

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รายงานฉบับสมบูรณ์

เครื่องละลายปลาประสิทธิภาพสูงเพื่ออุตสาหกรรม
HIGH EFFICIENCY OF FISH THAWING MACHINE FOR INDUSTRY

โดย

ดร. นวภัทรา หนูนา

รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

TP

363

เลขหมู่..... ๖ 294 ค

เลขทะเบียน..... 114479

ใน,เดือน,ปี..... 20 ส.ค. 2554

ได้รับการสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้งบประมาณเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12291110

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2553

- ขอขอบคุณ - คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- บุคลากรประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
 - นายเชษฐา เลิศพิภพเมธา นายชัยพร ลิ้มวารรัตน์ นายปวันวิทย์ แสงโสภิต นางสาวรุ่งรัศมี ศรีมะเร็ง และ นางสาวรักดี สระบัว นักศึกษาประจำสาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



นวกัฑรา หนูนาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญรูป

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	3
2.1. ปลายทาง.....	3
2.2. ทฤษฎีการแช่เยือกแข็ง.....	3
2.3. ทฤษฎีการละลายอาหารแช่แข็ง.....	4
2.4. การเลือกวิธีละลายอาหารแช่แข็งที่เหมาะสม.....	5
2.5. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการ Ohmic Heating.....	5
2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 การออกแบบ สร้างเครื่องละลายปลาด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า.....	10
3.1. วัสดุอุปกรณ์สำหรับตอนที่ 1.....	10
3.2. วิธีการทดลองสำหรับตอนที่ 1.....	11
3.3. วัสดุอุปกรณ์สำหรับตอนที่ 2.....	11
3.4. วิธีการทดลองสำหรับตอนที่ 2.....	12
3.5. วัสดุอุปกรณ์สำหรับตอนที่ 4.....	17
3.6. วิธีการทดลองสำหรับตอนที่ 4.....	18
บทที่ 4 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	25
4.1. การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองละลายทางไฟฟ้า.....	25
4.2. การศึกษาหาการกระจายอุณหภูมิที่ผิวเนื้อสเด็กปลาโดยใช้ กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	27
4.3. การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลายและค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของชิ้นสเด็กปลาด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่และการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า..	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การละลายปลาทั้งตัวที่สภาวะตัวกลางต่าง ๆ กัน.....	32
4.5 การคิดต้นทุนในการละลาย.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	พฤติกรรมเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสารอิเล็กทรอนิกส์.....10
3.2	สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน.....11
3.3	ชุดทดลองหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ.....11
3.4	การเรียงปลาสดในตู้แช่แข็ง.....12
3.5	ตำแหน่งการตัดปลาเป็นชิ้นสเต็ก.....12
3.6	วงจรการทดลองหาค่าการกระจายอุณหภูมิเนื้อปลา.....13
3.7	การวางชิ้นสเต็กและบันทึกอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....13
3.8	ตำแหน่งเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล.....14
3.9	ผังวิธีการทดลองละลายชิ้นสเต็กปลาที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ.....16
3.10	มุมมองระยะเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ด้าน Top view และ Side view.....17
3.11	มุมมองด้านบนของฐานรองตัวปลาและตัวปลาขณะอยู่บนฐานรอง.....17
3.12	การละลายปลาแช่แข็งโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง.....18
3.13	การละลายโดยใช้น้ำนิ่งเป็นตัวกลาง.....18
3.14	การละลายโดยใช้น้ำพ่นเป็นตัวกลาง.....19
3.15	การละลายโดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวกลาง.....20
3.16	การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่แข็ง.....21
3.17	ระยะการติดตั้งชุดทดลองการละลายด้วยขั้วอิเล็กทรอนิกส์ขนาดต่าง ๆ.....21
3.18	การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่แข็งด้วยขั้วอิเล็กทรอนิกส์ขนาดต่าง ๆ.....22
3.19	ปลาสดแช่แข็งในตู้แช่แข็ง.....23
3.20	การบันทึกอุณหภูมิระหว่างการละลาย.....23
3.21	การจัดเรียงปลาในอ่างละลาย.....24
3.22	ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....24
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้น NaCl ต่าง ๆ กัน26
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า Published กับ Constructed Cells.....26
4.3	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นสเต็กในขณะที่เริ่มต้นละลายโดยใช้ไฟฟ้า.....27
4.4	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นสเต็กในขณะที่ละลายโดยใช้ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที..27
4.5	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นสเต็กในขณะที่ละลายโดยใช้ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป 44 นาที..28
4.6	การละลายที่เกิดขึ้นตามแนวระนาบระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์.....28
4.7	กราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักกับการปรับแรงดันไฟฟ้า.....31
4.8	การเกิด Overheat ที่ผิวปลา ส่งผลให้ผิวไหม้และเนื้อปลาสุกอย่างรวดเร็ว.....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	หนังสือพิมพ์ตีพิมพ์ข่าวอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากผลการศึกษาเกิด Overheat.....32
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็งแบบต่าง ๆ.....35
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักที่สภาวะการละลายแบบต่าง ๆ.....35
4.12	กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็ง.....39
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าบำบัดน้ำเสียกับต้นทุนรวม.....41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ค่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่มีความเข้มข้น NaCl ต่าง ๆ กัน ($T = 20^{\circ}\text{C}$).....25
4.2	ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยที่ความเข้มข้น NaCl ต่าง ๆ กัน.....25
4.3	เวลาที่ใช้ในการละลายและผลต่างระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดร้อนเร็วสุดและร้อนช้าสุด ที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 220 V แล้วลดระดับค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ กัน.....30
4.4	เวลาที่ใช้ละลายปลาแซ่แข็งและการสูญเสียน้ำหนักที่สภาวะตัวกลางการละลายต่าง ๆ...34
4.5	ปริมาณน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนการผลิตปลาทูนากะป๋อง.....37
4.6	ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ณ เวลาที่เปลี่ยนไปทุก ๆ 2 นาที.....38
4.7	ต้นทุนโดยประมาณในการละลายปลาแซ่แข็ง.....40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกปลาทูน่ากระป๋องมากเป็นอันดับ 1 ของโลก จากข้อมูลการส่งออกปลาทูน่ากระป๋องในปี 2551 (ม.ค.-มิ.ย.) ประเทศไทยส่งออกเป็นปริมาณ 248,859 ตัน มูลค่ากว่า 28,978 ล้านบาท อุตสาหกรรมปลาทูน่าเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจและยังเป็นแหล่งรองรับแรงงานจำนวนมาก จึงจัดเป็นสินค้าที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยการพัฒนาอุตสาหกรรมปลาทูน่าส่งออกนี้ เป็นการสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ที่ 1 ของกระทรวงอุตสาหกรรมและยุทธศาสตร์ของ สกว.ฝ่ายอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการผลักดันและสร้างมูลค่าจากความรู้เพื่อให้อุตสาหกรรมมีความเข้มแข็ง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์ที่ 2 เป้าประสงค์ข้อที่ 2 ของสถาบัน ซึ่งเน้นการพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสร้างความเป็นเลิศในระดับชาติและนานาชาติ นอกจากนี้ การพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทนี้ยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 ในข้อที่ 3.1 และ 3.2 ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน โดยการปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพและคุณค่าของสินค้า เพื่อสร้างสินค้าที่มีคุณภาพและมูลค่าสูง ประหยัดเงินตราต่างประเทศ

กระบวนการผลิตปลาทูน่ากระป๋องประกอบด้วยหลายขั้นตอน เริ่มจากการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ การละลายน้ำแข็ง การตัดแต่งปลา การนึ่งปลา การลดอุณหภูมิ การแกะแยกเนื้อปลา การบรรจุและการฆ่าเชื้อในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท จากข้อมูลการส่งออกและนำเข้าปลาทูน่า พบว่า ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศผู้ส่งออกรายใหญ่ยังเป็นผู้นำเข้ารายใหญ่ที่สำคัญของโลกด้วยเช่นกัน เนื่องจากวัตถุดิบหลักในการผลิตปลาทูน่ากระป๋อง คือปลาทูน่าสดแช่แข็ง โดยกว่าร้อยละ 90 ของปลาทูน่าที่ใช้ในการผลิตต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ต้นทุนหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นต้นทุนจากวัตถุดิบ (ปลาทูน่าสดแช่แข็ง) ในปัจจุบันราคาวัตถุดิบมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากผลกระทบทางเศรษฐกิจของโลกรวมถึงภาวะการลดลงของปริมาณการจับปลาทูน่าทั่วโลก ซึ่งจัดเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการผลิต ดังนั้น การนำเอาเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและลดการสูญเสีย โดยมุ่งเน้นที่กระบวนการเริ่มต้นของการผลิต ซึ่งคือการละลายปลาแช่แข็งจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อก่อให้เกิดการใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่า ช่วยป้องกันและแก้ปัญหาเกี่ยวกับวัตถุดิบดังกล่าวข้างต้นซึ่งเป็นปัญหาในปัจจุบันและอาจเป็นปัญหาในระยะยาว การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการละลายนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถของอุตสาหกรรมนี้ให้สามารถแข่งขันในระดับนานาชาติได้อย่างยั่งยืน

จากการรับทราบข้อมูลทางโรงงาน พบว่า ปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่ถูกมองข้ามและยังไม่ได้รับการแก้ไข คือ การควบคุมกระบวนการละลายปลาทูน่าสดแช่แข็งให้ได้ประสิทธิภาพ

ปัจจุบันทางโรงงานทำการละลายปลาทูน่า โดยการแช่ปลาไว้ในอ่างน้ำและควบคุมอุณหภูมิของน้ำไม่ให้สูงกว่า 15°C ซึ่งเป็นปัญหาหลายประการดังนี้

- ใช้ปริมาณน้ำในการละลายปลามาก (ปริมาณการใช้น้ำในการละลาย 1.8 Q/ton ปลา)
- ใช้ระยะเวลาในการละลายนาน (ปลาทูน่าขนาด 2 กิโลกรัม ใช้เวลาละลายประมาณ 2-3 ชั่วโมงเพื่อให้อุณหภูมิปลาเท่ากับ -2°C)
- ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของอ่างแช่ได้ ทำให้อุณหภูมิของปลาแต่ละตัวไม่สม่ำเสมอไม่สามารถควบคุมคุณภาพของเนื้อปลาหลังการละลายได้ หากละลายปลาในสภาวะไม่เหมาะสมยังส่งผลให้ปริมาณน้ำในเนื้อปลาสูญเสียมาก ซึ่งเมื่อนำไปนึ่งให้ความร้อนจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อปลาหลังการแปรรูป

ปัญหาในกระบวนการละลายนี้ควรได้รับการแก้ไขปรับปรุง เพื่อหากรรมวิธีที่เหมาะสมและคิดค้นชุดอุปกรณ์ที่อาศัยเทคนิคทางไฟฟ้าเพื่อช่วยในการลดปริมาณการใช้น้ำ ลดระยะเวลาในการละลายและควบคุมความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในการละลาย ซึ่งเครื่องละลายนี้ผู้ประกอบการไม่สามารถหาซื้อจากท้องตลาดได้ โดยที่เมื่อชุดอุปกรณ์ต้นแบบนี้สำเร็จสามารถนำไปปรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอื่น ๆ ที่ต้องการละลายวัตถุดิบแช่แข็งและควบคุมคุณภาพเพื่อนำไปแปรรูปต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของโครงการคือ เพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องละลายปลาประสิทธิภาพสูง โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

- 12.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องละลายปลาด้วยเทคนิคไอห์มมิก
- 12.2 เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องละลายปลาด้วยเทคนิคไอห์มมิก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 13.1 ออกแบบและสร้างเครื่องละลายปลาด้วยเทคนิคไอห์มมิก
- 13.2 หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการละลายปลาโดยอาศัยหลักการไอห์มมิก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ผลที่ได้จากโครงการนี้ คือ

- 1.4.1 เครื่องละลายปลาประสิทธิภาพสูงทำงานโดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแบบไอห์มมิก
- 1.4.2 ระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการละลายปลา
- 1.4.3 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการละลายปลา

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ปลาทูน่า

ผลิตภัณฑ์จากปลาทูน่า เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางการตลาดสูงในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารทะเล และนอกจากส่งออกแล้วยังมีความต้องการบริโภคภายในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องใช้ปลาทูน่าแช่แข็งในการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการละลายปลาทูน่าแช่แข็งก่อนนำไปแปรรูป แต่การละลายปลาทูน่าจะทำให้เกิดการเสื่อมเสียด้านคุณภาพของเนื้อปลา จึงถือได้ว่าขั้นตอนการละลายปลาทูน่าเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม

สายพันธุ์ปลาทูน่าที่นิยมนำมาแปรรูปในประเทศไทย มีดังนี้

ปลาทูน่าครีบลีโอง	ปลาทูน่าตาโต	ปลาทูน่าท้องแถบ
ปลาทูน่าโอหม้อ	ปลาทูน่าโอดำ	ปลาทูน่าโอลาย
ปลาทูน่าครีบบยาว	ปลาทูน่าโอแกลบ	ปลาทูน่าครีบน้ำเงิน

ในส่วนของเนื้อของปลาทูน่ามีองค์ประกอบหลักคือ

- น้ำ ทั้งแบบ Free water และ Bound water
- โปรตีนซึ่งมีทั้งโปรตีนไม่ละลายน้ำ และโปรตีนที่ละลายน้ำได้
- ไขมัน ทั้งแบบ Depot-fat และ Non-Depot-fat
- อื่นๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต, วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ

2.2 ทฤษฎีการแช่เยือกแข็ง

เป็นกระบวนการถนอมอาหารให้มีอายุการเก็บรักษานาน 6-10 เดือน สภาวะแช่เยือกแข็งที่นิยมคือ 0°F (-18°C) หรือต่ำกว่านี้ ส่งผลให้น้ำในอาหารเกือบทั้งหมดแข็งตัวและเปลี่ยนเฟสเป็นน้ำแข็ง จึงช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่ทนอุณหภูมิสูง ปานกลางและต่ำ (Psychrophilic bacteria) ในขณะที่การแช่เย็นไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ทนอุณหภูมิต่ำ รวมทั้งกลุ่มที่ทำให้อาหารเน่าเสียบางชนิดซึ่งสามารถเติบโตภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ถ้าในอาหารยังมีน้ำที่ไม่แข็งตัวคงเหลืออยู่ (อัตราผลและคณะ, 2550)

เนื่องจากอัตราการแช่เยือกแข็งแต่ละวิธีไม่เท่ากัน อัตราการแช่เยือกแข็งบ่งบอกถึงผลกระทบต่อคุณภาพอาหารทั้งในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส การแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้เกิดนิวเคลียสของโมเลกุลน้ำแข็งต่ำและเกิดการโตของผลึกน้ำแข็งได้ต่อเนื่อง ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่กว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ส่งผลกระทบต่อการ

เสียหายของกล้ามเนื้อเยื่อเซลล์อย่างรุนแรงทำให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักหลังละลายน้ำแข็ง หรือ drip loss มากขึ้น ทำให้อาหารมีสีซีดและเนื้อสัมผัสแย่ง (อรรถพลและคณะ, 2550)

2.3 ทฤษฎีวิธีการละลายอาหารแช่แข็ง

วิธีละลายอาหารแช่เยือกแข็ง แบ่งได้ 2 หลักการขึ้นกับชนิดพลังงานที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในการละลาย ได้แก่ การใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์และการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นในตัวผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิตัวกลางที่ใช้ละลายต้องไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดของจุลินทรีย์

(E.Beyza และคณะ, 2008)

2.3.1 การใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

เป็นวิธีพื้นฐานของการละลายอาหารแช่แข็ง โดยอาศัยหลักการพาและนำความร้อนของของไหล เช่น น้ำ , อากาศ ผ่านอาหารแช่แข็ง ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอาหารแช่แข็งกับของไหล

2.3.2 High pressure thawing

เป็นวิธีละลายอาหารแช่แข็งโดยให้ความดันสูงแก่อาหารแช่แข็งภายใต้ของไหลเช่น น้ำ , ก๊าซ จุดหลอมเหลวที่ต่ำลงของน้ำแข็งภายใต้แรงดันสูงให้ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างตัวกลางและการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และด้วยเหตุนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น (R.Jocelyn และคณะ,2002) ส่งผลให้เกิดการละลายของอาหารแช่แข็งเร็วขึ้น

2.3.3 Ultrasonic thawing

เป็นกระบวนการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงเกินกว่าความสามารถของมนุษย์จะรับฟังด้วยหู ที่ความถี่สูงกว่า 18 kHz (จรรยาและคณะ,2546) ลงในตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น อากาศหรือน้ำ ทำให้โครงสร้างของของเหลวถูกบีบอัดและขยายสลับกันไปหลายพันรอบ เกิดเป็นฟองอากาศเรียกว่า cavitation ฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนก๊าซจากแรงสั่น เมื่อฟองอากาศแตกจะทำให้เกิดเป็นจุดความร้อนขึ้น (S. Kenneth และคณะ 2533) แล้วเกิดการถ่ายเทความร้อนสู่อาหารแช่แข็ง โดยที่อัตราการแทรกผ่านของคลื่นสู่อาหารขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า

2.3.4 Microwave thawing

ไมโครเวฟเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถผ่านเข้าไปในอาหารแล้ว ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และพลังงานจลน์นี้จะกลายเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารละลายได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณความร้อนที่ให้กับอาหารจะขึ้นกับความชื้นในอาหาร (ชวน, 2545)

2.3.5 Ohmic thawing

เป็นเทคนิคการให้ความร้อนโดยใช้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นแหล่งพลังงานแก่อาหารแช่แข็งโดยตรง ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของอาหารสูงขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของตัว

อาหารเอง แม้ว่าเทคโนโลยี Ohmic Heating จะยังอยู่ในช่วงพัฒนาและยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่กระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบอื่น (S.Pramoun, 2539)

2.4 การเลือกวิธีละลายอาหารแช่แข็งที่เหมาะสม

Morley และคณะ (1993) กล่าวว่า การละลายโดยใช้วิธีธรรมชาติ (Natural thawing) โดยวางไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมใช้เวลานานและเวลาที่ใช้ละลายมีความผันผวนมาก เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสู่ภายในอาหารแช่แข็งต่ำ การละลายอาหารแช่แข็งในน้ำทำได้ดีกว่าการละลายโดยใช้อากาศ เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิตัวกลางได้ดีและใช้เวลาละลายเร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวเพียงปรับปรุงอัตราการละลายให้ดีขึ้น อุณหภูมิที่ผิวของอาหารถูกควบคุมโดยอุณหภูมิของน้ำ (ส่วนของอากาศอุณหภูมิผิวของอาหารมีนัยสำคัญน้อยกว่าอุณหภูมิภายนอก เพราะว่าการจุกความร้อนของอากาศต่ำถึงแม้จะใช้อากาศหมุนเวียนก็ตาม) และอุณหภูมิภายในอาหารมีการเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และอาจทำให้เกิดอันตรายที่เกิดจากจุลินทรีย์อื่นที่ลอยในน้ำได้ การเพิ่มอุณหภูมิแก่ตัวกลางโดยใช้อากาศหรือน้ำสามารถปรับปรุงนัยสำคัญอัตราการละลายได้ เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิภายในอาหารเพิ่มขึ้นมากตามเวลาที่ใช้ละลายเพิ่มขึ้นแต่ทั้งนี้ยังมีปัจจัยเสี่ยงต่อจุลินทรีย์ ณ ผิวชั้นนอกเติบโตได้ ดังนั้นเทคนิคการละลายด้วยอากาศหรือน้ำโดยทั่วไปเราสามารถทำได้โดยสะดวกสำหรับการละลายขั้นพื้นฐาน ซึ่งวิธีการละลายน้ำแข็งด้วย high pressure thawing ,microwave thawing ,ohmic thawing และ acoustic หรือ ultrasonic thawing ทำให้การสูญเสียน้ำหนักหลังละลายลดลง (drip loss) และทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น (Bing Li และคณะ, 2545)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการ Ohmic Heating

ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (Electrical conductivity)

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้ากระแสลับที่ได้รับ (De Alwis และคณะ, 1990) ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวบ่งชี้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากหรือน้อยกล่าวคือ ถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสูง กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านได้มาก ส่งผลให้เกิดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้น้อยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Palaniappan และคณะ, 1991)

ความเข้มสนามไฟฟ้า (Field strength)

De Alwis Halden และ Fryer (1989) ได้ศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร พบว่าเมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหาร (Particle size and shape)

ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหารมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในกระบวนการ Ohmic heating (De Alwis Halden และ Fryer, 1989) ซึ่งมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ

Palaniappan และ Sastry (1991) ศึกษาผลของขนาดชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหาร พบว่าเมื่อขนาดของชิ้นอาหารใหญ่ขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยลดลง เนื่องจากอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ อาจช่วยให้การกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารมีมากกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ ซึ่งมีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าผิดปกติไป

De Alwis และคณะ (1989) ศึกษาผลของรูปร่างชิ้นอาหารต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ โดยทดลองในระบบสถิตย์ (Static system) ชิ้นอาหารใช้มันฝรั่ง 1 ชิ้น โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความยาวของชิ้นอาหาร (L) ที่ขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดขวาง (A) ของชิ้นอาหาร โดยที่ปริมาตรของชิ้นอาหารคงที่ ผลการทดลองพบว่าชิ้นอาหารที่มีค่า L/A สูง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ จะต่ำกว่าชิ้นอาหารที่มีค่า L/A ต่ำกว่า

ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร (Particle orientation)

ชิ้นอาหารที่วางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ร้อนเร็วกว่าชิ้นอาหารที่วางในแนวขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (Sastry และคณะ, 1992) สำหรับชิ้นอาหารที่มีรูปร่างทรงกลมและทรงลูกบาศก์ พบว่าทิศทางการจัดเรียงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร (De Alwis และคณะ, 1989) อาจเป็นเพราะว่าค่า L/A ของชิ้นอาหารทั้งสองรูปร่างนี้ไม่ขึ้นกับทิศทางการจัดเรียง

ปริมาณชิ้นอาหาร (Particle concentration)

ปริมาณชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ แต่มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร (Sastry และคณะ, 1993) สำหรับอาหารเหลวที่มีชิ้นแขวนลอยในปริมาณมาก มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ สูงกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารเหลวแขวนลอยในปริมาณที่น้อยกว่า (Palaniappan และ Sastry, 1991)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Halden, De Alwis and Fryer (1990) ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบ ohmic ทำจากกล่องพลาสติกชนิด พลีโพรพีลีนขนาด 184*70*77 มิลลิเมตร ด้านในของกล่องมีขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวกับที่ใช้ในทางการค้าติดตั้งอยู่ โดยต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าเมน (Main Supply) ที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์ ความถี่ 30 เฮิร์ต ให้เหลือ 200 โวลต์

สายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (K – type thermocouples) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ โดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์

Palaniappan and Sastry (1991) สร้างเซลล์โดยใช้ท่อแตนเลสยาว 12.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 15/16 นิ้ว ด้านในของท่อสแตนเลสมีปลอกเทฟลอนสวมอยู่ (เพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้า) ส่วนกลางท่อ มีปล่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 /16 นิ้ว สำหรับใส่ตัวอย่างและเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด T (T- type thermocouples) ที่ปลายทั้งสองด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นโรเดียม (Rhodium plated stainless steel electrodes) สวมอยู่กับ Teflon pressure caps และ Compression fittings

Gupta and Jindal (1992) ประกอบด้วย ท่ออะคริลิก (Acrylic) ยาว 8 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 เซนติเมตร ที่ปลายทั้ง 2 ข้างของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสติดอยู่ กับซีลยางและแผ่นประกบ โดยใช้ไนต์และสกรูเป็นตัวยึดให้แน่น ตามแนวยาวของท่อ มีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิ้ล 3 ช่อง โดยช่องหนึ่งเสียบที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ส่วนอีก สองเส้นเสียบที่ปลายท่อทั้งสองด้าน ห่างจากปลายท่อ 1 เซนติเมตร

Sander (1963) ละลายเนื้อปลาสดทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ $30 \times 22 \times 8$ cm³ แช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 °C ด้วยวิธี Ohmic เปรียบเทียบกับการแช่น้ำอุณหภูมิ 30 °C และวิธีไมโครเวฟ พบว่าวิธี Ohmic และไมโครเวฟ ลดเวลาละลายลงได้ 40% เทียบกับการแช่น้ำ ค่าใช้จ่ายวิธี Ohmic คิดเป็น 1 ใน 3 ของค่าใช้จ่ายรวมวิธีไมโครเวฟ

Naveh และคณะ (1983) ละลายเนื้อแช่แข็ง 17×33 cm แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz ผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสโดยมีน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้า 1000 มิลลิโอมห์/เซนติเมตร เป็นตัวกลาง พบว่าสามารถละลายชิ้นเนื้อแช่แข็งอุณหภูมิ -20 °C ในเวลา 160 นาที เมื่อเทียบกับการแช่น้ำที่กวนและควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C ใช้เวลา 450 นาที การใช้กระแสไฟฟ้าลดเวลาละลายได้ร้อยละ 60

Morley และคณะ (1993) กล่าวว่า การละลายโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่า การแทรกผ่านของคลื่นผ่านอาหารไม่ดีเมื่อใช้กับอาหารแช่เยือกแข็งขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม และยังพบอีกว่าการแทรกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำดีกว่าการแทรกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำแข็ง ความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้สุกในขณะที่อาหารส่วนใหญ่ยังแข็งอยู่

Carlez et al.(1994) รายงานว่าการใช้ความดันสูงช่วยลดเวลาในการละลายน้ำแข็งของอาหารแช่เยือกแข็งทำได้รวดเร็ว โดยมีรสชาติและความชุ่มฉ่ำ (juiciness) ไม่แตกต่างจากเนื้อสัตว์ที่ละลายน้ำแข็งโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิต่ำ 5 °C แต่สีเนื้อจะซีด

Yun และคณะ (1998) ใช้เทคนิค ohmic thawing ควบคู่กับการแช่น้ำ ในการละลายเนื้อที่ 60-210 V (a.c.) ที่ความถี่ 60 Hz-60 kHz พบว่า การเปลี่ยนแปลงความถี่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะเวลาในการละลาย และเมื่อใช้วิธีนี้ที่โวลต์เตจต่ำ ๆ สามารถลดการสูญเสีย (drip loss) และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของชิ้นเนื้อได้

Roberts และคณะ (1998) ออกแบบชุดละลายกุ้งแช่แข็ง (shrimp block) ด้วยเทคนิค ohmic thawing พบว่า สิ่งที่ต้องระวังสำหรับวิธีนี้คือ 'runaway heating' เนื่องจากในระหว่างกระบวนการละลายค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแช่แข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าอาหารที่ละลายแล้ว

C.A.Miles และคณะ (1999) ได้ศึกษาการละลายเนื้อและปลาสดแช่แข็งด้วยคลื่นอุลตราโซนิคในช่วงความถี่ 0.22 - 3.3 MHz ความเข้มสูงสุด 3 W/cm^2 พบว่าที่ความถี่ประมาณ 500 kHz และความเข้ม 0.5 W/cm^2 พื้นผิวเกิดความร้อนน้อยสุดคือต่ำกว่า 25°C และละลายได้ลึก 7.6 cm ในเวลา 2.5 ชั่วโมง และพบว่าที่ความถี่น้อยกว่า 430 kHz เกิดลักษณะปรากฏการณ์ cavitation ในเนื้อที่ความเข้ม $0.5 - 2 \text{ W/cm}^2$ ผลคือผิวมีความร้อนสูงและการแทรกผ่านของคลื่นไม่ดี และที่ความถี่มากกว่า 740 kHz ผิวเกิดความร้อนสูงอีกครั้ง

Miles และคณะ (1999) ทดสอบการละลายเนื้อวัว เนื้อหมูและปลาค็อดแช่แข็งโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิคที่ความถี่ (frequency) 0.22-3.3 MHz และความเข้ม (intensity) สูงถึง 3 W/cm^2 โดยที่ความถี่ 500 kHz และความเข้ม 0.5 W/cm^2 ส่งผลกระทบต่อบริเวณผิวน้อยที่สุด และสามารถละลายตัวอย่างได้ความลึก 7.6 cm ภายในระยะเวลา 2.5 h

Bing Li และคณะ (2002) กล่าวว่า การละลายโดยใช้ความดันสูงเสียค่าใช้จ่ายด้านเงินลงทุนและการดูแลรักษาสูง และความดันทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพและสีเนื้อเปลี่ยนไปจากเดิม และในปัจจุบันมีข้อจำกัดการใช้ในอุตสาหกรรมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต้องออกแบบให้ทนแรงดันสูงมาก อีกทั้งมีความเสี่ยงต่อการระเบิดของถังความดันได้

Anders Haugland (2002) กล่าวว่า การละลายด้วยคลื่นอุลตราโซนิคพบว่าการแทรกผ่านของคลื่นหรือการดูดกลืนพลังงานไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณถ้าโครงสร้างอาหารแตกต่างกัน และเมื่อพลังงานถูกดูดกลืน ณ.บริเวณขอบเขตระหว่างอาหารที่ละลายแล้วกับบริเวณที่ยังไม่ละลาย เป็นการยากที่จะควบคุมความร้อนสูงที่เกิดขึ้นที่ผิว และถ้าใช้ความถี่ต่ำไปควรป้องกันเสียงที่อาจเกิดขึ้นด้วย

Ersoy และคณะ (2008) ศึกษาผลของวิธีการละลายด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อคุณภาพของ eels (*Anguilla anguilla*) โดยวิธีที่ใช้ในการละลายมีดังนี้ การละลายในอุณหภูมิแช่เย็น การละลายในน้ำ การละลายในอากาศ และการละลายโดยใช้ไมโครเวฟ คุณภาพที่ศึกษาคือ สี ค่า pH ค่า TVB-N TVB และการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ พบว่า วิธีการละลายในน้ำให้ผลดีที่สุดในแง่ของการเพิ่มของเชื้อจุลินทรีย์

ประมวล (2539) กล่าวว่า การละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้าพลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปความร้อนซึ่งจะเกิดอย่างทั่วถึงในอาหารและสามารถแทรกผ่านได้ลึกไม่จำกัด ทำให้ลดระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อน การแปลงพลังงานมีประสิทธิภาพกว่าการให้พลังงานในรูปแบบอื่น ด้านการออกแบบสามารถทำให้ถูกหลักสุขอนามัยได้ง่าย การควบคุมกระบวนการทำได้อย่างแม่นยำ ด้านคุณภาพของอาหารสามารถลดการเสื่อมเสียที่ผิวของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อนที่อาหารได้รับไม่ได้ส่งผ่านบริเวณพื้นที่ผิวของอาหาร ด้านการลงทุน ใช้เงินลงทุนด้านอุปกรณ์ต่ำ พื้นที่

ติดตั้งอุปกรณ์น้อยบำรุงรักษาง่าย อีกทั้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการที่เกี่ยวข้อง
อีกหลายกระบวนการ เช่น หลอมเหลวอาหารแช่แข็ง (Naveh et al, 1983)

ทิพาพร และคณะ (2547) พบว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงาน
ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากระบวนการ ละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้า
(Ohmic Heating) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดความร้อนด้วยกระบวนการ Ohmic จะใช้พลังงานไฟฟ้า
ก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทันที ในขณะที่กลไกการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ จะต้อง
ใช้พลังงานไฟฟ้าให้แก่หลอดสุญญากาศ หรือ แมกนีตรอน เพื่อก่อให้เกิดเป็นคลื่นไมโครเวฟ
เสียก่อน แล้วจึงส่งคลื่นไมโครเวฟมาสร้างความร้อนในตัวอย่างอาหาร จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการ
เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนต่ำกว่ากระบวนการ Ohmic

นวกัทรာ และคณะ (2551) ศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อการนำไฟฟ้าใน
เนื้อปลาและศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลาย การสูญเสีย
น้ำหนักหลังละลายชิ้นสเต็กปลา พบว่าการนำไฟฟ้าแปรผันตามอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ
($P < 0.05$) ขณะที่การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการ
ละลายปลาทั้งตัวด้วยอากาศ น้ำนิ่ง น้ำฝน ไฟฟ้า และการใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำ พบว่า
การใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำลดเวลาในการละลายและการสูญเสียน้ำหนักได้ดีที่สุด เวลาที่ใช้
ละลายแปรผกผันตามพื้นที่แผ่นขั้วและแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นโดยสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้
สูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิน้ำไม่เกิน 15°C

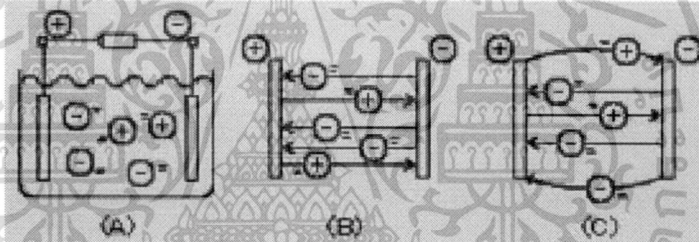
จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปในทางทฤษฎีได้ว่าการละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Ohmic
thawing) มีความเหมาะสมที่สุดและสามารถนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมละลาย
อาหารแช่แข็งให้แพร่หลายต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบ สร้างเครื่องละลายปลาด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า

ตอนที่ 1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า

เนื่องจากความเที่ยงตรงในการวัดมีความสำคัญอย่างยิ่งในการหาค่าการนำไฟฟ้าในเนื้อปลา จึงต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองละลายทางไฟฟ้าก่อนทำการทดลอง โดยใช้วิธีการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย คือการใช้แผ่นโลหะ 2 แผ่นซึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจุ่มลงในสารละลายที่ประกอบไปด้วยไอออนบวกและไอออนลบ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่แผ่นโลหะหรืออิเล็กโทรดทั้งสอง ไอออนบวกในสารละลายจะวิ่งเข้าไปหาแผ่นโลหะที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และไอออนลบก็จะวิ่งไปหาแผ่นที่ต่ออยู่กับขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในสารละลายและระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองสลับไปสลับมาเนื่องจากการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 3.1 ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าแปรผันตามกับค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะทราบค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย



รูปที่ 3.1 แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสารอิเล็กโทรไลต์

3.1 วัสดุอุปกรณ์

เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ภายในสารจะประกอบไปด้วยไอออนหรือสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะของกระแสไฟฟ้าในที่นี้เลือกสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบเข้มข้น หรือ strong electrolyte ซึ่งมีปริมาณไอออนที่แตกตัวอยู่ในสารเป็นจำนวนมาก คือเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เนื่องจากหาได้ง่ายและค่าการนำไฟฟ้าสูงเนื่องจากมีปริมาณไอออนที่เป็นพาหะในการนำกระแสสูง ในการทดลองได้เตรียมเกลือโซเดียมคลอไรด์ให้มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.02, 0.05, 0.17 mol/l ตามลำดับ โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

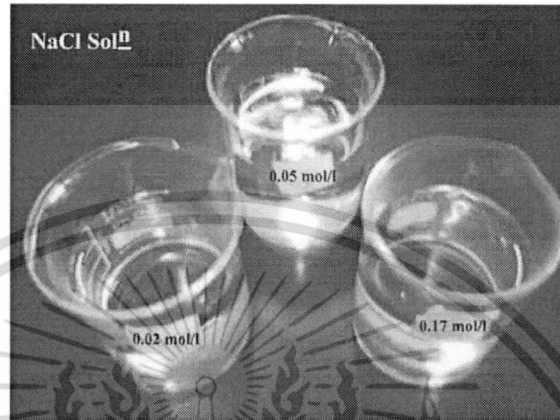
โดยที่

g = น้ำหนักเกลือ NaCl ที่ต้องการใช้ในการเตรียมสารละลายเกลือที่ความเข้มข้นต่างๆ (gram)

C = ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ NaCl ที่ต้องการ (mol/l)

V = ปริมาตรตัวทำละลายคงที่ ในที่นี้ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย 80 cm³

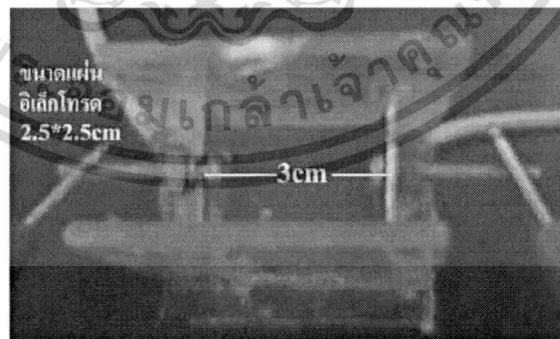
M_w = Molecular Weight NaCl = 58.5



รูปที่ 3.2 แสดงสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

3.2 วิธีการทดลอง

ต้องการหาค่าการนำไฟฟ้าของ Measured manufactured cell ด้วยการเติมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.02, 0.05, 0.17 mol/l ตามลำดับระหว่างแผ่นโลหะ AISI 316 ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 3 cm เปิด Breaker ปลดปล่อยไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันไฟฟ้า 25 V จากนั้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์และค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ เพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าที่อ้างอิงจาก (Palaniappan และคณะ, 1991)



รูปที่ 3.3 แสดงชุดทดลองหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ

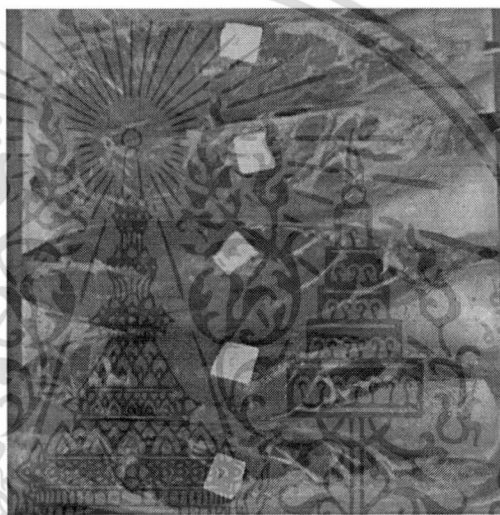
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ผิวเนื้อสติกปลาทูน่าพันธุ์โอลายโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

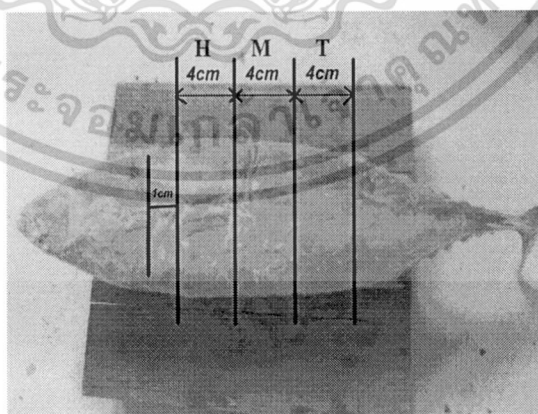
3.3 วัสดุอุปกรณ์

ปลาโอลายสดคัตขนาดยาว(L) กว้าง (a) หนา(b) จากบริษัท สยามแม็คโคร จำกัด (มหาชน) 422 หมู่ 5 ถนนศรีนครินทร์ ต.สำโรงเหนือ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ นำใส่กล่องโฟม ทับน้ำแข็งเกล็ด มาทางรถยนต์ตรงมายังภาควิชาและนำปลาโอลายสดมาแช่ในสภาวะที่ผิวปลาสัมผัสกับความเย็นโดยตรงในตู้แช่เย็นรุ่น SANYO อุณหภูมิภายในตู้แช่เย็น -20°C เป็นเวลา 2 วัน

หลังจากแช่เป็นเวลา 2 วัน ทำการตัดปลาเป็นชิ้นสติกห่างจากครีบบปลา 1 cm หนา $4 \pm$ cm ด้วยเลื่อยไฟฟ้า แล้วห่อชิ้นเนื้อปลาสติกด้วยพลาสติกให้มิดชิด แช่แข็งในตู้แช่ที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 2 วันก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 3.4 แสดงการเรียงปลาสดในตู้แช่แข็ง

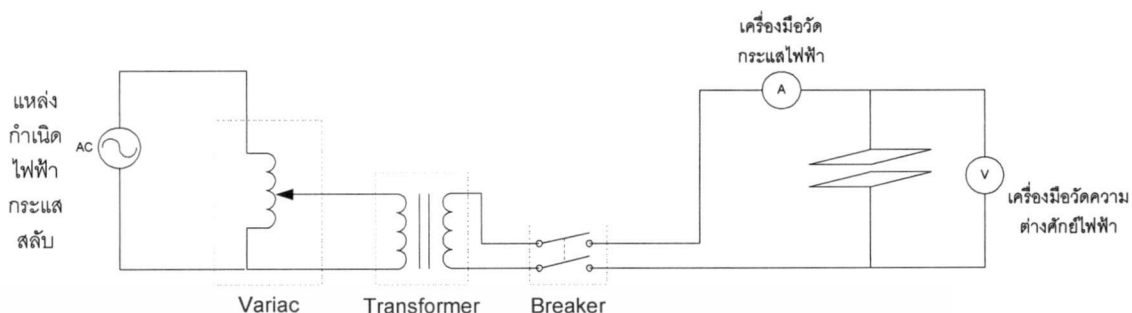


รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งการตัดปลาทูน่าเป็นชิ้นสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

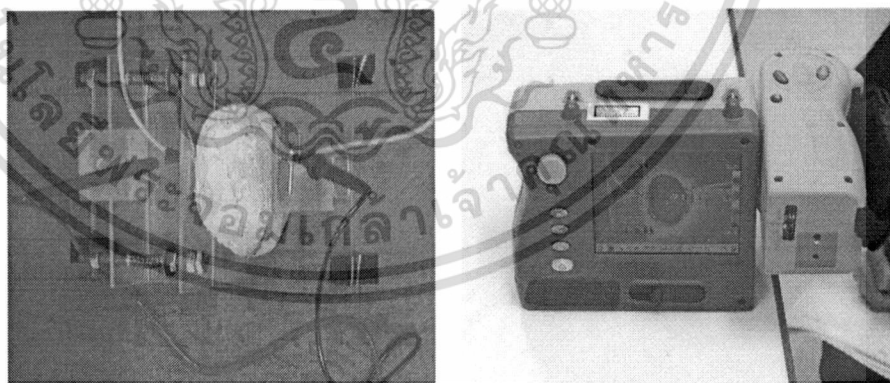
3.4 วิธีการทดลอง

ต่อวงจรดังรูปที่ 3.6 โดยเตรียมจากชุดทดลองที่ได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการทดลองหาค่าการกระจายอุณหภูมิเนื้อปลาโดยใช้ กล้องถ่ายภาพความร้อน

ติดตั้งตำแหน่งกล้องถ่ายภาพความร้อนให้สูงกว่าตำแหน่งวางชิ้นสเต็กปลาที่ชุดทดลองเริ่มต้นหมุนปรับ Variac จนกระทั่งความต่างศักย์ไฟฟ้าอ่านค่าได้ 50 ± 0.03 Volt นำปลาโอลายชิ้นสเต็กขนาดกว้าง 6.61 cm ยาว 9.90 cmหนา 3.52 cm ที่ผ่านการแช่แข็งวางแนบผิวระหว่างแผ่นสแตนเลส AISI 316 ขนาด 1×1 " ประกะที่ผิวข้างตามแนวลำตัวปลาตันละ 1 แผ่นในแนวเดียวกัน แล้วยึดชิ้นสเต็กปลาที่แผ่นสแตนเลส AISI 316 ให้แน่นโดยใช้สปริงดันแผ่นสแตนเลสตั้งชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้เพื่อป้องกันชิ้นสเต็กเนื้อปลาเคลื่อนตัวขณะทำการทดลอง จากนั้นทำการเปิดสวิตช์แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า V และกระแสไฟฟ้า I ทุกๆ 30 วินาทีจนกระทั่งอุณหภูมิที่ผิวปลาจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็น 0°C

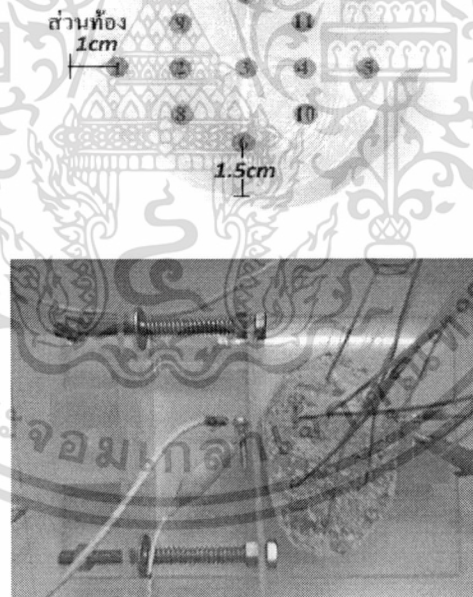


รูปที่ 3.7 แสดงการวางชิ้นสเต็กและการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลายและค่าการสูญเสีย น้ำหนัก (Drip Loss) ของชั้นสติกปลาทูลำพินธุ์โอลายที่แรงดันไฟฟ้าคงที่และการปรับแรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นนำปลาโอลายชั้นสติกเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ตามตำแหน่งดังรูปที่ จากนั้นนำชั้นสติกปลาสำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นวางแนบผิวระหว่างแผ่นสแตนเลส AISI 316 สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1"×1" ประกบที่ผิวข้างตามแนวลำตัวปลาด้านล่างละ 1 แผ่น แล้วยึดชั้นสติกปลากับแผ่นสแตนเลสให้แน่นโดยใช้สปริงตามชุดทดลอง เปิด Breaker เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจาก Power Source แล้วหมุนปรับ Variac จนกระทั่งอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ได้ตามที่ต้องการ คือที่ 0V 50V 100V 150V และ 200V ตามลำดับ แล้วปิดการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทันที ในขณะที่ตำแหน่งการหมุน Variac อยู่ ณ ตำแหน่งเดิม แล้วทำการเปลี่ยนชั้นสติกสำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นชั้นชั้นเนื้อปลาสดสำหรับการทดลองโดยทำการวางแนบผิวระหว่างแผ่นสแตนเลส AISI 316 สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1"×1" ประกบที่ผิวข้างตามแนวลำตัวปลาด้านล่างละ 1 แผ่น แล้วยึดชั้นสติกปลากับแผ่นสแตนเลสให้แน่นโดยใช้สปริงดันแผ่นสแตนเลสตามชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้เพื่อป้องกันชั้นสติกเนื้อปลาเคลื่อนตัวขณะทำการทดลอง จากนั้นทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทันที



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล

สภาวะค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่

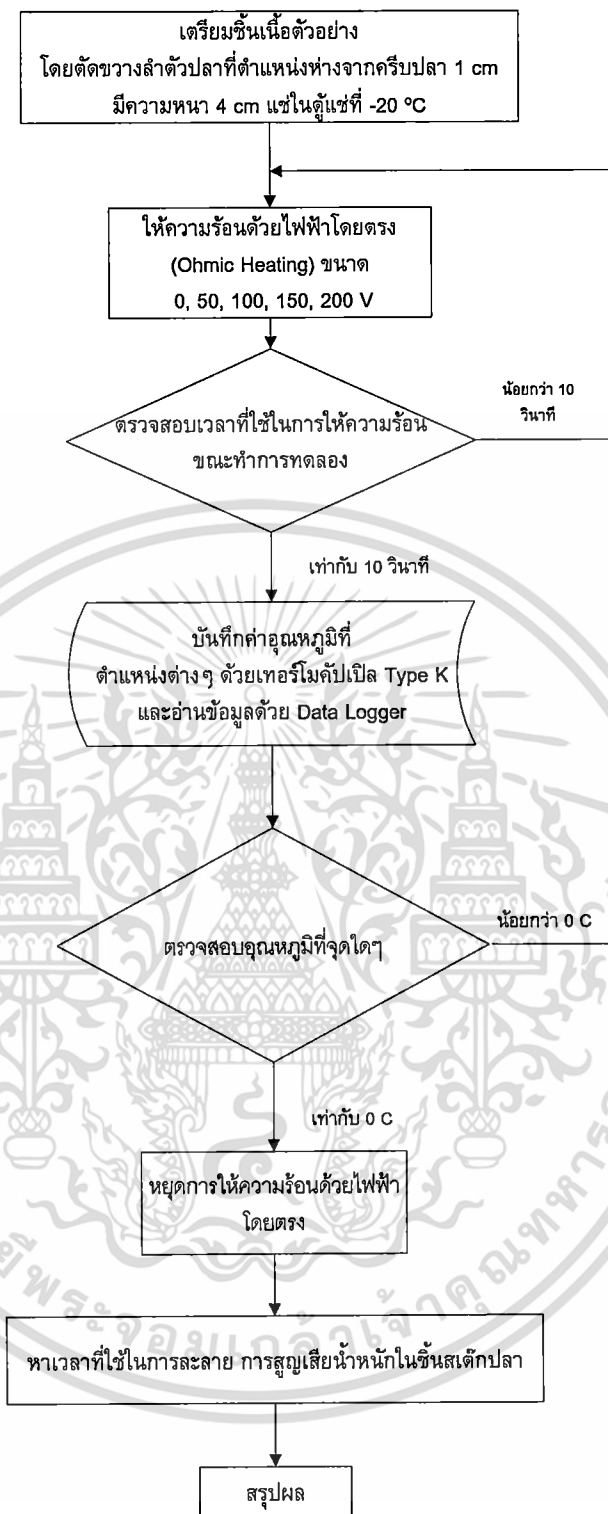
ทำการบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในแต่ละจุด ทุกๆ 10 วินาทีโดยใช้ Datalogger จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดใด ๆ มีค่า 0°C แล้วทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน ชั้นสติกเนื้อปลา เวลาที่ใช้ในการละลายและค่าการสูญเสียน้ำหนักในชั้นสติกเนื้อปลาโดย แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0-200V คือ 0V, 50V, 100V, 150V, 200V ตามลำดับ

สภาวะการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

ละลายปลาที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 220V จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนเร็วสุดคือบริเวณ ผิวสัมผัสแผ่น Electrodes มีอุณหภูมิ -2°C (Freezing point) แล้วทำการลดแรงดันไฟฟ้าไปที่ 0, 50, 75 และ 100V คงที่ตามลำดับจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าสุดเท่ากับ -2°C และ อุณหภูมิที่ผิวต้องน้อยกว่า 15°C แล้วทำการหาการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการละลาย และการสูญเสียน้ำหนักในตัวปลา

หมายเหตุ : แรงดันไฟฟ้า 0 V ทดลองที่สภาวะอากาศสัมผัสกับชั้นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง 25°C

: ในงานวิจัยไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการละลายชั้นเนื้อสติกปลา เนื่องจากน้ำสามารถแทรกผ่านตามช่องเจาะเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลบนชั้นสติกได้ ทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 3.9 แสดงผังวิธีการทดลองละลายชิ้นสติกปลาทุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 การละลายปลาหน้าทั้งตัวจำนวน 1 ตัวที่สภาวะตัวกลางต่าง ๆ กัน

3.5 วัสดุอุปกรณ์

ทำการเจาะปลาด้วยสว่านไฟฟ้า ขนาดหัวเจาะ 1.6 mm จำนวน 4 จุด ตามแนวสันปลา เพื่อทำเป็นช่องเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ดังรูปที่ โดยที่ตำแหน่งที่ 1 เจาะรูตามแนวสันปลาห่างจากครีบบปลา 3 cm โดยเจาะทำมุม 90° กับแนวระดับ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 เจาะห่างจากตำแหน่งที่ 1 ระยะ 7 cm และ 11 cm ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 4 เจาะข้างผิวปลาจากตำแหน่งที่ 1 ลงมาดังรูปที่ จากนั้นทำการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล Type K บนสันปลาตามตำแหน่ง 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ แล้วห่อตัวปลาด้วยโพลีไวนิลคลอไรด์ให้มิดชิด แข็งแรงในตู้แช่ที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 2 วันก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 3.10 มุมมองระยะเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ด้าน Top View และ Side View

ในการละลายจำเป็นต้องมีการควบคุมตำแหน่งปลาโดยใช้ฐานรองตัวปลา เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของตัวปลาขณะทำการละลายโดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงมุมมองด้านบนของฐานรองตัวปลาและตัวปลาขณะอยู่บนฐานรอง

ชุดทดลองละลายปลาทั้งตัวมีลักษณะเป็นกล่องพลาสติกขนาดคงที่ กว้าง 35.5 cm ยาว 48.5 cm สูง 14 cm โดยฐานรองตัวปลาถูกตั้งอยู่กึ่งกลางกล่องพอดี

3.6 วิธีทดลอง

การละลายโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง

เป็นการละลายปลาแช่แข็งทั้งตัวโดยตั้งตัวปลาแช่แข็งทั้งตัวบนฐานรองให้สัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิห้องภายในกล่องชุดทดลองขนาด กว้าง 35.5 cm ยาว 48.5 cm สูง 14 cm ด้วยการควบคุมอุณหภูมิอากาศ 24 °C อุณหภูมิทั้งจุด 1, 2, 3 และ 4 ถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาที ทำการละลายจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนเข้าสู่เท่ากับ -2 °C หลังเสร็จสิ้นกระบวนการละลายบันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการละลายด้วยเทคนิคการละลายโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง



รูปที่ 3.12 แสดงการละลายปลาแช่แข็งโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง
การละลายโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง

การละลายปลาแช่แข็งโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง รูปแบบการละลายถูกแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะน้ำนิ่งและสภาวะน้ำพ่น (วน)

สภาวะน้ำนิ่ง

เป็นการละลายปลาแช่แข็งโดยใช้กล่องชุดทดลองขนาด กว้าง 35.5 cm ยาว 48.5 cm สูง 14 cm กำหนดปริมาตรน้ำที่ใช้ละลายคงที่ 11 liter จากนั้นตั้งตัวปลาแช่แข็งทั้งตัวบนฐานรองให้สัมผัสกับน้ำนิ่งที่อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15 °C ภายในกล่องชุดทดลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการละลายโดยใช้น้ำนิ่งเป็นตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิทั้งจุด 1, 2, 3, 4 และจุดที่ 5 (อุณหภูมิหน้า) ถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาที ทำการละลายจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนเข้าสู่ค่าเท่ากับ -2°C หลังเสร็จสิ้นกระบวนการละลายบันทึกเวลาและการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในกระบวนการละลาย

หมายเหตุ : อุณหภูมิ ณ จุดที่ 5 คืออุณหภูมิหน้าหนึ่งที่ถูกบันทึกโดย Datalogger จากสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเส้นที่ 5

สภาวะน้ำพ่น

เป็นการละลายปลาแช่แข็งโดยใช้ชุดทดลองน้ำพ่นที่ได้เตรียมไว้ด้วยการติดตั้งภายในเครื่อง Cooling Machine แล้วปรับอัตราการไหลโดยใช้วาล์วจนกระทั่งมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร $94.63\text{ cm}^3/\text{s}$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการละลายน้ำแข็งสูง จากนั้นตั้งตัวปลาแช่แข็งทั้งตัวบนฐานรองให้สัมผัสกับน้ำพ่นในอ่างเครื่อง Cooling Machine ที่มีปริมาตรน้ำพ่นวนคงที่ 11 liter



รูปที่ 3.14 แสดงการละลายโดยใช้น้ำพ่นเป็นตัวกลาง

อุณหภูมิทั้งจุด 1, 2, 3, 4 และ 5 ถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาที ทำการละลายจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนเข้าสู่ค่าเท่ากับ -2°C หลังเสร็จสิ้นกระบวนการละลายบันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในกระบวนการละลาย

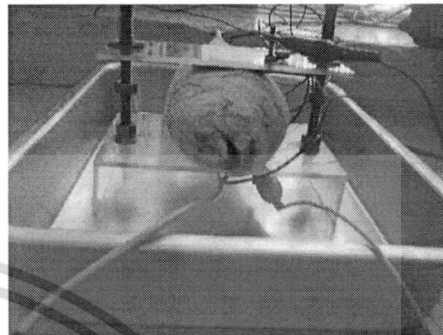
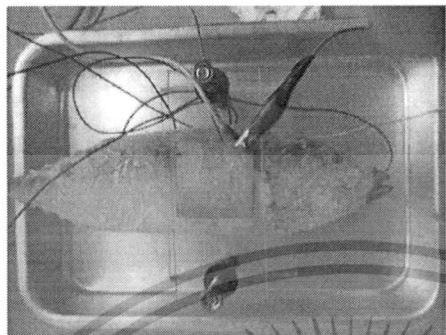
หมายเหตุ : อุณหภูมิ ณ จุดที่ 5 คืออุณหภูมิหน้าหนึ่งที่ถูกบันทึกโดย Datalogger จากสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเส้นที่ 5

การละลายโดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวกลางโดยตรง

ติดตั้งวงจรการละลายโดยวิธีทางไฟฟ้าแล้วเริ่มต้นเปิด Breaker นำปลาโอลายตัวอย่างทดลองวางแนบผิวระหว่างแผ่นสแตนเลส AISI 316 ขนาด $5 \times 5\text{ cm}$ ประยกที่ผิวข้างตามแนวลำตัวปลาตำแหน่ง 1 แผ่นในแนวเดียวกัน แล้วหมุนปรับ Variac จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าอ่านค่าได้ 220 V จากนั้นปิด Breaker แล้วนำปลาโอลายทั้งตัวสำหรับงานวิจัยที่ผ่านการแช่แข็งวางแนบผิวระหว่างแผ่นสแตนเลส AISI 316 ขนาด $5 \times 5\text{ cm}$ ประยกที่ผิวข้างตามแนวลำตัวปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านละ 1 แผ่นในแนวเดียวกันกับบริเวณผิวข้างลำตัวปลาตำแหน่งวัดอุณหภูมิที่ 1 แล้วยึดตัวปลากับแผ่นสแตนเลสให้แน่นโดยใช้สปริงดันแผ่นสแตนเลสตามชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้เพื่อป้องกันตัวปลาเคลื่อนตัวขณะทำการทดลอง แล้วเปิด Breaker เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งกำเนิดไปยังชุดทดลองเพื่อทำการละลายปลาแช่แข็ง



รูปที่ 3.15 แสดงการละลายโดยใช้ไฟฟ้าเป็นตัวกลางด้าน Top View และ Side View

อุณหภูมิทั้งจุด 1 2 3 4 และ 5 ถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาทีทำการละลายจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนเร็วสุดคือบริเวณผิวสัมผัสแผ่น Electrodes มีอุณหภูมิ -2°C (Freezing point) แล้วทำการลดแรงดันไฟฟ้าไปที่ 50 V คงที่ตามลำดับจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าสุดเท่ากับ -2°C และอุณหภูมิที่ผิวต้องน้อยกว่า 15°C

หมายเหตุ : อุณหภูมิที่จุด 4 และ 5 คืออุณหภูมิที่ผิวสัมผัสขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง

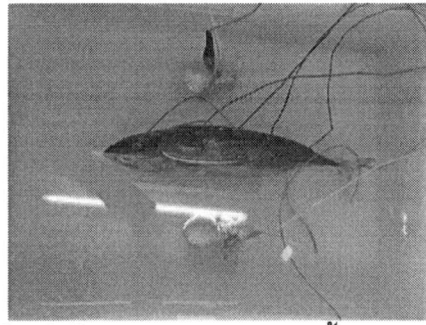
การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่แข็ง

เป็นการละลายปลาแช่แข็งโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการนำไฟฟ้า โดยเตรียมจากกล่องชุดทดลองขนาด กว้าง 35.5 cm ยาว 48.5 cm สูง 14 cm นำขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส AISI 316 ขนาด 5×5 cm ติดตั้งภายในกล่องชุดทดลองโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 15.5 cm

จากนั้นทำการบรรจุปริมาตรน้ำที่ใช้ละลายคงที่ 11 liter โดยที่อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15°C ในชุดทดลอง ทำการตั้งตัวปลาแช่แข็งทั้งตัวที่เสียบสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 4 จุดแล้วบนฐานรอง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรดและให้ตัวปลาแช่แข็งสัมผัสกับน้ำนิ่งที่อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15°C ภายในกล่องชุดทดลอง

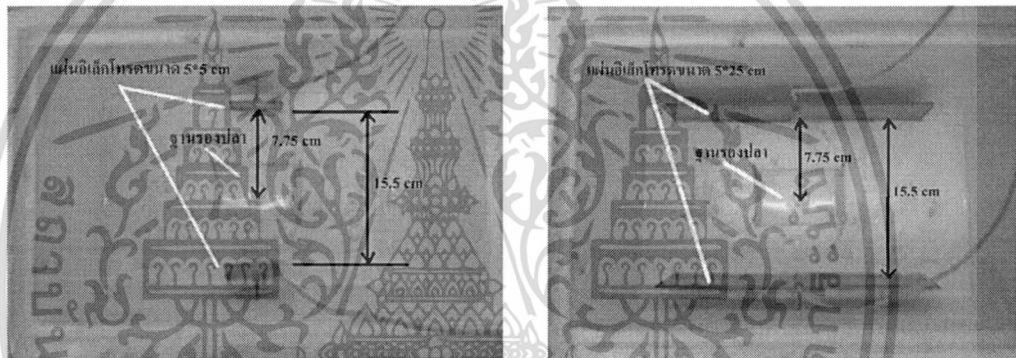
ทำการติดตั้งวงจรการละลายโดยวิธีทางไฟฟ้าแล้วเปิด Breaker เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ หมุนปรับ Variac จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าอ่านค่าได้ 220 V บันทึกอุณหภูมิทั้งจุด 1 2 3 4 และอุณหภูมิน้ำ (จุดที่ 5) อย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนช้าสุดเท่ากับ -2°C หลังเสร็จสิ้นกระบวนการละลายบันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงการละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำ 11 ลิตร ขนาดขั้ว 5×5 cm

ทำการทดลองละลายปลาแช่แข็งโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการนำไฟฟ้าอีกครั้ง โดยเตรียมจากกล่องชุดทดลองขนาด กว้าง 20 cm ยาว 35 cm สูง 15cm หนา 2 cm นำขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส AISI 316 ขนาด 5×5 cm ติดตั้งภายในกล่องชุดทดลองดังกล่าวโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 15.5 cm เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น ดังรูป



รูปที่ 3.17 ระยะการติดตั้งชุดทดลองการละลายด้วยขั้วอิเล็กโทรดขนาด 5×5 cm และ 5×25 cm

ทำการบรรจุปริมาตรน้ำที่ใช้ละลายคงที่ 5 liter โดยที่อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15 °C ในชุดทดลอง ทำการตั้งตัวปลาแช่แข็งทั้งตัวที่เสียบสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 4 จุดแล้วบนฐานรอง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรดและให้ตัวปลาแช่แข็งสัมผัสกับน้ำนิ่งที่อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 15 °C ภายในกล่องชุดทดลอง

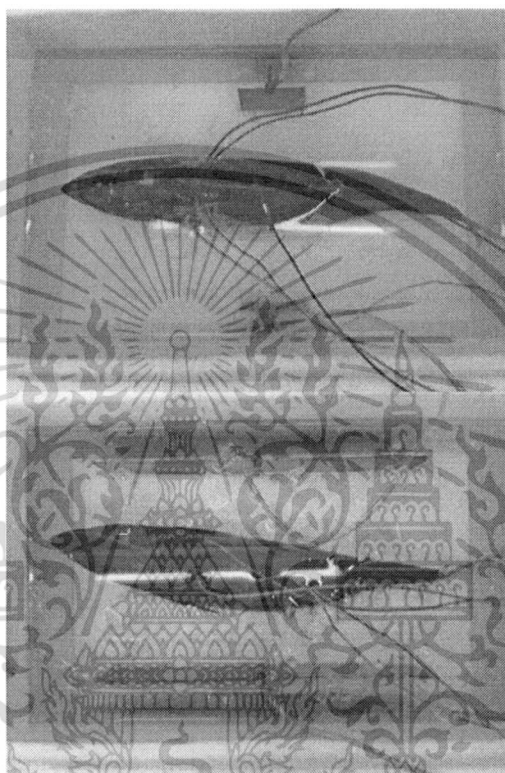
การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทำเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น คือเริ่มต้นติดตั้งวงจรการละลายโดยวิธีทางไฟฟ้าแล้วเปิด Breaker เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหมุนปรับ Variac จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าอ่านค่าได้ 220 V บันทึกอุณหภูมิทั้งจุด 1 2 3 4 และอุณหภูมิน้ำ (จุดที่ 5) อย่างต่อเนื่องด้วย Datalogger ทุกๆ 1 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนช้าสุดเท่ากับ -2 °C หลังเสร็จสิ้นกระบวนการละลายบันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการละลาย

ละลายปลาหุ่นาแช่แข็งด้วยการทดลองเปลี่ยนขนาดขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส AISI 316 เป็น 5×25 cm ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น 5 เท่าทำการติดตั้งภายในกล่องชุดทดลองดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 15.5 cm เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น บันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นหลังการละลายปลาแซ่แข็งเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

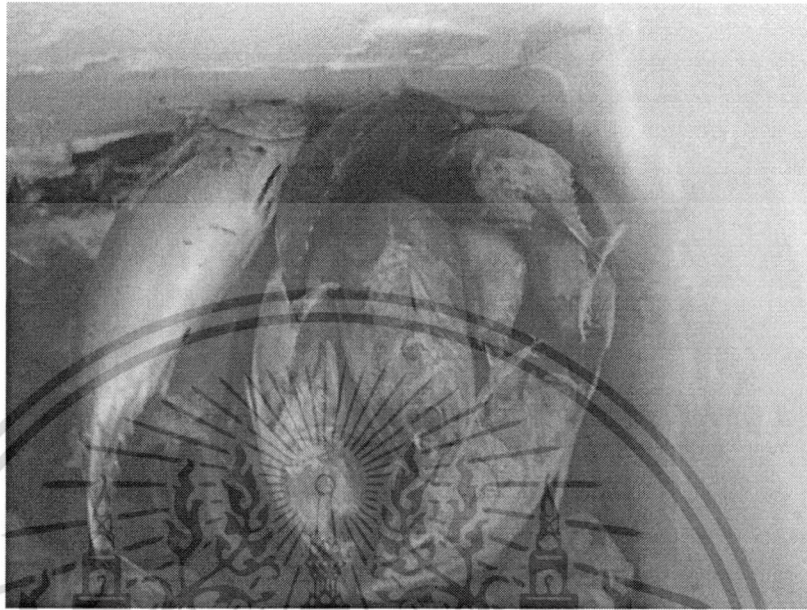
จากนั้นทดลองเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 220V เป็น 300 V โดยมีขนาดขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลส AISI 316 ขนาดเท่าเดิม คือ 5×25 cm กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 15.5 cm เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น บันทึกเวลาและหาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นหลังการละลายปลาแซ่แข็งเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์



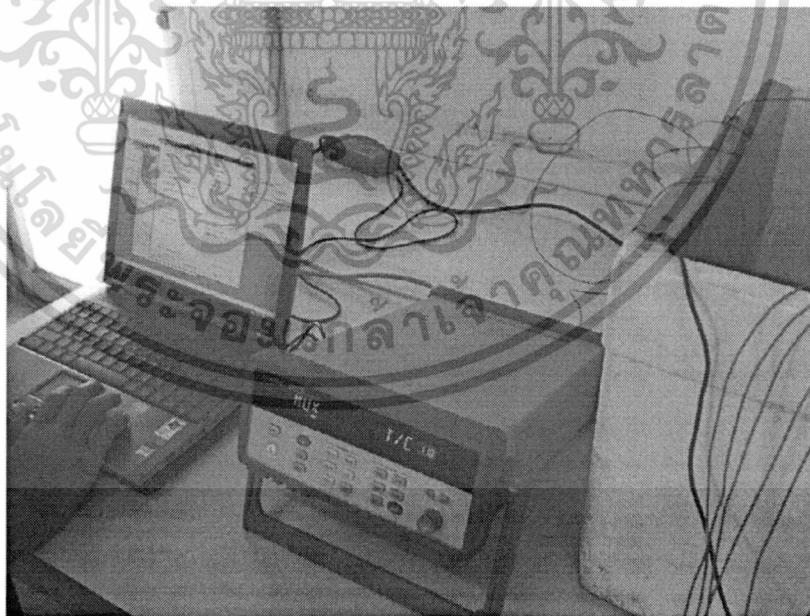
รูปที่ 3.18 แสดงการละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำ 5 ลิตร ขนาดขั้ว 5×5 cm และ 5×25 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 5 การละลายปลาหน้ำทั้งตัวจำนวน 10 ตัวด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า
ลำดับขั้นตอนการละลายปลาด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 3.19-3.22

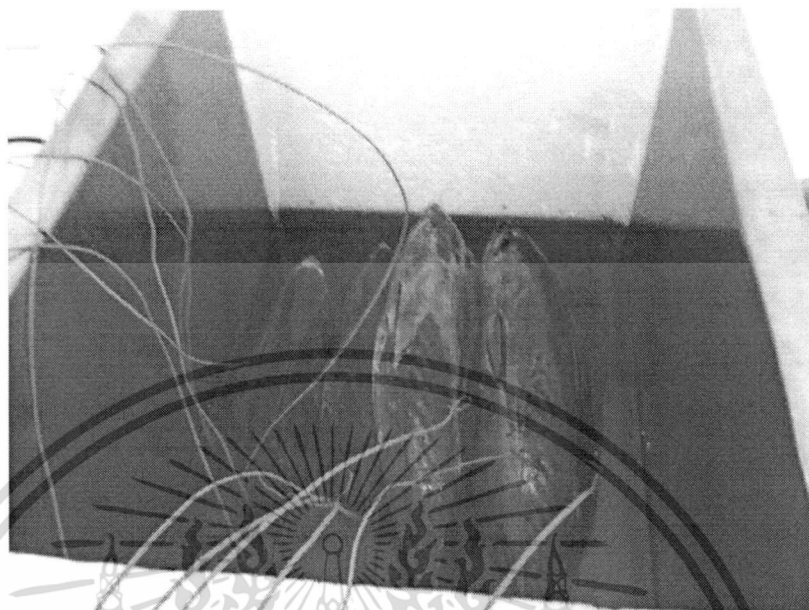


รูปที่ 3.19 ปลาสตแซ่แข็งในตู้แช่แข็ง



รูปที่ 3.20 การบรรรที่กอุณหภูมิระหว่างการละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การจัดเรียงปลาในอ่างละลาย



รูปที่ 3.22 ชุดควบคุมการป้อนจ่ายแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

4.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองละลายทางไฟฟ้า

สารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบเข้ม คือ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.02 0.05 0.17 mol/l นำมาทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้ชุดทดลองละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้า กำหนดให้พื้นที่สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์สัมพัทธ์อิเล็กโทรด 5 cm² และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 cm ทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 25V มีความเข้มสนามไฟฟ้า 8.3 V/cm เพื่อคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิงจาก (Palaniappan และคณะ, 1991) ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับความเข้มข้น NaCl ต่าง ๆ กัน (T=20°C)

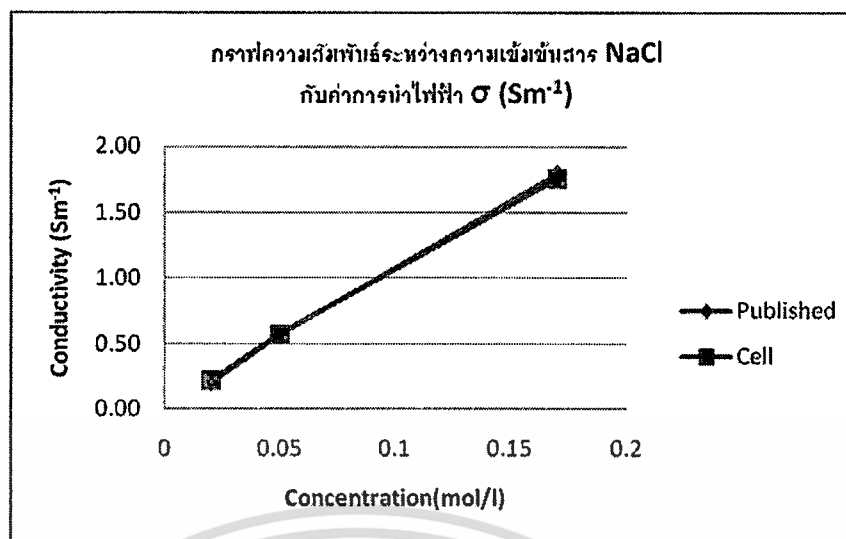
NaCl (mol/l)	1		2		3	
	V	A	V	A	V	A
0.02	25.07	0.09	25.03	0.10	25.04	0.08
0.05	25.37	0.24	23.45	0.22	25.40	0.25
0.17	25.64	0.75	25.55	0.73	25.45	0.76

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยกับความเข้มข้น NaCl ต่าง ๆ กัน

NaCl (mol/l)	Conductivity (Sm ⁻¹)				
	Published ^a	Measure manufactured cell			
		1	2	3	Avg.
0.02	0.20	0.22	0.24	0.19	0.22
0.05	0.57	0.57	0.56	0.59	0.57
0.17	1.79	1.76	1.71	1.79	1.75

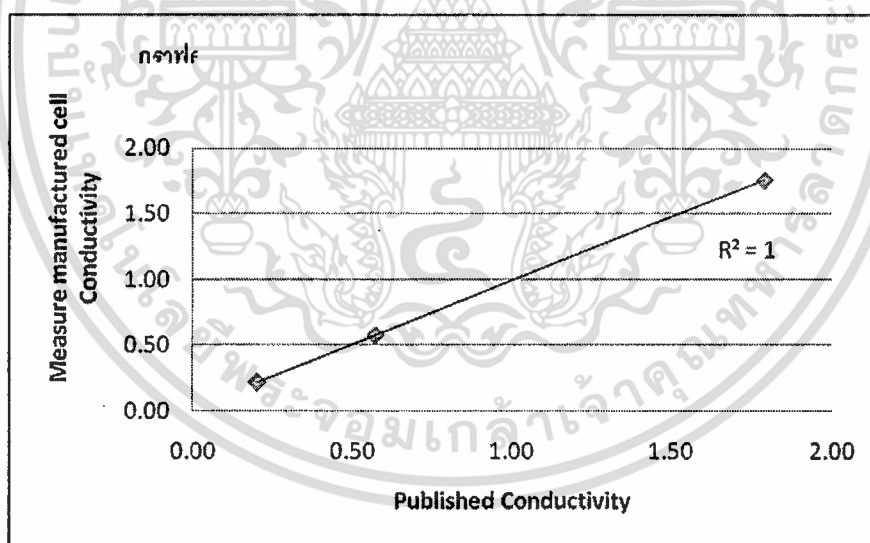
Data source : Palaniappan and Sastry (1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสาร NaCl ต่างๆกัน

จากการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของชุดทดลองละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Measure constructed cell) ที่ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.02, 0.05, 0.17 mol/l สอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งอ้างอิง (Published) คือมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิงเป็นเชิงเส้นและมีค่า $R^2=1$ ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดทดลองจึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้อ้างอิงได้



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า Published กับ Constructed Cell

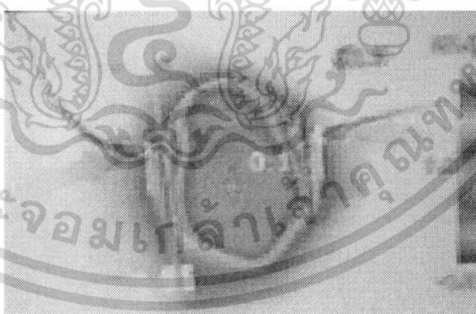
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาหาการกระจายอุณหภูมิที่ผิวเหนือสเติกปลาทูล่าพินธุ์โอสายโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

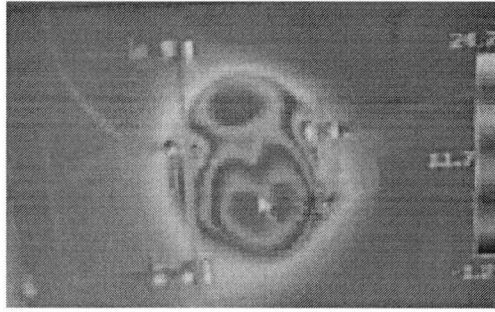
จากการศึกษาการกระจายอุณหภูมิที่ผิวชั้นสเติกปลาแซ่แข็งพบว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นแก่ชั้นสเติกปลาแซ่แข็งที่ 50 V การละลายเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ขอบผิวของชั้นตัวอย่างเนื่องจากผลจากการพาความร้อนของอากาศ (35 นาที) ดังรูปที่ 4.6 จากนั้นการละลายจะเพิ่มระดับขึ้นตามความลึกของชั้นตัวอย่างจากบริเวณผิวเนื่องจากการนำความร้อนจากผิวปลาจนกระทั่งเกิดการละลายของเนื้อปลาบริเวณตามแนวที่สั้นที่สุดระหว่างแผ่นขั้วสแตนเลส AISI 316 ซึ่งใช้เวลาละลายทั้งสั้น 44 นาที ดังรูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.7 ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรม การไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางที่สั้นที่สุด และผลจากการไหลของกระแสทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นหรือกล่าวได้ว่าพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนนั่นเอง (ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2546) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลทำให้เกิดการละลายของน้ำแข็ง



รูปที่ 4.3 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชั้นสเติกปลาทูล่าพินธุ์โอสายในขณะเริ่มต้นละลายโดยใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชั้นสเติกปลาทูล่าพินธุ์โอสายในขณะละลายโดยใช้ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที



รูปที่ 4.5 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชั้นสติกในขณะที่ละลายโดยใช้ไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไป 44 นาที



รูปที่ 4.6 การละลายที่เกิดขึ้นตามแนวระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

4.3 การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลายและค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Drip Loss) ชั้นสติกปลาทูน่าพันธุโอลายด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่และการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

สภาวะแรงดันไฟฟ้าคงที่

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ในช่วง 0-200V ในการละลายปลาทูน่าชั้นสติกพบว่าจุดที่ร้อนช้าสุดไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นสติกปลา โดยบริเวณที่สัมผัสกับแผ่นขั้วอิเล็กโทรดมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ร้อนช้าสุดเนื่องจากแผ่นขั้วอิเล็กโทรดร้อนขึ้นในขณะที่ทำการละลาย จากการทดลองพบว่าการละลายสติกปลาแช่แข็งโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าละลายที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง 50-200V ส่วนหัว(H) ส่วนกลางลำตัว (M) และส่วนหาง (T) สามารถลดระยะเวลาในการละลายลงได้เมื่อเทียบกับการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C (0V) ซึ่งการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ชั้นสติกปลาแช่แข็งส่วนหัว(H) ส่วนกลางลำตัว (M) และส่วนหาง (T) เกิดการละลายได้อย่างรวดเร็วตามแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ บริเวณส่วนหัว H รอบวง 27.00±1.08 cm ใช้เวลาในการละลายนานที่สุดเนื่องจากมีขนาดใหญ่สุด ในขณะที่ส่วนหาง (T) มีขนาดรอบวงชั้นสติกเล็กที่สุดคือ

23.50±1.04 cm ดังนั้นบริเวณส่วนหางจะใช้เวลาในการละลายได้อย่างรวดเร็วกว่าส่วนอื่น ทั้งนี้เนื่องจากมีปัจจัยแวดล้อมอื่นมาเกี่ยวข้องนั่นคือการพาความร้อนของอากาศ

การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในกระบวนการละลายชิ้นสเด็กปลาแต่ละส่วนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Yun และคณะ, 1998) กล่าวว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำสามารถลด drip loss และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของชิ้นเนื้อได้และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในชิ้นสเด็กปลาหลังการละลายด้วยวิธีการละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆกับการทดลองที่สภาวะชิ้นสเด็กปลาสัมผัสกับอากาศโดยตรง (25°C, 0 V) พบว่าวิธีการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าละลายปลาแช่แข็งการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการละลายปลาแช่แข็งด้วยการสัมผัสกับอากาศเพียงอย่างเดียวมากถึง 0.39% 0.49% 0.77% และ 0.87% โดยเฉลี่ย สำหรับการละลายที่แรงดันไฟฟ้า 200 150 100 และ 50 V ตามลำดับ

ผลจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นทำให้มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนช้าสุดและจุดที่ร้อนเร็วที่สุดมากขึ้นทั้งนี้เป็นผลมาจากความต้านทานในตัวปลามีค่าไม่เท่ากันในแต่ละส่วน จากความสัมพันธ์ $P=I^2R$ ส่วนที่มีความต้านทานปลา (R) สูง ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานจึงสูงด้วย และจากความสัมพันธ์ $P=V^2/R$ เมื่อความต้านทานคงที่ในแต่ละส่วนประกอบของปลา เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงสูงขึ้นด้วย

สภาวะการปรับแรงดันไฟฟ้า

ทดลองละลายชิ้นเนื้อสเด็กปลาหูหน้าง 3 ส่วนด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยสัมผัสกับบรรยากาศภายนอกโดยตรงที่อุณหภูมิในช่วง 24-25°C แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 220V จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนเร็วสุดคือบริเวณผิวสัมผัสแผ่น Electrodes มีอุณหภูมิ -2°C (Freezing point) แล้วทำการลดแรงดันไฟฟ้าไปที่ 0 50 และ 100V คงที่ตามลำดับจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าสุดเท่ากับ -2 °C และอุณหภูมิที่ผิวต้องน้อยกว่า 15 °C พบว่า ที่สภาวะเริ่มต้นเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 220V ทุกสภาวะในการละลายชิ้นสเด็กปลาแช่แข็งมีอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนเร็วสุดคืออุณหภูมิ ณ บริเวณผิวสัมผัสกับแผ่นขั้วอิเล็กโทรด (จุดที่ 6 หรือจุดที่ 7) สูงขึ้นกว่าตำแหน่งอื่นๆ ในขณะที่จุดที่ 3 คือบริเวณกึ่งกลางชิ้นสเด็กปลามีอุณหภูมิร้อนช้าที่สุดกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ breakdown ขึ้นที่ผิวขั้วอิเล็กโทรด การเบรกดาวนที่ผิวเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งผ่านตามฉนวนไฟฟ้าที่กั้นซึ่งคือช่องอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับผิวสเด็กปลาที่ไม่แนบสนิทกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้สภาพฉนวนของอากาศเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นชั่วคราว จึงทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสกับแผ่นขั้วอิเล็กโทรด

เมื่อทำการพิจารณาแนวโน้มการละลายพบว่าในช่วงก่อนถึงจุดเยือกแข็งของปลาที่อุณหภูมิ -2°C สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากผลของการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรกที่ 220V ส่งผลให้เกิดการละลายได้อย่างรวดเร็ว ต่อมาทำการลดแรงดันไฟฟ้าลงเมื่ออุณหภูมิที่ร้อนเร็วสุดคือบริเวณสัมผัสแผ่นขั้วอิเล็กโทรดละลายถึงจุดเยือกแข็งปลา (-2°C) พบว่าการลด

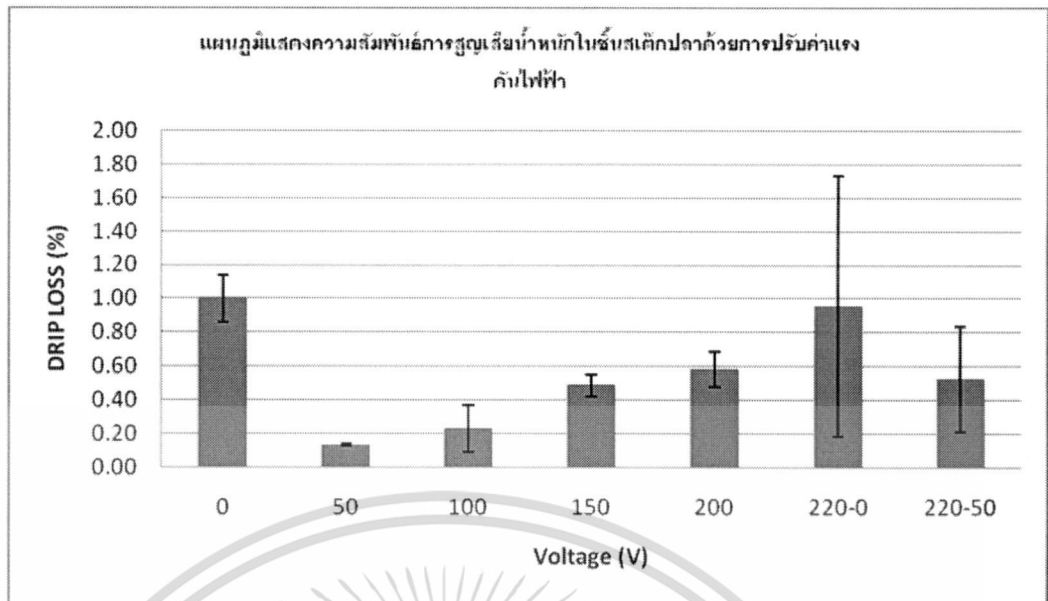
แรงดันไฟฟ้าไปที่ 75V และ 100V ตามลำดับส่งผลให้เกิด **overheat** ขึ้นในระหว่างกระบวนการละลายคือมีอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสแผ่นขั้วอิเล็กโทรดเกิน 15 °C ในขณะที่อุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนช้าสุดมีค่าต่ำกว่า -2°C และส่งผลให้เกิดการไหม้ที่ผิวและเนื้อบริเวณที่สัมผัสแผ่นขั้วอิเล็กโทรดเริ่มสูงอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ สำหรับการลดแรงดันไฟฟ้าไปที่ 0 และ 50V ตามลำดับให้ผลเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนดคือมีอุณหภูมิบริเวณผิวขั้วอิเล็กโทรดน้อยกว่า 15 °C ในขณะที่อุณหภูมิ ณ บริเวณกึ่งกลางชั้นสเด็กปลามีอุณหภูมิ -2°C

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการละลายชั้นสเด็กปลาทูน่า ดังตารางที่ พบว่าการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-50V ใช้เวลาละลายชั้นสเด็กปลาทูน่าทั้งส่วน H M และ T น้อยกว่าการละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-0V เป็นเวลา 33 25 และ 20 นาทีตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 0V เป็นการละลายโดยสัมผัสกับอากาศภายนอกโดยตรง จึงอาศัยการละลายด้วยการพาความร้อนจากอากาศภายนอก ขณะที่การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 50V เป็นการกำเนิดความร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องภายในตัวชั้นสเด็กปลาเนื่องจากความต้านทานในชั้นสเด็กปลา ดังนั้นจึงใช้เวลาในการละลายได้อย่างรวดเร็วกว่าการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 0V

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาที่ใช้ในการละลายและผลต่างระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดร้อนเร็วสุดและร้อนช้าสุดที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 220V แล้วลดระดับค่าที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ กัน

Voltage	Part	$T_a(^{\circ}\text{C})$	thawing time (min)	T_H	T_c	$\Delta T(T_H-T_c)$
220-0V	H	24	73	1.06	-2.05	3.11
	M	24	77	2.32	-2	4.32
	T	24	54	3.24	-2.01	5.25
220-50V	H	24	40	14.30	-2.67	16.97
	M	24	52	8.53	-2.50	11.03
	T	24	34	2.23	-2.50	4.73
220-75V	H	25	เกิด Overheat			
	M	25				
	T	25				
220-100V	H	25	เกิด Overheat			
	M	25				
	T	25				

พิจารณาการสูญเสียน้ำหนักหลังการละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-0 V และ 220-50 V พบว่ามีค่าดังรูปที่ 4.7

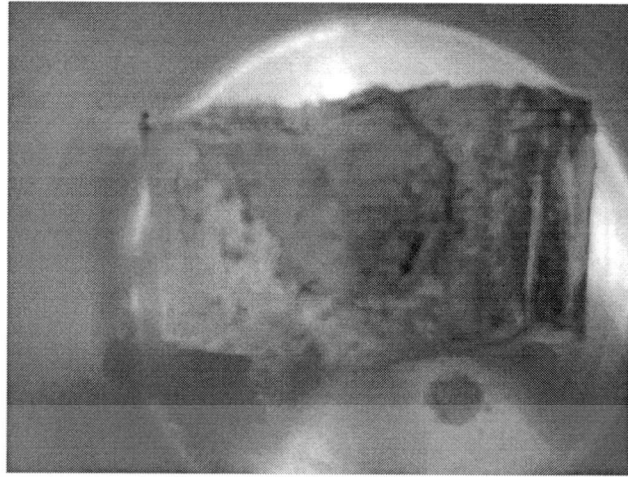


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนัก พบว่าการละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-0V มีการสูญเสียน้ำหนักโดยเฉลี่ยเกิดขึ้นมากกว่าการละลายด้วยแรงดันไฟฟ้า 220-50V ทั้งนี้เป็นผลมาจากการละลายที่ 0V เป็นการละลายด้วยสภาวะชื้นตัวอย่างสัมผัสกับอากาศโดยตรง ซึ่งการละลายโดยใช้อากาศในช่วงดังกล่าวส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการละลายนานกว่าการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-50V

เมื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักการละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-0V และ 220-50V ก็กับการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นเนื่องจากการละลายด้วยการสัมผัสกับอากาศโดยตรง พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าถึง 0.04% และ 0.48% โดยเฉลี่ย

ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักการละลายที่แรงดันไฟฟ้า 220-75V และ 220-100V พบว่าไม่สามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักได้เนื่องจากเกิด overheat ขึ้นที่ดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ทั้งนี้มีสาเหตุจากปรากฏการณ์ Breakdown เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.8 แสดงการเกิด Overheat ที่ผิวปลา ส่งผลให้ผิวไหม้และเนื้อปลาสุกอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.9 แสดงหนังปลาไหม้ติดแผ่นขั้วอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากผลการเกิด Overheat

4.4 การละลายปลาทุกหน้าทั้งตัวที่สภาวะตัวกลางต่าง ๆ กัน

จากการทดลองละลายปลาทุกหน้าแช่แข็งทั้งตัวจนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนเข้าสู่สุดมีอุณหภูมิ -2°C ที่สภาวะตัวกลางต่าง ๆ กัน ได้แก่ การใช้ภาคนึ่งเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิห้อง 24°C ด้วยสภาวะที่ปลาแช่แข็งสัมผัสกับอากาศโดยตรง การละลายโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางได้แก่การละลายด้วยสภาวะน้ำนิ่งและน้ำพ่นที่อุณหภูมิ น้ำต่ำกว่า 15°C การละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว การละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่แข็งที่ถูควบคุมอุณหภูมิ น้ำให้น้อยกว่า 15°C พบว่าการละลายปลาแช่แข็งด้วยสภาวะการละลายโดยใช้ภาคนึ่ง น้ำนิ่ง น้ำพ่นและการใช้เทคนิคทางไฟฟ้า ที่ผิวปลามีลักษณะเส้นกรวยระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการละลายที่ชันมากที่สุด นั้นหมายความว่าส่วนบริเวณของผิวหนังปลาจะเกิดอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ การละลายโดยใช้ภาคนึ่ง น้ำนิ่ง น้ำพ่นที่ผิวเกิดการละลายก่อนเป็นผลจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพาและนำความร้อนจากที่ผิวปลาทำให้เกิดการละลายก่อนตำแหน่งอื่น ในขณะที่การใช้เทคนิคทางไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดเกิดการละลายก่อนตำแหน่งอื่นทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ Breakdown การละลายโดยวิธีทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำ 11 ลิตรที่กลางลำตัวปลา (จุดที่ 2) มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ การแช่น้ำที่ 5 ลิตร บริเวณหาง (จุดที่ 3) มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 จึงเกิดเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการละลายได้รวดเร็วกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ความร้อนจึงถูกกำเนิดขึ้นจากบริเวณดังกล่าว

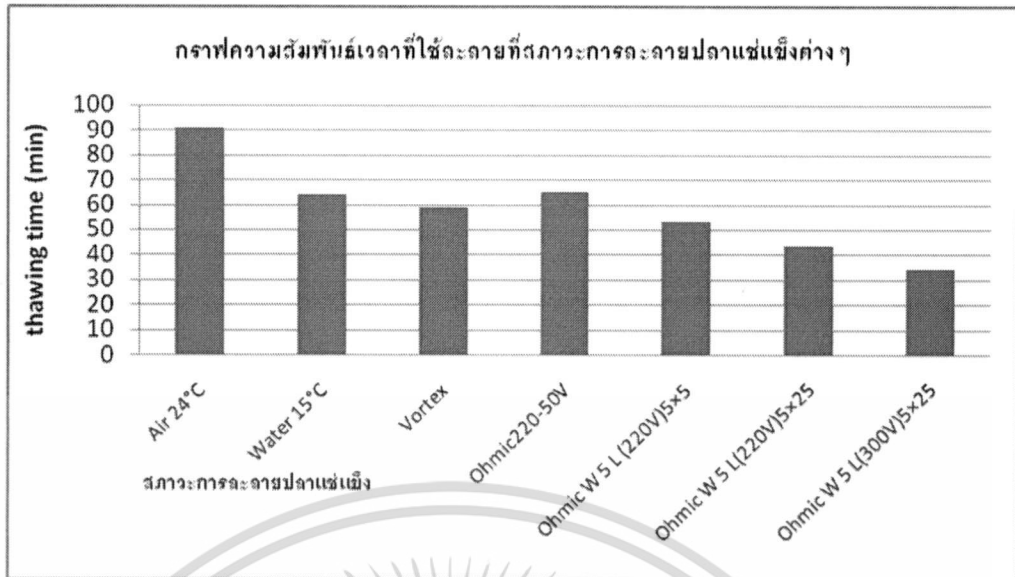
ในขณะเดียวกันในระหว่างกระบวนการละลายด้วยน้ำหนึ่ง น้ำพัน และการใช้เทคนิคไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณากราฟอุณหภูมิ พบว่า ณ จุดที่ 3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิส่วนใกล้หาง พบว่า เกิดการละลายอย่างช้าๆ (อุณหภูมิต่ำที่สุด) เพราะว่ามีลักษณะเส้นกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการละลายชั้นน้อยที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่บริเวณส่วนหางเป็นส่วนที่ประกอบด้วยกล้ามเนื้อปลาเพียงอย่างเดียว ยกเว้นการละลายปลาแช่แข็งโดยใช้อากาศที่อุณหภูมิห้อง 24°C ส่วนกลางลำตัวมีอุณหภูมิตำ่มาที่สุดในระหว่างกระบวนการละลาย การละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำนั้นพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิเปลี่ยนไปคือ การละลายที่น้ำ 11 ลิตรส่วนหางเกิดการละลายได้ช้าสุด การละลายที่น้ำ 5 ลิตรส่วนกลางลำตัวนั้นเกิดการละลายได้ช้าสุด

เวลาที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็งอย่างสมบูรณ์ (อุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนช้าสุดมีค่าถึง -2°C) และการสูญเสียน้ำหนักตัวปลาในระหว่างกระบวนการละลายปลาแช่แข็งที่สภาวะต่างๆ กัน มีค่าดังตารางที่ 4.4

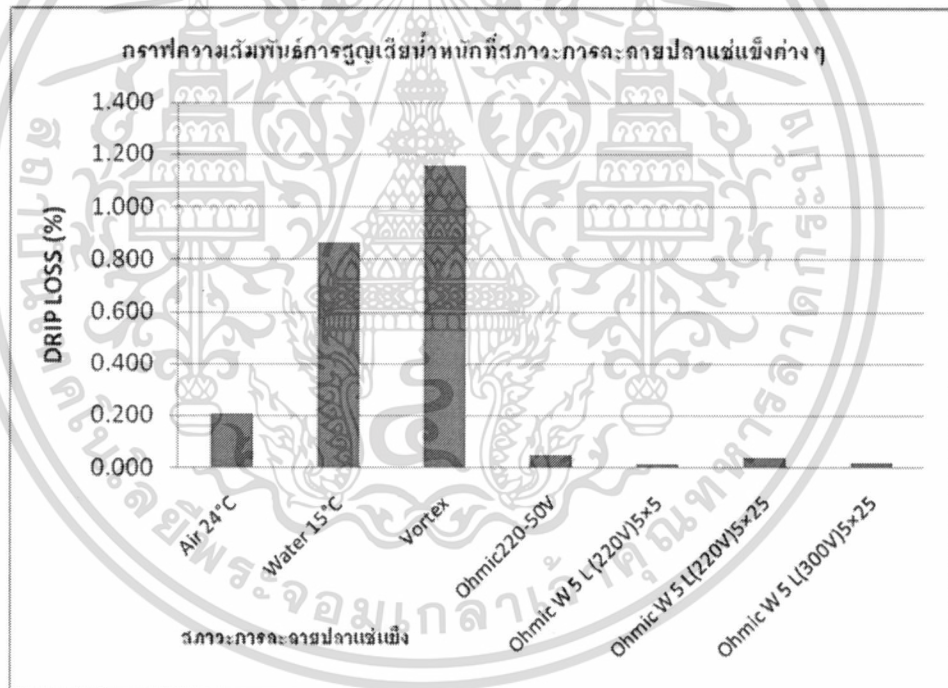
ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาที่ใช้ละลายปลาแช่แข็งและการสูญเสียน้ำหนักที่สภาวะตัวกลางการละลายต่างๆ กัน

ตัวที่	กว้าง (cm)	ยาว(cm)	หนา(cm)	Condition	plate dimension(cm)	thawing time(min)	Drip Loss			
							ก่อน (g)	หลัง (g)	diff mass (g)	%DRIP LOSS
1	7.26	30.50	4.97	Air 24°C	-	90.53	516.77	515.70	1.07	0.207
2	7.29	30.70	5.02	Water 15°C	-	64.13	514.38	509.93	4.45	0.865
3	7.16	31.10	5.13	Vortex 15°C	-	58.83	514.76	508.80	5.96	1.158
4	7.15	30.50	5.11	Ohmic 220-50V	5×5	64.71	506.37	506.12	0.25	0.049
5	6.84	28.10	4.83	Ohmic W 11 L (220V)	5×5	38.50	411.85	411.80	0.05	0.012
6	6.82	28.12	4.80	Ohmic W 5 L (220V)	5×5	22.53	409.80	409.74	0.06	0.015
7	7.23	30.40	4.98	Ohmic W 5 L (220V)	5×5	53.25	514.43	514.35	0.08	0.016
8	7.25	30.44	4.96	Ohmic W 5 L(220V)	5×25	43.32	509.97	509.76	0.21	0.041
9	7.27	30.65	5.00	Ohmic W 5 L(300V)	5×25	33.82	501.86	501.77	0.09	0.018

หมายเหตุ : Ohmic W คือการละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าควบคุมคู่กับการแช่แข็ง



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็งแบบต่างๆ



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก ที่สภาวะการละลายแบบต่างๆ

พบว่า การละลายปลาแช่แข็งทั้งตัวโดยใช้อากาศที่อุณหภูมิห้อง 24°C ใช้เวลาในการละลาย นานที่สุดคือ 90.53 นาที เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศต่ำ 30 W/m²K ทำให้เกิด การนำความร้อนผ่านปลาแช่แข็งได้ไม่ดี แต่การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการ ละลายปลาแช่แข็งโดยใช้สภาวะน้ำนิ่งและน้ำพ่นที่มีปริมาตรน้ำคงที่ 11 ลิตร การละลายโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะน้ำนิ่งและน้ำพ่นใช้เวลาในการละลายน้อยกว่าการละลายโดยใช้อากาศเพียงอย่างเดียว 26.40 นาที และ 31.70 นาทีตามลำดับ โดยที่สภาวะน้ำพ่นที่มีปริมาตรน้ำคงที่ 11 ลิตร อุณหภูมิ 15°C ใช้เวลาในการละลายน้อยกว่าสภาวะน้ำนิ่งถึง 5.3 นาทีที่อุณหภูมิดังกล่าว เนื่องจากการละลายโดยใช้สภาวะน้ำพ่นนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่าการละลายด้วยสภาวะน้ำนิ่ง 299.39 W/m²K แต่การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการละลายด้วยสภาวะน้ำพ่นสูงกว่าการละลายด้วยสภาวะน้ำนิ่ง 0.29% สำหรับการละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำเป็นวิธีที่สามารถละลายปลาแช่แข็งได้อย่างรวดเร็วที่สุดและค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการละลายด้วยวิธีอื่น

การละลายโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำที่ปริมาตรน้ำ 11 ลิตรขนาดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 5×5 เซนติเมตร ใช้เวลาในการละลายปลาแช่แข็งมากกว่าการละลายที่ปริมาตรน้ำ 5 ลิตรที่ขนาดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเกิดการสูญเสียแก่น้ำมากในขณะละลายปลาแช่แข็งและการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำและมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 0.003% และพบว่าขนาดของปลาแช่แข็งส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการละลายคือเมื่อทำการละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำที่ปริมาตรน้ำคงที่ 5 ลิตรพบว่าขนาดปลาแช่แข็งที่ใหญ่ขึ้นใช้เวลาในการละลายนานกว่าปลาขนาดเล็กกว่า และเมื่อทำการเพิ่มพื้นที่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์เป็น 5 เท่า (5×25 เซนติเมตร) กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์คงที่ พบว่าเวลาที่ใช้ละลายปลาแช่แข็งลดลงถึง 9.93 นาทีเมื่อเทียบกับการละลายโดยใช้ขนาดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เดิม (5×5 เซนติเมตร) และเมื่อทำการละลายโดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 300 โวลต์ ที่ขนาดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ (5×25 เซนติเมตร) และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์คงที่ พบว่าเวลาที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็งลดลงเมื่อเทียบกับการใช้แรงดันไฟฟ้าเดิม (220 โวลต์) ถึง 9.50 นาที ทั้งนี้เป็นผลจากขนาดกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่สูงขึ้นและขนาดแผ่นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใหญ่ขึ้นตั้งความสัมพันธ์ $P=I^2R=V^2/R$ ซึ่งกระแสไฟฟ้าถูกเปลี่ยนรูปเป็นกำลังไฟฟ้าและเกิดเป็นพลังงานความร้อนภายในขึ้นเนื่องจากความต้านทานในตัวปลา ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับการละลายด้วยวิธีอื่นเนื่องจากปลาแช่แข็งถูกละลายอย่างรวดเร็วจึงไม่ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ที่ใหญ่ขึ้น (Recrystallization) ซึ่งผลึกน้ำแข็งใหม่ที่ใหญ่ขึ้นนั้นสามารถทำลายเนื้อเยื่อ โครงสร้างและเนื้อเยื่อสัมผัสของอาหาร ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักสูง

4.5 การคิดต้นทุนในการละลาย

ต้นทุนในการละลายปลาแช่แข็ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือต้นทุนด้านน้ำและต้นทุนการใช้ไฟฟ้า ดังนี้

4.5.1 ต้นทุนด้านน้ำ

ในกระบวนการผลิตปลาทุ่นน้ำกระป๋องจะมีต้นทุนที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในการผลิต ซึ่งน้ำเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อต้นทุนในการผลิต โดยปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.22 ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนการผลิตปลาทุ่นน้ำกระป๋อง

ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณน้ำเสีย	
	ลูกบาศก์เมตรต่อตันวัตถุดิบ	ร้อยละในน้ำเสียรวม
การละลายน้ำแข็ง	1.2 – 5.1	16 – 40
การผ่าปลาควักไส้	2.3	30
การนึ่งปลา	0.2 – 0.6	3 – 5
การบรรจุกระป๋อง	4	30 - 50

ที่มา กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542, หน้า 4-5

ในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำออกได้ 2 ประเภท คือต้นทุนค่าน้ำและค่าบำบัดน้ำเสียที่เกิดในกระบวนการผลิต จากตารางที่ 4.22 พบว่าในการละลายน้ำแข็งโดยทั่วไปต้องใช้น้ำถึงร้อยละ 16 – 40 ของการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ทำให้มีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำจำนวนมาก ดังนั้นการลดปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการละลายน้ำแข็งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

การใช้กระบวนการละลายด้วยวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าโดยตรง (Ohmic Thawing) ช่วยให้อาจสามารถลดต้นทุนที่เกิดจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลาทุ่นน้ำกระป๋องได้ดังผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5

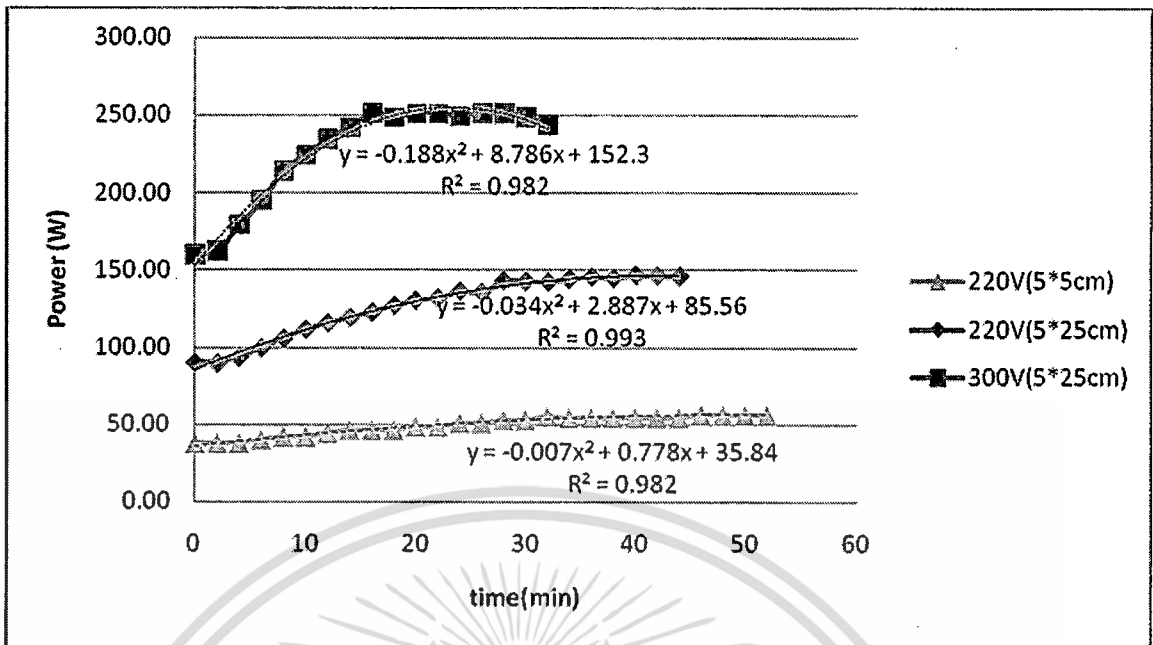
4.5.2 ต้นทุนด้านการใช้ไฟฟ้า

ต้องทราบปริมาณไฟฟ้าที่ใช้จากการทดลองละลายปลาทุ่นน้ำแช่แข็งควบคู่กับการแช่น้ำที่แรงดันไฟฟ้า 220V และ 300V ขนาดแผ่นขั้วอิเล็กโทรด 5×5 cm และ 5×25cm ตามลำดับ พบว่ามีค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ณ เวลาที่เปลี่ยนไปทุกๆ 2 นาที จนกระทั่งปลาทุ่นน้ำแช่แข็งเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ มีผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ณ เวลาที่เปลี่ยนไปทุกๆ 2 นาที

Time (min)	220 (5×5cm)			220 (5×25cm)			300 (5×25cm)		
	V	I(A)	P(W)	V	I(A)	P(W)	V	I(A)	P(W)
0	220.4	0.17	37.47	220.1	0.41	90.24	300.6	0.53	159.32
2	220.7	0.17	37.52	219.8	0.41	90.12	300.0	0.54	162.00
4	220.8	0.17	37.54	218.1	0.43	93.78	298.2	0.60	178.92
6	220.5	0.18	39.69	216.5	0.46	99.59	295.4	0.66	194.96
8	220.2	0.19	41.84	215.8	0.49	105.74	292.5	0.73	213.53
10	220.2	0.19	41.84	214.3	0.52	111.44	290.8	0.77	223.92
12	220.2	0.2	44.04	213.6	0.54	115.34	289.4	0.81	234.41
14	220.3	0.21	46.26	212.7	0.56	119.11	287.6	0.84	241.58
16	220.1	0.21	46.22	211.6	0.58	122.73	285.6	0.88	251.33
18	220.7	0.21	46.35	211.6	0.60	126.96	285.4	0.87	248.30
20	220.2	0.22	48.44	210.3	0.62	130.39	285.0	0.88	250.80
22	220.1	0.22	48.42	208.7	0.63	131.48	285.1	0.88	250.89
24	220.2	0.23	50.65	209.3	0.65	136.05	283.1	0.88	249.13
26	220.0	0.23	50.60	201.7	0.67	135.14	282.4	0.89	251.34
28	219.7	0.24	52.73	207.1	0.69	142.90	282.2	0.89	251.16
30	220.2	0.24	52.85	206.4	0.69	142.42	282.8	0.88	248.86
32	220.3	0.25	55.08	206.2	0.69	142.28	283.3	0.86	243.64
34	217.0	0.25	54.25	205.5	0.70	143.85			
36	216.2	0.25	54.05	204.7	0.71	145.34			
38	216.5	0.25	54.13	203.5	0.71	144.49			
40	216.7	0.25	54.18	203.2	0.72	146.30			
42	216.6	0.25	54.15	202.9	0.72	146.09			
44	216.6	0.25	54.15	202.3	0.72	145.66			
46	216.4	0.26	56.26						
48	216.5	0.26	56.29						
50	215.7	0.26	56.08						
52	215.0	0.26	55.90						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้ในการละลายปลาทูน่าแช่แข็ง

จากนั้นทำการอินทิเกรตหาปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการละลายละลายปลาทูน่าแช่แข็งด้วยแรงดันไฟฟ้า 220V และ 300V จากพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่เริ่มต้นละลายปลาทูน่าแช่แข็งจนกระทั่งการละลายปลาสิ้นสุดลง เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาต้นทุนที่ใช้ในการละลายดังนี้

ที่แรงดันไฟฟ้า 220V ขนาดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5×5 cm มีปริมาณไฟฟ้าที่ใช้

$$\int_0^{52} (-0.007x^2 + 0.778x + 35.84) dx$$

$$= 2587.451W \cdot \text{min}$$

ที่แรงดันไฟฟ้า 220V ขนาดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5×25 cm มีปริมาณไฟฟ้าที่ใช้

$$\int_0^{44} (-0.034x^2 + 2.887x + 85.56) dx$$

$$= 5593.836W \cdot \text{min}$$

ที่แรงดันไฟฟ้า 300V ขนาดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5×25 cm มีปริมาณไฟฟ้าที่ใช้

$$\int_0^{32} (-0.188x^2 + 8.786x + 152.3) dx$$

$$= 7318.572W \cdot \text{min}$$

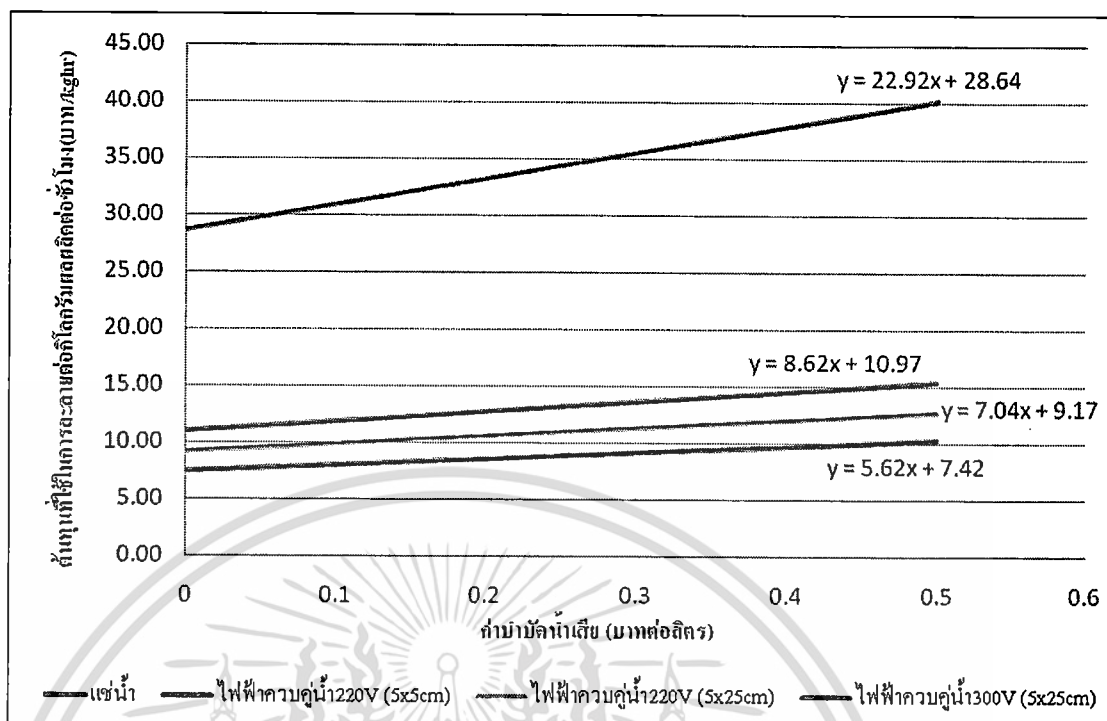
ตารางที่ 4.7 ต้นทุนโดยประมาณในการละลายปลาหน้าแช่แข็ง

รายละเอียด	การละลายด้วยวิธีแช่แข็ง	การละลายโดยใช้ไฟฟ้าโดยตรง		
		220V	220V	300V
ขนาดขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)	-	25	125	125
น้ำหนักปลาก่อนละลาย (กรัม)	514.38	514.43	509.97	501.86
น้ำหนักปลาหลังละลาย (กรัม)	509.93	514.35	509.76	501.77
น้ำหนักที่สูญเสีย	4.45	0.08	0.21	0.09
ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสีย	0.87	0.02	0.04	0.02
เวลาที่ใช้ในการละลาย (นาที)	64.13	53.25	43.32	33.82
ร้อยละของเวลาที่ลดลงเมื่อเทียบกับ การละลายด้วยวิธีแช่แข็ง	-	16.97	32.45	47.26
น้ำเสียที่เกิดขึ้น (ลิตร)	11	5	5	5
ร้อยละของน้ำเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับ การละลายด้วยวิธีแช่แข็ง	-	54.55	54.55	54.55
ค่าน้ำ (1.25 บาทต่อลิตร*)	13.75	6.25	6.25	6.25
ค่าบำบัดน้ำเสีย (A บาทต่อลิตร**)	11A	5A	5A	5A
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (หน่วย)	-	0.04	0.09	0.12
ค่าไฟฟ้า (2.8408 บาทต่อหน่วย***)	-	0.11	0.26	0.35
ต้นทุนที่ใช้ในการละลายต่อกิโลกรัม ผลผลิตต่อชั่วโมง	22.92A + 28.64	8.62A + 10.97	7.04A + 9.17	5.62A + 7.42

* ใช้อัตรารัฐวิสาหกิจ อุตสาหกรรม และธุรกิจขนาดใหญ่ ช่วงการใช้น้ำ 0 - 10 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน (ที่มา อัตราค่าน้ำ, การประปาส่วนภูมิภาค)

** จากค่าบำบัดน้ำเสีย A บาทต่อลิตร สามารถหาต้นทุนรวมใช้ในการละลายต่อกิโลกรัมผลผลิตต่อชั่วโมงได้จากรูปที่ 4.49

*** ใช้อัตราแบบ TOU ประเภทกิจการขนาดใหญ่ แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์ ใช้น้ำไฟฟ้าในช่วง Peak (ที่มา อัตราค่าไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค)



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าบ้ำบค้ำเกียกับต้นทุนรวม

จากรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาที่ค่าบ้ำบค้ำเกียคงที่ แล้วทำการเปรียบเทียบความชันของกราฟการละลายปลาทูน้าแช่แข็งด้วยวิธีการใช้ไฟฟ้าควคู้บ้ำกับการแช่น้ำและการวิธีแช่น้ำเพียงอย่างเดียว พบว่าการละลายด้วยการแช่น้ำ การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควคู้บ้ำกับการแช่น้ำที่ 220 V ขนาดขั้ว 5×5cm และขนาดขั้ว 5×25cm การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควคู้บ้ำกับการแช่น้ำที่ 300V ขนาดขั้ว 5×25cm พบว่ามีความชัน 22.92, 8.62, 7.04 และ 5.62 ตามลำดับ ค่าความชันที่น้อยที่สุดคือมีต้นทุนที่ใช้ในการละลายต่ำสุด

พบว่า การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควคู้บ้ำกับการแช่น้ำมีต้นทุนต่อหน้าหนักผลผลิตต่อเวลาที่ต่ำกว่าการละลายโดยใช้วิธีแช่น้ำเพียงอย่างเดียวเนื่องจากการละลายโดยใช้ไฟฟ้าควคู้บ้ำกับการแช่น้ำใช้ปริมาณน้ำและเวลาที่ใช้ในการละลายต่ำ โดยที่ผลจากการเพิ่มพื้นที่ขนาดขั้ว อิเล็กโทรดและการละลายที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นสูง นอกจากช่วยลดเวลาที่ใช้ในการละลายแล้วยังช่วยลดต้นทุนที่ใช้ในการละลายด้วย โดยผลการวิจัยพบว่าการใช้แรงดันไฟฟ้า 300V ในการละลาย ขนาดขั้ว 5×25cm ลดต้นทุนในการละลายได้ดีที่สุด

เมื่อนำปลาจำนวนมากกว่า 1 ตัวมาทำการละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดตั้งข้อสรุปข้างต้น พบว่าการละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้านี้ยังคงสามารถละลายปลาได้ดีเช่นเดิม โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับจำนวนปลาภายในอ่างละลายและขนาดของอิเล็กโทรด ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถนำไปขยายผลใช้จริงในภาคอุตสาหกรรมได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองละลายทางไฟฟ้า

ชุดทดลองโอห์มมิระบบสติกที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาการนำไฟฟ้าในเนื้อปลาทูน่าแช่แข็งด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.02, 0.05, 0.17 mol/l มาสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าจากเอกสารอ้างอิง (Palaniappan และคณะ, 1991) พบว่าชุดทดลองโอห์มมิระบบสติกที่สร้างขึ้นมีค่าความถูกต้องและแม่นยำในระดับที่พอใจ คือมีค่า $R^2=1$

5.2 การศึกษาหาการกระจายอุณหภูมิที่ผิวเนื้อสเต็กปลาทูน่าพันธุ์โอลายโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

จากการศึกษา พบว่าการละลายเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ขอบผิวของชิ้นตัวอย่างเนื่องจากผลจากการพาความร้อนของอากาศ จากนั้นการละลายเพิ่มระดับขึ้นตามความลึกของชิ้นตัวอย่างจากบริเวณผิวเนื่องจากการนำความร้อนจากผิวปลานจนกระทั่งเกิดการละลายของเนื้อปลาบริเวณตามแนวที่สั้นที่สุดระหว่างแผ่นขั้วสแตนเลส AISI 316 ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางที่สั้นที่สุด และผลจากการไหลของกระแสทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นหรือกล่าวได้ว่าพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน

5.3 การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลายและค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Drip Loss) ชิ้น สเต็กปลาทูน่าพันธุ์โอลายที่แรงดันไฟฟ้าคงที่

พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการละลายอย่างรวดเร็ว โดยส่วนหัวซึ่งเป็นส่วนที่มีขนาดรอบวงใหญ่ใช้เวลาในการละลายช้ากว่าส่วนกลางและส่วนหาง ส่วนหางใช้เวลาในการละลายได้อย่างรวดเร็วที่สุดเนื่องจากมีขนาดรอบวงเล็กสุด และเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัย (Yun และคณะ, 1998) ที่กล่าวว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำสามารถลด drip loss และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของชิ้นเนื้อได้ ซึ่งหมายความว่าเมื่อละลายด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น และพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิตำแหน่งที่ร้อนเร็วสุดและร้อนช้าสุดเพิ่มขึ้นด้วย

5.4 การศึกษาหาค่าการกระจายอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ละลายและค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Drip Loss) ขึ้นสแต็กปลาทูน่าพันธุ์โอลายด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

พบว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 220 V แล้วปรับค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 0V และ 50 Vตามลำดับ เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้คืออุณหภูมิที่ผิวไม่สูงกว่า 15°C และอุณหภูมิจุดที่ร้อนซ้ำสุดถึง -2°C โดยที่การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 50 V ใช้เวลาในการละลายได้อย่างรวดเร็วกว่าการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 0 V เป็นเวลา 33, 25 และ 20 นาทีตามลำดับ ในขณะที่การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 75 V และ 100V เกิด Overheat ขึ้นในระหว่างการละลาย

5.5 การละลายปลาทูน่าทั้งตัวที่สภาวะตัวกลางต่าง ๆ กัน

การใช้อากาศหนึ่งที่อุณหภูมิ 24°C ละลายปลาทูน่าแช่แข็งทั้งตัวใช้เวลาละลายนานที่สุดในขณะที่การใช้น้ำพ่นใช้เวลาละลายได้รวดเร็วกว่าการละลายโดยใช้อากาศหนึ่งและน้ำนิ่งแต่การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นสูง การละลายด้วยวิธีการใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ในการละลายปลาทูน่าแช่แข็งทั้งตัวใช้เวลาในการละลายน้อยและค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าการละลายโดยใช้วิธีอื่น การป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นและการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดขั้วอิเล็กโทรดส่งผลให้ใช้เวลาในการละลายปลาทูน่าแช่แข็งทั้งตัวลดลง เมื่อทำการคิดต้นทุนที่ใช้ในการละลายปลาแช่แข็งด้วยวิธีการใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำเทียบกับวิธีการแช่น้ำเพียงอย่างเดียวพบว่า การละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำมีต้นทุนต่อน้ำหนักผลผลิตต่อเวลาที่ต่ำกว่าการละลายโดยใช้วิธีแช่น้ำเพียงอย่างเดียวเนื่องจากการละลายโดยใช้ไฟฟ้าควบคู่กับการแช่น้ำใช้ปริมาณน้ำและเวลาที่ใช้ในการละลายต่ำกว่า เมื่อนำปลาจำนวนมากกว่า 1 ตัวมาทำการละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดตั้งข้อสรุปข้างต้น พบว่าการละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้านี้ยังคงสามารถละลายปลาได้ดีเช่นเดิม โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับจำนวนปลาภายในอ่างละลายและขนาดของอิเล็กโทรด ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถนำไปขยายผลใช้จริงในภาคอุตสาหกรรมได้

5.6 ข้อเสนอแนะ

ควรมีระบบควบคุมอุณหภูมิควบคู่กับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- ทิพาพร อยู่วิทยา, สุวิทย์ เตีย. การศึกษาสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของซูริมิแช่เยือกแข็งและผลของขนาดผลึกน้ำแข็ง ที่มีต่อกระบวนการละลาย ด้วยวิธี Ohmic. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2547.
- ประมวล ศรีกาหลง. กระบวนการให้ความร้อนน้ำสับประตด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้าโดยตรง [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2539.
- สำนักบริหารการนำเข้าส่งออกสินค้าทั่วไป กลุ่มวิเคราะห์สินค้า, 2550. "สถานการณ์ปลาทูน่ากระป๋อง" Available online <http://www.dft.moc.go.th>
- บวร กิติไพศาลนนท์. อุตสาหกรรมปลาทูน่ากระป๋อง. สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2 สำนักเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "อุตสาหกรรมปลาทูน่ากระป๋อง" Available online http://www.oie.go.th/project/tuna/tuna_01report.pdf
- อรรถพล นุ่มหอม, ฤทธิชัย อัครราชันย์. Becool : Find the suitable solution for you needs . 2550 ; 1 : 1-26
- Anders Haugland. INDUSTRIAL THAWING OF FISH – to improve quality, yield and capacity [dissertation] : Norwegian University of Science and Technology ; 2002
- Anderson, R. Ohmic heating as an alternative food processing technology [thesis master degree of science]. Manhattan (KS): Kansas State Univ ; 2008.
- Beyza Ersoy, Emine Aksan, Akif zeren. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*). Hatay : University of Mustafa Kemal ; 2008
- Bing Li, Da-Wan Sun. 2002. "Novel method for rapid freezing and thawing of foods- a review" *Journal of Food Engineering*. 54 : 175-182
- Carlez, A., J.P.Rosec, N.Richardand, J.C.Cheffel. 1994. Bacchilled storage of pressure treated mince meat. *Lebensn* 27 : 48-54.
- C.A.Miles , M.J.Morley, M.Rendell. 1999. "High power ultrasonic thawing of frozen foods" *Journal of Food Engineering*. 39 : 151-159
- Ersoy, B., Aksan, E. and Oezeren A. 2008. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*). *Food Chemistry*. (article in press)
- Foegeding, E.A., Lanier, T.C. and Hultin, H.O. 1996. Characteristics of edible muscle tissues. In. O.R. Fennema (Ed.), *Food Chemistry*. New York: Marcel Dekker
- Jocelyn Rouille', Alain Lebail, H.S.Ramaswamy, L.Leclerc .2002 "High pressure thawing of fish and shellfish" *Journal of Food Engineering*. 53 : 83-88

- Li, B. and Sun, D.W. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review. *J. Food Eng.* 54, 175-182
- Miles, C.A., Morley, M.J. and Rendell, M. 1999. High power ultrasonic thawing of frozen foods. *J. Food Eng.* 39, 151-159.
- Pornchaloempong, P. and Narkruksa W., 2005. Colour in the Can: Effects of Processing Conditions on Yield and Colour of Albacore Tuna. *Food & Beverage Asia.* 28-33.
- Roberts, J.S., Balaban, M.O., Zimmerman, R. and Luzuriaga D. 1998. Design and testing of a prototype ohmic thawing unit. *Computers and Electronics in Agriculture.* 19, 211-222.
- Rouille, J., Lebail, A., Ramaswamy, H.S. and Leclerc, L. 2002. High pressure thawing of fish and shellfish. 53, 83-88.
- Sarang, S., Sastry, S.K. and Knipe, L. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. 87, 351-356.
- Shirsat, N., Lyng, J.G., Brunton, N.P. and McKenna. B., 2004 "Ohmic processing: Electrical conductivities of pork cuts" *Journal of Food Engineering.* 67 : 507-514
- Yun, C.G., Lee, D.H. and Park, J.Y. 1998. Ohmic thawing of a frozen meat chunk. *J. Food Sci. and Techno.* 30(4), 842-847.