก ได้สมการดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระยะต่างๆของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอก

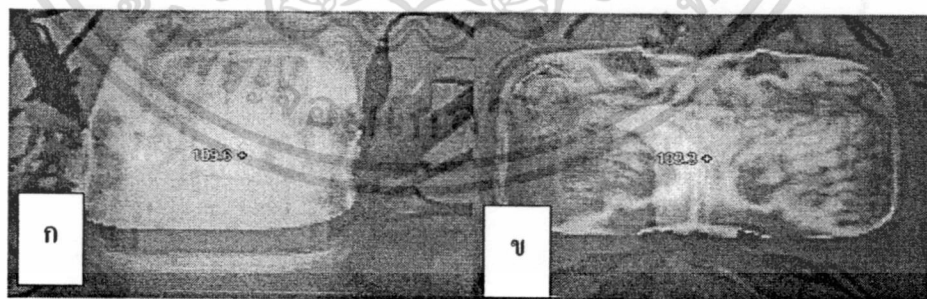
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงสมการการกระจายอุณหภูมิและ $\frac{\partial T}{\partial t}$ ของอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด

ชนิดอิเล็กทรอนิกส์	สมการการกระจายอุณหภูมิ	$\frac{\partial T}{\partial t}$
อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยม	$T = -0.2675x + 31.744$	0
อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอก	$T = 0.0061x^2 - 0.0611x + 44.593$	0.0122

จากตารางที่ 4.3 พบว่า การใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอก มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่าการใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยม 0.0122 เท่า แสดงว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกจะใช้เวลาในการทำให้ร้อนเร็วกว่า อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยมจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น จึงทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับบริเวณที่เย็นกว่าโดยอาศัยการนำความร้อนไปสู่จุดต่างๆ แต่อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกจะเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบๆ อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า นอกจากนั้นก็มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่จุดต่างๆ โดยการนำความร้อนด้วยดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกจะใช้เวลาในการทำให้ร้อนเร็วกว่า และที่ตำแหน่งเดียวกันที่เวลาเดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกจะมากกว่า เนื่องจากอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็นผลมาจากทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและการนำความร้อน (อดิศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; de Alwis et al., 1989; Palaniappan and Sastry, 1991)

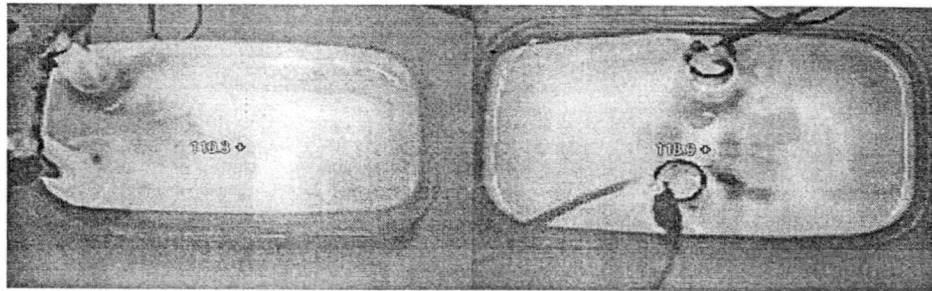
จากรูปที่ 4.5 (ก และ ข) แสดงให้เห็นว่าการวางตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยมมีระยะของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากัน คือ 4 cm และการวางตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกดังรูปที่ 4.6 (ก และ ข) มีระยะของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากัน คือ 6 cm ซึ่งผลต่างอุณหภูมิที่ยอมรับได้เฉลี่ยไม่เกิน 1.5°C ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในอุปกรณ์ฆ่าเชื้อที่มีการให้ความร้อน



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายความร้อนของการใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงสี่เหลี่ยม

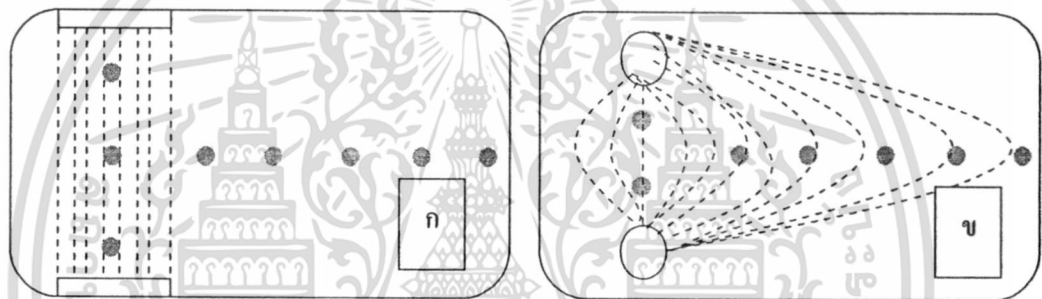
(ก) วางตำแหน่งริมภาชนะ (ข) วางตำแหน่งกึ่งกลางภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายความร้อนของการใช้อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอก

(ก) วางตำแหน่งริมภาชนะ (ข) วางตำแหน่งกึ่งกลางภาชนะ



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

(ก) แบบทรงสี่เหลี่ยม (ข) แบบทรงกระบอก

4.3.1.2 การจัดเรียงอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาในการให้ความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิของการจัดวางอิเล็กโทรดแบบต่างๆ

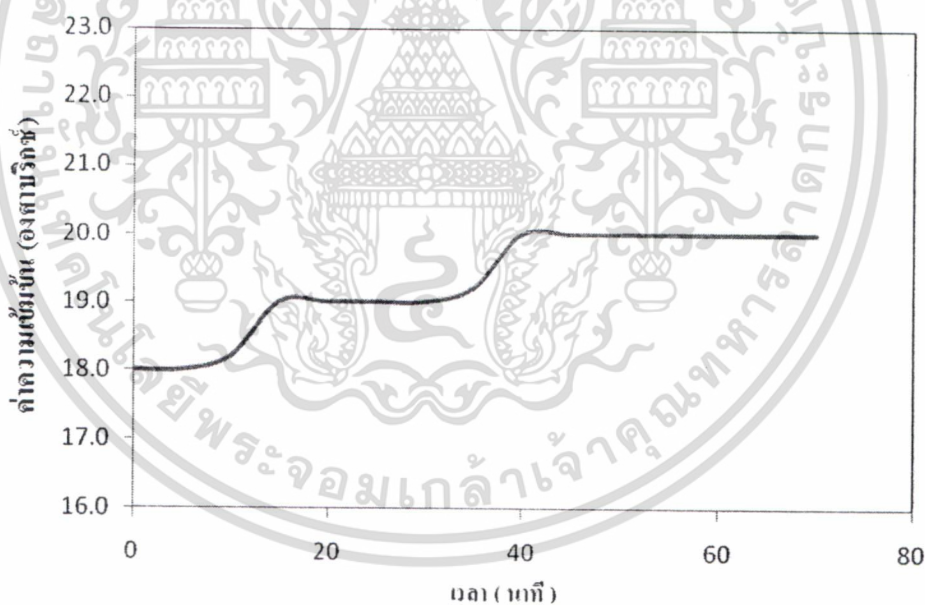
จากตารางที่ 4.4 การทดลองการหาลักษณะการจัดวางอิเล็กโทรดที่เหมาะสม โดยมีอุณหภูมิแต่ละจุดไม่ต่างกันเกินค่าที่ยอมรับและใช้เวลาในการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้รวดเร็ว ซึ่งเป็นการจัดวางอิเล็กโทรดแบบท่อสแตนเลสทรงกระบอก 4 ท่อ และมีระยะห่างระหว่างท่อ 6 cm

ตารางที่ 4.4 แสดงผลเวลาในการให้ความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิของการจัดวาง อิเล็กโทรดแบบต่างๆ

รูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรด	เวลา (วินาที)	ผลต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
แบบ 2 แผ่น	635	1.37
แบบ 3 แผ่น	706	0.67
แบบ 4 แผ่น	2828	0.34
แบบ 1 ท่อ	585	อุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกจุด
แบบ 2 ท่อ	460	0.94
แบบ 3 ท่อ	380	1.41
แบบ 4 ท่อ	312	0.47
แบบ 5 ท่อ	415	0.66

4.3.4.2 การให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิดแก่น้ำกระเจี๊ยบ

รูปที่ 4.8 แสดงการหาค่าความเข้มข้นของน้ำกระเจี๊ยบที่เวลาต่างๆ โดยการให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิด



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำกระเจี๊ยบที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 ให้ความร้อนน้ำกระเจี๊ยบปริมาณ 3.5 ลิตร โดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบ ไอหุ้มมิด อุณหภูมิน้ำกระเจี๊ยบเริ่มต้นเท่ากับ 40°C เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 25 นาที อุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นจนถึง 80°C จึงเริ่มวัดค่าความเข้มข้นซึ่งจากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าที่ 18 องศาบริกซ์ จนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ค่าความเข้มข้นเปลี่ยนเป็น 19 องศาบริกซ์ คงที่เป็นระยะเวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นความเข้มข้นจึงเปลี่ยนเป็น 20 องศาบริกซ์ และคงที่ที่ 20 องศาบริกซ์ จนถึงนาทีที่ 70 ด้วย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจากการทดลองที่ผ่านมาจึงมีผลให้ระยะเวลาในการระเหยน้ำออกจากสารละลายต้องใช้เวลามากขึ้นที่ค่าความเข้มข้นสูงขึ้น (อดิศักดิ์ สุขประเสริฐ, 2541; de Alwis et al., 1989)

ดังนั้นการระเหยน้ำกระเจี๊ยบโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่ต้องการให้น้ำกระเจี๊ยบได้ค่าความเข้มข้นตามที่ต้องการ เนื่องจากการระเหยน้ำกระเจี๊ยบนั้น อุณหภูมิที่ใช้เท่ากับ 100°C แต่อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกไม่สามารถให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 100°C เนื่องจากต้องใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และอีกเหตุผลก็คือ การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้นเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าเข้าไปจะเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เมื่อน้ำกระเจี๊ยบร้อนจนระเหยน้ำออกมาทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีค่าน้อยลงจนเมื่อค่าการนำไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนไม่สามารถนำไฟฟ้าได้แล้ว น้ำกระเจี๊ยบจึงมีอุณหภูมิต่ำลงเรื่อยๆ ทำให้น้ำกระเจี๊ยบระเหยไม่ได้อีกต่อไป

ดังนั้นการระเหยโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก จึงไม่เหมาะในการทำน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้นแต่สามารถใช้ได้ในส่วนของการพาสเจอร์ไรซ์ เนื่องจากการพาสเจอร์ไรซ์ เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นโดยตรงในอาหาร จนกระทั่งอุณหภูมิถึงระดับที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ การพาสเจอร์ไรซ์โดยวิธีให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นคือลดเวลาในการให้ความร้อนตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนถึงระดับฆ่าเชื้อ (Come-up time) สามารถใช้กับอาหารที่มีชั้นอาหารได้ และลดการเกิด Fouling ได้เพราะความร้อนเกิดขึ้นโดยตรงที่อาหาร โดยไม่ต้องอาศัยผิวถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอิเล็กโทรดอาจเกิดความร้อนได้ การหล่อเย็นอิเล็กโทรดจึงช่วยป้องกันการเกิด Fouling ที่ผิวของอิเล็กโทรดได้ (Sastry, 1994)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

- 1) การวัดค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จะทำให้ได้ค่าออกมาต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะได้ค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเป็นตัวอย่างเดียวกัน
- 2) การใช้ฮีลิกโทรดแบบทรงกระบอกพบว่ามีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ฮีลิกโทรดแบบแผ่น เนื่องจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการนำความร้อนและผลของสนามไฟฟ้า
- 3) ควรประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เฉพาะกับอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ๆ เท่านั้น เช่น น้ำมะขาม น้ำเสาวรสน้ำสับปะรด เป็นต้น
- 4) การระเหยโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ไม่เหมาะในการทำน้ำกระเจี๊ยบเข้มข้น แต่สามารถใช้ได้ในส่วนของกาสเจอไรซ์ เนื่องจากการกาสเจอไรซ์ เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส



เอกสารอ้างอิง

- คำรณ เสนานุช และปรมวจี ศุกลสกุล. การออกแบบเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้ งาน [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2548.
- จีสุตา เกตุกราย และนงนุช พรหมลา. การผลิตน้ำสับปรดเข้มข้นโดยวิธีแช่เยือกแข็ง [ปริญญา-วิทยาศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2542.
- ประมวล ศรีกาหลง. กระบวนการให้ความร้อนน้ำสับปรดด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้าตรง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า-คุณทหารลาดกระบัง ; 2539.
- พงศธร นวมานกร. การพัฒนาระบบฆ่าเชื้อแบบ Ohmic. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2540.
- วรัญญา ตั้งเจ็ดจรัส, วรายุ ภูระหงษ์ และอริษรา ทวีตตระกูล. การเพิ่มความเข้มข้นน้ำผลไม้โดยกระบวนการกลั่นผ่านเยื่อแบบออสโมติก. [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2550.
- วีรเชษฐ์ จิตตานิษฐ์. ผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟสในกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารแบบ Ohmic [ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2544.
- สาขาคหกรรมศาสตร มหาวิทาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. เอกสารการสอนชุดวิชา การถนอมอาหารและการแปรรูปอาหาร หน่วยที่ 1-7. นนทบุรี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ; 2545.
- สาขาคหกรรมศาสตร มหาวิทาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. เอกสารการสอนชุดวิชา การถนอมอาหารและการแปรรูปอาหาร หน่วยที่ 8-15. นนทบุรี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ; 2545.
- สุรชาติพ ภมรประวดี. กระเจียบ พืชมากคุณค่า. หมอชาวบ้าน มีนาคม 2551 : ปีที่ 28 ฉบับที่ 347 : 32-35.
- สุระกิต จิระสานต์ และปรารธนา วันพระแก้ว. การผลิตน้ำสมุนไพรมเข้มข้นโดยใช้ไมโครเวฟ – สูญญากาศ [ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ-จอมเกล้าธนบุรี ; 2543.
- สุวิทย์ เตีย, สายลม สัมพันธ์ และสุวิษ ศิริวัฒนโยธิน. สมบัติของค่าการนำไฟฟ้าในอาหารเพื่อใช้ ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Ohmic [งานวิจัยของสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงาน

- ต้นแบบ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2543.
- ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรวมสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว ; 2542.
- อดิศักดิ์ สุขประเสริฐ. คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหารที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ Ohmic [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2541.
- อาริสา คุณวิโรจน์พานิช. การลดการสูญเสียกลิ่นรสในน้ำผัก ผลไม้ที่ผ่านการการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธีโอห์มมิก [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร]. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2550.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์ และจิตใส อัญชลีกิจ. การออกแบบและศึกษาเครื่องทำความร้อนระบบโอห์มมิกฮีทเตอร์สำหรับน้ำผลไม้ [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2542.
- American Public Health. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 15th ed. Washington, D.C. : APHA ; 1981.
- Balaban, MO et al. Ohmic Thawing of Shrimp Blocks. Symposium on Progress in Food Preservation Process. Belgium ; 1993. p. 307-309.
- Beattie, JM. Electrical Treatment of Milk for Infant Feeding. Journal of State Medicine 1914 ; Vol. 24 No. 4 : 97-113.
- Benabderrahmane, Y and Pain, JP. Thermal Behavior of a Solid/Liquid Mixture in an Ohmic Heating Sterilizer-Slip Phase Model. Chemical Engineering Science 2000 ; Vol. 55 : 1371-1384.
- Biss, CH, Coombes, SA and Skudder, PJ. The Development and Application of Ohmic Heating for Continuous Heating of Particulate Foodstuffs. Elsevier Applied Science 1989. p. 17-25.
- Bohart, GS. Apparatus for Canning Foods. US Patent 1933 ; 1 : 879-911.
- Cho, H-Y, Yousef, AE, Sastry, SK. Growth Kinetics of Lactobacillus acidophilus Under Ohmic Heating. Biotechnol Bioeng 1996 ; 49 : 334-340.
- Davies, LJ, Kemp, MR and Fryer, PJ. The Geometry of Shadows : Effects of Inhomogeneities in Electrical Field Processing. Journal of Food Engineering 1999 ; Vol. 40 : 245-258.

- de Alwis, AAP and Fryer, PJ. A Finite-Element Analysis of Heat Generation and Transfer During Ohmic Heating of Food. *Chemical Engineering Science* 1989 ; Vol. 45 No. 6 : 1547-1549.
- de Alwis, AAP, Halden, K and Fryer, PJ. Shape and Conductivity Effects in the Ohmic Heating of Food. *Chemical Engineering Research and Design* 1989 ; Vol. 67 : 159-168.
- de Alwis, AAP and Fryer, PJ. The Use of Direct Resistance Heating in the Food Industry. *Journal of Food Engineering* 1990 ; Vol. 11 No. 1 : 3-27.
- de Alwis, AAP and Fryer, PJ. Operability of the Ohmic Heating Process : Electrical Conductivity Effects. *Journal of Food Engineering* 1992 ; Vol. 15 No. 1 : 21-48.
- de Alwis, AAP, Fryer, PJ, Koury, E, Stapley, AGF and Zhang, L. Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat Generation and Convection Effects. *Journal of Food Engineering* 1993 ; Vol.18 No. 2 : 101-125.
- Frank, P and David, P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th. New York: Wiley; 2002.
- Gupta, V and Jindal, VK. "Electrical Conductivity of Selected Fruit Juices" *Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference*. Bangkok ; 1992. p. 1187-1195.
- Marcotte, M and Piette, JPG and Ramaswamy, HS. Electrical Conductivities of Hydrocolloid Solutions. *Journal of Food Process engineering* 1998 ; Vol.21 : 503-520.
- Marybeth, L, Brian, FH and Sasty, SK. The Effect of Frequency and Wave Form on the Electrical Conductivity-Temperature Profiles of Tissue. *Journal of Food Process Engineering* 1999 ; Vol. 22 : 41-54.
- Mizrahi, S Kopelman, IJ and Perlman, J. Blanching by ElectroConductive Heating. *Journal of Food Technology* 1975 ; Vol.10 No. 3 : 281-288.
- Mitchell, FGR and De Alwis, AAP. Electrical Conductivity Meter for Food Sample. *Journal of Physics* 1989 ; Vol.22 : 554-556.
- Murphy, AB Powell, KJ and Morrow, R. Thermal treatment of Sewage Sludge by Ohmic Heating. *IEE Proceeding A : Science Measurement and Technology* 1991 ; Vol.138 No.4 : 242-248.
- Naveh, D Kopelman IJ and Mizrahi, S. Electroconductive Thawing by Liquid Contact. *Journal of Food Technology* 1983 ; Vol.18 No.2 : 171-176.

- Palaniappan, S and Sastry, SK. Electrical Conductivity of Selected Food During Ohmic Heating. *Journal of Food Engineering* 1991 ; Vol.14 No.3 : 221-236.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Electrical Conductivity of Selected Juice:Influences of Temperature, Solid content,Apply Voltage,and Particle Size. *Journal of Food Engineering* 1991 ; Vol. 14 No. 3 : 247-260.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Modeling of Electrical Conductivity of Liquid-Particle Mixtures, "Food and Bioproducts Processing. Institution of Chemical Engineering" 1991 ; Vol. 69 Part. C : 167-174.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Influences of Particle Orientation on the Effective Electrical Resistance and Ohmic Heating Rate of Liquid-Particle Mixture. *Journal of Food Process Engineering* 1992 ; Vol. 15 No. 3 : 213-227.
- Parrot, DL. Use of Ohmic Heating for Aseptic Processing of Food Particulates. *Food Technology* 1992 ; Vol. 46 No. 12 : 68-72.
- Qihua, T Jindal, VK and Winden, JV. Design and Performance Evaluation of a Ohmic Heating Unit for Liquid Foods. *Proceeding of the International Agricultural Engineering conference* 1992 ; 7-10 December 1992 : 1197-1206.
- Schade, AL. Prevention of Enzymatic Discoloration of Potatoes. *US Patent* 1951 ; 2 : 569-575.
- Skudder, PJ. Ohmic Heating in Food Processing. *Asean Food Journal* 1989 ; Vol.4 No. 4 : 163-189.
- Sastry, SK, 1994, "Ohmic Heating", In *Minimal Processing of and Process Optimization*, Singh, R.P. and Oliveira, F.A.R (Eds.), CRC Press, London, p. 23.
- Ting SV. The carotenoid and carotene content of Florida orange concentrate. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 1961 ; Vol.74 : 262-267.
- Vicente, AA, Castro, I and Teixeira, JA. Ohmic Heating for Food Processing : D.W. (Ed.). *Thermal Food Processing* Sun. New York : CRC Press ; 2006. p. 425-468.
- Wang, Wc and Sastry, SK. Chang in Electrical Conductivity of Selectes Vegetables During Multiple Thermal Treatment. *Journal of Food Process Engineering* 1997 ; Vol. 20 No. 9 : 499-516.
- Zhang, L. and Fryer, PJ. Model for the Electrical Heating of Solid-Liquid Food Mixtures. *Chemical Engineering Science* 1993 ; Vol. 48 No. 4 : 633-642.