



โครงการทางวิศวกรรม เรื่อง

การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว
ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Development of Electrical Conductivity Measurement Equipment
Portable of Liquid Food during Ohmic heating Technology

นาย	ชวณ	ริยะนา	รหัสนักศึกษา	6515125016
นาย	ธัญนาถ	ทรงนิลรักษ์	รหัสนักศึกษา	6515125026
นางสาว	มณีนรัตน์	พงษ์สุธีถาวร	รหัสนักศึกษา	6515125046
นางสาว	อัญนิชา	อินชู	รหัสนักศึกษา	6515125065

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ปีการศึกษา 2566



โครงการทางวิศวกรรม เรื่อง

การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว
ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Development of Electrical Conductivity Measurement Equipment
Portable of Liquid Food during Ohmic heating Technology

นาย	ชวณ	ริยะนา	รหัสนักศึกษา	6515125016
นาย	ธัญนาถ	ทรงนิลรักษ์	รหัสนักศึกษา	6515125026
นางสาว	มณีรัตน์	พงษ์สุธีถาวร	รหัสนักศึกษา	6515125046
นางสาว	อัญนิชา	อินชู	รหัสนักศึกษา	6515125065

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ปีการศึกษา 2566



การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว
ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Development of Electrical Conductivity Measurement Equipment Portable of Liquid Food
during Ohmic heating Technology

นาย	ชวณ	ริยะนา	รหัสนักศึกษา	6515125016
นาย	ธัญนาถ	ทรงนิลรักษ์	รหัสนักศึกษา	6515125026
นางสาว	มณีนรัตน์	พงษ์สุธีถาวร	รหัสนักศึกษา	6515125046
นางสาว	อัญณิชา	อินชู	รหัสนักศึกษา	6515125065

โครงการนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
คณะกรรมการสอบโครงการ

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครวราชันย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา)

..... คณบดีวิทยาลัยพลังงานทดแทน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วัน เดือน ปี ที่ทำการสอบ

19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

@ ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิศวกรรม เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสำเร็จลุล่วงได้ เพราะความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร. ฤทธิชัย อัครราชันย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขปัญหาดังกล่าว จนโครงการเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล และอาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา ที่กรุณามาเป็นกรรมการข้อสอบโครงการฯ ทั้งยังให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับคณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนสนับสนุนเพื่อทำโครงงานพลังงานทดแทน เทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตรสมัยใหม่ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้งบประมาณสนับสนุน "โครงการยกระดับวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการใหม่ด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการเกษตรสมัยใหม่ (ภายใต้กิจกรรม: พัฒนากำลังคนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมอัจฉริยะ)" สำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปีงบประมาณ 2565 สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงงานหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงงานเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำโครงงานขออภัย ณ ที่นี้

นายชวณ	ริยะนา
นายธัญนาถ	ทรงนิลรักษ์
นางสาวมณีรัตน์	พงษ์สุธีถาวร
นางสาวอัญญา	อินชู

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ	การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก			
ผู้ทำโครงการ	1. นายชวณ	ริยะนา	รหัสนักศึกษา	6515125016
	2. นายธัญนาถ	ทรงนิล	รหัสนักศึกษา	6515125026
	3. นางสาวณัฏฐ์	พงษ์สุธิถาวร	รหัสนักศึกษา	6515125046
	4. นางสาวอัญญา	อินชู	รหัสนักศึกษา	6515125065
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์			
กรรมการ	1. รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล			
	2. อาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา			

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพา ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสำหรับน้ำผลไม้เนื้อเดียว การดำเนินโครงการวิศวกรรม แบ่งเป็น การออกแบบและพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ การพัฒนางจรการวัดค่าการนำไฟฟ้ารวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ และการเขียนโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control: PLC) เพื่อใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0-250 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า ในช่วง 0-10 แอมแปร์ สำหรับการวัดค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0-95 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลการดำเนินโครงการ พบว่าได้ออกแบบโอห์มมิกเซลล์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยท่ออะคริลิก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 10 เซนติเมตร โดยติดตั้งหัววัดอุณหภูมิจำนวน 3 ตำแหน่งเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิ ในขณะที่หัวอิเล็กโทรดจุ่มจากวัสดุทนทานไฟฟ้า และแผ่นสแตนเลส SUS304 ประกันซิลิโคน ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อป้องกันพลังงานไฟฟ้าให้กับน้ำผลไม้ ดำเนินการทดสอบ ความแม่นยำของโอห์มมิกเซลล์ด้วยการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ผลการศึกษามีความแม่นยำของโอห์มมิกเซลล์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 99.53 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ ที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าน้ำมะเขือเทศ มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับเท่ากับ 0.1-0.2 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 0.0913 องศาเซลเซียสต่อวินาที โดยเกิดพลังงานความร้อนรวมเท่ากับ 92.34 วัตต์ต่อวินาที และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95.09 เปอร์เซ็นต์ โดยระบบการตรวจวัด และการควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ สามารถถ่ายโอนข้อมูลผ่านเครือข่ายรวมของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อถึงกันและเทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวกในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับระบบคลาวด์ตลอดจนระหว่างอุปกรณ์ ผลการดำเนินโครงการวิศวกรรมนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองการให้ความร้อนด้วยการให้ความร้อนวิธีโอห์มมิกด้วยการควบคุมด้วยผ่านอินเทอร์เน็ตบนทุกสรรพสิ่ง

คำสำคัญ: น้ำมะเขือเทศ, การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์, การพลาสมาเจโรส, อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

Abstract

Project Title	Development of Electrical Conductivity Measurement Equipment Portable of Liquid Food during Ohmic heating Technology	
Author	1. Mr. Chawapon Riyana	Student ID 6515125016
	2. Mr. Thanyanat Songnin	Student ID 6515125026
	3. Miss Maneerat Phongsutitawon	Student ID 6515125046
	4. Miss Aunnicha Inchu	Student ID 6515125065
Adviser	Associate Professor Dr. Rittichai Assawarachan	
Committee	1. Associate Professor Samerkhwan Tantikul	
	2. Miss Tasanee Chaiya	

The objective of this research project is to design and develop a portable electrical conductivity measurement device for use during Ohmic heating of single strength juice. The project activities involve engineering tasks, including the design and development of Ohmic cells, the development of measurement circuitry including equipment installation, and the standard programming of measurement systems using Programmable Logic Controllers (PLCs) for measuring electrical conductivity values in the voltage range of 0-250 volts and current range of 0-10 amps for measuring electrical conductivity values in the temperature range of 0-95 degrees Celsius.

The project results indicate that Ohmic cells were designed using computer programs and developed using acrylic tubes with a diameter of 25 millimeters, a thickness of 3 millimeters, and a length of 10 centimeters. Three temperature measurement heads were installed to measure temperature distribution during the passage of electrical current through insulating materials, SUS304 stainless steel, and silicone gaskets. An electrical transformer was installed to supply electrical energy to the fruit juice. The accuracy of the Ohmic cells in predicting electrical conductivity values was found to be as high as 99.53 percent. When testing the electrical conductivity of tomato juice at an electrical field strength of 10 volts per centimeter, it was found to be in the range of 0.1-0.2 Siemens per centimeter at temperatures ranging from 20 to 65 degrees Celsius. The rate of heat generation was found to be 0.0913 degrees Celsius per second, with a total heat energy generation of 92.34 watts per second and a thermal efficiency of 95.09 percent. The system, controlled and monitored by PLC programming, was able to transfer data through a network of interconnected devices and technology, facilitating communication between devices and the cloud-based system. The engineering progress of the project led to the development of a heat sterilization system controlled by Ohmic heating, enabling control through an integrated interface with all components.

Keywords: Tomato juice, Ohmic heating technology, Programmable logic Control (PLC), Pasteurization, Internet of Things (IOT)

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	3
2.1 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก	3
2.2 การหาค่าการนำไฟฟ้าของอาหารในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	4
2.3 อุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้า	5
2.4 การทวนสอบความถูกต้องของอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้า	11
2.5 การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในระดับอุตสาหกรรม	15
บทที่ 3 วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย	21
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	22
3.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า	22
3.3 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว	26
3.4 การทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารมาตรฐาน	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	29
4.1 การพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	29
4.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	33
4.3 การพัฒนาโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลผลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	35
4.4 ผลการทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การทดสอบการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้า	59
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการติดตั้งและการใช้งาน	63
ภาคผนวก ค ประวัติผู้ทำโครงการ	67

สารบัญรูป

	หน้า
ภาพ 2.1 วงจรสมมูลการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating circuit)	3
ภาพ 2.2 แบบร่างทางวิศวกรรมแสดงเซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า (Ohmic cell)	9
ภาพ 2.3 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	10
ภาพ 2.4 หน้าจอควบคุมการทำงานของโปรแกรมวัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	11
ภาพ 2.5 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ชนิดต่างๆ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	13
ภาพ 2.6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้ม (ปริมาณเนื้อส้มคงที่ ที่ 0.60 เปอร์เซ็นต์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ที่ระดับความเข้มข้นน้ำผลไม้ 5 ระดับ	14
ภาพ 2.7 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ในช่วงอุณหภูมิ 32.5–60 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นโดยมวล 5 ระดับ	15
ภาพ 2.8 การสแตริไลซ์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง	16
ภาพ 2.9 ระบบการแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่อง	16
ภาพ 2.10 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก	17
ภาพ 2.11 เครื่องการแปรรูปด้วยความร้อนของการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยเทคโนโลยีโอห์มมิก	19
ภาพ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิศวกรรม	21
ภาพ 3.2 เกลือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride)	22
ภาพ 3.3 แบบร่าง 3 มิติของการพัฒนาโอห์มมิกเซลล์	23
ภาพ 3.4 หลักการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันได้ โดยรับค่าพลังงานไฟฟ้า	23
ภาพ 3.5 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมแปร์	24
ภาพ 3.6 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า และแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0-10 โวลต์	24
ภาพ 3.7 การทำงานของอุปกรณ์ Programmable Logic Controller (PLC)	25
ภาพ 3.8 รูปแบบการทำงานและผ่านระบบ Cloud storage ของอุปกรณ์ Programmable Logic Controller (PLC)	25
ภาพ 3.9 การเขียนไดอะแกรมควบคุมการทำงานของ PLC	26
ภาพ 3.10 รูปแบบการเก็บข้อมูลผ่านระบบ Cloud storage	26
ภาพ 4.1 ออกแบบโอห์มมิกเซลล์ด้วยโปรแกรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	30
ภาพ 4.2 ขนาดและตำแหน่งในการติดตั้งโอห์มมิกเซลล์	30
ภาพ 4.3 การออกแบบขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และขนาด	31
ภาพ 4.4 การออกแบบเซลล์และฝาปิดเซลล์	32

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
ภาพ 4.5 ต้นแบบของการพัฒนาโอห์มมิคเซลล์	32
ภาพ 4.6 ลักษณะของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคแบบพกพา	33
ภาพ 4.7 ต้นแบบของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคแบบพกพา	34
ภาพ 4.8 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์	35
ภาพ 4.9 การกำหนด Assignments เพื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปร	36
ภาพ 4.10 Expressions เพื่อกำหนดค่าต่างๆ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ให้ความร้อน ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิค	37
ภาพ 4.11 การออกแบบหน้าจอแสดงผล (UI)	39
ภาพ 4.12 การถ่ายโอนข้อมูลหน้าจอประมวลผลเพื่อพัฒนา Dashborad ของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า	40
ภาพ 4.13 หน้าจอแสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ	41
ภาพ 4.14 ค่าพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิค	41
ภาพ 4.15 ค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ	42
ภาพ 4.16 การประมวลผลการคำนวณนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิค	43
ภาพ 4.17 การถ่ายโอนข้อมูลสู่โปรแกรม Excel	43
ภาพ 4.18 ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านการโอนถ่ายมายังโปรแกรม Excel	44
ภาพ 4.19 การเข้ารหัสระบบรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Cloud Computing	45
ภาพ 4.20 หน้าประมวลผลหลังจากที่ log in เข้าในระบบ Cloud Computing	45
ภาพ 4.21 ชั่งน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 5.85 กรัม	47
ภาพ 4.22 เตรียมน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เพื่อละลาย โซเดียมคลอไรด์ 5.85 กรัม	47
ภาพ 4.23 โซเดียมคลอไรด์ 5.85 กรัม ลงในน้ำบริสุทธิ์เพื่อละลายเกลือ จากนั้นคนจนเกลือละลายหมด	48
ภาพ 4.24 เมื่อละลายเกลือจนหมดแล้วดูสารละลายเกลือ ลงในโอห์มมิคเซลล์ที่ได้เตรียมเอาไว้	48
ภาพ 4.25 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐานและค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง	49
ภาพ 4.26 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำมะเขือเทศในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิค ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร	52
ภาพ 4.27 ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขือเทศ ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิค ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร	53
ภาพ 4.28 กราฟแสดงผลวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิค	53

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า (S/m) ของสารละลายเกลือ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส	12
ตาราง 4.1 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การแปรรูปด้วยความร้อน (Thermal processing) เป็นเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อน โดยไม่มีข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อนเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อน ในขณะที่การให้ความร้อนแบบดั้งเดิมในการแปรรูปด้วยความร้อนในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้การพาสเจอร์ไรส์ และการสเตอริไลส์ หรือกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (Ultra-high temperature process: UHT) แบบ Indirect heating method ซึ่งมีข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลานาน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพ การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เนื่องจากการเกิดตะกรันเกาะที่ผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง จากข้อจำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนา การให้ความร้อนเพื่อการแปรรูปอาหารที่มีประสิทธิภาพการให้ความร้อนสูง และมีกลไกการให้ความร้อน จากภายในอาหารซึ่งจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อน และประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการผลิต (อรรถพล และฤทธิชัย, 2550)

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงมีอัตราการให้ความร้อนที่สูงมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ โดยมีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 0.005-1.2 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ (Meredith, 1998 และ Richardson, 2001) ในขณะที่การสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 45-48 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีกลไกการให้ความร้อนจากภายในตัวอาหาร จึงไม่มีผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน (วิไล, 2547 และ Assawarachan, 2005) ปัจจุบันการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (Aseptic processing) เพื่อเสริมประสิทธิภาพของการพาสเจอร์ไรส์ และการสเตอริไลส์

ค่าการนำไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยปัจจุบันอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลวในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้นมีราคาแพง และมีขนาดใหญ่ ทำให้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกยังมีไม่แพร่หลาย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

1.2.2 ทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าการนำไฟฟ้ากับสารละลายมาตรฐาน น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

1.2.3 ทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้ากับน้ำผลไม้ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียสในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า โดยการออกแบบโอห์มมิกเซลล์ การออกแบบชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบระบบการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง และการออกแบบระบบควบคุมในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก สำหรับการวัดค่าความร้อนวัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา ในช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นไฟฟ้าในช่วงความเข้มข้นไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

1.3.2 เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐาน น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นไฟฟ้าในช่วงความเข้มข้นไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้า

1.3.3 การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ เช่น น้ำมะเขือเทศ (Single stage juice) ที่ความเข้มข้น 4.5 องศาบริกซ์ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา ในช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นไฟฟ้าในช่วงความเข้มข้นไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

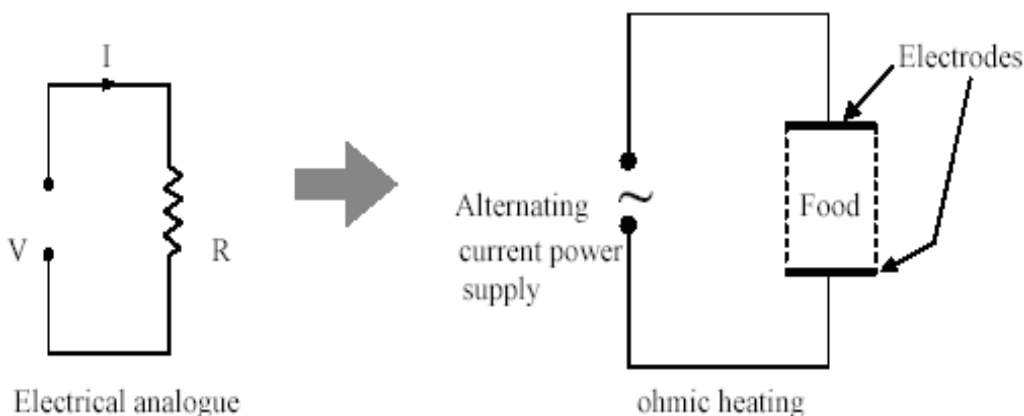
โครงการวิศวกรรมนี้ ทำให้ได้ต้นแบบอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา เพื่อใช้ในการศึกษา และขยายผลพัฒนาเทคโนโลยีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ด้วยการควบคุมแบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet Of Thing: IOT) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมในอนาคต

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหาร ซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร และเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารจนเกิดเป็นความร้อนที่อัตราความร้อนสูง โดยชนิดของอาหารที่เหมาะสมกับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้น ควรเป็นอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง (อรรถพล และฤทธิชัย, 2551) และค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เป็นผลจากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้น (Sarang และคณะ, 2008) นอกจากสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอาหารที่มีผลต่อการเร่งอัตราการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแล้ว ปริมาณเกลือและความเข้มข้นของอาหาร ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เนื่องจากปริมาณเกลือจะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแตกประจุไอออนของอาหาร ซึ่งช่วยเสริมความสามารถในการนำไฟฟ้าในอาหารได้เป็นอย่างดี และผลของความเข้มข้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยอาหารที่ความเข้มข้นของเกลือมาก จะเกิดความร้อนด้วย วิธีโอห์มมิกในอัตราที่สูงกว่าอาหารที่ความเข้มข้นของเกลือต่ำ (Assawarachan, 2010)



ภาพ 2.1 วงจรสมมูลการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating circuit)

ภาพที่ 2.1 แสดงวงจรการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวอย่างอาหารที่มีสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งผลของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในอาหาร จะเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเนื้ออาหารนั้น เนื่องจากในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและเสียดสีกันระหว่างชั้นโมเลกุลในอาหารเกิดเป็นพลังงานความร้อน หรืออาจจะกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสามารถเกิดขึ้นได้ดี และเหมาะสมกับอาหารเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous liquid food) และมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง (High electrical conductivity) เนื่องจากอาหารเหลวจะสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามลักษณะภาชนะที่บรรจุได้พอดี จึงทำให้สามารถสัมผัสข้อจำกัดได้สนิทพอดี ซึ่งมีส่วนช่วยให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่อาหารได้อย่างเต็ม

ประสิทธิภาพ ดังนั้นการใช้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหารจึงช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และทางประสาทสัมผัสของอาหารจากผลของการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน (อรรถพล และฤทธิชัย, 2551) การศึกษาเพื่อพัฒนาการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกใช้ในระดับอุตสาหกรรมนั้น จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เช่น ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นของอาหาร และความเข้มของสนามไฟฟ้า

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงทุกจุด ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสของอาหาร จากรายงานการวิจัยของ (Meredith, 1998) พบว่า การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่รวดเร็วหรือมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมากกว่า 0.005-1.2 องศาเซลเซียส ภายใน 1 วินาที และมีความสามารถในการประหยัดพลังงานได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนมาก 95 เปอร์เซ็นต์ จากลักษณะเด่นดังกล่าว การให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารได้มากมาย เช่น การแปรรูปแบบปลอดเชื้อ (Aseptic processing) การละลายอาหารแช่เยือกแข็ง การลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ การฆ่าเชื้อแบบพาสเจอไรซ์ และสเตอริไลซ์ กระบวนการลวก เป็นต้น

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นวิธีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในตัวอาหาร อันเป็นผลจากการต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าของอาหาร ซึ่งอัตราการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับสมบัติการต้านทานการไหล หรือสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจะเริ่มจากการปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่อาหารผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อาหาร อาหารจะเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในตัวอาหารเอง โดยอัตราการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสู่อาหาร และค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น

2.2 การหาค่าการนำไฟฟ้าของอาหารในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

อรรถพล และฤทธิชัย (2551) อัตราการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหาร ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะแปรผันตรงกับสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ดังนั้นอาหารที่มีสมบัติค่าการนำไฟฟ้า ที่สูง เช่น อาหารที่มีความเป็นกรดสูง (Acid food) และอาหารที่มีส่วนประกอบของเกลือคลอไรด์ ซึ่งอาหารที่มีความสามารถในการแตกตัวของประจุไอออนได้ดี จึงสามารถเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกได้ดี แต่ในอาหารที่มี ค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ (Low acid food) เช่น นม หรืออาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบหลักอาหารประเภทดังกล่าว มีการแตกตัวของไอออนต่ำจึงเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกได้ไม่ดี การนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยที่ใช้ใน การออกแบบและควบคุมการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก อาหารแต่ละชนิดมีสมบัติค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยหลัก (Critical parameter) ต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารด้วยการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาอุปกรณ์และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของทั้งอาหารเหลวและชิ้นอาหาร หลักการและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในตัวอาหาร และความเข้มของกระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม โดยใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.1)

$$\sigma = \frac{I}{V} \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว (S/m); I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (Amp.), V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt), L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (m²)

2.3 อุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของอาหารในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร รายงานวิจัยของ

Miitchell และ De Alwis (1989) ได้พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับอาหารที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับสร้างความร้อนแบบโอห์มมิกทำจากท่อที่เป็นฉนวนไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร วางในแนวตั้งที่มีตัวยึดทั้งด้านบนและด้านล่างปลายท่อด้านล่างมีขั้วอิเล็กโทรดติดตั้งอยู่ ส่วนปลายท่อด้านบนขั้วอิเล็กโทรดถูกยึดติดไว้ปลายหั่วกวดที่สามารถเคลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดสัมผัสผิวหน้าของชิ้นอาหารที่มีความยาวต่างกัน

Halden และคณะ (1990) ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกทำจากกล่องพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ขนาด 184x70x77 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ด้านในของกล่องมีขั้วไฟฟ้าติดตั้งอยู่โดยต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลัก (Main supply) ที่มีแรงดันไฟฟ้า 240 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เหลือ 200 โวลต์ และติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouples) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์จากนั้นมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารอย่างต่อเนื่อง

Palaniappan และ Sastry (1991) ได้สร้างเซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยตัวเซลล์ทำจากท่อสแตนเลส และมีปลอกเทฟลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 เซนติเมตร ซ้อนอยู่ภายในที่ปลายทั้งสองด้านของท่อมีขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นโลหะโรเดียม โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 1 เซนติเมตร หลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ผ่านตัวอย่างจะมีการบันทึกอุณหภูมิแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกข้อมูลดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ

Qihua และคณะ (1992) ได้สร้างระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยตัวเซลล์ ให้ความร้อนที่ทำจากท่ออะคริลิกยาว 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้ง 2 ข้างของเซลล์มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสติดตั้งอยู่ตามแนวยาวและแนวรัศมีของเซลล์มีช่องสำหรับเสียบสายเทอร์โม และตามแนวเส้นรอบวงที่ปลายทั้ง 2 ของเซลล์ได้ติดตั้งท่อแก้วข้างละ 3 ท่อ สำหรับต่อเข้าปั๊ม เพื่อให้การไหลเข้า และออกของตัวอย่าง เป็นไปอย่างสม่ำเสมอในส่วนของระบบการควบคุมการไหลประกอบด้วยปั๊มแบบกลุ่ม (Submersible pump) ที่มีอัตราการสูบสูงสุด 10 ลิตรต่อนาที ผ่านสายยางเข้าสู่ตัวเซลล์ให้ความร้อนทางท่อแก้วทั้ง 3 ท่อ โดยใช้ระบบ Bypass สำหรับปรับอัตราการไหลของตัวอย่าง

Gupta และ Jinda (1992) ได้ออกแบบเซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้าประกอบด้วยท่ออะคริลิก (Acrylic) ยาวเท่ากับ 8 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4 เซนติเมตร ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของท่อ มีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสอยู่กึ่งกลางและแผ่นประกบ โดยใช้ฉนวนและสกรูเป็นตัวยึดให้แน่นตามแนวยาวของท่อ มีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล 3 ช่อง โดยช่องหนึ่งเสียบที่ตำแหน่งกลางท่อ ส่วนอีก 2 ช่องที่เหลืออยู่ห่างจากปลายท่อข้างละ 1 เซนติเมตร

Khalaf และ Sastry (1996) ได้ใช้ท่อไพเรกซ์ (Pyrex tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 เมตร สำหรับทำเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในระบบต่อเนื่อง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.72 เมตร บริเวณทางเข้าและออกจากเซลล์ให้ความร้อนได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของตัวอย่างที่เข้าและออกจากเซลล์ การส่งตัวอย่างจากถังเก็บผ่านเข้าเซลล์ให้ความร้อนและออกไปยังถังเก็บจะใช้วิธีการอัดอากาศ

Sarang และคณะ (2008) ได้ออกแบบและศึกษาระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) ซึ่งอัตราการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ ศึกษาการนำไฟฟ้า ตัวอย่างอาหารจำนวน 6 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ แอปเปิ้ลแดง แอปเปิ้ลพันธุ์สีทอง ลูกพีช ลูกแพร์ สับปะรด และสตรอว์เบอร์รี รวมทั้งเนื้อสัตว์ตัดแต่งรูปทรงที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เนื้อไก่ เนื้อหมู และเนื้อวัว โดยทดสอบวิธีให้ความร้อนโดยวิธีการโอห์มมิกที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีความร้อนสูงถึงช่วงอุณหภูมิ 25-140 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของผลไม้ทั้ง 6 ชนิด จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูง โดยค่าการนำไฟฟ้าของสตรอว์เบอร์รีจะมีค่ามากที่สุดและค่าการนำไฟฟ้าของแอปเปิ้ลพันธุ์สีทองจะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด โดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ในขณะที่การนำไฟฟ้าของเนื้อสัตว์ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ชัดเจนได้ โดยพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อสัตว์ทั้งชนิด ขึ้นอยู่กับปริมาณไขมัน จากการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อ แสดงว่าส่วนเนื้อแดงมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าส่วนที่เป็นไขมัน

Assawarachan และคณะ (2013) ได้พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าอาหารเหลวเนื้อเดียว สำหรับการศึกษาส่วนประกอบหลักของชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร มีส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ โอห์มมิกเซลล์ ระบบการวัดสัญญาณไฟฟ้าและระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบปรับแรงดันมิกเซอร์การทำงาน แสดงตามแผนภาพอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Lee และคณะ (2013) ได้ออกแบบระบบทำความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า, เพาเวอร์แอมป์, ออสซิลโลสโคปจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลแบบ 2 ช่องสัญญาณ, เครื่องบันทึกข้อมูล และโอห์มมิกเซลล์ โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าจะสร้างรูปแบบคลื่นต่างๆ ที่ความถี่ตั้งแต่ 1-10 เมกะเฮิร์ตซ์ และเอาต์พุตสูงสุดที่ 5 โวลต์ ส่วนแอมพลิฟายเออร์จะทำงานควบคู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสามารถส่งกำลังได้ 1 กิโลวัตต์ และเพิ่มสัญญาณในช่วง 45 เฮิร์ตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึงส่งออกกระแสไฟฟ้าสลับสูงสุด 141 โวลต์ ส่วนเอาต์พุตแอมพลิฟายเออร์จะถูกเชื่อมต่อกับแต่ละด้านของอิเล็กโทรดไทเทเนียมในโอห์มมิกเซลล์ เมื่อใช้งานฟังก์ชันजेเนอเรเตอร์และเอาต์พุตแอมพลิฟายเออร์ สัญญาณต่างๆ (ความถี่ แรงดันไฟฟ้า และกระแส) จะถูกวัดด้วยออสซิลโลสโคปที่จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลแบบสองช่องสัญญาณ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่สอดอยู่ตรงกลางของภาชนะแก้วทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 2x15x6 เซนติเมตร ที่มีความหนา 0.5 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองคือ 2 เซนติเมตร และพื้นที่หน้าตัดคือ 60 ตารางเซนติเมตร โดยอุณหภูมิจะถูกบันทึกในช่วงเวลา 1 วินาทีโดยเครื่องบันทึกข้อมูลที่เชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์

Darvishi และคณะ (2013) ได้ออกแบบระบบทำความร้อนแบบโอห์มมิก ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ หม้อแปลงแบบเดี่ยว เครื่องวิเคราะห์กำลัง (Lutron DW6090) และบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ มีเซลล์ที่ใช้สร้างจาก กระบอกเทปลอน (Polytetrafluoroethylene: PTFE) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 2.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร และความยาว 0.15 เซนติเมตร และแผ่นโลหะอเล็กโทรดสแตนเลสที่ถอดออกได้ 2 อเล็กโทรดที่มีความหนา 0.2 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างอเล็กโทรดทั้งสองคือ 5 เซนติเมตร เครื่องซึ่งติดตั้งวางลงในเซลล์เพื่อเก็บค่าตัวอย่างมวล วัดอุณหภูมิตัวอย่างด้วยเทอร์โมคัปเปิลเคลือบเทฟลอนชนิด K เพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามไฟฟ้า บนพื้นผิวเซลล์ได้สร้างรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. เพื่อสังเกตการเกิดฟอง การแทรกตัวของเทอร์โมคัปเปิล และไอระเหยออกจากเซลล์

Moraveji และ Ghaderi (2015) ได้ออกแบบระบบให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยความแรงของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (5.04 กิโลวัตต์ต่อเมตร) เพื่อกระตุ้นความร้อนแบบโอห์มมิก มีใช้งานเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ที่เคลือบด้วยเทฟลอนถูกติดตั้งไว้ที่ศูนย์กลางของกระบอกเซลล์ โดยตัวอย่างได้รับความร้อนตั้งแต่ 20 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (ที่มีความถี่ 60 เฮิร์ตซ์) ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 300 โวลต์ และค่าเวลาอุณหภูมิจะถูกบันทึกในเครื่องส่งสัญญาณที่มีตัวแปลงที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

Rajendran และ Sinthiya (2015) ได้ออกแบบเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยกำหนดความยาวและความกว้างของอเล็กโทรดที่ 200x50, 140x50 และ 70x50 มิลลิเมตร ด้วยขนาดข้างต้น โอห์มมิกเซลล์จึงถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอเล็กโทรดที่ 30, 45, 77.5 และ 100 มิลลิเมตร สร้างโดยใช้แก้วหนา 5 มิลลิเมตร ขอบของแก้วถูกต่อเข้าด้วยกันโดยใช้วัสดุประสาน (ซิลิกอนเพสต์) เป็นตัวเสริมเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยหาที่ขอบด้านนอกของเซลล์ พื้นผิวของอเล็กโทรดสแตนเลสสตีลได้รับการขัดเงาให้เรียบเนียนโดยใช้แผ่นทรายเนื้อละเอียด แผ่นอเล็กโทรดขัดเงาหนา 120 มิลลิเมตร

Abdelmaksoud และคณะ (2018) ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่ทำจากโพลีเอทิลีน-โพลีโพรพิลีนเกรด W500 ที่สามารถปรับขนาดได้ และจุดติดตั้งสำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิ (Type K) มีการติดตั้งเครื่องจ่ายไฟที่ 230 โวลต์ โดยใช้กระแสสลับ (60 เฮิร์ตซ์) โดยตัวของอเล็กโทรดได้ใช้เป็นวัสดุไทเทเนียมที่มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนสูง ภายใต้สถานะความเป็นเบส 13 โดยมีระยะห่างของอเล็กโทรดที่ 3.945 เซนติเมตร และความกว้าง 9.5 เซนติเมตร และได้มีการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 30, 35 และ 40 โวลต์ จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการที่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นถูกทำให้เย็นลงในอ่างน้ำแข็ง

Hardinasinta และคณะ (2019) ได้สร้างเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีอเล็กโทรดเป็นวัสดุสแตนเลสสองตัวที่มีฟาดแรงดันเป็นวัสดุเทฟลอนไว้ที่ปลายแต่ละด้านและเทอร์โมคัปเปิลถูกเสียบไว้ที่ตรงกลาง โดยอเล็กโทรดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างอเล็กโทรดยาว 12.1 เซนติเมตร โดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จ่ายไฟและเครื่องบันทึกข้อมูล โดยบันทึกค่า ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ระหว่างการทำความร้อนแบบโอห์มมิก โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80, 85 และ 95 องศาเซลเซียส

Zhang และคณะ (2021) ได้ออกแบบเซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งประกอบไปด้วยท่อแก้วเป็นฉนวนไฟฟ้าทรงกลม (ทอสเปเซอร์) และอเล็กโทรดใช้วัสดุสแตนเลสทรงกลมสองอันวางอยู่ที่ปลายท่อ (ทางเข้าและทางออก) ส่วนของขนาดของตัวทำความร้อน (ความยาวของโอห์มมิกเซลล์) คือ 2.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อแก้ว คือ 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก คือ 60 มิลลิเมตร และแรงดันไฟฟ้า คือ 2,304 โวลต์

Gratz และคณะ (2021) ได้ออกแบบระบบการทำความร้อนแบบโอห์มมิก ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนำร่อง โดยใช้ฟลัสโซโพลาร์ฮีเทียมที่อัตราการเกิดซ้ำของฟลัสที่ 12 กิโลเฮิร์ตซ์ ระบบมีกำลังสูงสุดอยู่ที่ 15 กิโลวัตต์ และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 500 โวลต์ โดยการปรับความกว้างของฟลัส (ระหว่าง 10-40 ไมโครวินาที) จะมีการจ่ายพลังงานคงที่ในระหว่างการให้ความร้อน โดยได้มีการทดลองดำเนินการโดยใช้ท่อโอห์มมิกเซลล์แบบ 2 ชั้นทรงกระบอก ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้ทนการทำความร้อนสม่ำเสมอในสภาวะการฆ่าเชื้อ ตัวโอห์มมิกเซลล์ทำจากโพลีโอเทอรอีเทอร์อีโตนและอีเล็กโทรดสแตนเลส โดยโอห์มมิกเซลล์นี้สร้างขึ้นเพื่อให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 130 องศาเซลเซียส และทำการลดจุดเย็นด้านนอกให้เหลือน้อยที่สุด โดยการให้ความร้อนแก่ท่อเซลล์ด้านนอก ไปพร้อมๆ กันในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Jung และคณะ (2022) ได้ออกแบบระบบทำอาหารแบบโอห์มมิก ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเทฟลอนแบบสั่งทำพิเศษที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร ท่อโอห์มมิกเซลล์ที่ขนาด 111×88×60 มิลลิเมตร อีเล็กโทรดไทเทเนียมชนิดฮีเทียม ซึ่งอยู่ที่ปลายทั้งสองของท่อโอห์มมิกเซลล์ ระยะห่าง 2.5 เซนติเมตร โดยอีเล็กโทรดไทเทเนียม เพื่อช่วยลดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าให้เกิดน้อยที่สุด เทฟลอนขนาด 110×20×95 มิลลิเมตร และได้ใช้หม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 60 เฮิร์ตซ์กระจายทั่วทั้งตัวอย่าง ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการคงอยู่ในระหว่างการปรุงแบบโอห์มมิก ข้อมูลอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า และกระแส ได้รับการตรวจสอบและบันทึกโดยใช้ระบบเก็บข้อมูล 34970A ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดความสม่ำเสมอของกระบวนการและค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบ (SPC) ของระบบการปรุงอาหารแบบโอห์มมิก

Gavahian และ Chu (2022) ได้ออกแบบระบบทำความร้อนแบบโอห์มมิก ด้วยแรงดันไฟฟ้าและความถี่สูงสุด 300 โวลต์ และความถี่ 999.9 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยระบบประกอบไปด้วยอีเล็กโทรดสแตนเลส 2 อีเล็กโทรด ขนาด 32×10^{-4} ตารางเมตร มีช่องว่าง 9 เซนติเมตร ใช้งานเป็นเซลล์ทรงกระบอก 2 ชั้นที่ขนาดความจุ 1 ลิตร และใช้งานระบบบันทึกและอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิ 12 ช่องสัญญาณ ได้นำมาใช้งานกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาที โดยเงื่อนไขการประมวลผลเลือกตามผลลัพธ์เบื้องต้นที่เกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาระบบโอห์มมิกทั้งนี้เบื้องต้นได้ใช้งานแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 110 โวลต์

Moongngarm และคณะ (2022) ได้ออกแบบโอห์มมิกเซลล์ ขนาด 14.4×14.4×1.5 เซนติเมตร ที่อยู่ระหว่างอีเล็กโทรดไทเทเนียม ขนาด 40×30 มิลลิเมตร เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ OH อีเล็กทริกและได้ติดตั้งบนขาตั้งเทฟลอน จากนั้นได้ทดลองจ่ายกระแสสลับ 50 เฮิร์ตซ์ ใช้ระดับความแรงของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันสามระดับตั้งแต่ 75, 150 และ 200 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยให้ค่าความร้อน ค่าแรงดัน ค่ากระแส และค่าอุณหภูมิจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่อง โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมเครื่องบันทึกข้อมูล เมื่ออุณหภูมิหลักของแต่ละตัวอย่างในโอห์มมิกเซลล์ถึงค่าสูงสุด อุณหภูมินี้จะถูกคงไว้เป็นเวลาทั้งสิ้น 1 นาที

2.3.1 การออกแบบเซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า (Cell ohmic)

โอห์มมิกเซลล์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทนความร้อนสูง เช่น ท่ออะคริลิก (Acrylic Tube) ท่อเทฟลอน (Teflon Tube) ท่อไพเรกซ์ (Pyrex tube) หรือพลาสติกวิศวกรรมชั้นสูงชนิดต่างๆ เพื่อใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ปลายทั้งสองด้านของโอห์มมิกเซลล์ จะประกอบด้วยแผ่นอีเล็กโทรด ซึ่งมีหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลเข้าสู่อาหาร แผ่นอีเล็กโทรดส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นโลหะ เช่น แผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel) ซึ่งมีความทนทานต่อ

การกักต้อนของกรดจากอาหารได้ดี และมีความแข็งแรงของโครงสร้างเป็นอย่างดี การออกแบบโอห์มมิกเซลล์และการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ เป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

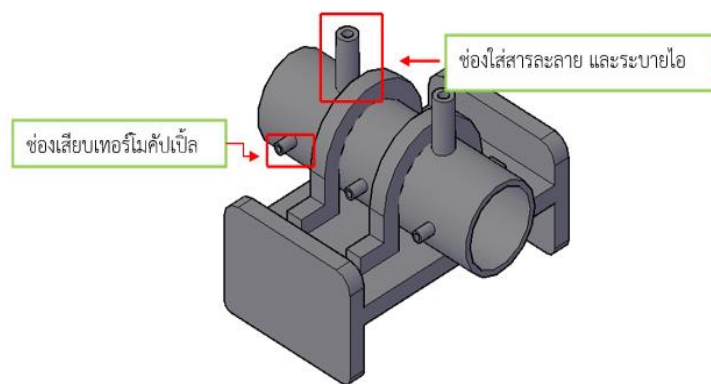
2.3.1.1 สามารถถอดออกและรักษาความสะอาดได้ง่าย

2.3.1.2 พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบ

2.3.1.3 พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารสามารถทำความสะอาดและทั่วถึง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นโลหะที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น เหล็กปลอดสนิม เหล็กธรรมดา เหล็กหล่อ เหล็กอาบสังกะสี ดีบุก ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น ในขณะที่วัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างโอห์มมิกเซลล์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความสามารถทนความร้อนได้สูง

การออกแบบโอห์มมิกเซลล์จึงออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 15 เซนติเมตร ทั้งๆที่ในการคำนวณมีค่า 16 เซนติเมตร แต่เพื่อให้สารละลายหรือตัวอย่างอาหารไหลผ่านเข้าเซลล์อย่างเต็มที่ จึงออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 15 เซนติเมตร โดยขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นไร้สนิมเบอร์ 316 โอห์มมิกเซลล์ทำจากท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 4.4 เซนติเมตร และระหว่างท่อเจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 ช่องเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิ โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type) และเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล เพื่อนำไปประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งโอห์มมิกเซลล์ที่ออกแบบจะแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพ 2.2 แบบร่างทางวิศวกรรมแสดงเซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า (Ohmic cell)

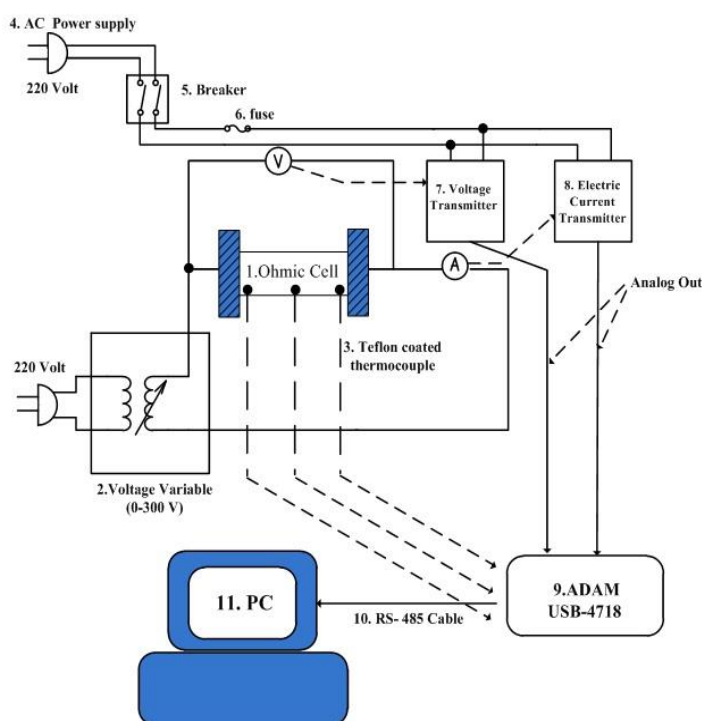
2.3.2 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าชนิดปรับแรงดัน

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ ซึ่งเป็นหม้อไฟฟ้าชนิดปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ โดยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ไม่นิยมระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) เนื่องจากการให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis Reaction) ส่งผลให้เกิดการกร่อนที่ผิวของอิเล็กโทรด

อย่างรุนแรง และเกิดเป็นตะกอนของสนิมออกไซด์ของโลหะ ซึ่งเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในอาหาร จึงนิยมใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับในการศึกษาการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมากกว่า อย่างไรก็ตามระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าต่ำกว่า 5 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความเสี่ยงในการเกิดกร่อนที่ผิวของอิเล็กโทรด และเกิดเป็นตะกอนของสนิมออกไซด์ของโลหะได้เช่นกัน (Lamsal, 1994) ดังนั้นการเลือกระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงรูปแบบ และความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ใช้ให้เหมาะสม

2.3.3 ระบบการวัดและควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้า

เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์ แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้ามาตรฐานและรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลแอนะล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (Analog or Digital Transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

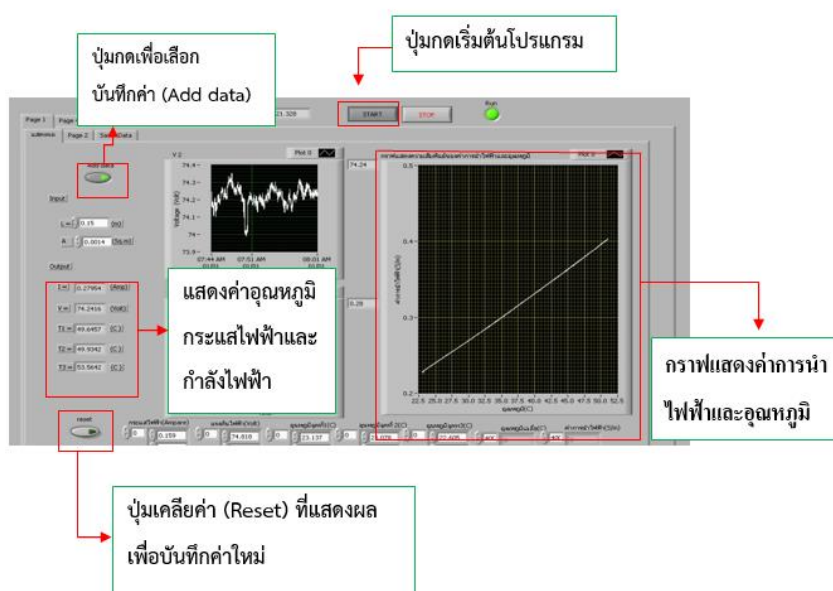


ภาพ 2.3 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

- 1) โอห์มมิกเซลล์ 2) อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า 3) สายเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ 4) แหล่งพลังงาน 5) เบรกเกอร์ 6) ฟิวส์ 7) อุปกรณ์เปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสัญญาณมาตรฐาน 8) อุปกรณ์เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณมาตรฐาน 9) อุปกรณ์บันทึกสัญญาณมาตรฐาน 10) สายเชื่อมต่อ RS-485 11) คอมพิวเตอร์ประมวลผล

ที่มา : Assawarachan และคณะ (2013)

หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีหลักการดังนี้ เมื่อดำเนินปรับอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า (2) เข้าสู่โอห์มมิกเซลล์ที่มีตัวอย่างอาหารเหลวบรรจุอยู่ นั้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในระบบ จะถูกปรับเปลี่ยนด้วยอุปกรณ์เปลี่ยนเป็นค่าสัญญาณมาตรฐาน (7,8) เป็นสัญญาณไฟฟ้าขนาด 4-20 มิลลิแอมป์ หรือ 0-10 โวลต์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น เวลา อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าถูกบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูล (9) และถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า ที่เวลา และอุณหภูมิใดๆ ตามสมการ (2.1) ต่อไป ภาพที่ 2.4 และ 2.5 แสดงหน้าจอควบคุมการทำงานของโปรแกรมวัดค่าการนำไฟฟ้า และแผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ตามลำดับ



ภาพ 2.4 หน้าจอควบคุมการทำงานของโปรแกรมวัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก
ที่มา : Assawarachan และคณะ (2013)

2.4 การทวนสอบความถูกต้องของอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้า

การทวนสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าสมบัติในด้านต่างๆ ของอาหารต้องมีการทวนสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อน วิธีการตรวจสอบความแม่นยำในการวัดข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การทวนสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐาน และการทวนสอบด้วยการสารมาตรฐานที่ทราบสมบัติทางเคมี-กายภาพ สำหรับการทวนสอบความถูกต้องของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร นิยมใช้วิธีการทวนสอบกับค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐาน Lyle และ Hosking (1902) ได้ศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (S/m) ของสารละลายเกลือ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 2.1) เพื่อใช้สำหรับการทวนสอบความถูกต้องในการวัดค่าการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว

Assawarachan และคณะ (2013) ได้พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าอาหารเหลวเนื้อเดียวสำหรับการศึกษาและใช้ค่าสารละลายเกลือที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 20–80 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งพบว่าค่าการนำไฟฟ้าค่าของสารละลาย น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กับค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐานของสารละลาย น้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

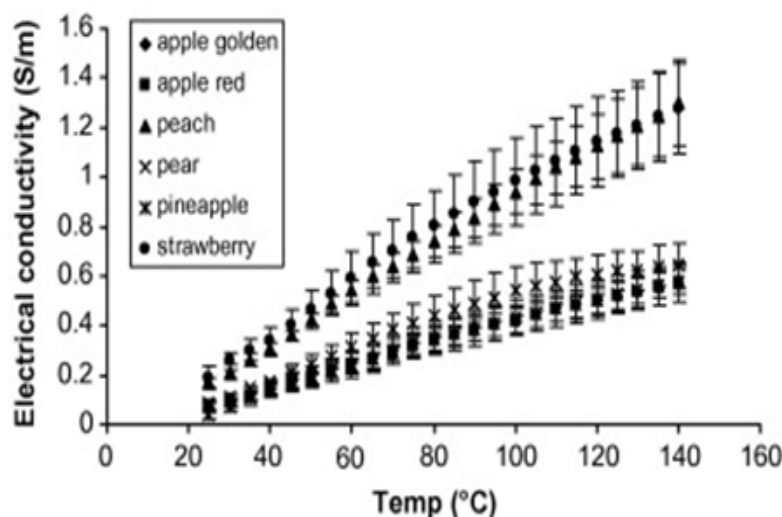
ตาราง 2.1 ค่าการนำไฟฟ้า (S/m) ของสารละลายเกลือ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าการนำไฟฟ้า (S/m) ของสารละลายเกลือแกง (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (M)					
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0
0	0.5938	0.5697	0.5375	0.4785	0.3978	0.3230
10	0.7848	0.7370	0.6937	0.6125	0.5411	0.4136
15	0.8854	0.8812	0.7778	0.6916	0.6060	0.4588
18	0.9476	0.8920	0.8276	0.7406	0.6443	0.4895
20	0.9888	0.9360	0.8656	0.7755	0.6710	0.5095
30	1.2215	1.1447	1.0610	0.9471	0.8028	0.6237
40	1.4580	1.3630	1.2500	1.1240	0.9447	0.7428
50	1.7130	1.5850	1.4430	1.3090	1.1070	0.8636
60	1.9770	1.8320	1.6460	1.5060	1.2930	0.9906
70	2.2420	2.0660	1.8450	1.7170	1.4850	1.1110
80	2.5230	2.3220	2.0590	1.1910	1.8330	1.2370
90	2.810	2.5870	2.3060	2.1020	1.9610	1.3340
100	3.1410	2.2900	2.5740	2.2880	2.0480	1.4870

ที่มา : Lyle และ Hosking, (1902)

2.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าของ Sarang และคณะ (2008) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.5 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ชนิดต่างๆ (น้ำแอปเปิล น้ำพีช น้ำสับปะรด น้ำลูกแพร์ และน้ำสตรอว์เบอร์รี่) ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-140 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่น้ำสับปะรด และน้ำสตรอว์เบอร์รี่มีความเป็นกรดที่สูงจะมีอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า น้ำแอปเปิล น้ำพีช และน้ำลูกแพร์ ที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ



ภาพ 2.5 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ชนิดต่างๆ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก
ที่มา : Sarang และคณะ (2008)

ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยผนังเนื้อเยื่อที่มีโปรโตเพกทินเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเกิดการเสียสภาพ (Protopectin Breakdown) และอ่อนตัวลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อนทำให้น้ำในเนื้อเยื่อเซลล์ไหลผ่านออกมาโดยน้ำภายใต้เนื้อเยื่อเซลล์จะประกอบด้วยสารอาหาร เกลือแร่ และไอออนจำนวนมาก ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้น จึงช่วยกระตุ้นการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้อาหารมีการนำไฟฟ้าที่มากขึ้น โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ และมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.2)

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (2.2)$$

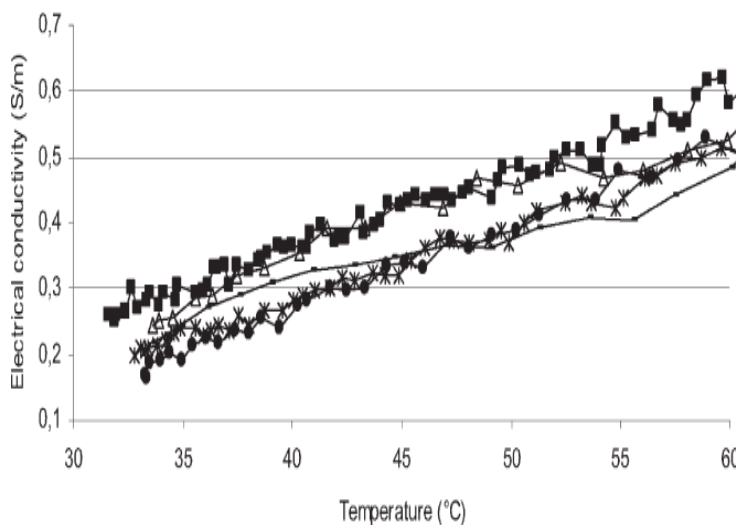
เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว (ซีเมนส์ต่อเมตร: S/m), T คือ อุณหภูมิของอาหารเหลวในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (องศาเซลเซียส: °C) และ B_1 , C_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า (Icier and Ilcali, 2005a)

นอกจากค่าการนำไฟฟ้าของอาหารที่มีผลการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแล้ว ผลของความเข้มข้นไฟฟ้าและความเข้มข้นของอาหารที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าพบว่าเมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะการเพิ่มความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มข้นของอาหารเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีความสามารถไหลผ่านอาหารที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี ภาพที่ 2.13 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 20, 30, 40, 50 และ 60 โวลต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ

เมื่อค่าความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่ออัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3)

$$\sigma \text{ (S/m)} = D_1 (E)^{N_1} + B_2 T + C_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ E คือ ค่าความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร: V/cm), D_1 , N_1 , B_2 , C_2 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า (Icier and Ilicali, 2005b)



ภาพ 2.6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้ม (ปริมาณเนื้อส้มคงที่ ที่ 0.60 เปอร์เซ็นต์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก)

ในระหว่างการให้ความร้อนแบบไอหม้มิก ที่ระดับความเข้มข้นสแนมไฟฟ้า 5 ระดับ

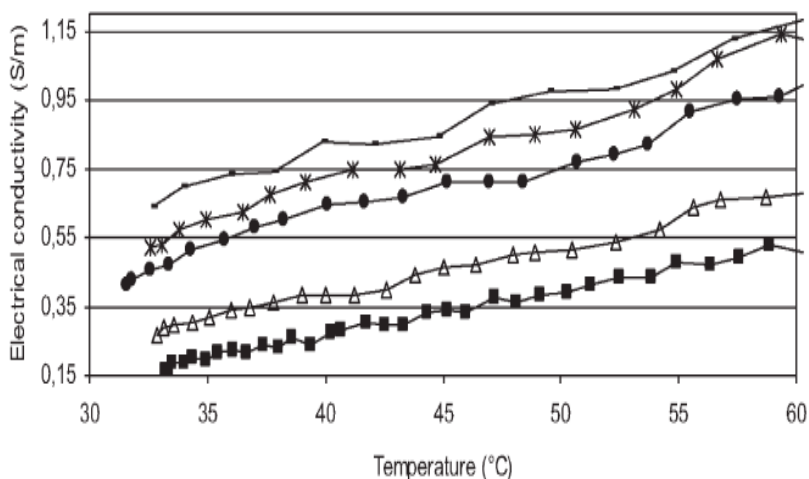
ที่มา : Icier และ Ilicali, (2005b)

Assawarachan (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่ความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำองุ่นแดง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำองุ่นแดงได้เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยเมื่อมีความเข้มข้นหรือมีปริมาณของแข็งในอาหารที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านในตัวกลางของแข็งได้ดีกว่าของเหลว ดังนั้นเมื่ออาหารมีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีพื้นที่ในการไหลผ่านในอาหารได้มาก ส่งผลให้มีสมบัติค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Drvishi และคณะ (2011) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะนาว ต่างจากผลการวิจัยของ Icier และ Ilicali (2005b) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้า และปริมาณเนื้อส้มที่ผสมในน้ำส้มที่ระดับ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 กรัมของเนื้อส้มต่อน้ำหนักของน้ำส้มทั้งหมด พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการนำไฟฟ้าลดลง เมื่อน้ำส้มมีปริมาณเนื้อส้มมากขึ้น (ภาพ 2.6) เนื่องจากส่วนประกอบของเนื้อส้มและเกล็ดส้ม

ที่ผสมมีโครงสร้างเป็นเส้นใยเนื้อสัมผัส (Fiber) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าปริมาณเนื้อสัมผัสที่ผสมจะเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านได้ในส่วนที่เป็นเฟสของเหลว ดังนั้นในกรณีของน้ำสัมผัสที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสผสมในปริมาณที่มาก และมีน้ำสัมผัสที่เป็นเฟสของเหลวที่สามารถนำไฟฟ้าที่มีปริมาณน้อย ส่งผลให้ช่องทางการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าลดลง ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสัมผัสที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสในปริมาณที่น้อยมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสัมผัสที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสในปริมาณที่มาก โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า และสัดส่วนของแข็งที่แขวนลอยในน้ำผลไม้ไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.4)

$$\sigma \text{ (S/m)} = E_1 (M \times 100)^{N_3} + D_2 \text{ (V/cm)}^{N_2} + B_3 T + C_3 \quad (2.4)$$

เมื่อ M คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแข็งที่แขวนลอยในน้ำผลไม้ (กรัมของเนื้อผลไม้ต่อกรัมของน้ำผลไม้) $E_1, D_2, N_2, N_3, B_3, C_3$ คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า

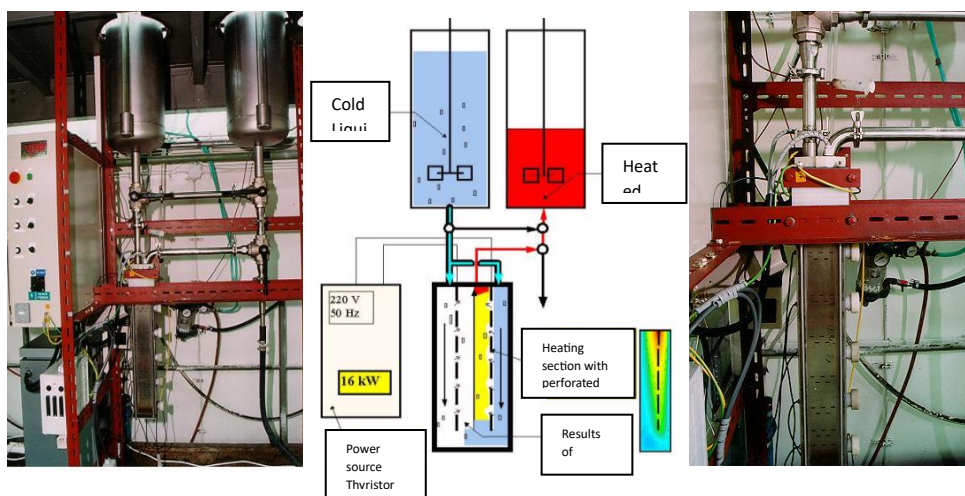


ภาพ 2.7 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสัมผัสระหว่างการให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิก ที่ช่วงอุณหภูมิ 32.5–60 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นโดยมวล 5 ระดับ
ที่มา : Icier และ Ilicali, (2005)

2.5 การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิกในระดับอุตสาหกรรม

การให้ความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิกมีข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรมหลายประการ นักวิจัยในกลุ่มเทคโนโลยีและวิศวกรรมอาหารต่างให้ความสนใจศึกษาการให้ความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิก เพื่อการแปรรูปอาหาร เช่น กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแต่ใช้เวลาสั้น (High temperature short time: HTST) และการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (Aseptic Processing) บริษัท APV Baker ประเทศอังกฤษได้ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของกระบวนการให้ความร้อนแบบไอหุ้มมิกสำหรับการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่อง (Continuous aseptic processing) โดยออกแบบระบบสร้างความร้อนด้วยวิธีไอหุ้มมิกเป็นท่อรูปทรงสี่เหลี่ยม (Zitny และคณะ, 2003) เมื่ออาหารเหลวไหลเข้าสู่ท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมระบบปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่อาหาร และเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็น

พลังงานความร้อนจุนอาหารได้รับความร้อนตามกำหนดไว้ อาหารจะถูกส่งไปยังถังปลอดเชื้อเพื่อรอการบรรจุ (ภาพ 2.8-2.9)



ภาพ 2.8 การสเตอริไลซ์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง
ที่มา : Zitny และคณะ, (2003)



ภาพ 2.9 ระบบการแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่อง
ที่มา : Ramaswamy และคณะ, (2005)

รายงานของ Ramaswamy และคณะ, (2005) มหาวิทยาลัย Ohio State ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ระบุว่าการนำเครื่องแปรรูปแบบปลอดเชื้อด้วยกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง (ภาพ 2.9) ใช้ในอุตสาหกรรมและแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่องในผลิตภัณฑ์แบบพวกน้ำผลไม้เข้มข้น น้ำซूप โดยส่งไปขายในประเทศอิตาลี กรีซ ฝรั่งเศส เม็กซิโก และญี่ปุ่น ในขณะที่ในประเทศอังกฤษใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์ไข่ (Liquid eggs)

Pataro และคณะ, (2011) ศึกษากระบวนการแปรรูปน้ำเชื่อมจากแอพริคอตแบบปลอดเชื้อด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง พบว่าน้ำเชื่อมจากแอพริคอตมีอายุการเก็บมากกว่า 52 สัปดาห์ การพัฒนาวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนในการ

แปรรูปอาหาร และการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะที่การแปรรูปด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพต่ำในการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปสู่อาหาร จึงใช้เวลาในการให้ความร้อนที่ยาวนานกว่าที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในอาหารจะได้รับความร้อนตามสภาวะที่กำหนด ส่งผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร ทั้งในด้านคุณลักษณะทางกายภาพ (สี กลิ่น เนื้อสัมผัส) คุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน จะส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสลายของ รงควัตถุในอาหาร รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล เนื่องจากความร้อนที่สูงและเป็นเวลานาน แต่การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็วและเกิดขึ้นภายในตัวอาหารเอง จึงสามารถช่วยลดสูญเสีย คุณลักษณะทางกายภาพ (สี กลิ่น เนื้อสัมผัส) คุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารได้ดี (ภาพ 2.10) โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วยวิธีโอห์มมิกจะมีคุณภาพที่ดีกว่าการแปรรูปด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



ภาพ 2.10 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก
ที่มา : Ramaswamy และคณะ, (2005)

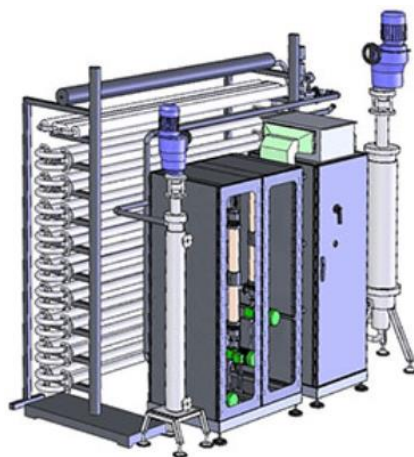
Icier และคณะ, (2006) นำวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (ความเข้มข้นไฟฟ้า 50 โวลต์ต่อเซนติเมตร) ใช้ยับยั้งเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase Inactivation) ถั่วพีตีป่น (Pea puree) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเพียง 54 วินาที เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนเพื่อการยับยั้งเอนไซม์ด้วยการแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3-5 นาที เพื่อให้ถั่วพีตีป่นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาคงอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อนอีก 300 วินาที ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จึงช่วยลดเวลาและพลังงานในกระบวนการลวก เพื่อใช้ยับยั้งเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายงานวิจัยของ Jakób และคณะ, (2010) พบว่าการลวกด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถยับยั้งเอนไซม์ แอลคาไลน์ฟอสฟาเทส (Alkaline phosphatase) เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (Pectin methyl esterase, PME) และเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในนม น้ำ ผัก และผลไม้ ได้ดีกว่าการให้ความร้อนโดยการแช่น้ำร้อนหรือการพ่นละอองไอน้ำ การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในกระบวนการละลายอาหารแช่เยือกแข็งนับเป็นจุดเด่นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความเหมาะสมในด้านต่างๆ สามารถลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการและลดการเสื่อมเสียคุณภาพ อีกทั้งช่วยลดต้นทุนในกระบวนการละลายวัตถุดิบทางอาหารได้เป็นอย่างดี Ohtsuki,

(1993) พบว่าการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง ปลาทูน่า เนื้อวัว และไข่) ด้วยวิธีโอห์มมิก สามารถช่วยลดเวลาในการละลายได้มากถึง 67-75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน และ Fuchigami และคณะ, (1994) ยังพบว่าวิธีการละลายด้วยการให้ความร้อนวิธีโอห์มมิกช่วยลดอัตราการทำลายของโครงสร้างเซลล์และรักษาสภาพของเนื้อสัมผัสได้ดี Yun และคณะ, (1998) ศึกษาการละลายเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็งด้วยการแช่น้ำ และการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ซึ่งพบว่า สามารถช่วยลดเวลาและประหยัดพลังงานในกระบวนการละลายเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็งได้มากกว่าการแช่น้ำ นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็ง (Drip loss) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการละลาย แนวความคิดดังกล่าวได้รับการสนใจและถูกนำไปออกแบบเพื่อสร้างระบบการละลายอาหารแช่เยือกแข็งด้วยการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก อย่างไรก็ตาม ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำแข็งมีค่าประมาณ 0.5×10^{-10} - 6.7×10^{-10} ซีเมนส์ต่อเมตร ซึ่งมีค่าต่ำมากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าสู่เนื้อแข็งได้ ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแช่เยือกแข็งซึ่งน้ำในองค์ประกอบเป็นน้ำแข็งมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ และกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อาหารแช่เยือกแข็งได้เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเพียงเล็กน้อย น้ำแข็งที่ชั้นผิวนอกของอาหารแช่เยือกแข็ง เริ่มเกิดการละลายและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่อาหารแช่เยือกแข็งได้มากขึ้น อัตราการเกิดร้อนและการละลายจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และน้ำแข็งที่ละลายเป็นของเหลวที่ชั้นผิวนอกจะเป็นตัวกลางในการนำความร้อนเข้าสู่ใจกลางและจุดที่ร้อนช้าที่สุดของอาหารแช่เยือกแข็ง (Cold spots) ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งในองค์ประกอบของอาหารแช่เยือกแข็งเริ่มเกิดการละลาย ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแช่เยือกแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่อาหารได้มากขึ้น อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นอย่างมาก และการละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการให้ความร้อนแบบรันอะเวย์ (Runaway heating) การละลายอาหารแช่เยือกแข็งด้วยวิธีโอห์มมิกจึงสามารถใช้แทนระบบการละลายด้วยการแช่น้ำสามารถช่วยประหยัดเวลาและลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการละลายของระบบเดิม ซึ่งการละลายด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถช่วยลดปรากฏการณ์การรวมตัวผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ (Recrystallization) ผลของการเกิดผลึกน้ำขนาดใหญ่ จะไปทำลายโครงสร้างผนังของเนื้อเยื่อเซลล์ในอาหารเกิดการฉีกขาดของเหลวต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารอาหารที่สำคัญภายในโครงสร้างเซลล์ จะไหลซึมออกมาส่งผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (Drip loss) ซึ่งเป็นผลเสียต่อสี รส และการสูญเสียสารอาหาร

Roberts, (1998) ออกแบบเครื่องการละลายด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกใช้ในการละลายปลาทะเลแช่เยือกแข็ง เพื่อใช้งานในระดับอุตสาหกรรม พบว่าสามารถใช้แทนวิธีการละลายด้วยการแช่น้ำวิธีดังกล่าวใช้พื้นที่และน้ำปริมาณมากและมีต้นทุนการดำเนินการที่สูงมากซึ่งประกอบด้วยต้นทุนของค่าน้ำที่ใช้ในการละลายและต้นทุนการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากกระบวนการละลาย น้ำทิ้งหลังการละลายด้วยวิธีการแช่น้ำจะมีอัตราการเน่าเสียที่สูงมาก เนื่องจากน้ำที่ใช้แช่ในการละลายมีการปนเปื้อนของโปรตีนจากปลา เช่น เลือดหรือเมือกปลาจำนวนมาก โดยเครื่องละลายด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถช่วยลดต้นทุนได้ 48 เปอร์เซ็นต์ หรือสามารถลดต้นทุนเท่ากับ 95,000 ดอลลาร์สหรัฐฯ ต่อปี และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการละลายได้มากกว่า 12.6×10^9 ลิตรต่อปี

จากการศึกษาถึงผลของไฟฟ้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์นั้นที่ผ่านมายังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปมีผลกระทบต่อจุลินทรีย์และองค์ประกอบต่างๆ เช่น เอนไซม์ และกรดแอสคอร์บิกในอาหาร นักวิจัยส่วนใหญ่จึงได้สรุปว่า การทำลายจุลินทรีย์และการสูญเสียสารอาหารต่าง ๆ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังความร้อน ดังนั้นไม่ว่าอาหารจะถูกให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกในด้านประสิทธิภาพเชิงพลังงานนั้น ถึงแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปในอาหารจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน แต่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้ามีราคาต่อกิโลจูลสูงกว่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (น้ำมัน) ดังนั้นการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกอาจจะไม่สามารถช่วยประหยัดต้นทุนด้านพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

บริษัท Agro-process ประเทศแคนาดาประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาเครื่องพาสเจอร์ไรซ์รองรับกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (UHT) และการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยเทคโนโลยี HTST โดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยออกแบบห้องทำความร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกภายในห้องปลอดเชื้อ โดยกำลังไฟฟ้าของระบบเท่ากับ 50 กิโลวัตต์ และสามารถสร้างความร้อนในอาหารเหลวที่มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0.3-1.6 ซีเมนส์ต่อเมตร จากอุณหภูมิห้องถึง 130 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1-3 วินาที โดยมีประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปติดตั้งระบบพาสเจอร์ไรซ์ทดแทนแหล่งการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (ภาพ 2.11)



ภาพ 2.11 เครื่องการแปรรูปด้วยความร้อนของการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยเทคโนโลยีโอห์มมิก

บริษัท Agro-process ประเทศแคนาดา

ที่มา : <http://agro-process.com/en/>

หากเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกกับการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกัน พบว่าการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปในระบบเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนภายในอาหาร และสามารถทำให้อาหารเกิดความร้อนอย่างทั่วถึงไม่ว่าระยะลึกลงไปจากผิวมากเท่าใดก็ตาม ในขณะที่การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อน แล้วอาหารที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปลงพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานความร้อนอีกทีหนึ่ง ซึ่งพลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นในอาหารเฉพาะบริเวณที่รับคลื่นได้ และเกิด

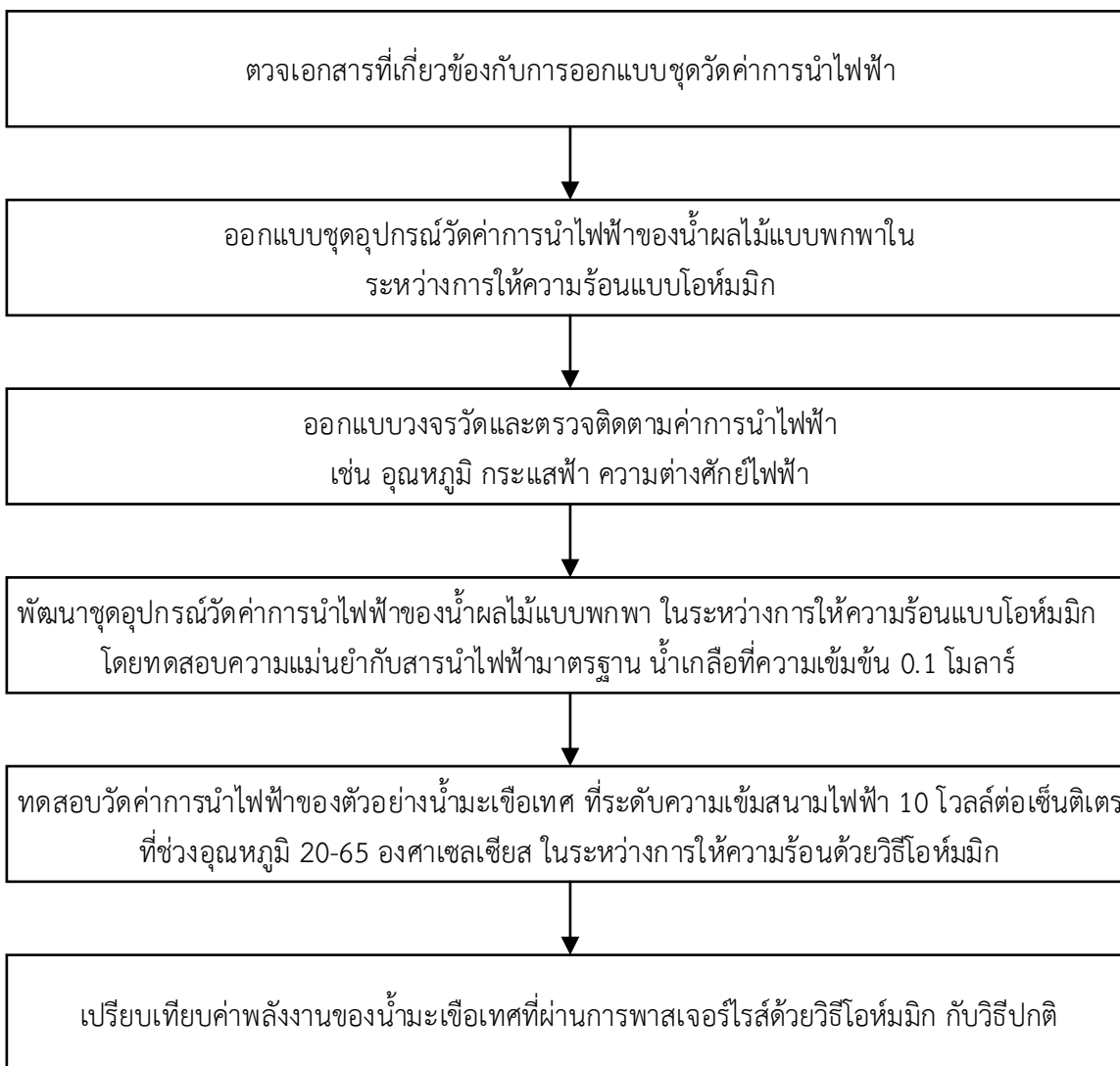
ความร้อนบริเวณที่ผิวมากกว่าส่วนที่อยู่ลึกลงไปจากผิวของอาหาร Assawarachan และ Noomhorm (2008) นวัตกรรมการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจำแนกตามระดับความถี่ ออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating) การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio frequency heating) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) และการให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared heating) ดังมีรายละเอียด

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกซึ่งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมการให้ความร้อนด้วยวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหาร อัตราการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหาร ซึ่งจะแปรผันตรงกับสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหารชนิดนั้นๆ จุดเด่นที่สำคัญของวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก สามารถเกิดความร้อนได้ภายในตัวของมันเองมีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็ว และประสิทธิภาพในการกระจายของความร้อนอย่างสม่ำเสมอเป็นจุดเด่นที่ดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

การสร้างความร้อนแบบโอห์มมิกจึงเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนในการแปรรูปอาหาร เช่น การลวก การพาสเจอร์ไรส์ และการสเตอริไลส์ มีการพัฒนาและสร้างระบบการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อ ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยยับยั้งเอนไซม์ด้วยความร้อนในผักและผลไม้ให้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกยังถูกนำมาใช้ลดเวลาในการหลอมละลายอาหารแช่เยือกแข็งประเภทต่างๆ (Thawing process) สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการละลาย จากการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียได้ดี การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนที่เหมาะสม และสามารถพัฒนาไปสู่การแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 3 วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินโครงการวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก บรรลุตามวัตถุประสงค์มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้



ภาพ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิศวกรรม

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

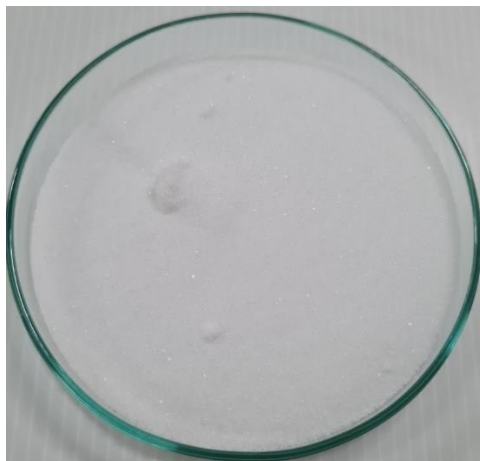
3.1.1 ตัวอย่างอาหารเหลว

3.1.1.1 น้ำผลไม้ (Single state juice)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินโครงการวิศวกรรม

3.1.2.1 สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

3.1.2.2 น้ำกลั่น จำนวน 100 ลิตร



ภาพ 3.2 เกลือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.3.1 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance, Sartorius model CP 224S)

3.1.3.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, Memmert model WNB22)

3.1.3.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Metrohm model 744)

3.1.3.4 เครื่องวัดสีในระบบ CIE L*a*b*

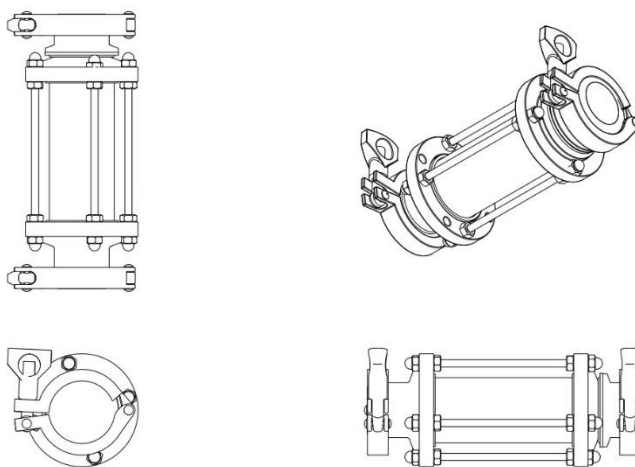
3.1.3.5 เครื่องวัดปริมาณของแข็งในอาหาร (Refractometer) ขนาด 0-n

3.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า

3.2.1 การออกแบบโอห์มมิคเซลล์ ด้วยโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ

โอห์มมิคเซลล์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทนความร้อนสูง เช่น ท่ออะคริลิก (Acrylic Tube) ท่อเทฟลอน (Teflon Tube) ท่อไพเร็กซ์ (Pyrex tube) หรือพลาสติกวิศวกรรมชั้นสูง ชนิดต่างๆ เพื่อใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ปลายทั้งสองด้านของโอห์มมิคเซลล์ จะประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งมีหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลเข้าสู่อาหาร แผ่นอิเล็กโทรดส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นโลหะ เช่น แผ่นเหล็กไร้สนิม (stainless steel) ซึ่งมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดจากอาหารได้ดี และมีความแข็งแรงของโครงสร้างเป็นอย่างดี การออกแบบโอห์มมิคเซลล์และการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ เป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น สามารถถอดออกและรักษาความสะอาดได้ง่าย

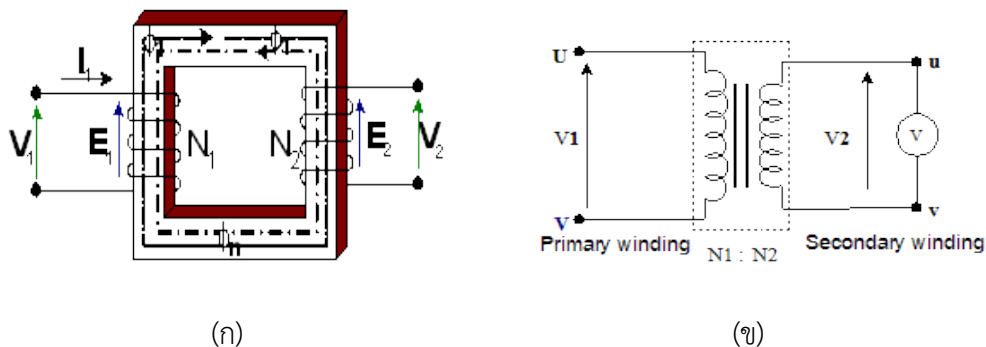
พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบ พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารสามารถทำความสะอาดและทั่วถึง สำหรับวัสดุที่ใช้ในการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นโลหะที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น เหล็กปลอดสนิม เบอร์ 304 หรือ 316 ภาพ 3.3 แสดงการการออกแบบโอห์มมิคเซลล์ ด้วยโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ การออกแบบโอห์มมิคเซลล์จึงออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 10 เซนติเมตร โดยขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นไร้สนิมเบอร์ 316 และโอห์มมิคเซลล์ทำจากท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 46 มิลลิเมตร และระหว่างท่อเจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 ช่องเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิ



ภาพ 3.3 แบบร่าง 3 มิติของการพัฒนาโอห์มมิคเซลล์

3.2.2 การออกแบบระบบตรวจวัดและประมวลผลการวัดค่าการนำไฟฟ้า

การพัฒนาระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคนั้น เป็นเป็นการกำหนดแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับระบบ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันได้ โดยรับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 220 โวลต์ (V) ขนาดกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ (A) เป็น Primary winding และสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 0-250 โวลต์ (secondary winding) ตามที่ต้องการ โดยหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันได้ เป็นไปตามภาพ 3.4

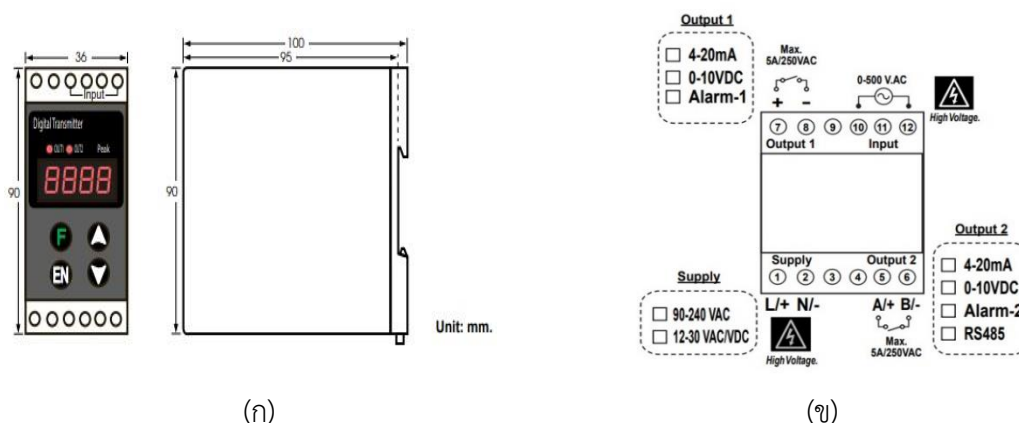


ภาพ 3.4 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันได้ โดยรับค่าพลังงานไฟฟ้า

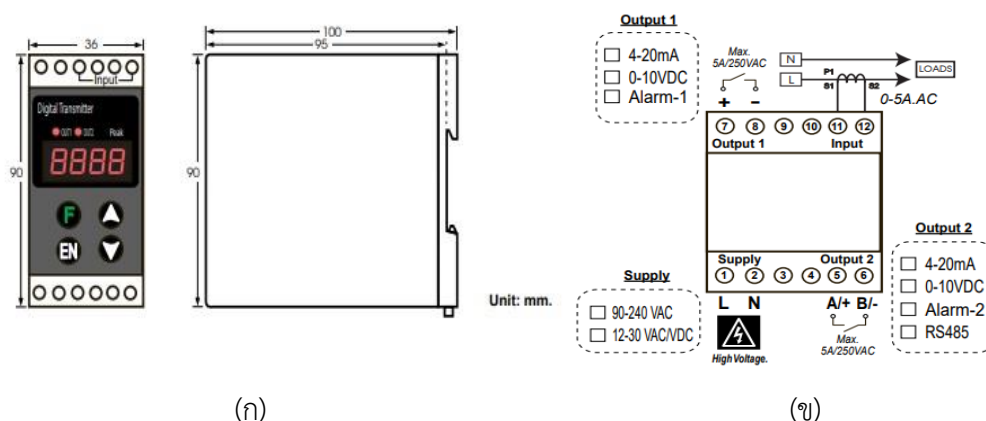
ที่มา : http://www.9engineer.com/index.php?m=reference&a=show&reference_id=1020

3.2.3 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

อุปกรณ์วัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เป็นเซ็นเซอร์ประเภทนี้ใช้หลักการ “นำความร้อน” จำเป็นต้องสัมผัสกับวัตถุเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สามารถใช้ตรวจจับอุณหภูมิของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซในช่วงอุณหภูมิต่างๆ การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์ แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้ามาตรฐานและรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลแอนะล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (Analog or Digital Transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ โดยเซ็นต์วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า แบ่งเป็นอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองอุปกรณ์จะแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐานที่ 4-20 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0-10 โวลต์ ตามภาพ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



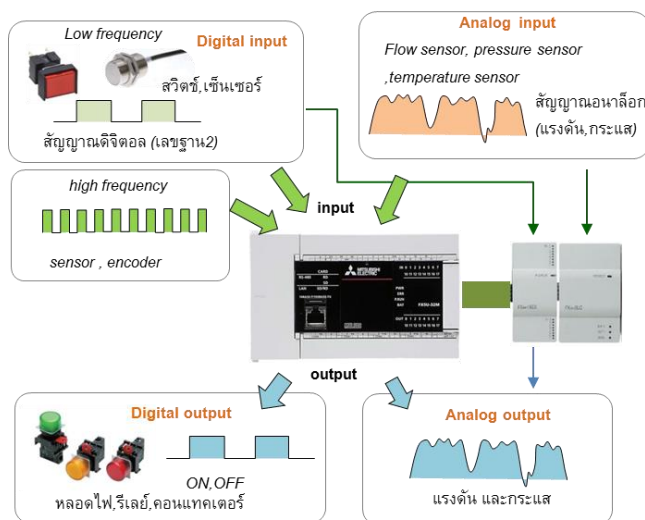
ภาพ 3.5 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า และแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมแปร์



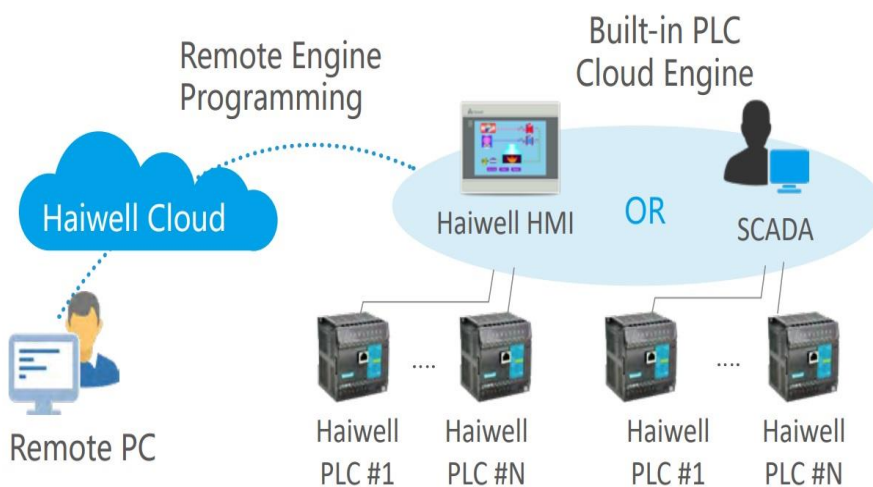
ภาพ 3.6 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า และแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0-10 โวลต์

3.2.4 ระบบประมวลผล

ใช้อุปกรณ์ Programmable Logic Controller (PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบลอจิกที่สามารถเขียนโปรแกรมลงไปได้ PLC บางครั้งก็เรียกสั้นๆว่า PC ซึ่งย่อมาจาก Programmable Controller หรือบางครั้งก็เรียกว่า Sequence Controller โดยอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่างๆ โดยภายในมี Microprocessor เป็นมันสมองสั่งการที่สำคัญ PLC จะมีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งานได้ทันที ตัวตรวจวัดหรือสวิตช์ต่างๆ จะต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตจะใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมาย เราสามารถสร้างวงจรหรือแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนเป็นโปรแกรมคำสั่งเข้าไปใน PLC ภาพ 3.7 และ 3.8 แสดงการ



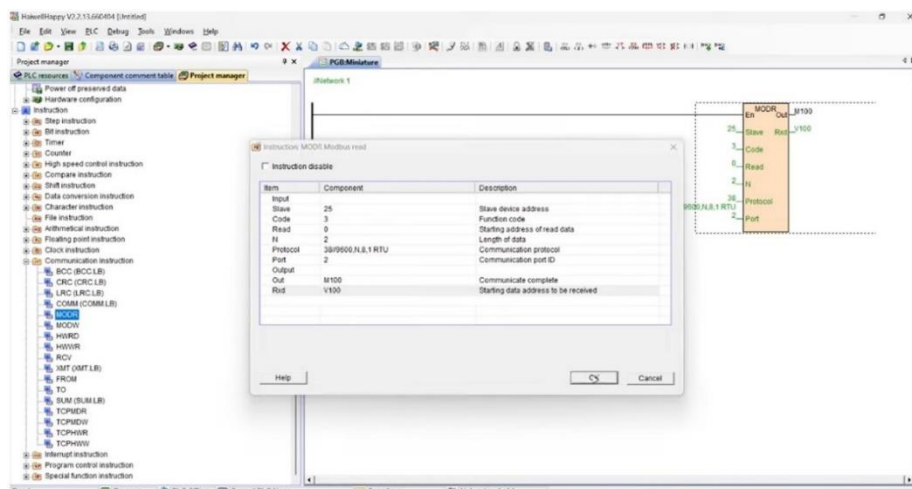
ภาพ 3.7 การทำงานของอุปกรณ์ Programmable Logic Controller (PLC)



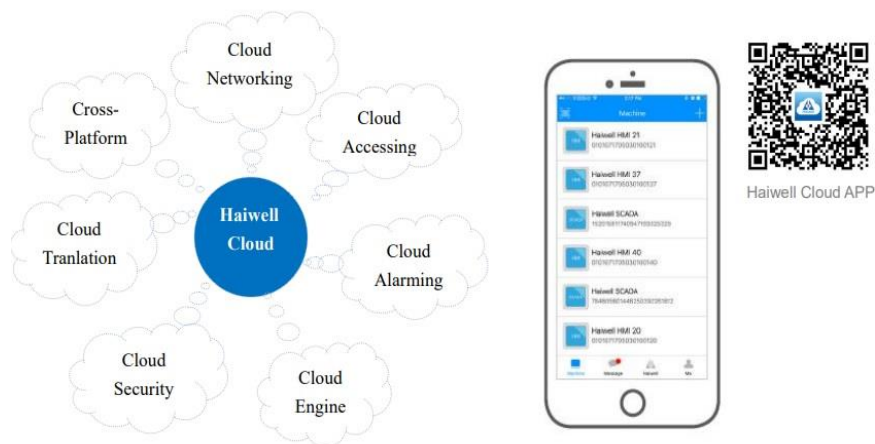
ภาพ 3.8 รูปแบบการทำงานและผ่านระบบ cloud storage ของอุปกรณ์ Programmable Logic Controller (PLC)

3.3 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลว

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control: PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่างๆ โดยภายในมี Microprocessor เป็นมันสมองสิ่งสำคัญ PLC จะมีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งาน ในการดำเนินโครงการวิศวกรรมนี้ใช้การเขียนไดอะแกรมรับสัญญาณทางไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้ามาตรฐานและรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลแอนะล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (Analog or Digital Transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ภาพ 3.12 และ 3.13 แสดงรูปแบบการเขียนไดอะแกรมเบื้องต้น



ภาพ 3.9 การเขียนไดอะแกรมควบคุมการทำงานของ PLC



ภาพ 3.10 รูปแบบการเก็บข้อมูลผ่านระบบ cloud storage

3.4 การทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารมาตรฐาน

3.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการการนำไฟฟ้า

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าของ พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น มีอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ และมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.1)

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (3.1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว, T คือ อุณหภูมิของอาหารเหลวในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และ B_1 , C_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า (Icier และ Ilicali, 2005a)

3.5.2 ผลกระทบของความเข้มข้นไฟฟ้า

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้า พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น มีอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ และมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.2)

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (3.2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว, T คือ อุณหภูมิของอาหารเหลวในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และ B_1 , C_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า (Icier และ Ilicali, 2005a)

3.6.3 การวิเคราะห์ค่าพลังงานในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating) เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหารเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร ดังนั้นการวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ประกอบด้วยพลังงานงานไฟฟ้า ($E_g = \sum I \Delta V t$) เข้าสู่ระบบและเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหาร จนเกิดเป็นความร้อนในตัวอาหาร ($Q_t = m C_p \Delta T$) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา รวมทั้งพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (E_{loss}) ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่เข้าและออกจากระบบในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

$$E_g = Q_t + E_{loss} \quad (3.3)$$

เมื่อ E_g คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่ป้อนพลังงานสู่ระบบค่ากระแสไฟฟ้า (I) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของค่าการนำไฟฟ้าของอาหารได้ดังนี้

$$I = \frac{\Delta V \sigma}{\text{Ohmic Cell } (K_C)} \quad (3.4)$$

เมื่อ Ohmic cell (K_C) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดและพื้นที่หน้าตัด (L/A) ซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสามารถเขียนพลังงานงานไฟฟ้า ($E_g = \sum \Delta V I t$) ในรูปแบบของตัวแปรค่าการนำไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_g = \left(\frac{\Delta V \sigma}{K_C} \right) \Delta V t \quad (3.5)$$

$$= \left(\frac{\Delta V^2 \sigma}{K_C} \right) dt \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในอาหารในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยพิจารณาว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบมีค่าน้อยมากจนไม่มีผลกระทบต่ออัตราการให้ความร้อนด้วยโอห์มมิก (E_{loss}) ความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.7) จึงเป็น

$$\left(\frac{\Delta V^2 \sigma}{K_C} \right) dt = \dot{m} C_p (T_f - T_i) \quad (3.7)$$

ดังนั้น ระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานถูกเขียนอยู่ในพารามิเตอร์ของค่า Ohmic heating system performance coefficients (SPCs) และระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดควรมีค่า SPCs เท่ากับ 1.0 หรือหมายถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่อาหารได้รับ

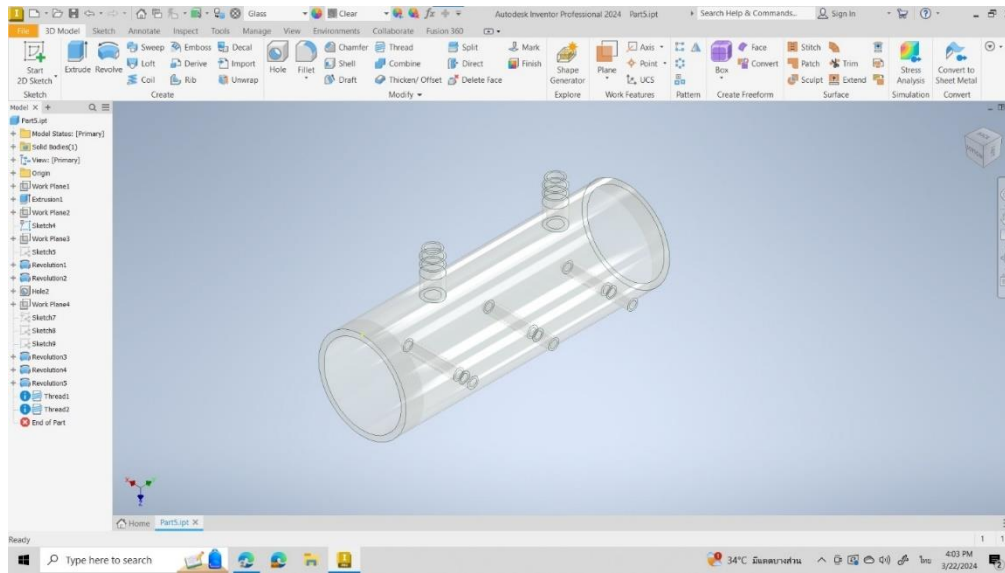
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงการวิศวกรรม เรื่องการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ประกอบด้วยการดำเนินโครงการ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การพัฒนางจรวัดค่าการนำไฟฟ้า การเขียน การพัฒนาโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลผลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller) รวมถึงการ การเชื่อมต่อเครือข่ายรวมของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อถึงกันและสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับระบบคลาวด์ โดยหลังจากที่พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำเร็จ ดำเนินการวิจัยในส่วนที่สี่ ได้แก่ การทดสอบความแม่นยำในการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐาน ด้วยน้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ และการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ และอัตราการให้ความร้อนในระหว่างการให้ความร้อนกับโอห์มมิก โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

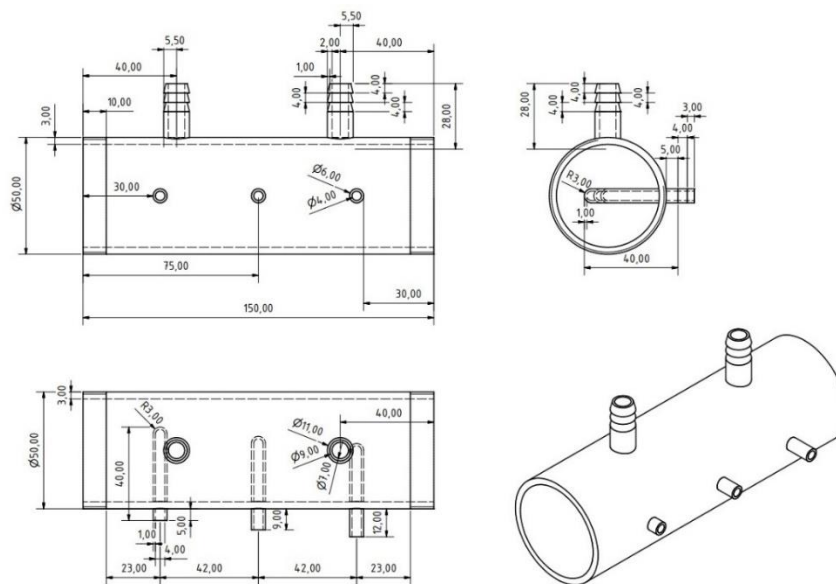
โอห์มมิกเซลล์ที่สำคัญอย่างมากในการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทนความร้อนสูง เช่น ท่ออะคริลิก (Acrylic tube), ท่อเทฟลอน (Teflon tube), ท่อไพเร็กซ์ (Pyrex tube) หรือพลาสติกวิศวกรรม ชั้นสูง ชนิดต่างๆ เพื่อใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการ ทดลอง โดยที่ปลายทั้งสองด้านของโอห์มมิกเซลล์จะประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรด โดยการดำเนินโครงการวิศวกรรมครั้งนี้ดำเนินการพัฒนาและออกแบบโอห์มมิกเซลล์ด้วยโปรแกรม Autodesk Inventor Professional โดยกำหนดให้ตัวเซลล์ทำจากวัสดุเป็นท่ออะคริลิกใส ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทนความร้อนที่สูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างเซลล์ 150 มิลลิเมตร ระหว่างท่อจะเจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู เพื่อกระจายการตรวจวัดค่าอุณหภูมิในตำแหน่งที่ต่างกัน และเจาะอีก 2 รู เป็นท่อทางปลา สำหรับการเติมอาหารเหลวและช่วยระบายไอความร้อนภายในเซลล์ และกลิ้งเกลียวข้างนอกท่ออะคริลิกเพื่อหมุนปิดกับฝาปิดเซลล์ รายละเอียดของส่วนประกอบในการดำเนินการพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบ่งเป็น การออกแบบห้องบรรจุของเหลว และขั้วอิเล็กโทรด



ภาพ 4.1 ออกแบบโอห์มมิกเซลล์ด้วยโปรแกรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1.1 ห้องบรรจุของเหลว (โอห์มมิกเซลล์)

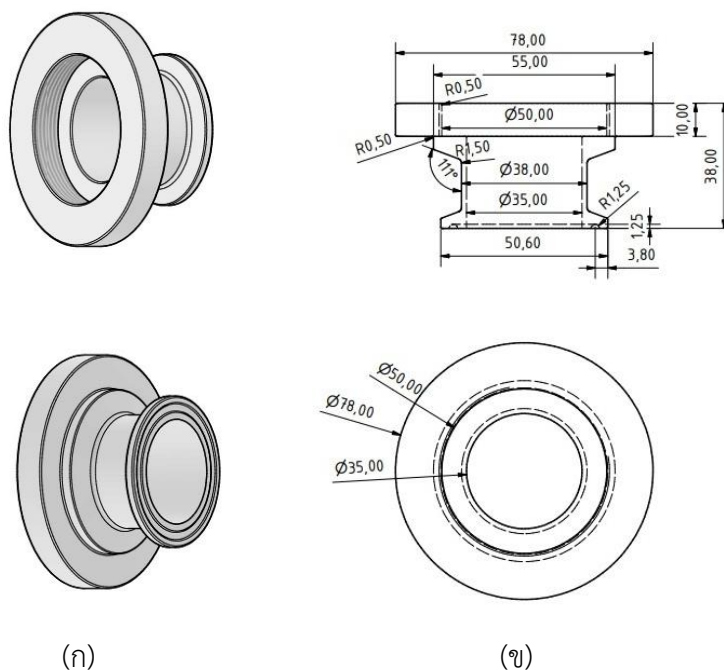
ห้องบรรจุของเหลวทำจากท่ออะคริลิกความหนา 3 มิลลิเมตร โดยมีความยาว 15 เซนติเมตร กิ่งเกลียวที่ผิวด้านนอกประมาณ 5 มิลลิเมตร ระหว่างท่อเจาะรูขนาด 6 มิลลิเมตรเพื่อติดตั้งท่อแก้วสำหรับหัววัดอุณหภูมิ ด้านบนของโอห์มมิกเซลล์ติดตั้ง ท่อเติมของเหลว และทางออกของของเหลว สำหรับระบบการไหลอย่างต่อเนื่อง ภาพ 4.2 แสดงขนาดและตำแหน่งในการติดตั้งส่วนต่างๆ ของการพัฒนาห้องบรรจุของเหลว (โอห์มมิกเซลล์)



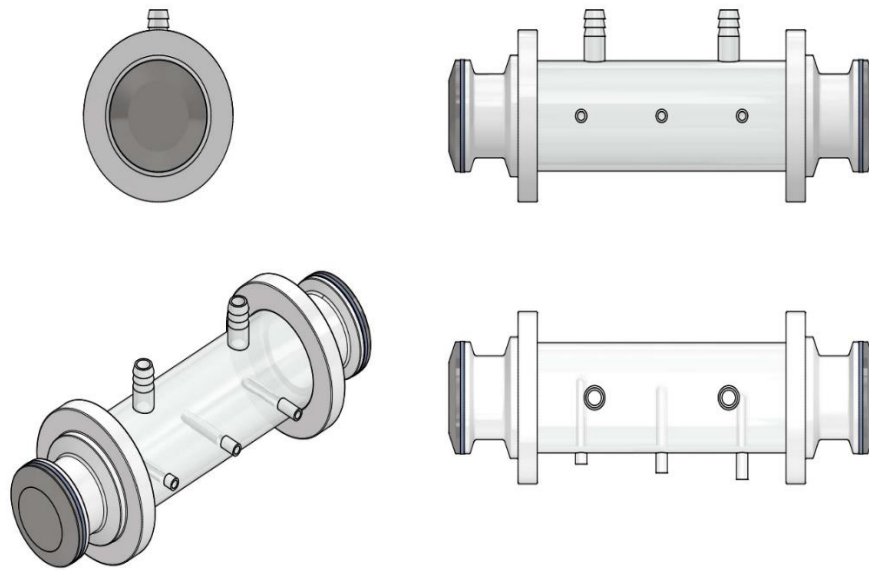
ภาพ 4.2 ขนาดและตำแหน่งในการติดตั้งโอห์มมิกเซลล์

4.1.2 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนาขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหารเหลว ทำจากวัสดุแผ่นสแตนเลสเบอร์ 316 ซึ่งมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดสนิมได้ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ฝาปิดเซลล์ทำจากวัสดุเทปลอน มีคุณสมบัติทนความร้อนสูงถึง 260 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง นำมากลึงโดยให้ข้างนอกมีขนาดรับกับขั้วอิเล็กทรอนิกส์พอดีกับแคลมป์ล็อกสแตนเลส และกลึงเกลียวข้างในเพื่อหมุนปิดกับเซลล์ได้สนิท ภาพ 4.3 แสดงการออกแบบขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และขนาดของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และภาพ 4.4 แสดงการประกอบเข้ากับห้องบรรจุของเหลว หลังจากทำออกแบบเสร็จแล้วดำเนินการพัฒนาโอห์มมิคเซลล์ตามรายละเอียดที่กล่าวมา จากนั้นพัฒนาโอห์มมิคเซลล์ โดยภาพ 4.5 แสดงต้นแบบของการพัฒนาโอห์มมิคเซลล์



ภาพ 4.3 การออกแบบขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และขนาด



ภาพ 4.4 การออกแบบเซลล์และฝาปิดเซลล์



(ก)



(ข)

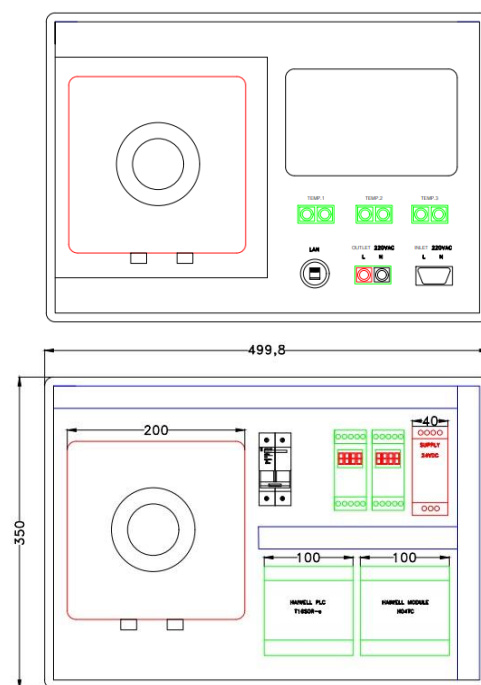
ภาพ 4.5 ต้นแบบของการพัฒนาโอห์มมิคเซลล์

4.2 การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์ แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้ามาตรฐานและรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลแอนะล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (Analog or Digital transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ภาพ 4.6 และ 4.7 แสดงรายละเอียดการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ PLC ลงในกระเป๋าลูมิเนียม เพื่อพัฒนาระบบการวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยวางหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดัน ต่อเข้าอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เข้ากับระบบแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน เข้าสู่โมดูลของ PLC เพื่อประมวลผลและแสดงค่าผ่านหน้าจอมอนิเตอร์แบบทัชสกรีน



(ก)



(ข)

ภาพ 4.6 ลักษณะของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา

(ก) ลักษณะกระเป๋ (ข) ไดอะแกรมในการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนาของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา ใช้ระบบควบคุมและรับสัญญาณด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ใช้ plc Huawei ต่อเชื่อมกับโมดูลในการรับสัญญาณที่แปลงเป็นสัญญาณมาตรฐาน ระบบการวัดและควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้า: เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่

ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่าง การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์ แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้ามาตรฐานและรับข้อมูลมา จากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลแอนะล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (analog or digital transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ ติดตั้งตามรายละเอียดของภาพ 4.7



(ก)



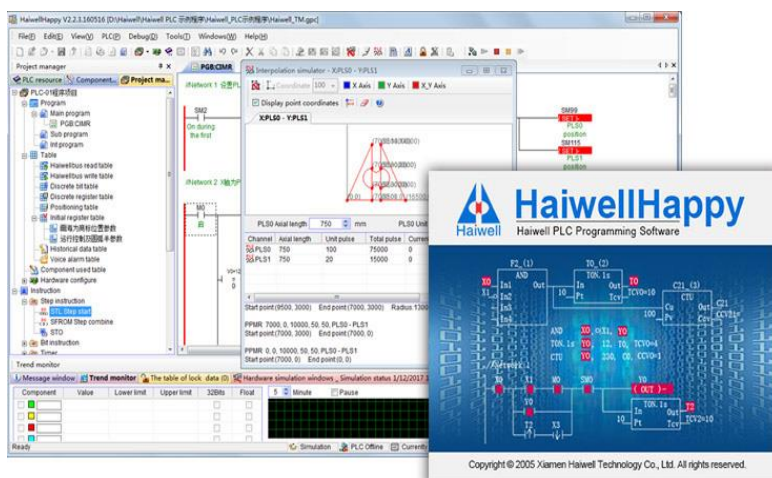
(ข)

ภาพ 4.7 ต้นแบบของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแบบพกพา

4.3 การพัฒนาโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์

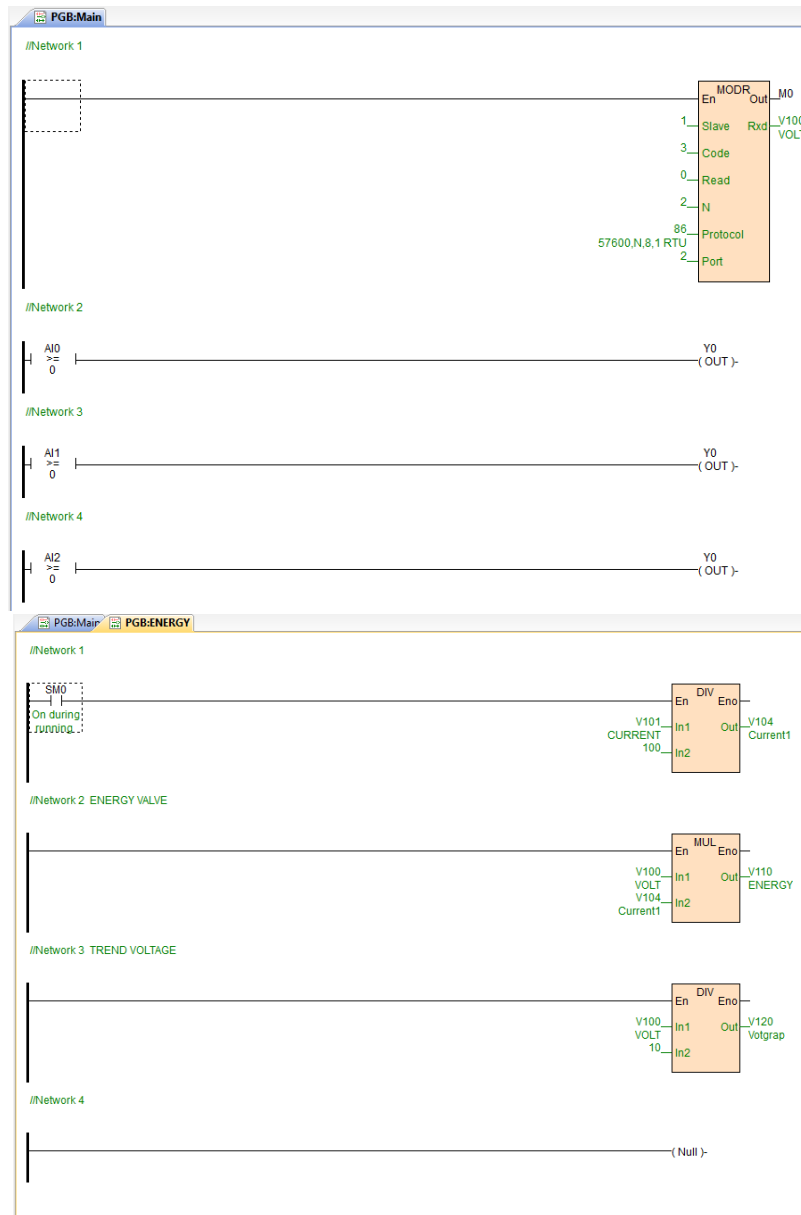
4.3.1 การเขียนแลตเตอร์ไดอะแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า

การพัฒนาโปรแกรมควบคุมชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกด้วยโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์ การดำเนินโครงการนี้ใช้การเขียนแลตเตอร์ไดอะแกรม Ladder Diagram จัดเป็นภาษาสัญลักษณ์ที่สามารถดูตามโครงสร้างแล้วเข้าใจการทำงานแต่เวลาที่ PLC ทำงานจะอาศัยชุดคำสั่ง (Instructions) ทำงานโดยวิธีการเขียนลงในส่วนของ หน่วยความจำ ข้อมูลในหน่วยความจำนั้น จะจัดเก็บเป็นรหัส (Code) หรือตัวย่อสั้นๆอาจจะเรียกว่า “LD” เป็นหนึ่งในภาษาที่อยู่ใน Standard IEC61131-3 ว่าด้วยเรื่องของมาตรฐานการเขียนโปรแกรมบน Programmable Logic Controller (PLC) เป็นภาษาที่มีจุดเด่นในด้านความง่ายในการโปรแกรมที่มีการคำนวณที่ซับซ้อน มีการบวก ลบ คูณ หาร หรือการ mapping ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งถ้าใช้ Ladder Diagram อาจจะใช้จำนวนบล็อกที่มากกว่าในการทำงานอย่างเดียวกัน งานที่มีลักษณะการทำงานเป็นเงื่อนไข (IF ELSE) ก็สามารถจัดการได้ง่ายกว่า หรือแม้กระทั่งคำสั่งวงรูปต่างๆเพื่อนำไปใช้จัดการกับ Array ของข้อมูลจำนวนมาก ก็เหมาะสมอย่างยิ่งกับการเขียนด้วย D-Ladder Structure Diagram แบ่งเป็น Assignments เพื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปร, Expressions เพื่อกำหนดค่าต่างๆ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ให้ความร้อนระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก, Instructions คำสั่งเฉพาะ การป้อนข้อมูลขนาดของโอห์มมิกเซลล์ และ Constructions การจัดการกับโปรแกรม ตามลำดับ

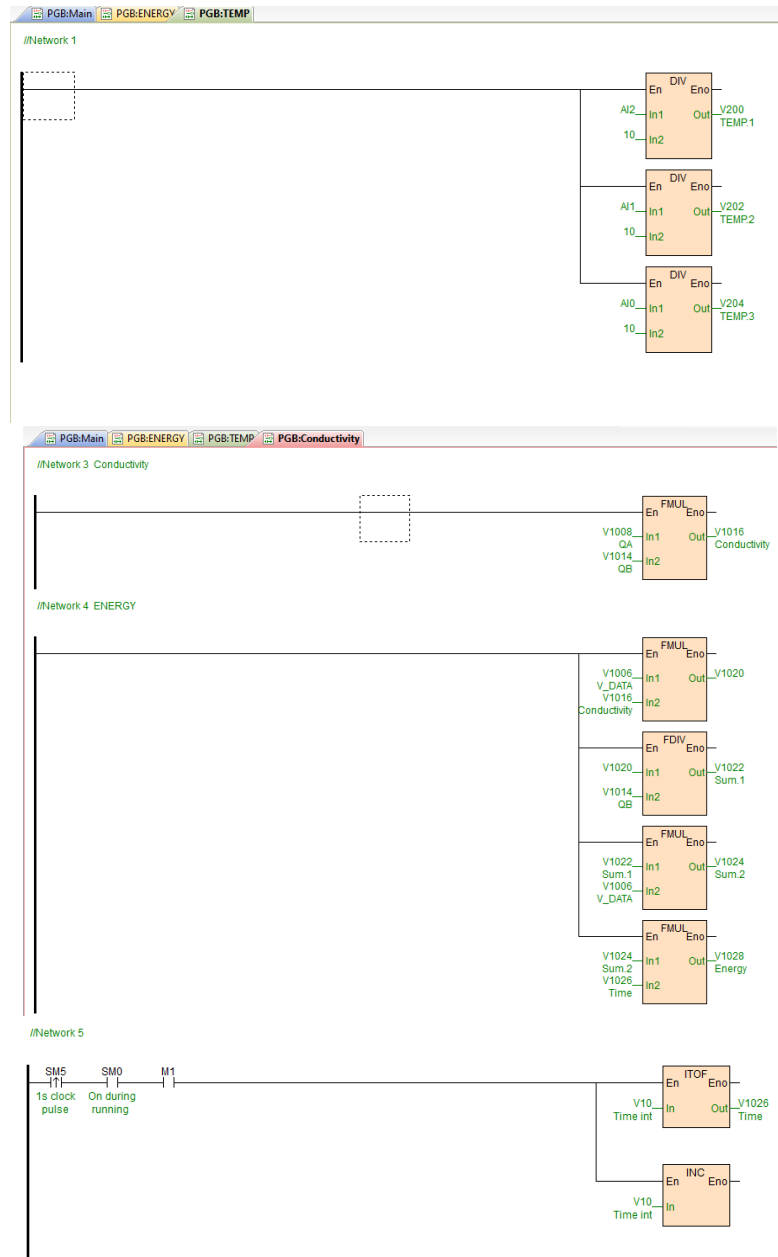


ภาพ 4.8 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์

การดำเนินโครงการใช้อุปกรณ์ประมวลผลด้วยระบบปฏิบัติการ Programmable Logic Controller (PLC) โปรแกรม Haiwell Happy เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ออกแบบการทำงานระบบ PLC โดยภาษาการเขียนโปรแกรมจะอยู่ในรูปของไดอะแกรม LD-Ladder, ไดอะแกรมบล็อกฟังก์ชัน FBD ที่สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows



ภาพ 4.9 การกำหนด Assignments เพื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปร



ภาพ 4.10 Expressions เพื่อการคำนวณต่างๆ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ให้ความร้อนระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

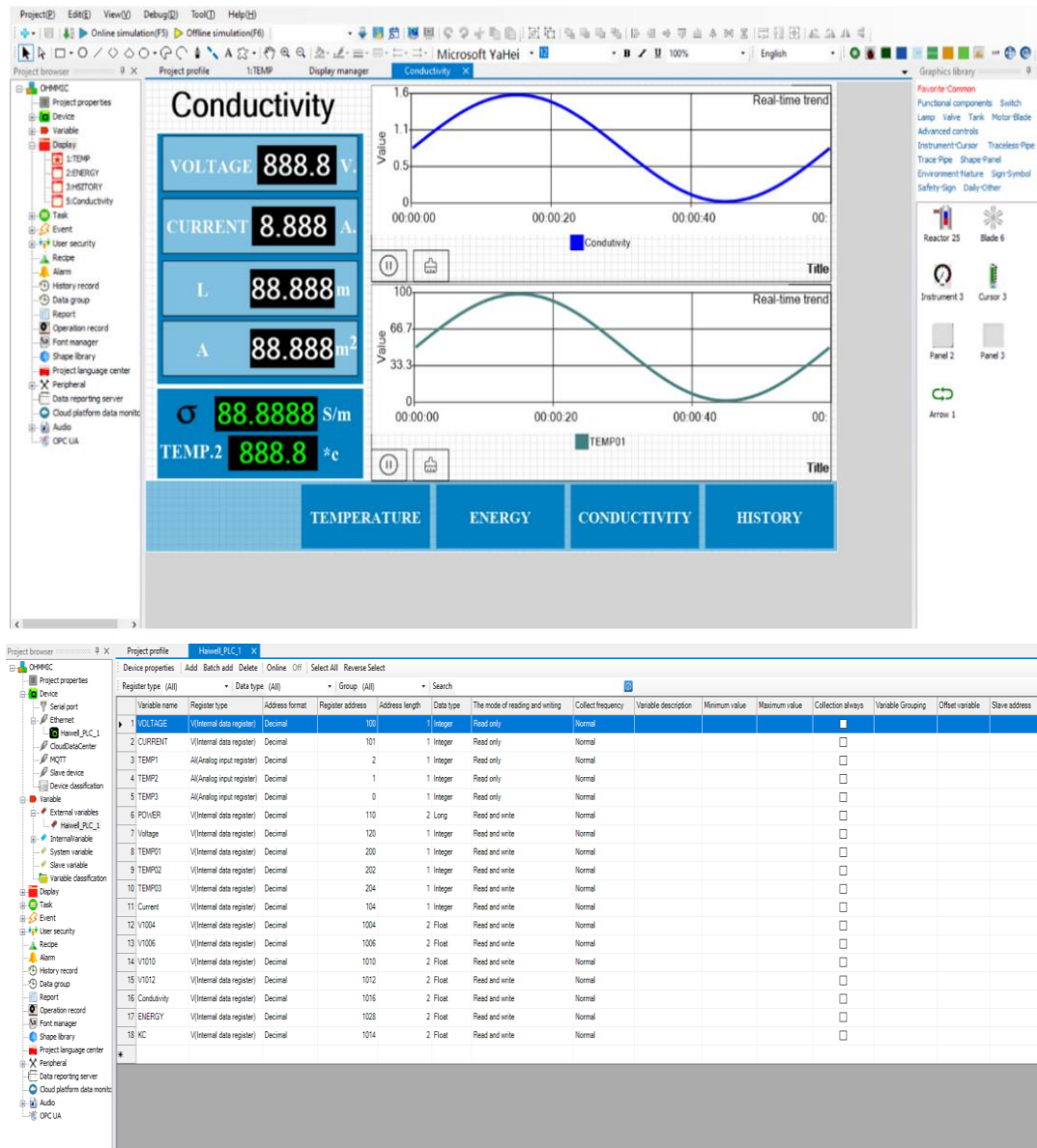
4.3.2 การออกแบบหน้าจอประมวลผล

ปัจจุบันการเขียน PLC สามารถเขียน Ladder Diagram ใน Computer PC รวมทั้งการใช้งาน PLC ร่วมกับ HMI (Human Machine Interface) ในการควบคุมเครื่องจักรผ่านหน้าจอแบบต่าง ๆ และพีแอลซี (PLC) สามารถเขียนโปรแกรมสร้างฟังก์ชันและเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อควบคุมการทำงานได้ตามความต้องการ ถ้าต้องการจะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานใหม่ก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโปรแกรม การเชื่อมต่อโปรแกรม HMI Cloud Free by Haiwell เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างหน้าจอการควบคุม (Human Machine Interface) ที่ใช้งานได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์และใช้งานได้ในโหมดออฟไลน์ (Offline Mode) โดยสำหรับ HMI Cloud Free by Haiwell จะมีการออกแบบโครงสร้างหน้าจอการควบคุมที่ใช้งานได้ง่าย และมีการจัดเรียงส่วนองค์ประกอบเพื่อให้สามารถเข้าใจและใช้งานได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ HMI Cloud Free by Haiwell ยังมีความสามารถในการสร้างหน้าจอการควบคุมที่มีการแสดงผลแบบ Real-Time ที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ได้ในเวลาจริง หน้าจอที่ใช้ในอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการทำความร้อนแบบโอห์มมิก มีรายละเอียดทางเทคโนโลยี Main characteristic ดังนี้

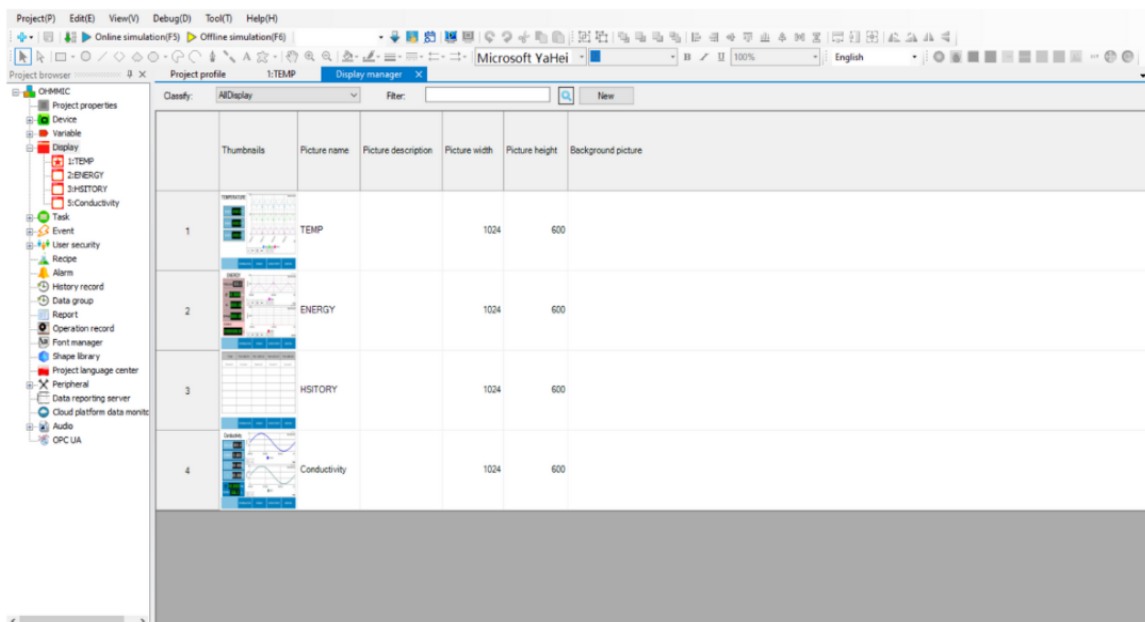
- 7" sizes optional. LED backlight, fashion, splendid, elegant
- Cortex A8 800MHz CPU, 4GB FLASH + 512M DDR3
- Serial port/ U disk / SD card / Ethernet port/ Haiwell cloud
- HMI directly uses Haiwell Cloud SCADA Software for programming and management
- Supports cloud / mobile terminal access control, strong operability
- A/B Key security mechanism, multi-language automatic translation, Project overview interface
- Innovative network mode, easy, convenient and practical
- Integrate Haiwell cloud service, built-in Haiwell cloud engine
- Standard RJ45 port, 2 serial ports (232/422/485), 2 USB ports, SD card. WiFi is optional
- Support MQTT protocol, making device easily connects to the haiwell cloud, easily manage devices and process data with a wide range of application scenario

การดำเนินโครงการออกแบบจอสั่งการระบบสัมผัส Touch Screen Operation Panel (HMI) หรือ Human Machine Interface เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ แบ่งเป็นหน้าจอแสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ หน้าจอแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

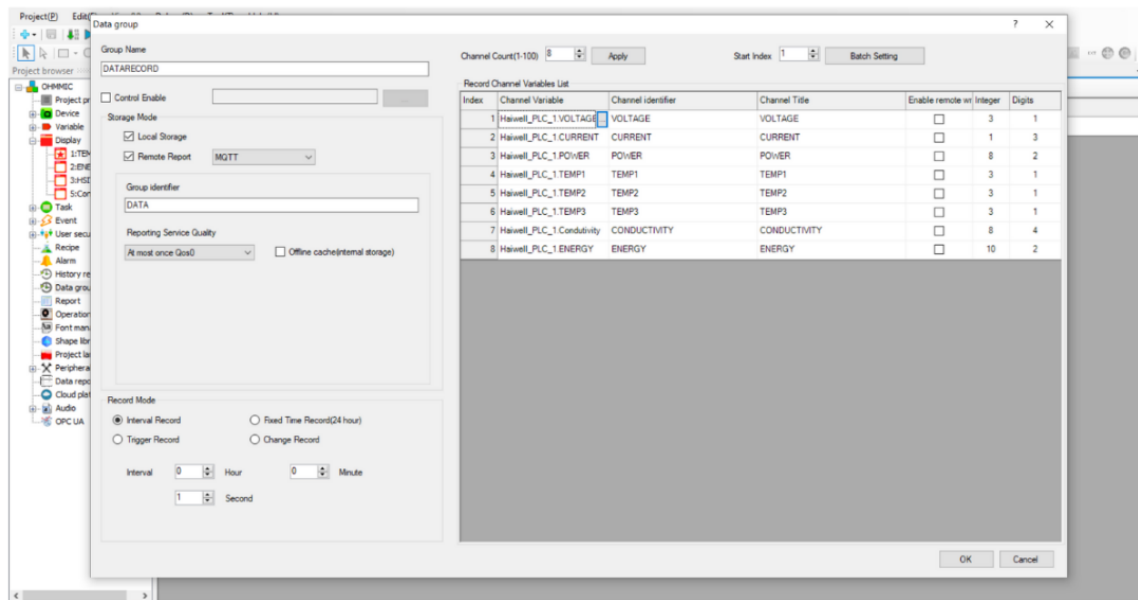
และหน้าจอแสดงผลการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ตามที่แสดงในภาพ 4.11-4.13 ตามลำดับ หลักการออกแบบหน้าจอ(UI) จะใช้โปรแกรม Haiwell Cloud Scada เป็นโปรแกรมในการดีไซน์และออกแบบและใช้โปรแกรม HaiwellHappy ในการตั้งค่าตัวแปรที่ประกาศไว้ ในการออกแบบหน้าต่าง UI โดยหลักๆ แล้วหน้าต่างที่แสดงตัวเลขข้อมูล โดยใช้แบบฟังก์ชัน Graphics library > Functional components > Numeric input/display > ใส่ตัวแปรที่ได้ประกาศไว้ใน HaiwellHappy เพื่อใช้ในการแสดงผลตามภาพ 4.11



ภาพ 4.11 การออกแบบหน้าจอแสดงผล (UI)

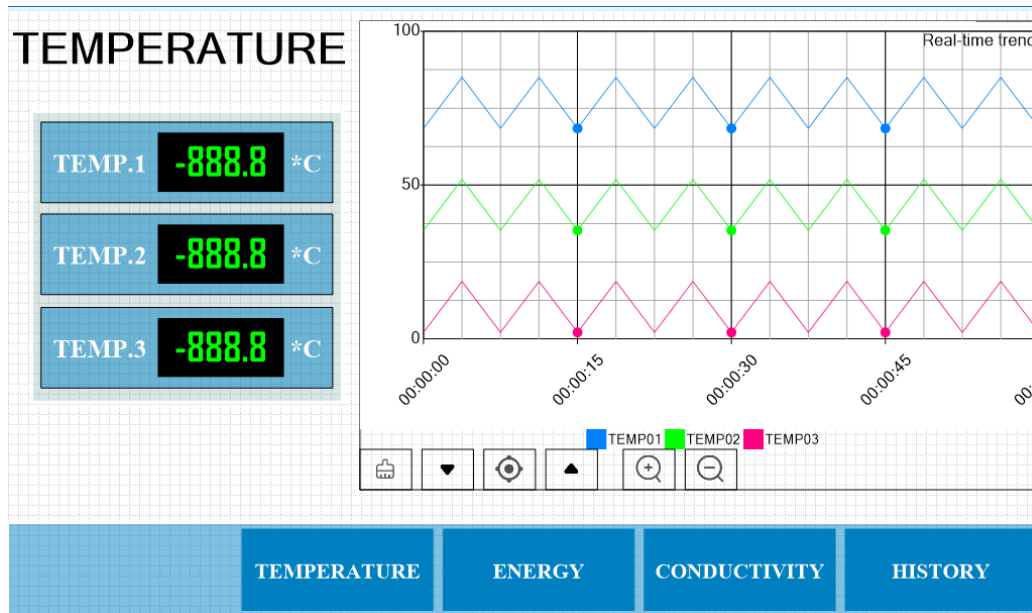


(ก)

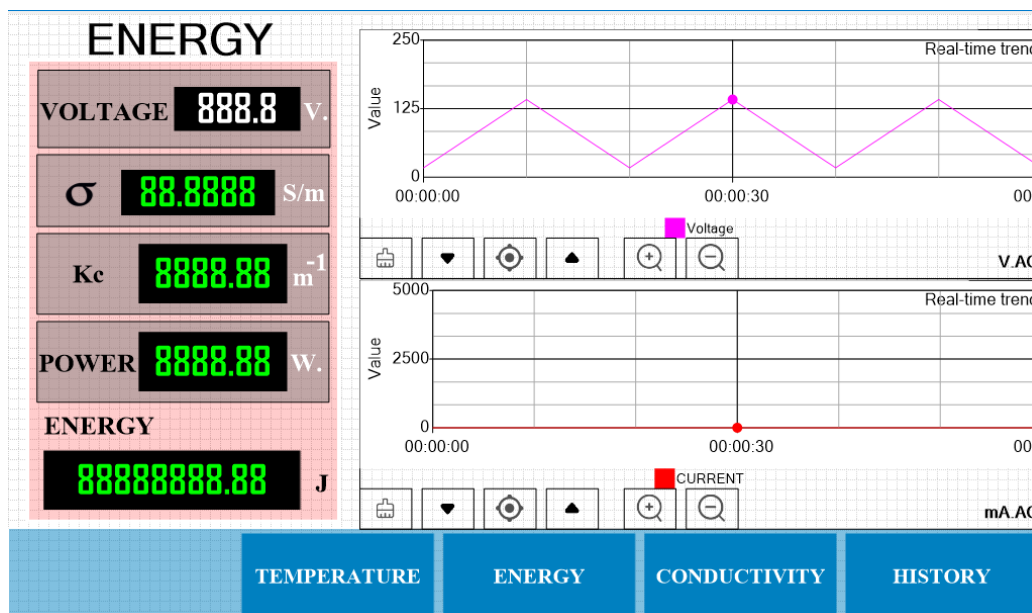


(ข)

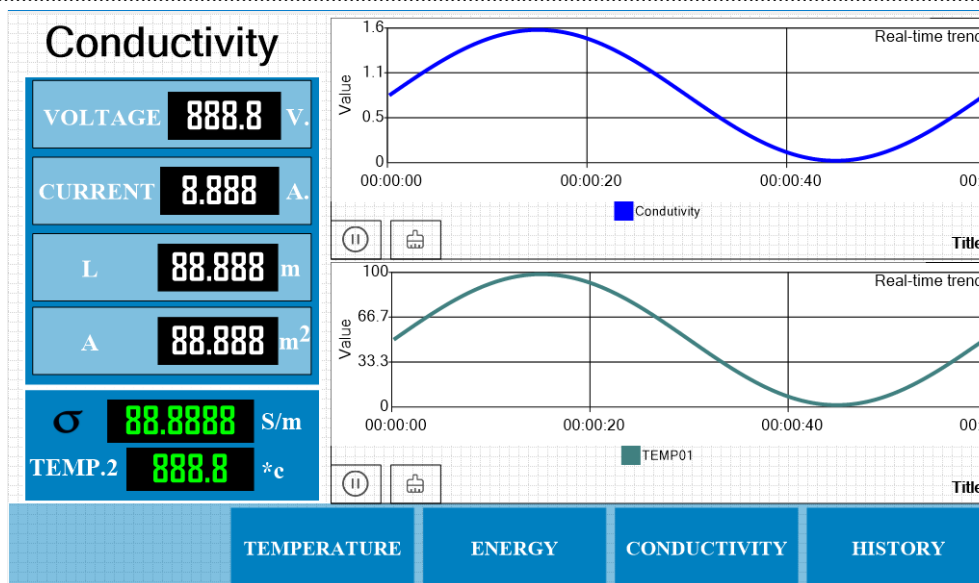
ภาพ 4.12 การถ่ายโอนข้อมูลหน้าจอประมวลผลเพื่อพัฒนา Dashborad ของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า



ภาพ 4.13 หน้าจอแสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ



ภาพ 4.14 ค่าพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก



ภาพ 4.15 ค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

4.3.3 การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้า

หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีหลักการดังนี้ เมื่อดำเนินปรับอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่โอห์มมิกเซลล์ที่มีตัวอย่างอาหารเหลวบรรจุอยู่ นั้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในระบบ จะถูกปรับเปลี่ยนด้วยอุปกรณ์เปลี่ยนเป็นค่าสัญญาณมาตรฐานเป็นสัญญาณไฟฟ้าขนาด 4-20 มิลลิแอมป์ หรือ 0-10 โวลต์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น เวลา อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าถูกบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูล และถูกนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา และอุณหภูมิใดๆ การเขียนแลตเตอร์ไดอะแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าการพัฒนาโปรแกรมควบคุมชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลวระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกด้วยการเขียนโปรแกรมแลตเตอร์ไดอะแกรม Ladder Diagram ดำเนินการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง heater มาตรฐาน พบว่าค่าสัญญาณที่วัดได้ตรงกับค่ามาตรฐานที่วัดได้ โดยการกำลังไฟฟ้าของ heater มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1000 วัตต์ และผลการวัดค่ากำลังงานด้วยอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 997.98 วัตต์ โดยสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ได้เท่ากับการวัดค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าเท่ากัน ภาพ 4.15 และ 4.16 แสดงผลการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของ heater มาตรฐาน



(ก)



(ข)

ภาพ 4.16 การประมวลผลการคำนวณไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Time	VOLTAGE	CURRENT	POWER	TEMP1	TEMP2	TEMP3	CONDUCTIVITY	ENERGY
2024-02-07 16:31:14	225.2	1.033	225.20	52.2	47.3	49.8	0.3440	68161.05
2024-02-07 16:31:13	225.2	1.030	225.20	52.1	47.2	49.6	0.3430	67963.09
2024-02-07 16:31:12	225.2	1.028	225.20	51.8	47.0	49.4	0.3424	67831.15
2024-02-07 16:31:11	225.2	1.025	225.20	51.7	46.9	49.3	0.3414	67633.19
2024-02-07 16:31:10	225.2	1.022	225.20	51.5	46.8	49.2	0.3404	67435.24
2024-02-07 16:31:09	225.2	1.019	225.20	51.4	46.7	49.0	0.3394	67237.29
2024-02-07 16:31:08	225.2	1.016	225.20	51.2	46.5	48.9	0.3384	67039.34
2024-02-07 16:31:07	225.2	1.013	225.20	51.0	46.5	48.7	0.3374	66841.38
2024-02-07 16:31:06	225.2	1.011	225.20	50.9	46.4	48.4	0.3367	66709.42
2024-02-07 16:31:05	225.3	1.008	225.30	50.6	46.2	48.2	0.3356	66541.02

ภาพ 4.17 การถ่ายโอนข้อมูลสู่โปรแกรม Excel

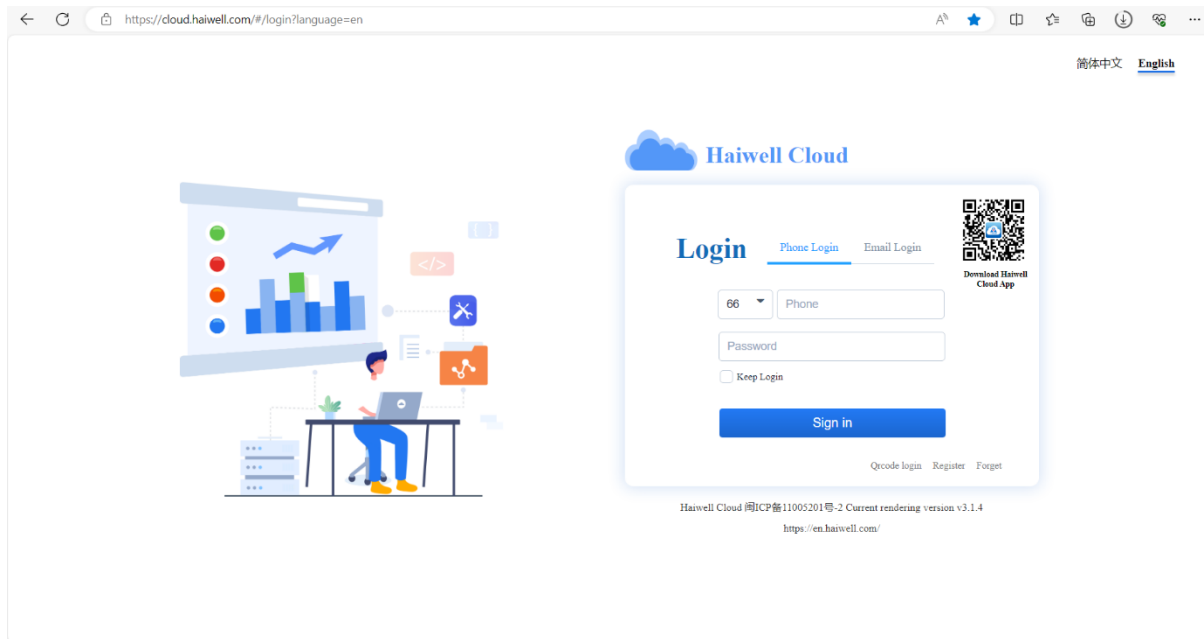
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	time	VOLTAGE	CURRENT	POWER	TEMP1	TEMP2	TEMP3	CONDUCT	ENERGY
2	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.3	31.5	0.212	0
3	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.3	31.5	0.212	0
4	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.3	31.5	0.212	0
5	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.3	31.5	0.212	0
6	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.3	31.5	0.212	0
7	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
8	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
9	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
10	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
11	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
12	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
13	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
14	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
15	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
16	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
17	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
18	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
19	2/7/2024 15:25	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
20	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
21	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
22	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
23	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
24	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
25	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
26	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
27	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0
28	2/7/2024 15:26	0	0	0	31.3	30.2	31.5	0.212	0

ภาพ 4.18 ตัวอย่างข้อมูลผ่านการโอนถ่ายมายังโปรแกรม Excel

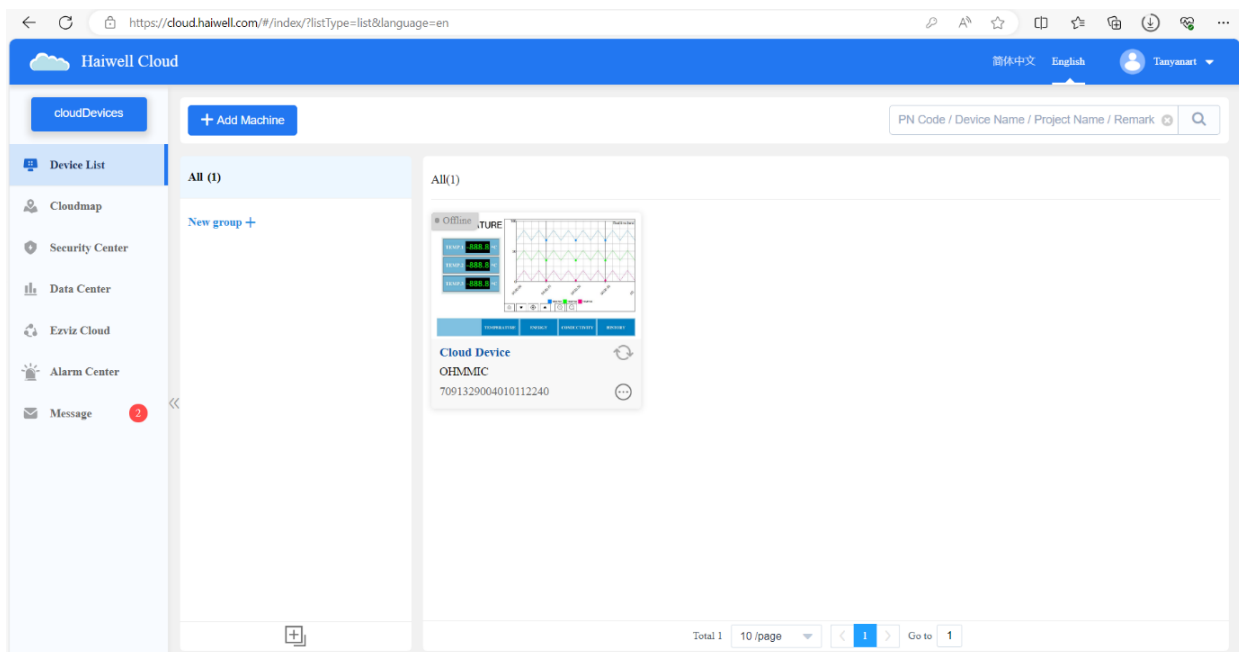
4.3.4 การเชื่อมข้อมูลผ่านทางอินเทอร์เน็ต

PLC on Cloud เป็นการนำเทคโนโลยี Cloud มาใช้ร่วมกับ PLC+HMI (Programmable Logic Controller+Human Machine Interface) ซึ่งทำให้สามารถควบคุมและตรวจสอบการทำงานของ PLC+HMI (Programmable Logic Controller+Human Machine Interface) ผ่านทางอินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมและตรวจสอบการทำงานของ PLC+HMI (Programmable Logic Controller+Human Machine Interface) ได้ทุกที่ทุกเวลา โดยไม่ต้องเข้าไปในระบบของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่ง PLC on Cloud จะมีลิแอมแปร์เป็นการแสดงผลการควบคุมและตรวจสอบการทำงานของ PLC ผ่านทางอินเทอร์เน็ต โดยอาจมีรูปภาพของ PLC และสถานะของการทำงานของ PLC เช่น การทำงานปกติ หรือการเกิดข้อผิดพลาด และสามารถแสดงผลการทำงานของ PLC ในรูปแบบกราฟหรือข้อมูล Data ต่าง ๆ ได้ โดยผู้บรรยายสามารถ Monitor การแสดงผลผ่านทางหน้าเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันบนมือถือ การใช้ Hiwell Cloud Scada Designer เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ออกแบบระบบการส่งข้อมูลระยะไกลทำหน้าที่ตรวจสอบจัดเก็บข้อมูลรวมไปถึงการควบคุมกระบวนการทำงาน และกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม รวมถึงการออกแบบหน้าจอแสดงผล (UI) ให้กับอุปกรณ์ต่างๆ

(เครื่องจักร มือถือ และ PC) ตามที่แสดงขั้นตอนในจากภาพ 4.18 และ 4.19 เป็นการรับข้อมูลระยะไกล (Cloud) หรือระยะใกล้ (Local)



ภาพ 4.19 การเข้าระบบรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Cloud Computing
ที่มา: <https://cloud.haiwell.com/#/login/?language=en>



ภาพ 4.20 หน้าประมวลผลหลังจากที่ log in เข้าในระบบ Cloud Computing

การใช้ Hiwell Cound Scada Designer เพื่อรับข้อมูลระยะไกล (Cloud) มีขั้นตอนดังนี้

- ในกรณีที่ใช้คอมพิวเตอร์ : เข้าผ่านเว็บเบราว์เซอร์ <https://cloud.haiwell.com/> แล้วหลังจากนั้นล็อกอินเข้าสู่ระบบ (ID : 0985451321 Password : ass753951456)
- หลังจากเข้าสู่ระบบจะมีหน้าจอขึ้นเหมือนกับ ภาพ 4.19
- ชุดข้อมูลจะแสดงแบบเรียลไทม์ และสามารถ Export data (ตามภาพ4.16) ได้ รูปแบบไฟล์จะเป็นรูปแบบ Excel

การเข้าผ่านระบบ Longsa Selasial มีขั้นตอนดังนี้

- สามารถใช้เข้าใช้ได้ทุกอุปกรณ์ที่มีเว็บเบราว์เซอร์ โดยกรอกในช่องค้นหา ดังนี้ 192.168.1.68
- หน้าจอจะแสดงเหมือนกันกรณีการรับข้อมูลระยะไกลเหมือนกัน

4.4 ผลการทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนของสารละลาย น้ำเกลือ 0.1 โมลาร์ แสดงดังตารางภาคผนวก 1 และภาพภาคผนวก 11-14 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนพบว่า เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของสารละลายเกลือจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส จากสมการการเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ได้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.02 ± 0.0305 ถึง 2.51 ± 0.0125 ซีเมนส์ต่อเมตร จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าจะส่งผลให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยดังภาพภาคผนวก 11-14 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้สามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็วนั่นเอง (สิริรัตน์ และ อิสราพงศ์, 2554) การเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หาน้ำหนักเกลือบริสุทธิ์เข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

4.1.1 การเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.1M

หาน้ำหนักเกลือบริสุทธิ์เข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

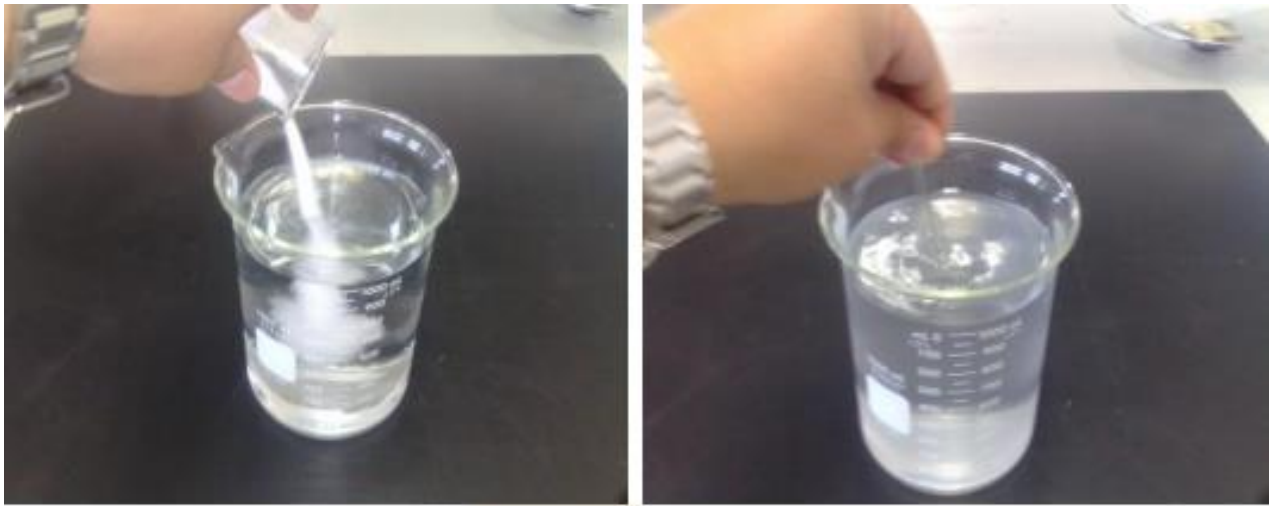
$$\begin{aligned} \text{NaCl} &= 22.9897 + 35.453 \quad \rightarrow \quad \text{Mol} = \frac{\text{จำนวนสาร (g)}}{\text{มวลโมเลกุล}} \\ &= 58.5 \\ &\quad \downarrow \\ 0.1 &= \frac{\text{จำนวนสาร (g)}}{58.5} \\ &\quad \downarrow \\ \text{จำนวนสาร (กรัม)} &= 0.1 \times 58.5 = 5.85(\text{g}) \\ &\text{สำหรับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์} \end{aligned}$$



ภาพ 4.21 ชั่งน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 5.85 กรัม
ที่มา: สิริรัตน์ และ อิสราพงศ์ (2554)



ภาพ 4.22 เตรียมน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เพื่อละลายโซเดียมคลอไรด์ 5.85 กรัม
ที่มา: สิริรัตน์ และ อิสราพงศ์ (2554)



ภาพ 4.23 เทโซเดียมคลอไรด์ 5.85 กรัม ลงในน้ำบริสุทธิ์เพื่อละลายเกลือ จากนั้นคนจนเกลือละลายหมด
ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



ภาพ 4.24 เมื่อละลายเกลือจนหมดแล้วดูดสารละลายเกลือ ลงในโอห์มมิคเซลล์ที่ได้เตรียมเอาไว้
เพื่อทำการทดลองต่อไป
ที่มา: สิริรัตน์และ อิศราพงศ์ (2554)

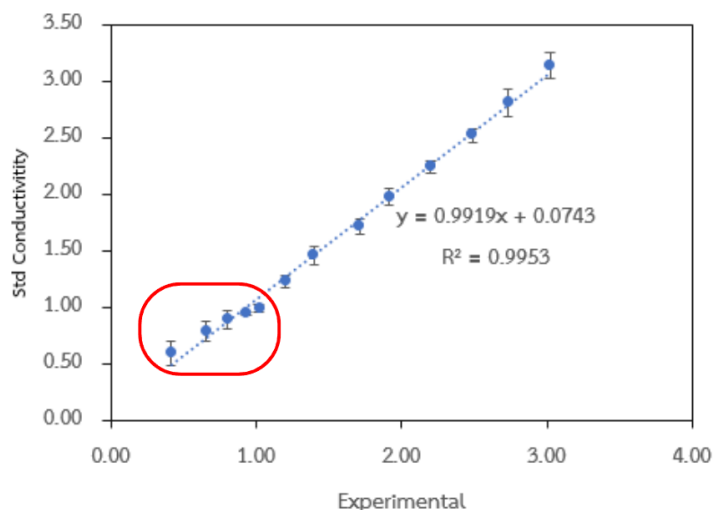
ตาราง 4.1 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 โมลาร์

ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	10 โวลต์ต่อเซนติเมตร	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย มาตรฐานอ้างอิง (ซีเมนส์ต่อเมตร)	การเบี่ยงเบน (เปอร์เซ็นต์)
40	143±0.0055	1.458	1.980
50	1.69±0.0086	1.713	1.626
60	1.95±0.0127	1.977	1.909
70	2.19±0.0523	2.242	3.677
80	2.5±0.0041	2.523	1.626
เฉลี่ย			2.164

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิสราพงศ์ (2554)

นำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากตารางภาคผนวกที่ 3 มาหาเปอร์เซ็นต์ความ เบี่ยงเบนช่วง อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร เทียบกับค่าการนำไฟฟ้า ของสารละลายมาตรฐานอ้างอิงพบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 1626 ถึง 3.677 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนพบว่ามีค่า 2.164 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 4.25 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐาน และค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง

จากภาพ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐานและค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง คือ $Y = 0.9919x + 0.0743$ ($R = 0.9953$) แสดงว่าไอห้ม มิกเซลล์ ที่ใช้ในการศึกษามีความแม่นยำในการทำนายค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 99.53 เปอร์เซ็นต์ สังเกตในช่วง

อุณหภูมิ 0-20 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีความกว้างตัว เนื่องจากการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยวิธีโอห์มมิคไม่เหมาะสมในช่วงอุณหภูมิ 0-20 องศาเซลเซียส จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานจะไม่ผลกระทบกับการแตกตัวของโซเดียมไอออน แต่วิธีโอห์มมิคยังคงมีผลกระทบอยู่ ด้วยผลของความเย็นทำให้เกิดการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า

4.5 การทดสอบการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ

ในการศึกษานี้ทดสอบการให้ความร้อนในน้ำมะเขือเทศด้วยวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิคที่อุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิคมีความสามารถในการ กระจายความร้อนสม่ำเสมอ เนื่องจากกลไก การเหนี่ยวนำความร้อนในน้ำมะเขือเทศด้วยวิธีโอห์มมิคเป็นการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหารซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่ น้ำมะเขือเทศ และเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในน้ำมะเขือเทศ ทำให้เกิดความร้อนความร้อนสูง และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นผลจากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารได้มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarang และคณะ (2008)

Icier และ Ilcali (2005) และ Assawarachan (2010) ได้อธิบายกลไกการเหนี่ยวนำให้เกิด ความร้อน และผลการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้า ในระหว่างการให้ความร้อน แบบโอห์มมิค โดยแบ่งกลุ่มพลังงานออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบป้อนให้กับระบบ การเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าความเข้มข้นไฟฟ้ากับค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของ น้ำมะเขือเทศ ($E_{\text{electrical}}$) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการต้านทานการไหลของ กระแสไฟฟ้าในระหว่างและเหนี่ยวนำเกิดเป็นความร้อนความร้อน ($E_{\text{ohmic heating}}$) และความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม (E_{loss}) การวิเคราะห์กลไกการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบสามารถคำนวณ ได้ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก นี้ได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ เทียบกับความแตกต่างระหว่างสถานะเริ่มต้นกับสถานะสุดท้ายของระบบ ตามที่แสดงในสมการที่ (4.1)

$$E_{\text{electrical}} = E_{\text{ohmic heating}} + E_{\text{loss}} \quad (4.1)$$

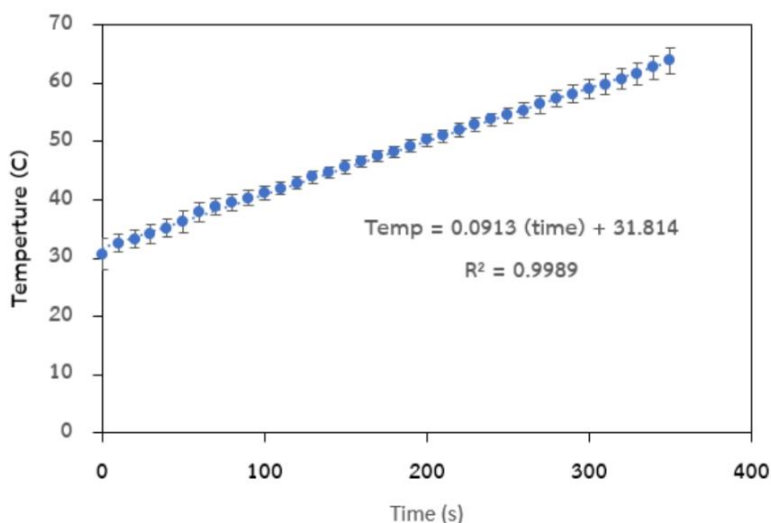
เมื่อ $E_{\text{ohmic heating}}$ มีค่าเท่ากับ Sensible heat และ E_{loss} มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบการให้ความร้อนของน้ำมะเขือเทศ ให้ค่า E_{loss} มีค่าน้อยมาก และไม่นำมาวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบ (ฤทธิชัย, 2561)

$$\left(\frac{\Delta V^2 \sigma}{K_C} \right) dt = C_p (T_f - T_i) \quad (4.2)$$

ในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมะเขือเทศ สมการที่ (4.2) แสดงสมการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิค เท่ากับอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแบบโอห์มมิคเทียบกับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในน้ำมะเขือเทศ เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบการให้ ความ

ร้อนแบบโอห์มมิก เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานของเทอร์โมไดนามิก โดยพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนนำความร้อนในน้ำมะเขือเทศ ด้วยวิธีโอห์มมิกมีค่าเท่าพลังงานความร้อนที่ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อมน้อยลง

อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะเขือเทศ ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส พบว่ามีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 0.0913 องศาเซลเซียสต่อวินาที ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร ดังนั้น เมื่อพิจารณาอัตราการให้ความร้อนของน้ำมะเขือเทศที่ความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นไฟฟ้าจาก 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 54.79 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเทียบเท่าการเพิ่มพลังงานในระบบดังนั้นความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ที่ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเพียง 62.61 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความเข้มข้นไฟฟ้างกล่าวให้พลังงานไฟฟ้าให้ระบบ ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนน้ำมะเขือเทศ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่า SPCs น้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดความสูญเสีย ความร้อนกับสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน ในขณะที่ค่า SPCs ของการให้ความร้อนในน้ำมะเขือเทศที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร นั้นเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียสภาพอย่างสมบูรณ์และสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมร้อนในอัตราสูง ดังนั้น ค่า SPCs จึงมีค่าที่ต่ำกว่าการให้ความร้อนที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ที่ระดับ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร ดังนั้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนน้ำมะเขือเทศด้วยวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกนั้น จากข้อมูลในโครงการวิจัยนี้พบว่า ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-85 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกที่ อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 85 องศาเซลเซียส จะเกิดฟองอากาศ เนื่องจากการเดือดจนน้ำมะเขือเทศพุ่งออกจากโอห์มมิกเซลล์เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายในระหว่างการศึกษา

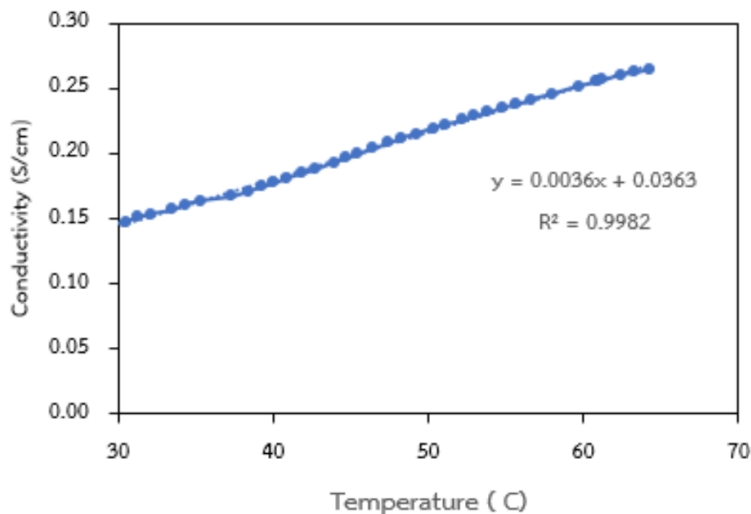


ภาพที่ 4.26 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำมะเขือเทศในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

จากภาพ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยของความเข้มข้นไฟฟ้ามากขึ้นมีผลต่ออัตรา การให้ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.09 เปอร์เซนต์ ตัวอย่างน้ำมะเขือเทศในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนได้เร็วขึ้น เมื่อใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น เส้นแนวโน้มของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 25-65 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 10-20 V/cm จะเห็นได้ว่าใช้เวลาในการเปลี่ยนความร้อนสูงสุด ทั้งนี้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่น้ำผลไม้มีความเป็นกรดสูงเกิดไฮโดรเจนอเล็กโตรไลต์ที่มีศักยภาพสร้าง ฟองอากาศ Zhao และคณะ (2005) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนิกเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง และอีกสาเหตุหนึ่ง ที่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นน้ำผลไม้เกิดการเดือด ทำให้น้ำผลไม้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และยังทำให้ เกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันลดลงจนทำให้เกิดอากาศอย่างรวดเร็ว (Dadali และคณะ, 2007)

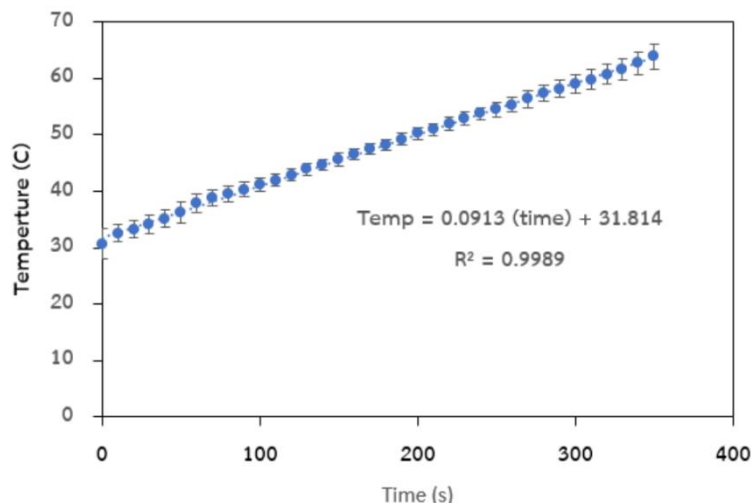
จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.1-0.2 ซีเมนส์ต่อเมตร ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในน้ำมะเขือเทศได้มากขึ้นส่งผลให้ค่า การนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยผนังเนื้อเยื่อที่มีโปรโตเพกตินเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเกิดการเสียสภาพ (Protopectin Breakdown) และอ่อนตัวลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้น้ำในเนื้อเยื่อเซลล์ไหลผ่านออกมาโดยน้ำภายใต้เนื้อเยื่อเซลล์จะประกอบด้วยสารอาหาร เกลือแร่และ ไอออนจำนวนมาก ส่งผลทำให้มีการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้นจึงช่วยกระตุ้นการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น Icier และ Ilcali (2005) และ Assawarachan (2010) โดยอัตรา การเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิง เส้นตรงกับอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังนั้นการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ช่วงเวลาต่างๆ พบว่ามีรูปแบบสมการเป็นสมการเส้นตรง ตามภาพ 4.27



ภาพที่ 4.27 ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขือเทศ ในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

โดยสมการพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขือเทศ ในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก ในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์ดังนี้ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10 V/cm พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าการนำไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) เท่ากับ 0.9982



ภาพ 4.28 กราฟแสดงผลวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ต่อเวลาในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

จากภาพ 4.28 กราฟแสดงผลวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต่อเวลาในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิ ในระบบเพิ่มขึ้นในลักษณะสมการเส้นตรง $Y=0.0913(\text{time})+31.814$ ($R=0.9989$) สามารถวิเคราะห์อัตราการให้ความร้อนได้จาก ค่าความชันของสมการมีค่าเท่ากับ 0.0913 องศาเซลเซียสต่อวินาที นำไปใช้หาเวลาในการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ การวิเคราะห์การกระจายความร้อนพบว่าค่าความผิดพลาด ในการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโอห์มมิก พบว่ามีค่าในช่วง 1.0781-2.7358 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.4115 แสดงว่าค่าความแตกต่างในการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโอห์มมิกเซลล์มีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (แตกต่างกันถึง 5-10 องศาเซลเซียส)

ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 30-65 องศาเซลเซียส หรือเป็นสถานะการฆ่าเชื้อในระดับพาสเจอร์ไรส์ สำหรับน้ำผลไม้ที่มีค่าความเป็นกรดสูง ($\text{pH}=3.5$) พบว่ามีความสัมพันธ์ในสมการเส้นตรง $Y=0.0036x+0.0363$ ($R=0.9982$) ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่ออุณหภูมิในระบบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น อันเป็นผลจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อเซลล์ในน้ำมะเขือเทศ เช่น ไฟเบอร์ เพคติน เกิดการอ่อนตัว ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้มากขึ้น ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก

การหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยสมการ ดังนี้

จากสมการ
$$\left(\frac{\Delta v^2 \sigma}{K_c}\right) dt = mC_p(T_f - T_i)$$

แทนสมการ
$$97.1 \text{ w} = \frac{0.3 \text{ Kg} \times 2.85 \text{ kJ}^\circ\text{C} \times (64.3 - 26.5)}{350 \text{ s}}$$

$$= 92.34 \text{ w}$$

$$= 95.09 \%$$

สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ได้ที่ 95.09 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าแบบพกพาของอาหารในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ที่สามารถควบคุม ตรวจสอบ และบันทึกผลผ่านอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet Of Think: IOT) ผ่าน PLC on cloud ในทั้งหน้าเว็บไซต์บนคอมพิวเตอร์หรือแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์ การออกแบบและพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ การพัฒนาวงจรการวัดค่าการนำไฟฟ้ารวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ และการเขียนโปรแกรมมาตรฐานด้วยการใช้ระบบตรวจวัดและประมวลด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control: PLC) เพื่อใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0-250 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า ในช่วง 0-10 แอมแปร์ สำหรับการวัดค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0-95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า โอห์มมิกเซลล์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาโอห์มมิกเซลล์ด้วยท่ออะคริลิก ความแม่นยำของโอห์มมิกเซลล์ด้วยการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ผลการศึกษามีความแม่นยำของโอห์มมิกเซลล์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 99.53 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ ที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าน้ำมะเขือเทศ มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับเท่ากับ 0.1-0.2 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 20-65 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 0.0913 องศาเซลเซียสต่อวินาที โดยเกิดพลังงานความร้อนรวมเท่ากับ 92.34 วัตต์ต่อวินาที และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95.09 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และความเข้มข้นไฟฟ้าของการวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำมะเขือเทศ หรือน้ำผลไม้ชนิดอื่น

5.2.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก สำหรับการพาสเจอร์ไรซ์น้ำผลไม้เปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนรูปแบบอื่นๆ เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ การให้ความร้อนแบบดั้งเดิม เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำผลไม้พาสเจอร์ไรซ์ เช่น กลิ่น รสชาติ สมบัติทางโภชนาการ สารอาหาร และอายุการเก็บรักษา

5.2.3 ควรพัฒนาชุดต้นแบบการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เพื่อใช้ใช้ในการจำลองสภาวะการแปรรูป โดยดำเนิน บันทึกข้อมูล และควบคุมผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

เอกสารอ้างอิง

วีไล รังสาดทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร: บริษัทเท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด.

อรรถพล นุ่มหอม และฤทธิชัย อัสวราชันย์. (2551). กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก. Food Focus Thailand Magazine. 3(27): 48-53.

Abedelmaksoud, T. G., Mohsen, S. M., Duedahl-Olesen, L., Elnikeety, M. M., & Feyissa, A. H. (2018). Optimization of ohmic heating parameters for polyphenoloxidase inactivation in not-from-concentrate elstar apple juice using RSM. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2420-2428.

Assawarachan, R. (2005). Innovative Process Heating by Electro Technologies, Special Study Report. Bangkok: Asian Institute of Technology.

Assawarachan, R and A. Nookhorm. (2008). Application electromagnetic radiation technologies in food processing: Paper presented at The 2nd R&D* International Conference – 2008; University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, Thailand; Theme: Global Competitiveness Through, Research and Development, Innovation, Design.

Assawarachan, R. (2010). Estimation model for electrical conductivity of red grape juice. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(2), 52-57.

Assawarachan, R. M. Nookung, I. Ze-O. and S. Ga-Jai (2013). Development of Electrical conductivity measuring device for fruit juice using ohmic heating. In Food Innovation Asia Conference, Empower SMEs through and Technology. 13-14 June 2013. BITEC Convention Center, Bangkok, Science Thailand.

Dadali, G., Demirhan, E., & Özbek, B. (2007). Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity. *Drying Technology*, 25(10), 1703-1712.

Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., Khoshtaghaza, M. H., & Torang, H. (2011). Ohmic processing: temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Science*, 5(1), 209.

Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., & Najafi, G. (2013). Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 101-108.

FUCHIGAMI, M., HYAKUMOTO, N., MIYAZAKI, K., NOMURA, T., & SASAKI, J. (1994). Texture and histological structure of carrots frozen at a programmed rate and thawed in an electrostatic field. *Journal of food science*, 59(6), 1162-1167.

Gavahian, M., & Chu, R. (2022). Ohmic heating extraction at different times, temperatures, voltages, and frequencies: a new energy-saving technique for pineapple core valorization. *Foods*, 11(14), 2015.

Ghaderi, E. (2015). Experimental Study and CFD Modeling of the Ohmic Heating Process in a Static Two-Phase Biosolid–Liquid System. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)*, 12(2), 75-87.

Gratz, M., Sevenich, R., Hoppe, T., Schottroff, F., Vlaskovic, N., Belkova, B., ... & Jaeger, H. (2021). Gentle sterilization of carrot-based purees by high-pressure thermal sterilization and ohmic heating and influence on food processing contaminants and quality attributes. *Frontiers in nutrition*, 8, 643837.

Gupta, V. (1992). Experimental determination of electrical conductivity of selected fruit juice.

Halden, K., A.A.P. De Alwis. and P.J. Fryer. (1990). Change in the Electrical Conductivity of food During Ohmic Heating. *International Journal of Food Science and Technology*. 25(1): 9-25.

Hardinasinta, G., Salengke, S., Juaedi, M., & Mursalim, M. (2019, November). Ohmic heating characteristics and degradation kinetics of anthocyanin in mulberry juice. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 355, No. 1, p. 012094). IOP Publishing.

Icier, F., & Ilicali, C. (2005). The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating. *European Food Research and Technology*, 220, 406-414.

Icier, F. and C. Ilicali. (2005a). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*. 38: 1135-1142

Icier, F., Yildiz, H., & Baysal, T. (2006). Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 424-429.

Jakób, A., Bryjak, J., Wójtowicz, H., Illeová, V., Annus, J., & Polakovič, M. (2010). Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food chemistry*, 123(2), 369-376.

Jung, A. H., Hwang, J. H., Jun, S., & Park, S. H. (2022). Application of ohmic cooking to produce a soy protein-based meat analogue. *Lwt*, 160, 113271.

Khalaf, W. G., & Sastry, S. K. (1996). Effect of fluid viscosity on the ohmic heating rate of solid-liquid mixtures. *Journal of Food Engineering*, 27(2), 145-158.

Lamsal, B. P. (1994). *Investigation of the factor affecting the electrical conductivity of selected fruit juice during ohmic heating* (Doctoral dissertation, Thesis. Thailand: Asian Institute of Technology).

Lee, S. Y., Ryu, S., & Kang, D. H. (2013). Effect of frequency and waveform on inactivation of Escherichia coli O157: H7 and Salmonella enterica serovar Typhimurium in salsa by ohmic heating. *Applied and environmental microbiology*, 79(1), 10-17.

Lyle, R.T. and R. Hosking. (1902). Conductivity of NaCl in aqueous solution. General and physical chemistry.

Meredith, R. J. (1998). *Engineers' handbook of industrial microwave heating* (No. 25). let.

Mitchell, F.R.G. and A.A.P. De Alwis. (1989). Electrical Conductivity Meter for Food Sample. *Journal of Physics* 22: 554-556.

Moongngarm, A., Sriharboot, N., Loypimai, P., & Moontree, T. (2022). Ohmic heating-assisted water extraction of steviol glycosides and phytochemicals from Stevia rebaudiana leaves. *Lwt*, 154, 112798.

Ohtsuki, T. (1991). *U.S. Patent No. 5,034,236*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Palaniappan, S., & Sastry, S. K. (1991). Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating 1. *Journal of Food Process Engineering*, 14(3), 221-236.

Pataro, G., Donsi, G., & Ferrari, G. (2011). Aseptic processing of apricots in syrup by means of a continuous pilot scale ohmic unit. *LWT-Food Science and Technology*, 44(6), 1546-1554.

Qihua, T. (1992). Design and development of an experimental ohmic heating unit for liquid foods.

Ramaswamy, R., Balasubramaniam, V. M., & Sastry, S. K. (2005). Effect of high pressure and irradiation treatments on hydration characteristics of navy beans. *International Journal of Food Engineering*, 1(4).

Richardson, P. (Ed.). (2001). *Thermal technologies in food processing*. Elsevier.

Roberts, J. S., Balaban, M. O., Zimmerman, R., & Luzuriaga, D. (1998). Design and testing of a prototype ohmic thawing unit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 19(2), 211-222.

Sarang, S., Sastry, S. K., & Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 351-356.

Sinthiya, R. (2015). Design and fabrication of ohmic heating equipment. *Food Science and Quality Management*, 35, 99-104.

Yun, C. G., Lee, D. H., & Park, J. Y. (1998). Ohmic thawing of a frozen meat chunk. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 30(4), 842-847.

Zhang, H., Mohamed, A., Breikin, T., & Howarth, M. (2021). Modelling and simulation of an ohmic heating process. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 9(1), 26-42.

Zhao, W., Kim, S., Zhang, J., & Adesida, I. (2005). Thermally stable ge/ag/ni ohmic contact for InAlAs/InGaAs/InP HEMTs. *IEEE electron device letters*, 27(1), 4-6.

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้า

ตารางภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

temp	standard	R1	R2	R3	R4	R5	exper	standard	error
0	0.5938	0.44320	0.26310	0.36390	0.45870	0.54310	0.4144	0.59380	0.10582717
10	0.7848	0.72450	0.63380	0.52370	0.64350	0.74130	0.6534	0.78480	0.086726397
15	0.8854	0.77370	0.88120	0.88080	0.78610	0.68540	0.8014	0.88540	0.082355589
18	0.9476	0.93620	0.94080	0.90970	0.94210	0.93220	0.9322	0.94760	0.013174027
20	0.9888	0.98410	1.00800	1.00100	1.01500	1.07640	1.0169	0.98880	0.035184229
30	1.2215	1.23140	1.24210	1.22040	1.10870	1.18770	1.1981	1.22150	0.053950653
40	1.4580	1.42770	1.43780	1.44280	1.24360	1.44270	1.3989	1.45800	0.08704365
50	1.7130	1.71340	1.60530	1.70250	1.78060	1.76200	1.7128	1.71300	0.068337713
60	1.9770	1.96870	1.96440	1.86240	1.80280	1.96340	1.9123	1.97700	0.075807045
70	2.2420	2.24100	2.14120	2.24200	2.13900	2.23810	2.2003	2.24200	0.054942497
80	2.5230	2.52310	2.42310	2.43300	2.54400	2.53100	2.4908	2.52300	0.057908747
90	2.8100	2.60780	2.60160	2.79840	2.86340	2.79440	2.7331	2.81000	0.120407857
100	3.1410	3.03810	3.13440	3.08750	2.84610	2.99900	3.0210	3.14100	0.110281717

ตารางภาคผนวก ก.2 ผลการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขือเทศ

ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร

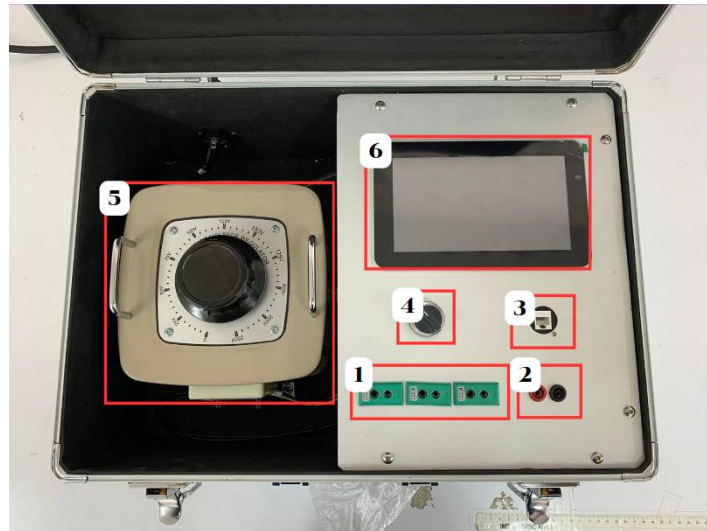
time	temp 1	temp 2	temp 3		Time (s)	Temp	STD
0	33.7	28.4	30		0	30.70	2.7185
10	34.3	31.4	31.9		10	32.53	1.5503
20	35	32.2	32.5		20	33.23	1.5373
30	36	33.1	33.1		30	34.07	1.6743
40	36.8	34	34.7		40	35.17	1.4572
50	38.4	35	35.4		50	36.27	1.8583
60	39.4	36	38.2		60	37.87	1.7243
70	40.1	37.3	39.1		70	38.83	1.4189
80	40.8	38.1	39.7		80	39.53	1.3577
90	41.6	39	40.4		90	40.33	1.3013
100	42.4	40	41.1		100	41.17	1.2014
110	43.2	41	41.8		110	42.00	1.1136
120	44.2	42	42.6		120	42.93	1.1372
130	45.1	43.1	43.5		130	43.90	1.0583
140	45.9	44.1	44.3		140	44.77	0.9866
150	46.9	45	45		150	45.63	1.0970
160	47.8	46	46		160	46.60	1.0392
170	48.6	47	46.9		170	47.50	0.9539
180	49.4	48	47.6		180	48.33	0.9452
190	50.5	49	48.3		190	49.27	1.1240
200	51.2	50.2	49.3		200	50.23	0.9504
210	52.1	51	50		210	51.03	1.0504
220	53.1	52.2	50.8		220	52.03	1.1590
230	54	53.3	51.7		230	53.00	1.1790
240	54.5	54.4	52.6		240	53.83	1.0693
250	55.4	55	53.1		250	54.50	1.2288
260	56.3	56	53.8		260	55.37	1.3650
270	57.4	57	54.7		270	56.37	1.4572
280	58.1	58.3	55.7		280	57.37	1.4468
290	58.9	59.1	56.4		290	58.13	1.5044

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

300	59.7	60.1	57.1		300	58.97	1.6289
310	60.6	61	57.9		310	59.83	1.6862
320	61.5	62	58.7		320	60.73	1.7786
330	62.5	63	59.5		330	61.67	1.8930
340	63.5	64.2	60.5		340	62.73	1.9655
350	65.1	65.3	61.4		350	63.93	2.1962
					AVERAGE		1.4115

ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนการติดตั้งและใช้งาน



องค์ประกอบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพาของอาหารเหลือ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบไอซึม

วิธีการใช้งาน

1. เสียบสาย AC POWER ด้านหลังกระเป๋าดูอุปกรณ์
2. เสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ล โดยสังเกตสัญลักษณ์ขั้วบวกและลบ แล้วเสียบให้ถูกขั้ว (1)
3. เสียบหัวแจ็คกล้วยของสายจ่ายไฟขั้วอิเล็กทรอนิกส์ตามสีดำและแดง (2)
4. เสียบสายแลนกับเราเตอร์แบบไร้สายเพื่อใช้ในการกระจายข้อมูล (3)
5. เปิดเครื่องโดยกดสวิทช์ไปทางขวา (4)
6. หมุนเวอร์ริแอคเพิ่มแรงดันตามค่าที่ต้องการสูงสุด (220V)
7. สามารถเลือกดูข้อมูลและควบคุมได้ผ่านหน้าจอมอนิเตอร์ (6)



หลังติดตั้งชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนไอซึมแบบพกพาเสร็จแล้ว



ใช้ผลมะเขือเทศหวานล้างทำความสะอาด,ผ่าครึ่งลูกเพื่อให้ปั่นได้ง่าย



นำใส่โถปั่นละเอียด



กรองด้วยตะแกรงสแตนเลส



ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ได้ค่าความหวาน 4.5 brix และค่า pH ที่ 3.5,
ใส่น้ำมะเขือเทศที่โหม้มิกเซลล์ 300 กรัม



เริ่มการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้า ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง 25-65 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค.

ประวัติผู้ทำโครงการ

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายชวณ ริยะนา
รหัสร่ำักศึกษา 6515125016
วัน เดือน ปีเกิด 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2538



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยพายัพ	2564
มัธยมศึกษาตอนปลาย	ขุนยวมวิทยา	2558
มัธยมศึกษาตอนต้น	ขุนยวมวิทยา	2555
ประถมศึกษา	อนุบาลขุนยวม	2549

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 305/2 หมู่ 2
ตำบล ขุนยวม อำเภอ ขุนยวม
จังหวัด แม่ฮ่องสอน
รหัสไปรษณีย์ 58140
เบอร์โทรศัพท์ : 095 675 5684
Email Address : wayu.norossi99@gmail.com
Facebook : Chawapon Riyana

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายธัญนาถ ทรงนิลรักษ์
รหัสรักศึกษา 6515125026
วัน เดือน ปีเกิด 5 มีนาคม พ.ศ. 2545



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนพระปริยัติธรรมพระราหุล	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนราชวินิต	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 34/136 หมู่ 4
ตำบล ฉิมพลี อำเภอ ตลิ่งชัน
จังหวัด กรุงเทพฯ
รหัสไปรษณีย์ 10170
เบอร์โทรศัพท์ : 098 545 1321
Email Address : wayu.norossi99@gmail.com
Facebook : K'krow Bufest's

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาวมนิรัตน์ พงษ์สุธิถาวร
รหัสร่ำักศึกษา 6515125046
วัน เดือน ปีเกิด 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2532



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	2554
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนสารสาสน์วิเทศศึกษา	2550
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนสารสาสน์วิเทศศึกษา	2547
ประถมศึกษา	โรงเรียนสารสาสน์วิเทศศึกษา	2544

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 62/233 หมู่ 3
ตำบล วัดชลอ อำเภอ บางกรวย
จังหวัด นนทบุรี
รหัสไปรษณีย์ 11130
เบอร์โทรศัพท์ : 086 422 6628
Email Address : wayu.norossi99@gmail.com
Facebook : Fang Maneerat Ph

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาวอัญนิชา อินชู
รหัสร่ำักศึกษา 6515125065
วัน เดือน ปีเกิด 10 มกราคม พ.ศ. 2545



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนสวรรคค่อนันต์วิทยา	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนเทศบาลสวรรคโลกประชาสรรค์	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 457/2 หมู่ 3
ตำบล ศรีนคร อำเภอ ศรีนคร
จังหวัด สุโขทัย
รหัสไปรษณีย์ 64180
เบอร์โทรศัพท์ : 092 063 9800
Email Address : aunter08@gmail.com
Facebook : Aunnicha Inchu