



การวิเคราะห์ทางความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในเนื้อสุกรภายใต้
แผ่นคู่ขนานอิเล็กโทรดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

THERMAL ANALYSIS DUE TO ELECTRIC CURRENT IN PORK UNDER
ELECTRODE PLATE BY USING FINITE ELEMENT METHOD

นายกลวัชร นาคไพจิตร รหัส 57362781
นายศิวักร ศรีรุวัฒน์ รหัส 57363504

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2560



การวิเคราะห์ทางความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในเนื้อสุกรภายใต้
แผ่นคู่ขนานอิเล็กโทรดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

THERMAL ANALYSIS DUE TO ELECTRIC CURRENT IN PORK UNDER
ELECTRODE PLATE BY USING FINITE ELEMENT METHOD

นายกลวัชร นาคไพจิตร รหัส 57362781
นายศิวักร ศรีรุวัฒน์ รหัส 57363504

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2560

ชื่อหัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในเนื้อสุกรภายใต้แผ่น คูชานานอิเล็กโทรดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกมลวัชร	นาคไพจิตร	รหัส 57362781
	นายศิวกร	ศรียุวัฒน์	รหัส 57363504
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2560		

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนของเนื้อสุกร และการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสุกรเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างแผ่น อิเล็กโทรดคูชานานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench ซึ่งในการจำลองหาการกระจายความร้อนนั้น จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อสุกร ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนทางไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์และแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ที่มีความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาทีและดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 ที่สร้างจากวงจรทระดับแรงดันและวงจรสวิตซ์ จากผลการ จำลอง พบว่า ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ อุณหภูมิภายในเนื้อสุกรที่สูงกว่า 40 องศาเซลเซียสจะมีค่าการนำความร้อนคงที่ประมาณ 1.39 จูลต่อเมตร•องศาเซลเซียส และแหล่งจ่าย แรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ อุณหภูมิภายในเนื้อสุกรที่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส มีค่าการนำ ความร้อนคงที่ประมาณ 2.65 จูลต่อเมตร•องศาเซลเซียส

Project title Thermal Analysis due to the Electric Current in a Pork under the Electrode Plate by using Finite Element Method

Name Mr. Konlawat Nakphijit ID. 57362781
Mr. Siwakon Sriruwat ID. 57363504

Project advisor Mr. Sarawut Wattanawongpitak, D.Eng.

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2017

Abstract

This thesis presents the analysis of the thermal conductivity and heat dissipation in pork due to the electric current flowing between the electrode plates in parallel. The finite element method with ANSYS Workbench program was used to simulate this heat transfer problem. In the thermal expansion simulation, current flow through the pork and input voltage got from the experiments are used to calculate thermoelectric energy, the comparison of voltage sources, 30 V source voltages and a 60 volt pulse width (50 millisecond pulse widths and a 50 percent duty cycle pulse width) which are generated by Boost converter circuit and Switching circuit. So the experiments showed that at the voltage of 30 volts, 40 degree celsius, which the thermal conductivity is close to 1.39 joule per meter•degree celsius and 60 volts, 50 % Duty cycle, thermal conductivity is close to 2.65 joule per meter•degree celsius at 60 degree celsius.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงการขอขอบคุณ ดร.สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งคอยให้คำแนะนำ ปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ มาโดยตลอด อีกทั้งยังเอาใจใส่ในรายละเอียดในการทำงานในทุกขั้นตอนของการดำเนินโครงการจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วง รวมถึงยังให้คำแนะนำในหลักการเขียนปฏิญยานิพนธ์และตรวจทานแก้ไขอย่างละเอียดจนได้ปฏิญยานิพนธ์เป็นรูปเล่มสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ว่าที่ ร.ต.ธานี โกสุม (ครูช่างสาขาวิชาไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์) ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่และให้ยืมใช้อุปกรณ์ในการทำโครงการ ทำให้โครงการดำเนินไปได้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณห้องสมุดมหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้ยืมหนังสือดี ๆ มากมายทำให้สามารถสืบค้นข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้เกี่ยวกับโครงการทำให้โครงการสำเร็จไปได้ด้วยดี

ในท้ายที่สุดนี้ เหนือสิ่งอื่นใด ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งท่านได้ให้การสนับสนุนในทุกด้านเกี่ยวกับการศึกษา เงินทุนของผู้ดำเนินโครงการ คอยให้คำปรึกษา และกำลังใจเป็นอย่างดี

ผู้ดำเนินโครงการ

นายกลวัชร นาคไพจิตร

นายศิวักร ศรีรัฐวัฒน์

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ตารางกิจกรรมการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating).....	4
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	5
2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาความร้อน.....	7
2.3 การแก้ปัญหาคำนวณความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench.....	9
2.4 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อน.....	11
2.5 การสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง.....	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	14
3.1 การออกแบบและทดสอบเครื่อง.....	14
3.1.1 ภาควงจรกำลัง.....	14
3.1.2 ภาควัดคุม.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การสร้างแบบจำลอง และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์คู่ขนาน.....	20
3.3 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ.....	21
3.3.1 การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเน็อสูกรด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ (ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50).....	22
3.3.2 การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเน็อสูกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	23
3.4 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench.....	24
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล.....	25
4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้า.....	25
4.1.1 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเน็อสูกรด้วยเครื่องสร้างแรงดันพัลส์ กระแสตรงด้วยวงจรบอร์ดแรงดัน.....	25
4.1.2 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเน็อสูกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง.....	28
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน.....	32
4.2.1 การจำลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน จากการป้อน แรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรบอร์ดแรงดัน.....	32
4.2.2 การจำลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน จากการป้อน แรงดันไฟฟ้าให้กับเน็อสูกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	32
4.3 วิเคราะห์สรุปผลการทดลอง.....	35
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	45
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	46
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์.....	48
ภาคผนวก ข รหัสต้นฉบับของโปรแกรมเครื่องกระตุ้นเน็อสูกรนุ้มนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	62
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อร่างกายระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ	5
3.1 การเปรียบเทียบการควบคุมระดับแรงดันที่วงจรทระดับแรงดัน จากฟังก์ชัน Timer1.pwm ที่ระดับแรงดัน 50 , 70 และ 90 โวลต์.....	17
3.2 คุณสมบัติทั่วไปของแท่นวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้.....	21
3.3 ข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการความร้อน	24
4.1 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าเนื่อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50.....	26
4.2 ตัวแปรประกอบการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการทดสอบป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื่อสุกร	28
4.3 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	28
4.4 ตัวแปรประกอบการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเนื่อสุกร	30
4.5 การนำความร้อน , ความนำไฟฟ้า และพลังงานความร้อนในรูปของจูล จากการทดสอบป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาทีให้กับเนื่อสุกร.....	32
4.6 ค่าตัวแปรเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50.....	36
4.7 การนำความร้อน , ความนำไฟฟ้า และพลังงานความร้อนในรูปของจูล จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ให้กับเนื่อสุกร.....	37
4.8 ค่าตัวแปรเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ	5
2.2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ประกอบด้วยสามจุดต่อโดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุดต่อ	6
2.3 รูปร่างในการคำนวณปัญหาความสัมพันธ์ความร้อนและกระแสไฟฟ้า	9
2.4 หน้าต่างกรอกข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละเอลิเมนต์	10
2.5 หน้าต่างกำหนดเงื่อนไขในการแก้ปัญหาความร้อนและกระแสไฟฟ้าด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.6 ลักษณะของวงจรถูกตัดคอนเวอร์เตอร์	12
2.7 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์สวิตต์ควบคุมด้วยแสง (Opto-Isolator)	13
3.1 แผนภาพวงจรการทำงานเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงด้วยวงจรถบระดับแรงดัน	15
3.2 ภาพรวมของวงจรเชื่อมต่อภายในตัวเครื่อง	16
3.3 ลักษณะภายนอกของตัวเครื่อง	17
3.4 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์	18
3.5 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 70 โวลต์	18
3.6 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 90 โวลต์	18
3.7 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุม	19
3.8 แทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้	20
3.9 รายละเอียดแบบจำลองแทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้	20
3.10 การจัดวางเนื่อสุกรก่อนเริ่มการทดสอบ	22
3.11 เครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง	22
3.12 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกร	23
3.13 การวัดรูปคลื่นระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกร	23
3.14 การแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนเพื่อคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
4.1 ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการป้อนแรงดันพัลส์ กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ให้กับเนื่อสุกร	27
4.2 ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ เนื่อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์	30
4.3 แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ กับเครื่องสร้างแรงดัน พัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที	31
4.4 กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่าง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ กับเครื่องสร้างแรงดัน พัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับอุณหภูมิเมื่อทำการป้อนแรงดันพัลส์ กระแสตรง 60 โวลต์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50.....	31
4.6 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิจากการป้อนแรงดัน พัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50.....	35
4.7 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับเวลาจากการป้อนแรงดันพัลส์ กระแสตรง 60 โวลต์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50.....	35
4.8 การจำลองการกระจายความร้อนจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร.....	37
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับอุณหภูมิเมื่อทำการป้อนด้วย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	39
4.10 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิจากการป้อน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	40
4.11 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับเวลาจากการป้อน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	41
4.12 การจำลองการกระจายความร้อนจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเนื้อสุกร.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การทำให้เนื้อสุกรสุกพอดีด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก จำเป็นต้องมีการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า ช่วงเวลา และรูปแบบที่เหมาะสม

โครงการนี้จึงได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาคำนวณคุณลักษณะการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรเมื่อถูกป้อนด้วยแหล่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ กับ แรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และมีดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 และจำลองการกระจายความร้อนเนื่องจากแรงดันที่ป้อนให้กับเนื้อสุกร ด้วยโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อน กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้อสุกร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบให้ได้สถานะที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อหาคุณลักษณะการนำความร้อนในเนื้อสุกร
2. เพื่อวิเคราะห์ทางความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในเนื้อสุกรด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สามารถพัฒนาเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน ให้สามารถปรับระดับแรงดันได้ตั้งแต่ 50 - 90 โวลต์ และเลือกปรับเปลี่ยนความกว้างพัลส์ได้ 5 - 100 มิลลิวินาที
2. อิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบเพลดคู่ขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 1.25 เซนติเมตร , ยาว 5.5 เซนติเมตร และหนา 0.1 เซนติเมตร
3. ใช้โปรแกรม Ansys Workbench ในการวิเคราะห์ความร้อน และประมาณค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกร
4. ใช้เนื้อสุกรขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร , ยาว 2 เซนติเมตร และสูง 1 เซนติเมตร

1.4 ตารางกิจกรรมการดำเนินงานตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรมการดำเนินงาน	พ.ศ. 2560					พ.ศ. 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกำลังไฟฟ้า										
2. ประมวลผลข้อมูลเพื่อออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Ansys และทำโมเดลการทดสอบแบบแผ่นเพลตคู่ขนาน										
3. พัฒนาเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี										
4. รวบรวมข้อมูล และปรับปรุงการทดลอง										
5. จัดทำรูปเล่มโครงการ										
6. นำเสนอโครงการ										

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำผลจากการจำลองคุณลักษณะการนำความร้อนเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรแสดงให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป
2. สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย กับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สภาวะเหมาะสม

1.6 งบประมาณ

1. ค่าอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	1350 บาท
2. เนื้อสุกร (สำหรับใช้ทดสอบ)	650 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาท)	<u>2000 บาท</u>
หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ โดยอัตราการนำความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนอิสระที่ไหลผ่านเนื้อสุกร จึงทำให้จากแผ่นเพลตอีกด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งร้อนประมาณ 0.005 - 1.2 องศาเซลเซียสต่อวินาทีและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าร้อยละ 95 การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีกลไกการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหาร จึงไม่มีผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกถูกนำมาใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อสำหรับอาหารเหลวเนื้อเดียว ตลอดจนการนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปในลักษณะต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้ในการละลายอาหารทะเลแช่แข็งซึ่งสามารถช่วยลดพื้นที่และปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการละลายแบบดั้งเดิม การลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ การพาสเจอร์ไรส์และการสเตอริไลซ์

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกสามารถใช้ได้ทั้งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่า เนื่องจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียว จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ส่งผลให้เกิดการกร่อน (Corrosion) ที่ผิวของอิเล็กโทรดอย่างรุนแรงและเกิดเป็นตะกอนของสนิมออกไซด์ของโลหะ ซึ่งเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในอาหาร ดังนั้น จึงนิยมใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อการศึกษาการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก

ถึงแม้ว่า การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีข้อเสียในเรื่องการปนเปื้อนในอาหาร แต่ไฟฟ้ากระแสตรงก็มีข้อดีในเรื่องความปลอดภัยที่มีมากกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีการเปรียบเทียบผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับแสดงดังตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ทั้งเพศชายและหญิงที่เกิดเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ พบว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายทั้งชายและหญิงของไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีผลต่อร่างกายทุกระดับความรุนแรง มีค่าที่สูงกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ จึงสรุปได้ว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีความปลอดภัยมากกว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

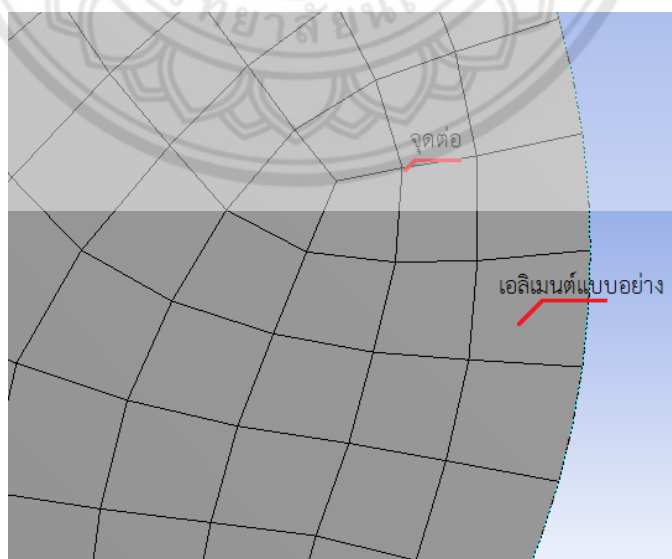
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อร่างกายระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

กระแสไฟฟ้า (mA)				ผลต่อร่างกายมนุษย์
ไฟฟ้ากระแสตรง		ไฟฟ้ากระแสสลับ		
ชาย	หญิง	ชาย	หญิง	
-	0.6	0.4	0.3	รู้สึกเล็กน้อยเมื่อสัมผัสด้วยมือ
5.2	3.5	-	0.7	รู้สึกว่าไฟดูด
9	6	1.8	1.2	กระตุก ไม่เจ็บปวด ยังควบคุมกล้ามเนื้อได้
62	41	9	6	กระตุก เจ็บปวด ควบคุมกล้ามเนื้อได้ยากขึ้น
76	51	16	10.5	กระตุก เจ็บปวด กล้ามเนื้อเกร็ง
90	60	23	15	กระตุก เจ็บปวด หายใจลำบาก
500	500	100	100	เมื่อถูกไฟดูด 3 วินาที หัวใจเต้นเร็วอาจเสียชีวิต

ที่มา : <http://oknation.nationtv.tv/blog/print.php?id=796993>

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณในปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยหลักการคือแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นชิ้นๆ เป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมที่มีขนาดไม่เท่ากันก็ได้ เรียกว่า เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2.1 สร้างสมการคำนวณเป็นค่าประมาณจากรูปร่างปัญหาที่ถูกแบ่งนั้นๆ โดยการคำนวณจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้



รูปที่ 2.1 การแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ

การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ที่ประกอบด้วยจุดต่อ หมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ซึ่งอาจเป็นค่าของอุณหภูมิ หรืออาจเป็นค่าความเร็วของการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.1)$$

โดย $N_i(x, y)$, $i=1,2,3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ จากสมการ 2.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ แสดงดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ประกอบด้วยสามจุดต่อโดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุดต่อ

$$\phi(x, y) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

การสร้างสมการของเอลิเมนต์ สามารถทำได้โดย

1. วิธีการโดยตรง
2. วิธีการแปรผัน
3. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตัก้าง

หลังจากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (System of simultaneous equations) ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต ลงในระบบสมการรวม แล้วแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $(\phi)_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ เมื่อคำนวณจุดต่อได้แล้ว สามารถนำไปหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการได้ต่อไป

2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนในของแข็งสามมิติ ประกอบด้วยการนำความร้อนในโดเมน (Ω), การนำความร้อนโดยพื้นที่ผิวรอบนอก (Γ) อาจมีการกำหนดอุณหภูมิ กำหนดปริมาณความร้อนที่ผิว การพาความร้อน รวมถึงการแผ่รังสี โดยสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวกับการนำความร้อนภายใต้สถานะไม่อยู่ตัวทั่วไป ดังสมการที่ 2.3

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

โดย q_x , q_y และ q_z แทนอัตราการถ่ายเทความร้อน ในแนวแกน, Q คืออัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เอง, ρ คือความหนาแน่นมวล, c คือความถ่วงจำเพาะของวัสดุนั้น และ T คืออุณหภูมิที่อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นตัวแปรไม่รู้ค่าที่ต้องการหาจากการคำนวณ

จากกฎของฟูริเยร์ อัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความชันของการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์โดยทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.4

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

โดย $[k]$ เรียกว่าเมทริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งหากวัสดุนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic material) สามารถลดรูปอย่างง่ายดังสมการที่ 2.5

$$[k] = - \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปอาจประกอบด้วย การกำหนดอุณหภูมิที่ผิว, กำหนดปริมาณความร้อนเข้าตลอดผิว, การพาความร้อนออกตลอดผิว และ

การแผ่รังสีออกตลอดผิว จากสมการอนุพันธ์ที่ 2.3 ที่มีเงื่อนไขเริ่มต้น สามารถเขียนในรูปสมการทั่วไป ได้ดังสมการ 2.6

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.6)$$

โดย T_0 แทนอุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวัตถุ

เมื่อทราบสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขเริ่มต้นของขอบเขตที่เหมาะสมแล้ว สามารถทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) การกระจายของอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์สามารถสมมติให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และค่าอุณหภูมิที่จุดต่อได้ดังสมการที่ 2.7

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)](T(t)) \quad (2.7)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของพิกัด ความชันของการกระจายของอุณหภูมิในทิศทาง x , y และ z สามารถเขียนอยู่ในรูปดังสมการที่ 2.8

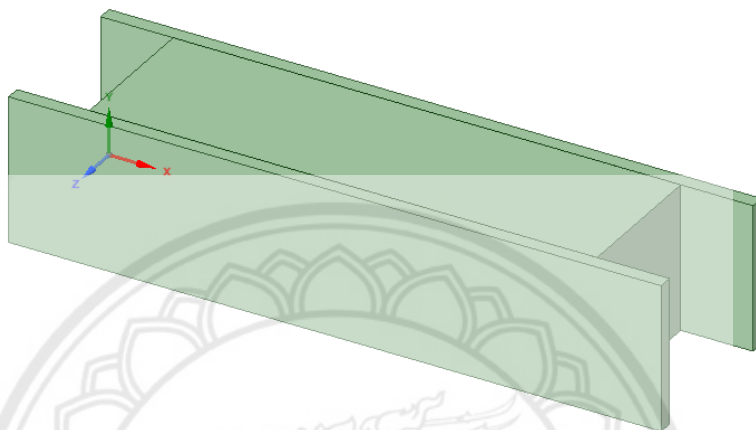
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial z} \end{bmatrix}}_{[B(x,y,z)]} (T(t)) \quad (2.8)$$

สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างซึ่งก็คือสมการเชิงอนุพันธ์ ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W , และประยุกต์การอินทิเกรตทีละส่วน และระเบียบวิธีของบับโนฟ - กาเลอร์คิน โดยเลือกฟังก์ชันการกระจาย N , ภายในเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก จากนั้นแทนอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถเขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวน r และละเลยการนำความร้อนที่พื้นผิวโดยรอบนอก แสดงดังสมการที่ 2.9

$$\int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k][B]d\Omega(T) - \int_{\Omega^{(e)}} Q(N)d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c(N)[N]d\Omega \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = 0 \quad (2.9)$$

2.3 การแก้ปัญหาความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench

โปรแกรม Ansys Workbench เป็นโปรแกรมใช้คำนวณปัญหาทางฟิสิกส์ในระบบสามมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกปัญหาที่ต้องการคำนวณ ในที่นี้เลือกปัญหาระหว่างอุณหภูมิทางไฟฟ้า โดยสร้างรูปร่างเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปร่างในการคำนวณปัญหาความสัมพันธ์ความร้อนและกระแสไฟฟ้า

แบ่งรูปร่างออกเป็นส่วนเอลิเมนต์ย่อย เพื่อคำนวณปัญหาอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้า ต้องทราบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความร้อนจากสมการพลังงานความร้อนในรูปของจูล (G) ดังสมการที่ 2.10 และสมการพลັกซ์ความร้อน (H) โดยที่ k คือค่าความนำความร้อน ดังสมการที่ 2.11

$$G = J^2 \rho \quad (2.10)$$

$$H = k \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (2.11)$$

จากนั้นนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (J) $J = \sigma E$ และสมการความสัมพันธ์ของความต้านทานทางไฟฟ้า $R = \rho \frac{l}{A}$, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ โดยที่ E คือสนามไฟฟ้า, ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า, σ คือสภาพความนำไฟฟ้า และ A คือพื้นที่หน้าตัด แทนลงในสมการ 2.10

$$G = \frac{l}{VA} E^2 \quad (2.12)$$

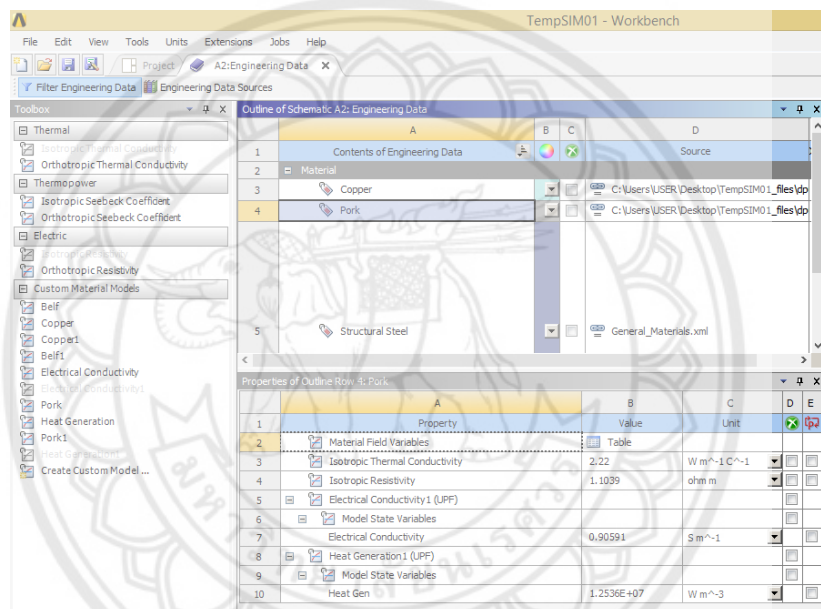
สมการความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนในรูปของจูล ดังสมการที่ 2.12 แทนลงในสมการพลັกซ์ความร้อน โดยแปลงความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนในรูปของจูลเป็นพลັกซ์ความร้อนด้วย

การคูณ ส่วนกลับของระยะห่างของกระแสที่วิ่งผ่านเนื้อสุกรที่ทำการทดสอบ (l) และในที่นี้ระยะที่กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน $l = \Delta L$ ดังสมการ 2.13

$$\frac{H}{l} = k \frac{\Delta T}{l^2}$$

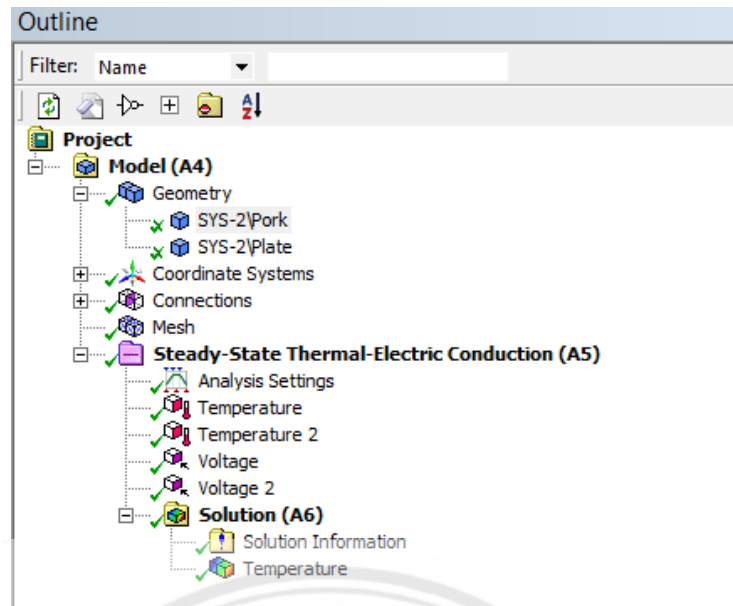
$$k = \frac{l^2 G}{\Delta T} \quad (2.13)$$

ป้อนเงื่อนไขขอบเขตของปัญหานี้ (เช่น ค่าความนำไฟฟ้า ค่าความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนในรูปของจุด และค่าการนำความร้อน เป็นต้น) จาก Engineering Data ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หน้าต่างกรอกข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละเอลิเมนต์

เมื่อกำหนดข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละเอลิเมนต์แล้ว ทำการป้อนเงื่อนไขเริ่มต้น เช่น แรงดันที่ตกคร่อม อุณหภูมิโดยรอบที่ Steady – State Thermal – Electric Conduction ดังรูปที่ 2.5 และกด F5 เพื่อคำนวณปัญหาความร้อนและกระแสไฟฟ้าด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.5 หน้าต่างกำหนดเงื่อนไขในการแก้ปัญหาความร้อนและกระแสไฟฟ้าด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

2.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรนั้นเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยทำการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) เปรียบเทียบกับค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จริงโดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี

ในการหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จะพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากผลการทดสอบ เทียบกับสมการการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน โดยสมมติให้พลังงานทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 2.14 โดยที่ U คือพลังงาน , P คือกำลังไฟฟ้า และ t คือเวลา

$$U = Pt \quad (2.14)$$

พิจารณาสมการให้อยู่ในรูปของพลังงานในหน่วยจูล ดังนั้น จึงทำการแปลงหน่วยโดยการคูณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J) โดยที่ $J = 4.184 \text{ J/cal}$ เข้าไปในสมการที่ 2.14 จะได้สมการอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปที่พิจารณาพลังงานไฟฟ้าดังสมการที่ 2.15 โดยที่ m คือมวลของวัสดุ c คือค่าความร้อนจำเพาะ และ T คืออุณหภูมิ

$$Pt = J * mc\Delta T \quad (2.15)$$

โดยที่ mc ในสมการประกอบด้วยมวลของเนื้อคู่กับค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อรวมกับมวลของน้ำคู่กับค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ แสดงดังสมการ ที่ 2.16 โดยในที่นี้จะละเลยผลของอุณหภูมิหลังจากน้ำระเหยออก และสมมติว่าเนื้อที่ทำการทดสอบไม่มีเลือดอยู่ภายใน

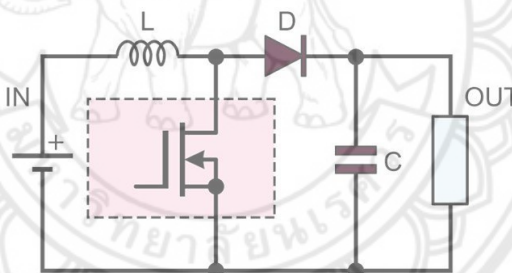
$$mc = m_m c_m + m_w c_w \quad (2.16)$$

เมื่อทำการทดสอบจะทำการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง โดยใช้ค่ากำลังเฉลี่ย (P_{av}) แสดงดังสมการที่ 2.17

$$J_{\text{exp}} = \frac{P_{\text{av}} t_{\text{max}}}{mc(T_{\text{max}} - T_0)} \quad (2.17)$$

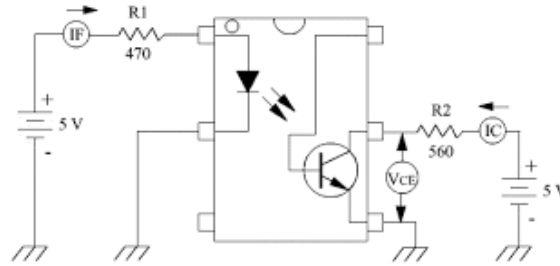
2.5 การสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง

ในการสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงนี้ จะใช้วงจรทระดับแรงดัน เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้า และวงจรสวิตซ์ซึ่งในการกำหนดขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยใช้วงจรออปโตไอโซเลเตอร์ในการแยกภาคกำลัง และภาคควบคุม



รูปที่ 2.6 ลักษณะของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ มีส่วนประกอบใหญ่แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของวงจรทบแรงดัน และวงจรควบคุม โดยในบทความนี้จะขอแบ่งอธิบายการทำงานที่ละส่วน และขอละวิธีการคำนวณไว้ ตามวงจรในรูปที่ 2.6 ลักษณะของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายทางด้านอินพุต, ตัวเหนี่ยวนำ, ไดโอด, ตัวเก็บประจุ, มอสเฟต และโหลด อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่ในการทบแรงดันทางด้านอินพุตให้มากขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ต้องการ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์สวิตต์ควบคุมด้วยแสง (Opto-Isolator)

ที่มา : <http://chaiveewan-resume.blogspot.com/2012/06/opto-isolator-opto-coupler-opto-coupler.html>

อุปกรณ์สวิตต์ควบคุมด้วยแสง (Opto-Isolator) ในรูปที่ 2.7 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบควบคุมไฟฟ้า โดยใช้หลักการ กระแสต่ำควบคุมกระแสสูง และแรงดันไฟฟ้าต่ำควบคุมแรงดันไฟฟ้าสูง จากแนวคิดนี้เราสามารถนำไปออกแบบวงจรควบคุม เพื่อออกแบบให้บอร์ดอาตุโนที่ใช้พิกัดแรงดันต่ำสามารถควบคุมมอเตอร์กำลังที่มีพิกัดแรงดันสูงในวงจรได้ โดยข้อดีที่สำคัญ คือ กรรวาน์แยกออกจากกันทำให้ไม่มีการรบกวนกันระหว่างแรงดันสูง และแรงดันต่ำ



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนในการดำเนินงาน ออกแบบและพัฒนาเครื่องสร้างแรงดันพัลส์ กระแสตรงด้วยวงจรทระดับแรงดัน และขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกร โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบและทดสอบเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงด้วยวงจรทระดับแรงดัน
2. สร้างแบบจำลอง และพัฒนาแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก
3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อสุกร ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench

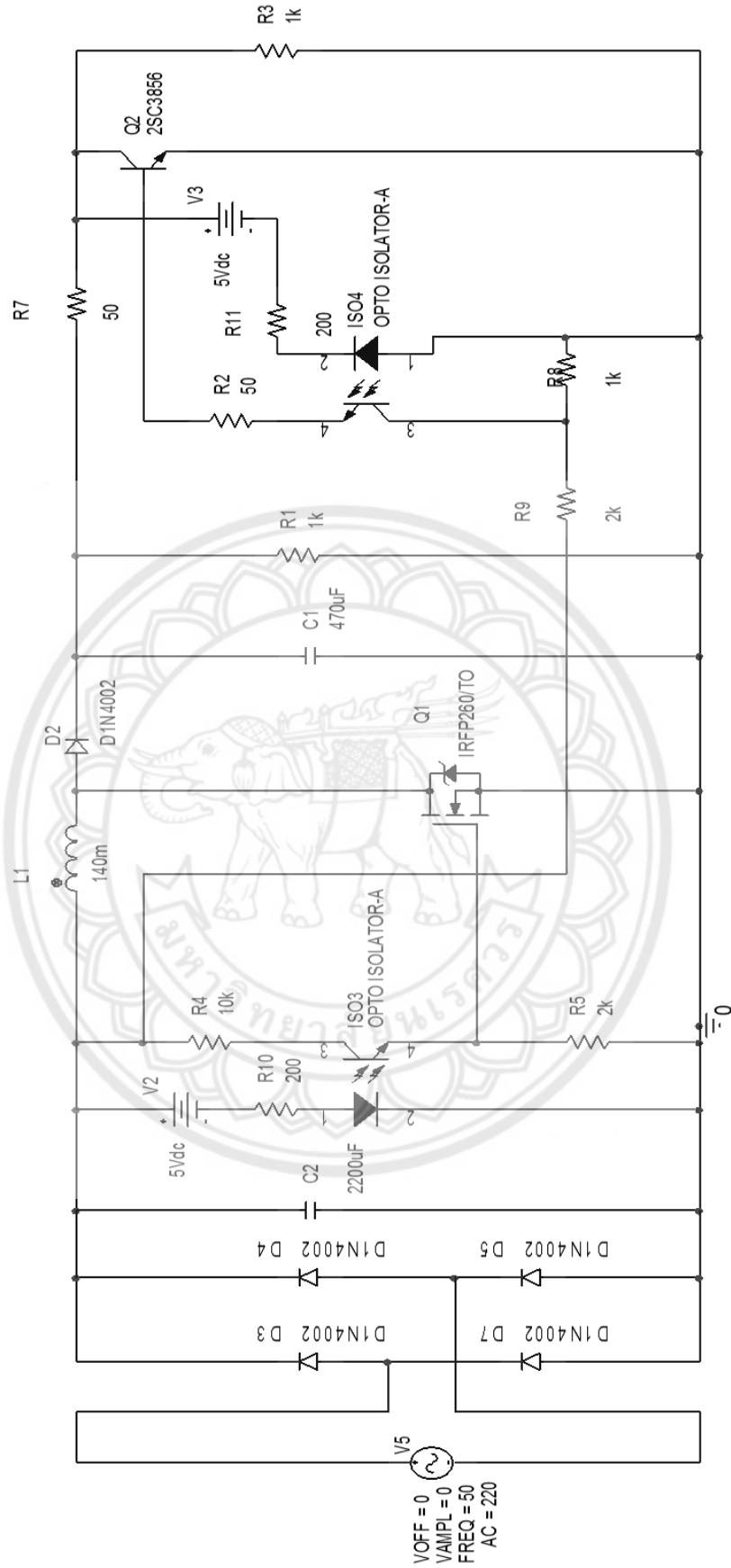
3.1 การออกแบบและทดสอบเครื่อง

เครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับภายในบ้านเรือน 220 โวลต์ ภายในเครื่องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลต์เป็น 35 โวลต์ แล้วทำการแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสให้ได้แรงดันกระแสตรงประมาณ 50 โวลต์ พร้อมทั้งสามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ในช่วง 50 - 90 โวลต์ ด้วยวงจรทระดับแรงดัน และสามารถปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรทระดับแรงดันด้วย วงจรสวิตชิ่งโดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง 2SC3856 เป็นตัวควบคุมระยะเวลาการสวิตชิ่ง ได้ตั้งแต่ 5 ถึง 100 มิลลิวินาที นอกจากนี้ ตัวเครื่องยังสามารถตั้งเวลาการทำงานได้ภายใน 300 วินาที

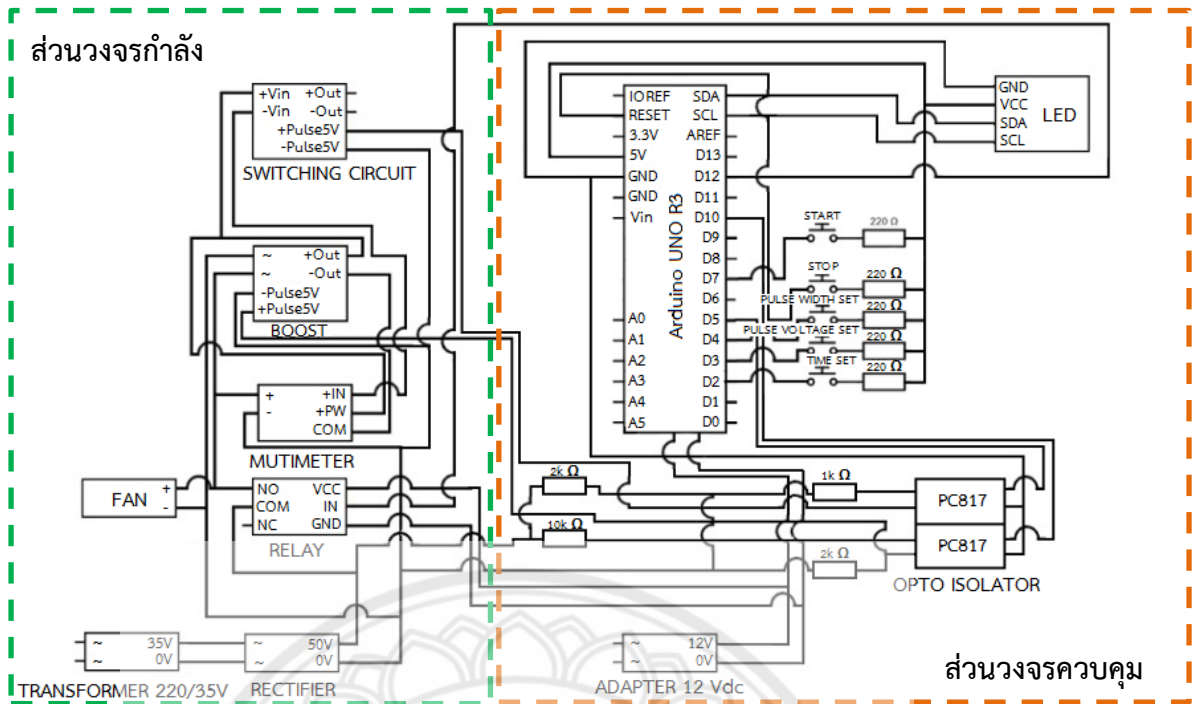
3.1.1 ภาควงจรกำลัง

ส่วนของภาคกำลังประกอบไปด้วยวงจร หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220/35 โวลต์ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ รุ่น RS404 พัดลมระบายอากาศ รีเลย์ วงจรสวิตชิ่ง และวงจรทระดับแรงดัน

นอกจากนี้ อุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง (Opto-Isolator) ถูกใช้ในการแยกส่วนของ วงจรภาคกำลังและวงจรภาคควบคุมออกจากกันทางไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ไอซีเบอร์ PC817 โดยรายละเอียด วงจรภายในแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ส่วนโครงสร้างภายนอกของตัวเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.3



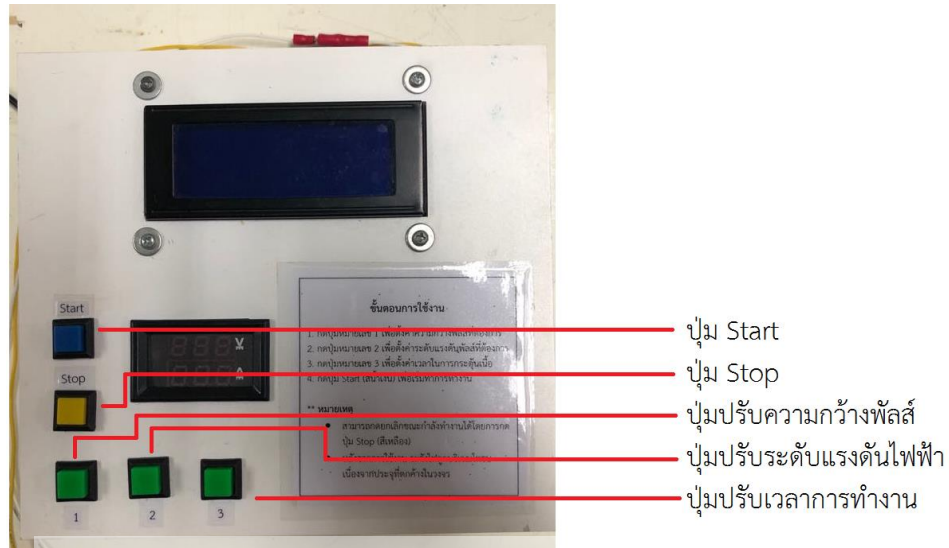
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรการทำงานเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงด้วยวงจรทบทระดับแรงดัน



รูปที่ 3.2 ภาพรวมของวงจรเชื่อมต่อภายในตัวเครื่อง

รายละเอียดอุปกรณ์ที่สำคัญในวงจรเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง

1. หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220/35 โวลต์
2. แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 12 โวลต์
3. วงจรออปโต ไอโซเลเตอร์
4. วงจรเรียงกระแส
5. บอร์ด Arduino UNO R3 1 ตัว
6. วงจรทระดับแรงดัน
7. วงจรสวิตชิง
8. รีเลย์ 1 ตัว



รูปที่ 3.3 ลักษณะภายนอกของตัวเครื่อง

3.1.2 ภาคควบคุม

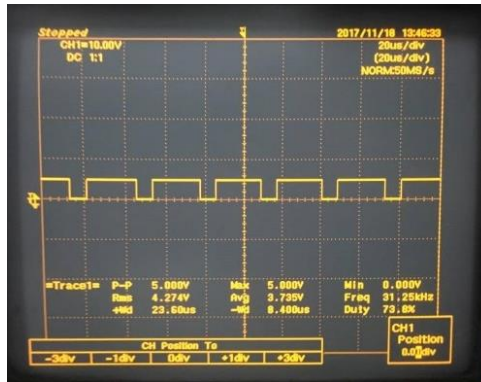
ในส่วนของภาคควบคุมนั้นจะประกอบด้วยส่วนของการปรับระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรทระดับแรงดันและส่วนของการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรทระดับแรงดัน ทั้งสองส่วนจะถูกปรับค่าได้ด้วยสัญญาณ PWM ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอิโนที่มีการควบคุมแยกกันอย่างอิสระ ดังนั้น ในส่วนภาคควบคุมนี้จึงได้นำชุดคำสั่งแบบ Asynchronous Programming ที่สามารถสร้างสัญญาณ PWM ทั้ง 2 สัญญาณ ได้อย่างอิสระ โดยแสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.7

ทำการทดสอบโดยการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อสร้างระดับแรงดันที่ 50 , 70 และ 90 โวลต์ โดยกำหนดให้กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิล ทำการวัดสัญญาณพัลส์ ดังรูปที่ 3.4 , 3.4 และ 3.4 ตามลำดับ รวมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าขาออกที่วงจรทระดับแรงดันแสดงดังตารางที่ 3.1

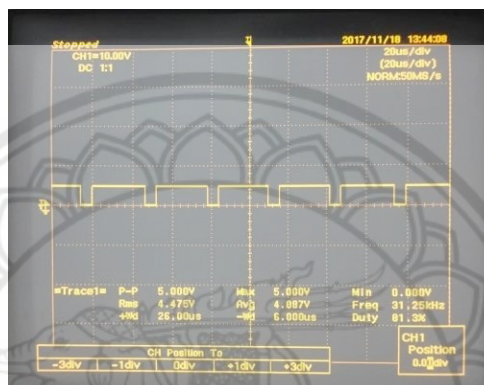
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบการควบคุมระดับแรงดันที่วงจรทระดับแรงดัน จากฟังก์ชัน

Timer1.pwm ที่ระดับแรงดัน 50 , 70 และ 90 โวลต์

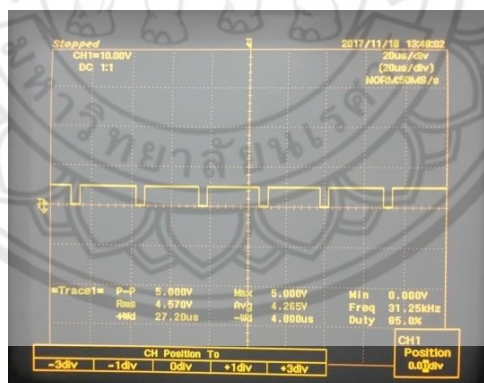
แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)	แรงดันไฟฟ้าขาออก (V)	ความกว้างพัลส์ขณะนำกระแส (μs)	ความกว้างพัลส์ขณะไม่นำกระแส (μs)	ความถี่ (kHz)	ดิวตี้ไซเคิล (%)
50	50.6	23.6	6	31.65	73.8
70	70.8	26.0	6	31.25	81.3
90	91.4	27.2	4.8	31.65	85.0



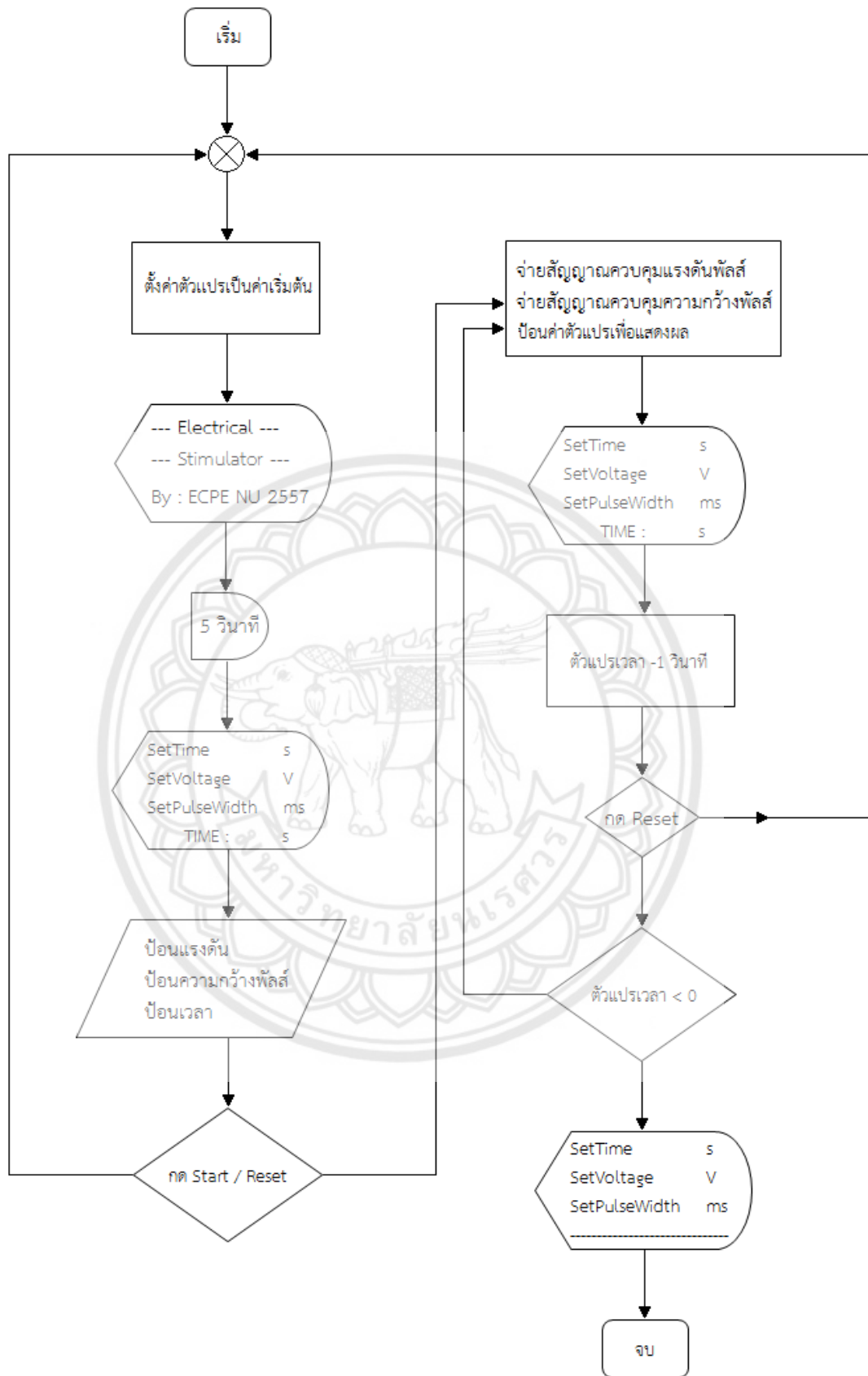
รูปที่ 3.4 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์



รูปที่ 3.5 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 70 โวลต์



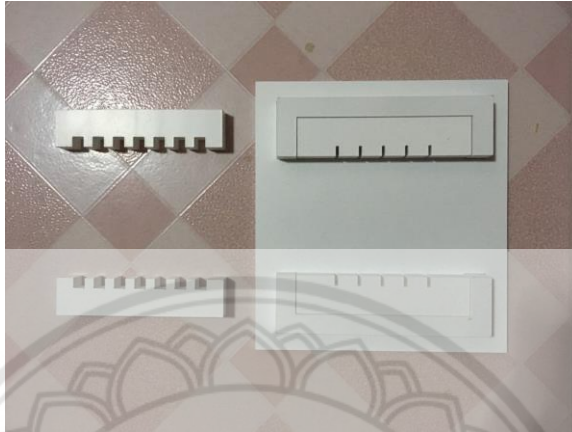
รูปที่ 3.6 สัญญาณควบคุมการสร้างแรงดันพัลส์ที่ระดับแรงดัน 90 โวลต์



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุม

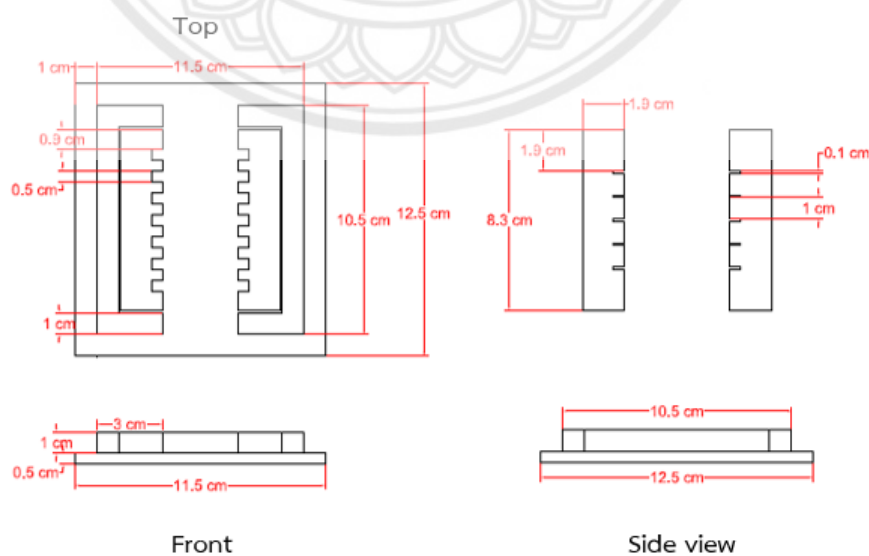
3.2 การสร้างแบบจำลอง และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์คู่ขนาน

ทำการออกแบบให้อยู่ในรูปของอิเล็กทรอนิกส์แบบคู่ขนาน โดยวัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเพลตทำจากแผ่นอะคริลิกใสแสดงดังรูปที่ 3.8 แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกใช้เป็นแผ่นเหล็กขนาดยาว 5.5 เซนติเมตร ความหนา 0.1 เซนติเมตร ความสูง 1.25 เซนติเมตร



รูปที่ 3.8 แทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้

โดยแทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้สามารถปรับขนาดความกว้างของชิ้นเนื้อได้โดยแบ่งเป็นระดับต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งออกแบบให้มีทั้งหมด 2 ชุด เพื่อให้สามารถเลือกขนาดของแผ่นตัวนำที่ใช้ทำแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ และปรับขนาดความกว้างของเนื้อสุกรที่ต้องการทดสอบได้โดยรายละเอียดขนาดของแทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับค่าได้แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รายละเอียดแบบจำลองแทนวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้

ในช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 1 สามารถปรับความยาวเนื้อได้ 6 ระดับ สามารถบรรจุอิเล็กทรอนิกส์ได้ขนาดสูงสุดแผ่นละ 0.5 เซนติเมตร ส่วนในช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบที่ 2 สามารถปรับความยาวเนื้อได้ 4 ระดับ สามารถบรรจุอิเล็กทรอนิกส์ได้ขนาดสูงสุดแผ่นละ 0.1 เซนติเมตร เพื่อใช้กับแผ่นทองแดงที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดเพื่อความกระชับของการบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โดยแต่ละระดับห่างกันระยะละ 1 เซนติเมตร ตารางที่ 3.2 แสดงถึงขนาดและข้อมูลทั่วไปของแท่นวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทั่วไปของแท่นวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบปรับระยะได้

คุณสมบัติ	หน่วย (เซนติเมตร)
ความกว้างทั้งหมดของแท่นวางแผ่นเพลต	11.5
ความยาวทั้งหมดของแท่นวางแผ่นเพลต	12.5
ความสูงทั้งหมดของแท่นวางแผ่นเพลต	1.5
ความกว้างชิ้นเนื้อที่บรรจุได้	5.5
ความยาวช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์	8.3
ความกว้างช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์	1.9
ความสูงช่องบรรจุแผ่นอิเล็กทรอนิกส์	1

3.3 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ทำการทดสอบโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรดังรูปที่ 3.10 ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบ่งเป็นการทดสอบการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ให้กับเนื้อสุกร ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และคิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 กับป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ให้กับเนื้อสุกร โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

เงื่อนไขการทดลอง

1. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร ขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ขนาดความยาว 2 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร
2. ใช้ระยะเวลาในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร 300 วินาที
3. การทดลองโดยใช้แท่นวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ปรับระยะวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ห่างกัน 1 เซนติเมตร
4. แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ใช้แผ่นเหล็กขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ขนาดความยาว 3.5 เซนติเมตร และหนา 0.01 เซนติเมตร
5. วัดอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางของเนื้อสุกร ด้วยมัลติมิเตอร์ UNI-T รุ่น UT70B



รูปที่ 3.10 การจัดวางเนื้อสุกรก่อนเริ่มการทดสอบ

3.1.1 การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ (ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50)

ทำการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ระยะเวลาในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร 300 วินาที และความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที จากเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง ดังรูปที่ 3.11 จากนั้นกดปุ่มเริ่ม เพื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร

ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์จากเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง และทำการวัดอุณหภูมิ แล้วบันทึกผลลงในตาราง



รูปที่ 3.11 เครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง

3.1.2 การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกรเป็นระยะเวลา 300 วินาที และบันทึกผลของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และวัดอุณหภูมิจากมัลติมิเตอร์ UNI-T โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกร

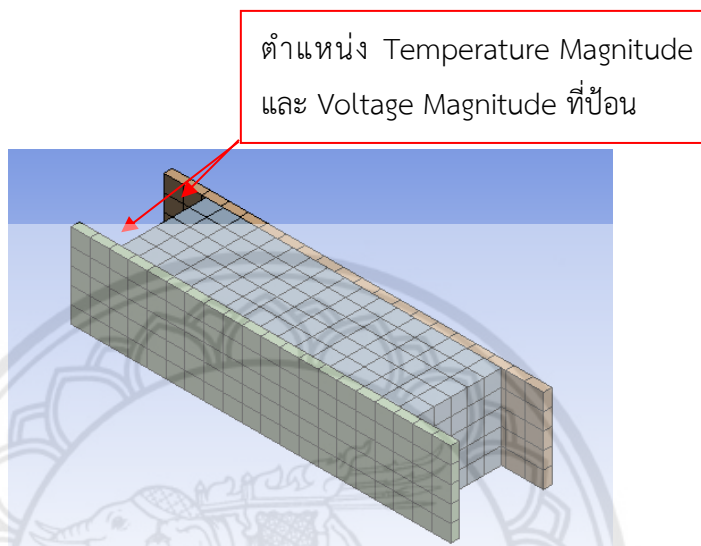
ในการวัดรูปคลื่นทำได้โดยการต่อออสซิลโลสโคป Yokogawa รุ่น DL1520 ดังรูปที่ 3.13 ระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นปรับย่านการวัดให้เหมาะสมกับรูปคลื่น



รูปที่ 3.13 การวัดรูปคลื่นระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื่อสุกร

3.4 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench

จำลองผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้วยวิธีแก้ปัญหาระหว่างอุณหภูมิทางไฟฟ้า สร้างแบบจำลองของเนื้อสุกร และป้อนตัวแปรเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง ดังตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการแบ่งแบบจำลองเป็นส่วน ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนเพื่อคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการคำนวณปัญหาความร้อนกับกระแสไฟฟ้า และสังเกตอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการประมาณค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรให้มีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดสอบ

หลังจากประมาณค่าการนำความร้อนของเนื้อสุกร บันทึกค่าการนำความร้อน และนำค่าการนำความร้อนมาคำนวณสมการคุณลักษณะด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการความร้อน

ตัวแปรที่ใช้	ความหมายของตัวแปร	หน่วย
Temperature Magnitude	ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ	$^{\circ}C$
Voltage Magnitude	ค่าแรงดันเริ่มต้นที่ป้อนให้กับวัตถุ	V
Isotropic Thermal Conductivity (k)	ค่าการนำความร้อน	$W / m^{\circ}C$
Isotropic Resistivity (ρ)	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega * m$
Electrical Conductivity (σ)	สภาพความนำไฟฟ้า	S/m
Joule heat power (G)	พลังงานความร้อนในรูปของจุด	W/m^3

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากกำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิ โดยแบ่งเป็นการทดสอบระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยเครื่องสร้างแรงดันพัลส์ กระแสตรง จากวงจรทระดับแรงดัน 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 และจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ โดยจะแบ่งการทดลองและการวิเคราะห์ผลดังนี้

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้า
2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน
3. วิเคราะห์สรุปผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรนั้นเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก นำมาคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) เปรียบเทียบกับค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จริงโดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี ด้วยการคำนวณสมการที่ 2.16 และจากสมการที่ 2.17

4.1.1 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง ด้วยวงจรทระดับแรงดัน

ทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรเป็นระยะเวลา 300 วินาที ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 โดยแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.1

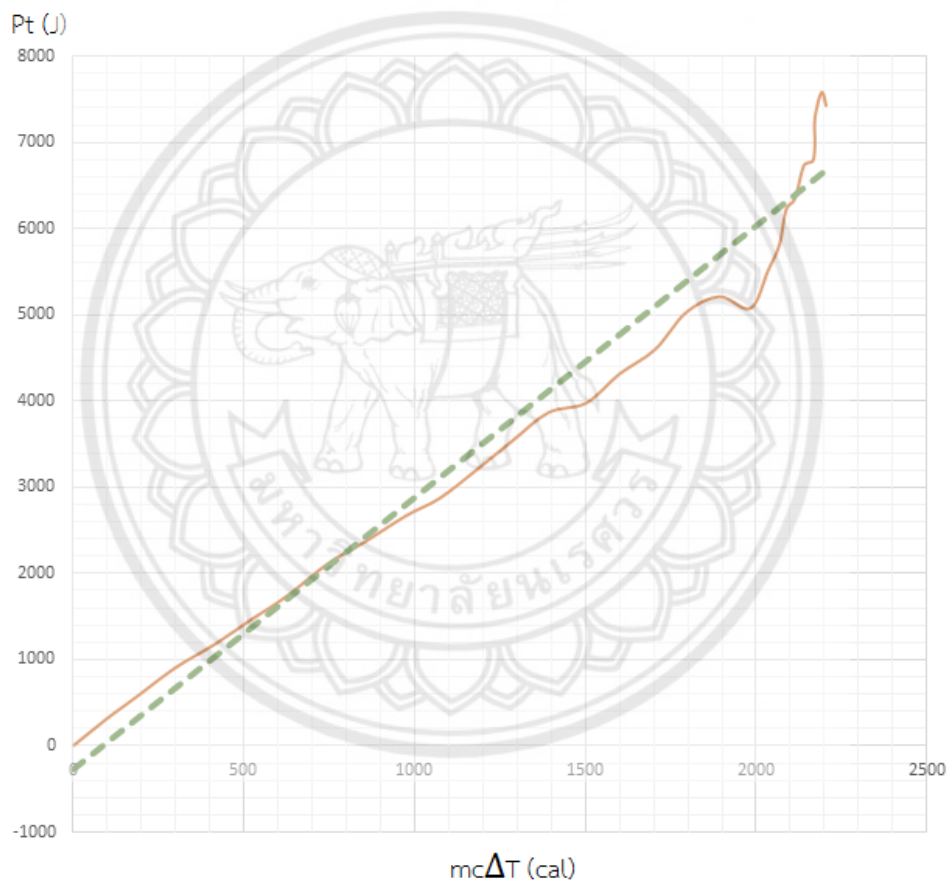
ตารางที่ 4.1 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าเนื้อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์
ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	$mc\Delta T$ (cal)
0	17.9	1.171	28.0	20.9609	0.0	0.0000
10	19.3	1.100	30.0	21.2300	2.0	68.0808
20	18.8	1.185	32.7	22.2780	4.7	159.9899
30	18.6	1.126	35.4	20.9436	7.4	251.8990
40	19.2	1.086	38	20.8512	10.0	340.4040
50	19.6	1.047	40.5	20.5212	12.5	425.5050
60	19.3	1.033	43.3	19.9369	15.3	520.8181
70	19.4	1.100	46.1	21.3400	18.1	616.1312
80	19.5	1.069	48.3	20.8455	20.3	691.0201
90	19.7	1.049	50.7	20.6653	22.7	772.7171
100	19.6	1.056	52.8	20.6976	24.8	844.2019
110	20.0	1.057	55.1	21.1400	27.1	922.4948
120	20.4	1.035	57.2	21.114	29.2	993.9797
130	20.9	1.004	59.1	20.9836	31.1	1058.6564
140	20.8	1.021	61.1	21.2368	33.1	1126.7372
150	21.1	0.977	63.1	20.6147	35.1	1194.8180
160	21.8	0.961	65.1	20.9498	37.1	1262.8988
170	22.0	0.968	67.0	21.2960	39.0	1327.5756
180	22.1	1.006	69	22.2326	41.0	1395.6564
190	22.5	0.995	71	22.3875	43.0	1463.7372
200	23.7	0.94	72.7	22.2780	44.7	1521.6059
210	24.4	0.926	74.5	22.5944	46.5	1582.8786
220	24.9	0.927	76.2	23.0823	48.2	1640.7473
230	25.3	0.933	77.7	23.6049	49.7	1691.8079
240	26.5	0.845	79.3	22.3925	51.3	1746.2725
250	27.1	0.915	80.7	24.7965	52.7	1793.9291
260	28.5	0.896	82.3	25.5360	54.3	1848.3937

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	$mc\Delta T$ (cal)
270	28.9	0.817	83.6	23.6113	55.6	1892.6462
280	28.8	0.822	85.0	23.6736	57.0	1940.3028
290	30.6	0.863	86.1	26.4078	58.1	1977.7472
300	30.9	0.835	86.4	25.8015	58.4	1987.9594

หมายเหตุ : นำหนักก่อนป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร 9.6 กรัม หลังป้อนแรงดันไฟฟ้า 7.8 กรัม



— ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี - - - - - เส้นแนวโน้มค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี

รูปที่ 4.1 ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการป้อนแรงดันพัลส์ กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ให้กับเนื้อสุกร

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรประกอบการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการทดสอบป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
P_{av} (กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย)	22.1681	W
σ_p (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้า)	1.6946	W
mc (มวลคูณค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อสุกรและน้ำ)	34.0404	cal / ° C

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ทำการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) ด้วยสมการที่ 2.17 เปรียบเทียบกับค่าจริงโดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี โดยที่มวลที่ใช้คำนวณสมมติเป็นค่าคงที่ ได้ผลลัพธ์แสดงดังนี้

$$J_{exp} = 3.3454 \text{ จูล ต่อ แคลอรี ค่าความผิดพลาด : ร้อยละ 20.04}$$

4.1.2 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ทำการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรเป็นระยะเวลา 300 วินาที ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ โดยแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป แสดงดังตารางที่ 4.3

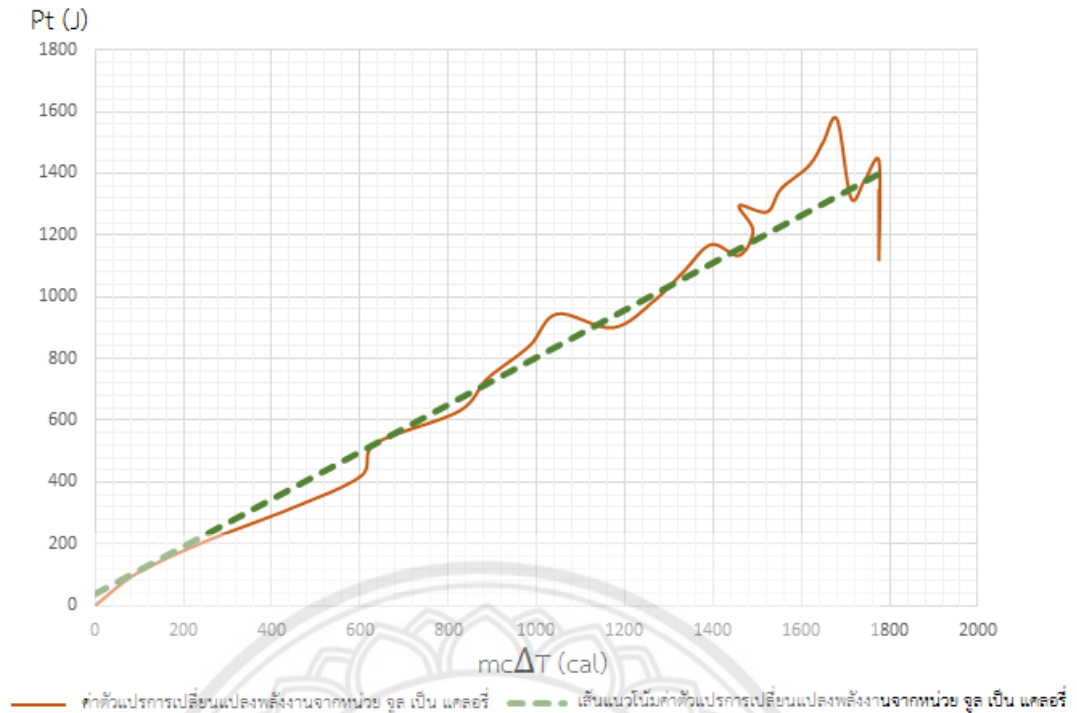
ตารางที่ 4.3 การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)	ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	$mc\Delta T$ (cal)
0	30	0.35	25	10.5	0	0.0000
10	30	0.35	28	10.5	3	95.1282
20	30	0.35	33	10.5	8	253.6752
30	30	0.35	39	10.5	14	443.9316
40	30	0.35	44	10.5	19	602.4786
50	30	0.35	45	10.5	20	634.1880
60	30	0.35	51	10.5	26	824.4444
70	30	0.35	53	10.5	28	887.8632
80	30	0.35	56	10.5	31	982.9914
90	30	0.35	58	10.5	33	1046.4102

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (W)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	$mc\Delta T$ (cal)
100	30	0.30	62	9.0	37	1173.2478
110	30	0.30	65	9.0	40	1268.3760
120	30	0.30	67	9.0	42	1331.7948
130	30	0.30	69	9.0	44	1395.2136
140	30	0.27	71	8.1	46	1458.6324
150	30	0.27	72	8.1	47	1490.3418
160	30	0.27	71	8.1	46	1458.6324
170	30	0.25	73	7.5	48	1522.0512
180	30	0.25	74	7.5	49	1553.7606
190	30	0.25	76	7.5	51	1617.1794
200	30	0.25	77	7.5	52	1648.8888
210	30	0.25	78	7.5	53	1680.5982
220	30	0.20	79	6.0	54	1712.3076
230	30	0.20	80	6.0	55	1744.0170
240	30	0.20	81	6.0	56	1775.7264
250	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264
260	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264
270	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264
280	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264
290	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264
300	30	0.15	81	4.5	56	1775.7264

หมายเหตุ : นำหนักก่อนป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร 8.6 กรัม หลังป้อนแรงดันไฟฟ้า 6.5 กรัม



รูปที่ 4.2 ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรประกอบการคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี จากการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเนื้อสุกร

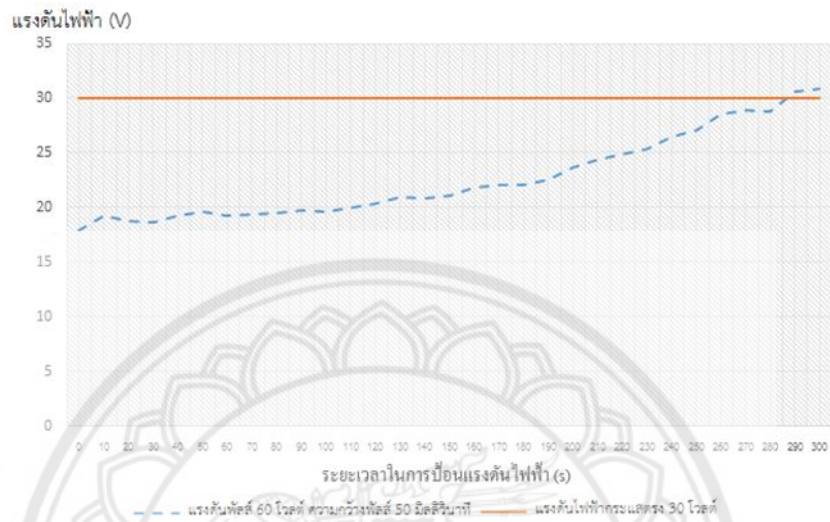
ตัวแปร	ค่า	หน่วย
P_{av} (กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย)	7.9100	W
σ_p (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้า)	2.2604	W
mc (มวลคูณค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อสุกรและน้ำ)	31.7094	$cal / ^\circ C$

จากตารางที่ 4.4 คำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) โดยใช้สมการที่ 2.17 เปรียบเทียบกับค่าจริงโดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี โดยที่มวลที่ใช้คำนวณสมมติเป็นค่าคงที่ โดยได้ผลลัพธ์แสดงดังนี้

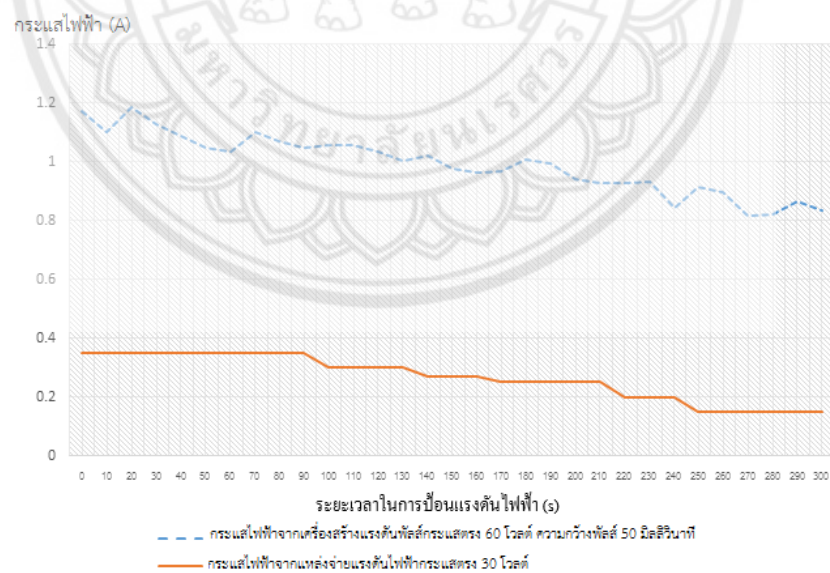
$$J_{exp} = 1.3364 \text{ จูล ต่อ แคลอรี ค่าความผิดพลาด : ร้อยละ 68.06}$$

จากค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) ที่คำนวณพบว่า มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 20.04 ในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ที่มี duty cycle ร้อยละ 50 และในการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

30 โวลต์ มีค่าสูงถึงร้อยละ 68.06 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการในคำนวณ จะไม่คำนึงถึงมวลของน้ำที่การระเหยออกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรที่ไม่คงที่ ซึ่งส่งผลต่อค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ให้ได้ค่าที่ไม่เท่ากับค่าจริง



รูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเปรียบเทียบระหว่าง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ กับเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.4 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเปรียบเทียบระหว่าง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ กับเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยก็มีค่าไม่เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยที่การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 30 โวลต์ คงที่ แต่ในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงด้วยวงจรทระดับแรงดัน กลับมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 20 โวลต์ ถึง 30 โวลต์ เท่านั้น และ กำลังไฟฟ้าจากการป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน

เพื่อหาคุณลักษณะการนำความร้อนเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกร ทำได้โดยการนำค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิจากการทดสอบ มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพความนำไฟฟ้า และค่าพลังงานความร้อนในรูปของจุล เพื่อนำมาเป็นข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตในการแก้ปัญหาการกระจายความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กรอกตัวแปรเงื่อนไขขอบเขต และทำการประมาณค่าการนำความร้อนลงในโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench จากนั้นจำลองการกระจายความร้อนภายในเนื้อสุกร โดยทำการปรับค่าการนำความร้อน ให้การจำลองอุณหภูมิจากการกระจายความร้อนมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิจริงจากการทดสอบมากที่สุด

4.2.1 การจำลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน จากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน

จากการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ค่าสภาพความนำไฟฟ้า (σ) และค่าพลังงานความร้อนในรูปของจุล (G) เพื่อใช้ในการประมาณค่าการนำความร้อน (k) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การนำความร้อน ความนำไฟฟ้า และพลังงานความร้อนในรูปของจุล จากการทดสอบป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาทีให้กับเนื้อสุกร

เวลา (s)	สภาพต้านทาน ไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)	สภาพความนำ ไฟฟ้า (S/m)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m^2)	ค่าพลังงาน ความร้อนในรูป ของจุล (W/m^3)	ค่าการนำความ ร้อน ($W/m^{\circ}C$)
0	0.3057	3.2709	5855	10480450	45.00
10	0.3509	2.8497	5500	10615000	27.00
20	0.3173	3.1516	5925	11139000	18.20
30	0.3304	3.0269	5630	10471800	12.60
40	0.3536	2.8281	5430	10425600	10.00
50	0.3744	2.6709	5235	10260600	8.30

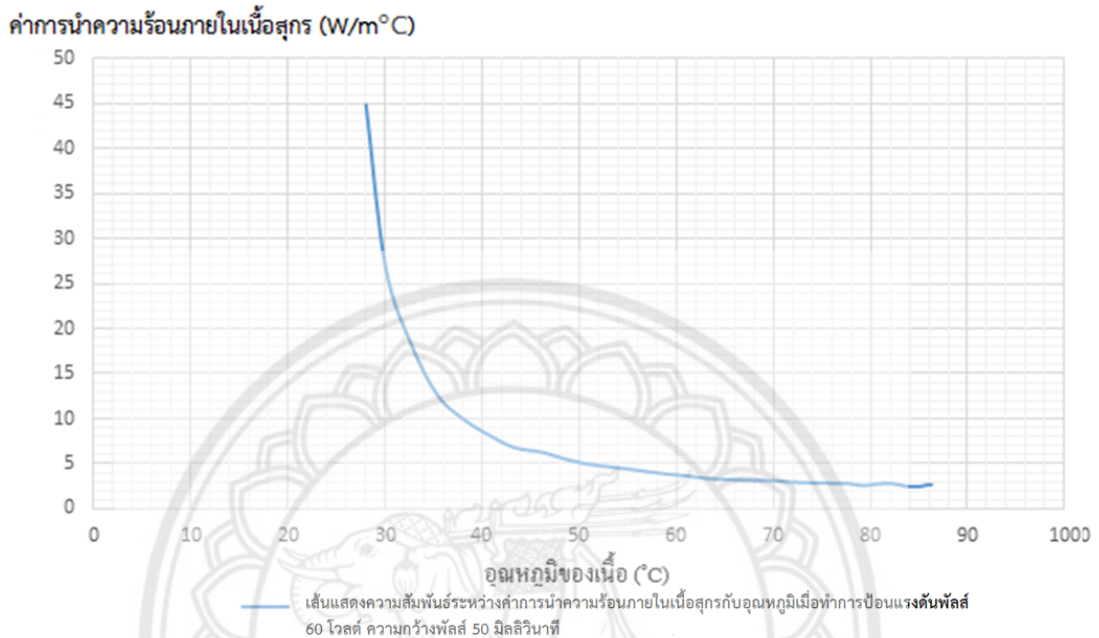
ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

เวลา (s)	สภาพต้านทาน ไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)	สภาพความนำ ไฟฟ้า (S/m)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m^2)	ค่าพลังงาน ความร้อนในรูป ของจุล (W/m^3)	ค่าการนำความ ร้อน ($W/m^{\circ}C$)
60	0.3737	2.6762	5165	9968450	6.80
70	0.3527	2.8351	5500	10670000	6.30
80	0.3648	2.7410	5345	10422750	5.60
90	0.3756	2.6624	5245	10332650	5.00
100	0.3712	2.6939	5280	10348800	4.70
110	0.3784	2.6425	5285	10570000	4.40
120	0.3942	2.5368	5175	10557000	4.10
130	0.4163	2.4019	5020	10491800	3.85
140	0.4074	2.4543	5105	10618400	3.65
150	0.4319	2.3152	4885	10307350	3.38
160	0.4537	2.2041	4805	10474900	3.26
170	0.4545	2.2000	4840	10648000	3.17
180	0.4394	2.2760	5030	11116300	3.16
190	0.4523	2.2111	4975	11193750	3.04
200	0.5043	1.9831	4700	11139000	2.92
210	0.5270	1.8975	4630	11297200	2.86
220	0.5372	1.8614	4635	11541150	2.82
230	0.5423	1.8439	4665	11802450	2.80
240	0.6272	1.5943	4225	11196250	2.58
250	0.5923	1.6882	4575	12398250	2.76
260	0.6362	1.5719	4480	12768000	2.79
270	0.7075	1.4135	4085	11805650	2.52
280	0.7007	1.4271	4110	11836800	2.47
290	0.7092	1.4101	4315	13203900	2.70
300	0.7401	1.3511	4175	12900750	2.63

นำค่าการนำความร้อนที่ได้จากการประมาณทั้งหมดจากตารางที่ 4.5 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.5 และนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน

และอุณหภูมิมาสร้างเป็นสมการโพลิโนเมียล ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ลำดับ 5 ดังสมการที่ 4.1

$$k = (-1 \cdot 10^{-6})T^5 + 0.0004T^4 - 0.0533T^3 + 3.2026T^2 - 94.588T + 1106.1 \quad (4.1)$$



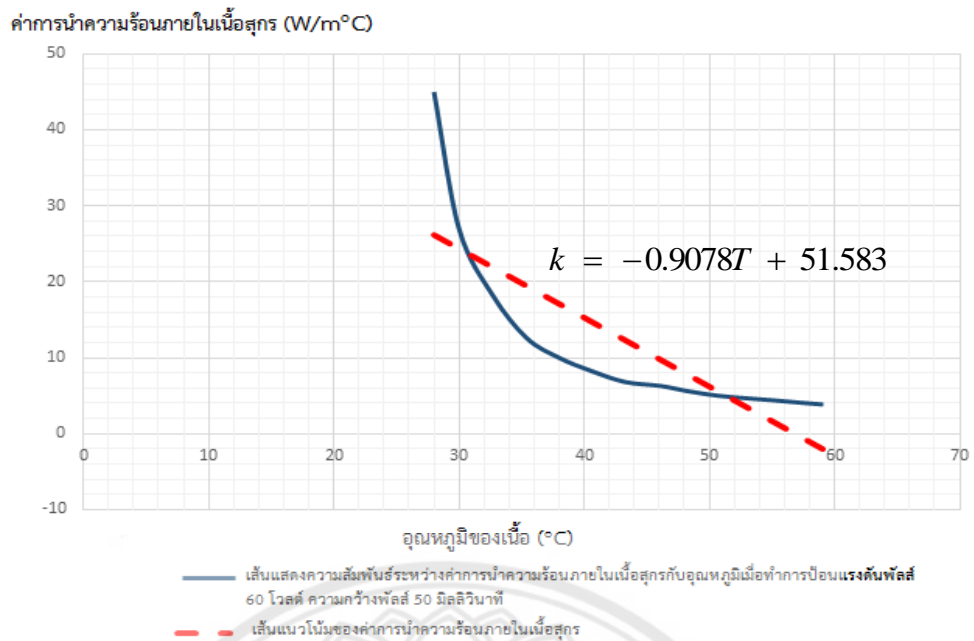
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับอุณหภูมิเมื่อทำการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

จากสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าสมการมีความซับซ้อน ดังนั้น จึงประมาณค่าการนำความร้อนเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป

ในช่วงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ค่าการนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จึงให้ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิเกิน 60 องศาเป็นค่าคงที่ประมาณ $k = 2.65$ จูลต่อเมตร • องศาเซลเซียส

และในช่วง 28 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.5 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้น จึงประมาณสมการคุณลักษณะให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจากรูปที่ 4.6 และสมการความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 ที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel แสดงดังสมการที่ 4.2

$$k = -0.9078T + 51.583 \quad (4.2)$$



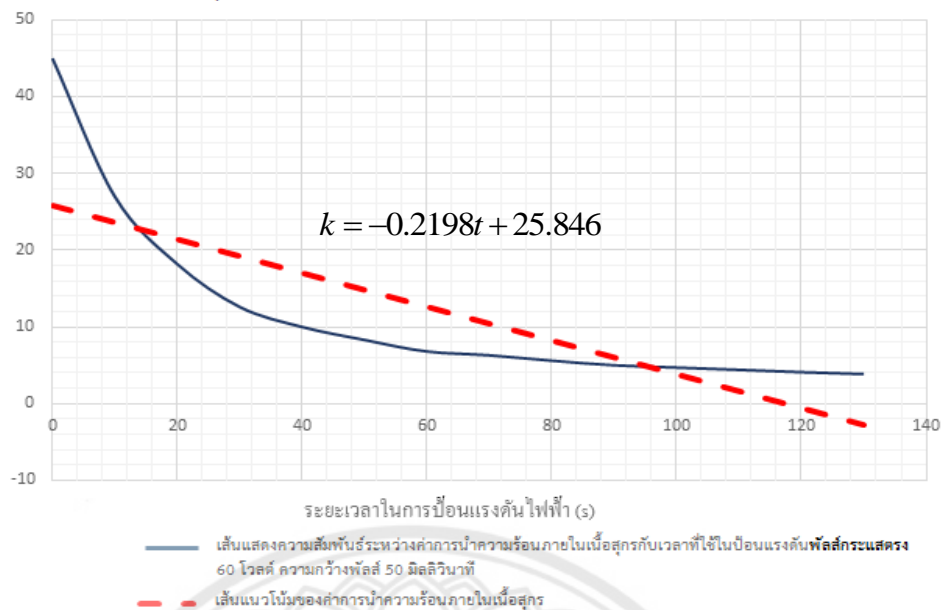
รูปที่ 4.6 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงในช่วงอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส และหาสมการความสัมพันธ์จากการประมาณกราฟเป็นเส้นตรงแสดงดังสมการที่ 4.3 เพื่อใช้ในการจำลองการกระจายความร้อนในเนื้อสุกรที่เวลา 10 , 20 , 30 และ 40 วินาที อีกครั้งจากสมการที่ 4.2 และสมการที่ 4.3 แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยกรอกเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองดังตารางที่ 4.6

$$k = -0.2198t + 25.846$$

(4.3)

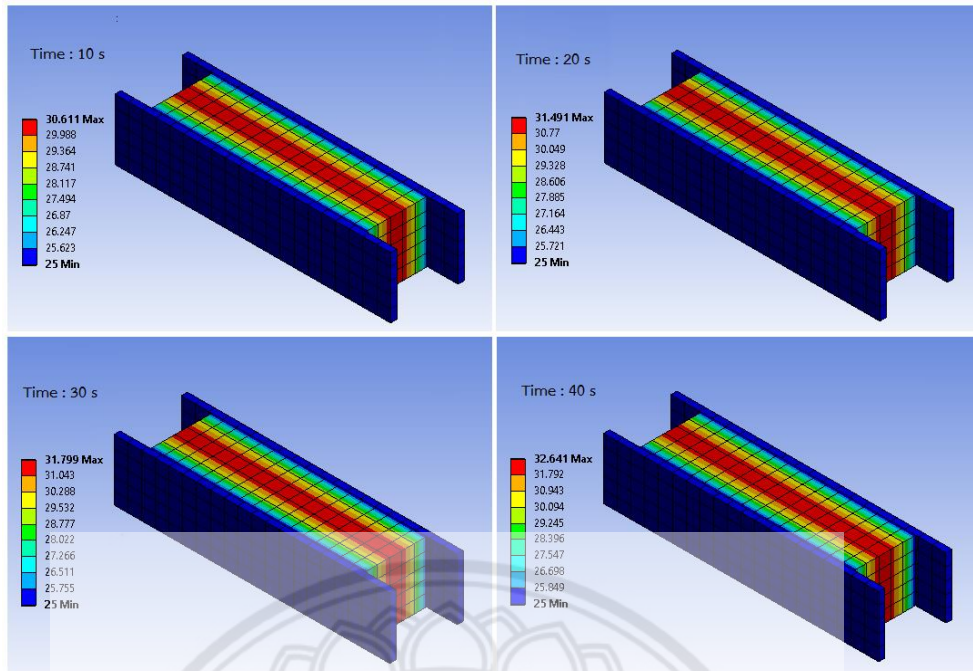
ค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกร (W/m°C)



รูปที่ 4.7 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับเวลาจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

ตัวแปรที่ใช้	ระยะเวลา (วินาที)			
	10	20	30	40
Temperature Magnitude	25	25	25	25
Voltage Magnitude	19.3	18.8	18.6	19.2
Isotropic Thermal Conductivity (k)	23.648	21.450	19.252	17.054
Isotropic Resistivity (ρ)	0.3509	0.3173	0.3304	0.3536
Electrical Conductivity (σ)	2.8497	3.1516	3.0269	2.8281
Joule heat power (G)	10615000	11139000	10471800	10425600



รูปที่ 4.8 การจำลองการกระจายความร้อนจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร

4.2.2 การจำลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับค่าการนำความร้อน จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ นำค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ค่าสภาพความนำไฟฟ้า (σ) และค่าพลังงานความร้อนในรูปของจูล (G) เพื่อใช้ในการประมาณค่าการนำความร้อน (k) ดังตารางที่ 4.7

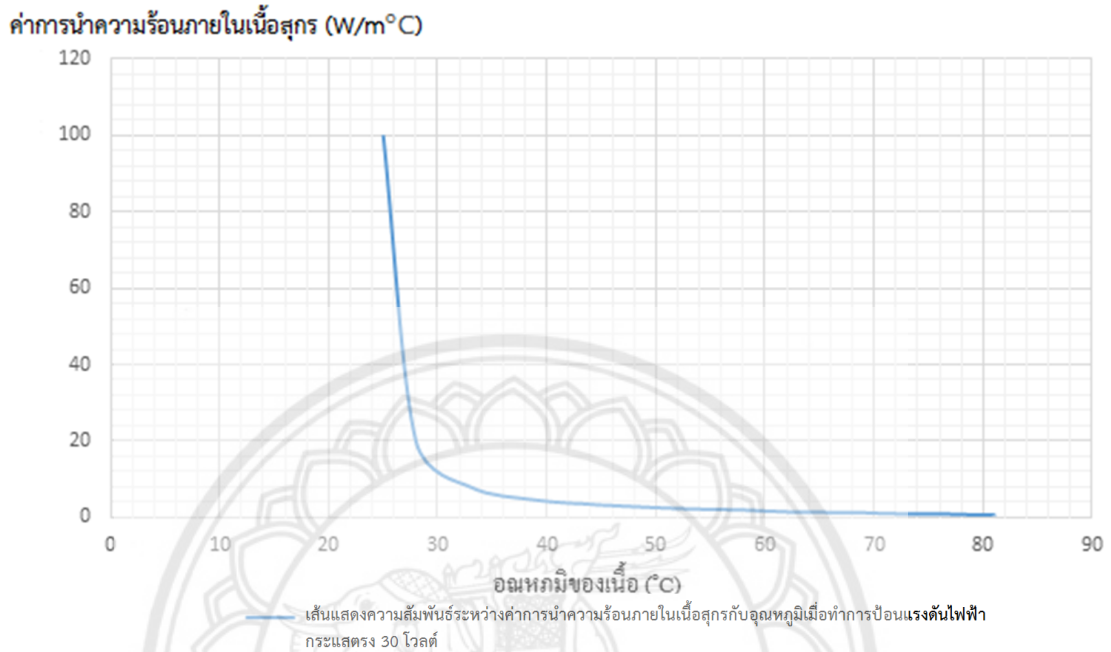
ตารางที่ 4.7 การนำความร้อน ความนำไฟฟ้า และพลังงานความร้อนในรูปของจูล จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ให้กับเนื้อสุกร

เวลา (s)	สภาพต้านทาน ไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)	สภาพความนำ ไฟฟ้า (S/m)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m^2)	ค่าพลังงาน ความร้อนในรูป ของจูล (W/m^3)	ค่าการนำความ ร้อน ($W/m^{\circ}C$)
0	1.7143	0.5833	1750	5250000	100.00
10	1.7143	0.5833	1750	5250000	20.00
20	1.7143	0.5833	1750	5250000	8.00
30	1.7143	0.5833	1750	5250000	4.60

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

เวลา (s)	สภาพต้านทาน ไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)	สภาพความนำ ไฟฟ้า (S/m)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m^2)	ค่าพลังงาน ความร้อนในรูป ของจุล (W/m^3)	ค่าการนำความ ร้อน ($W/m^{\circ}C$)
40	1.7143	0.5833	1750	5250000	3.50
50	1.7143	0.5833	1750	5250000	3.30
60	1.7143	0.5833	1750	5250000	2.50
70	1.7143	0.5833	1750	5250000	2.30
80	1.7143	0.5833	1750	5250000	2.10
90	1.7143	0.5833	1750	5250000	2.00
100	2.0000	0.5000	1500	4500000	1.51
110	2.0000	0.5000	1500	4500000	1.40
120	2.0000	0.5000	1500	4500000	1.35
130	2.0000	0.5000	1500	4500000	1.29
140	2.2222	0.4500	1350	4050000	1.10
150	2.2222	0.4500	1350	4050000	1.07
160	2.2222	0.4500	1350	4050000	1.10
170	2.4000	0.4167	1250	3750000	0.97
180	2.4000	0.4167	1250	3750000	0.96
190	2.4000	0.4167	1250	3750000	0.92
200	2.4000	0.4167	1250	3750000	0.91
210	2.4000	0.4167	1250	3750000	0.88
220	3.0000	0.3333	1000	3000000	0.70
230	3.0000	0.3333	1000	3000000	0.68
240	3.0000	0.3333	1000	3000000	0.67
250	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50
260	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50
270	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50
280	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50
290	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50
300	4.0000	0.2500	750	2250000	0.50

จากตารางที่ 4.7 นำค่าการนำความร้อนในเนื้อสุกรที่ถูกป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.9



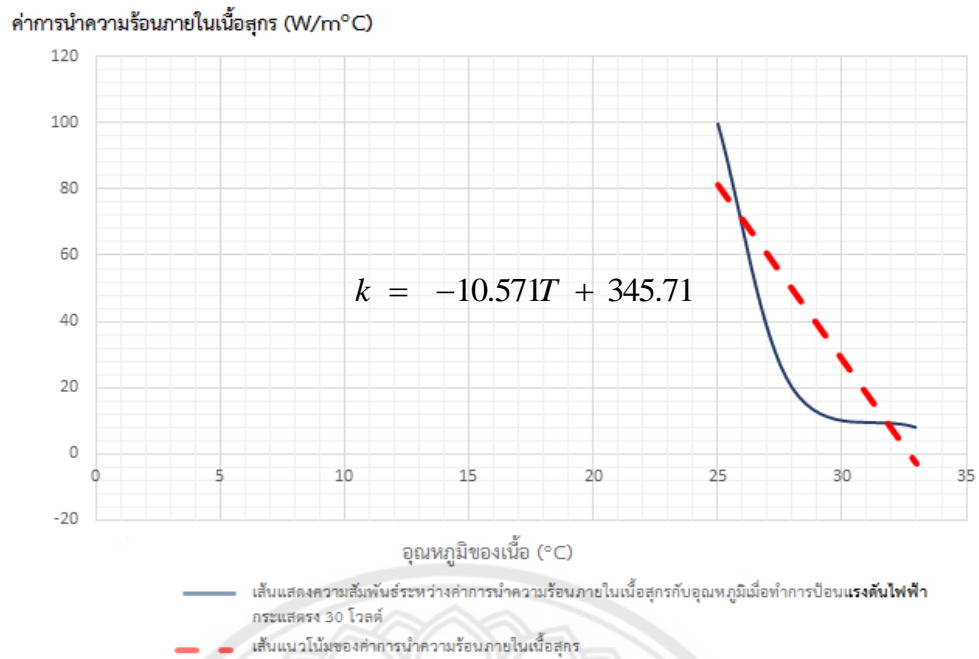
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับอุณหภูมิเมื่อทำการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

จากรูปที่ 4.9 ทำการประมาณค่าการนำความร้อนออกเป็น 2 ช่วง ให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย คือในช่วง 28 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียสและในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสขึ้นไป

ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสขึ้นไป พบว่า ค่าการนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จึงให้ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิเกิน 40 องศาเป็นค่าคงที่ประมาณ $k = 1.39$ จูลต่อเมตร•องศาเซลเซียส

และในช่วง 28 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเป็นลักษณะเชิงเส้น ดังนั้น จึงประมาณค่าการนำความร้อนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นดังรูปที่ 4.10 และหาสมการความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ ที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel แสดงดังสมการที่ 4.4

$$k = -10.571T + 345.71 \quad (4.4)$$



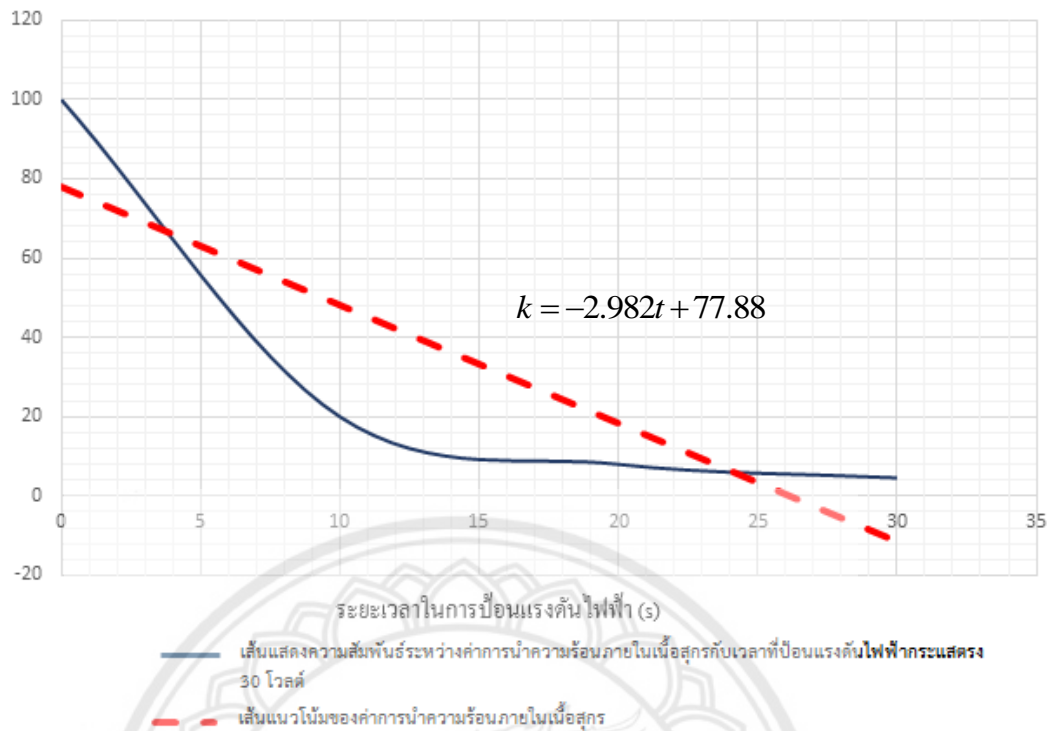
รูปที่ 4.10 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงในช่วงอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11 และสมการความสัมพันธ์จากการประมาณกราฟเป็นเส้นตรง ดังสมการที่ 4.5 เพื่อใช้ในการจำลองการกระจายความร้อนในเนื้อสุกรที่เวลา 10 และ 20 วินาที อีกครั้งจากสมการที่ 4.4 และ สมการที่ 4.5 แสดงการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองดังรูปที่ 4.12 โดยกรอกเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองจากตารางที่ 4.8

$$k = -2.982t + 77.88$$

(4.5)

ค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกร (W/m°C)

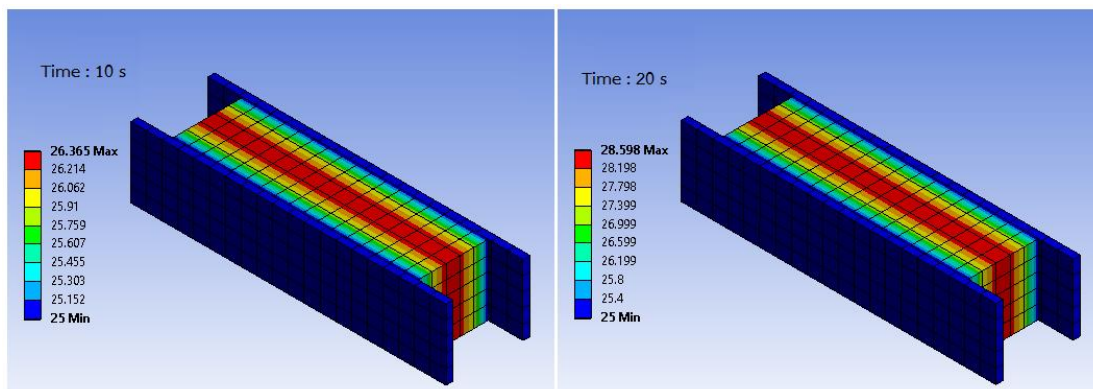


รูปที่ 4.11 การประมาณสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนเทียบกับเวลาจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30

เนื่องจากที่จำลองเพียงวินาทีที่ 10 กับ 20 มาจากความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์จากรูปที่ 4.11 พบว่าที่เวลามากกว่า 25 วินาทีขึ้นไปค่าการนำความร้อนที่ได้จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริง

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

ตัวแปรที่ใช้	ระยะเวลา (วินาที)	
	10	20
Temperature Magnitude	25	25
Voltage Magnitude	30	30
Isotropic Thermal Conductivity (k)	48.06	18.24
Isotropic Resistivity (ρ)	1.7143	1.7143
Electrical Conductivity (σ)	0.5833	0.5833
Joule heat power (G)	5250000	5250000



รูปที่ 4.12 การจำลองการกระจายความร้อนจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเนื้อสุกร

4.3 วิเคราะห์สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบที่ผ่านมาได้ทำการทดสอบออกเป็น 2 ประเภท คือการทดสอบป้อนแรงดันพัลส์ กระแสตรงโดยใช้วงจรทระดับแรงดันและวงจรสวิชชิง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 และการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ โดยในการทดสอบแต่ละประเภทของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะแบ่งเป็นการทดสอบวิเคราะห์ ความความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณค่าตัวแปร การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี กับการทดสอบหาค่าการนำความร้อนภายใน เนื้อสุกร ได้ผลลัพธ์ดังนี้

1. การทดสอบป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงโดยใช้วงจรทระดับแรงดันและวงจรสวิชชิง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50

- ในการทดสอบ พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรที่ไม่คงที่โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเนื้อสุกรจะลดลงอยู่ที่ประมาณ 20 โวลต์ ถึง 30 โวลต์ ซึ่งไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ทำการควบคุม 60 โวลต์ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อสุกรมีค่าประมาณ 0.8 ถึง 1.2 แอมแปร์

- การทดสอบวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี เพื่อตรวจสอบว่า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรนั้นเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดหรือไม่ พบว่า ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) จากการป้อนแรงดันพัลส์ในเนื้อสุกรมีค่าเท่ากับ 3.3454 จูล ต่อ แคลอรี และมีค่าความผิดพลาดร้อยละ 20.04 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ค่าจริง โดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการในคำนวณจะไม่คำนึงถึงมวลของน้ำที่การระเหยออก

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ให้ได้ค่าที่ไม่เท่ากับค่าจริง

- จากการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรด้วยการประมาณค่าจากโปรแกรม Ansys Workbench พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนจะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยค่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นในช่วง 0 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส และจะประมาณเป็นค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส

2. การทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์

- จากการทดสอบ พบว่า กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรที่ไม่คงที่โดยกระแสไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 0.15 ถึง 0.35 แอมแปร์ แต่แรงดันไฟฟ้าคงที่อยู่ที่ 30 โวลต์

- การทดสอบวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี พบว่า ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี (J_{exp}) จากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในเนื้อสุกรมีค่าเท่ากับ 1.3364 จูล ต่อ แคลอรี และมีค่าความผิดพลาดร้อยละ 68.06 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง โดยที่ $J = 4.184$ จูล ต่อ แคลอรี โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการในคำนวณจะไม่คำนึงถึงมวลของน้ำที่การระเหยออกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรที่ไม่คงที่ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ให้ได้ค่าที่ไม่เท่ากับค่าจริง และเนื่องจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่าการป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงอย่างมากทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร

- จากการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรด้วยการประมาณค่าจากโปรแกรม Ansys Workbench พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนจะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยค่าการนำความร้อนของเนื้อสุกรที่ถูกป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ จะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นในช่วง 0 องศาเซลเซียส ถึง 30 องศาเซลเซียส และจะประมาณเป็นค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส

นำสมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนในช่วงที่มีการลดลงเป็นเชิงเส้นมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับอุณหภูมิ และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสุกรกับเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการสร้างสมการจากเส้นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อน และนำสมการความสัมพันธ์ทั้งสองแบบมาจำลองการกระจายความร้อนภายในเนื้อสุกรอีกครั้ง ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench เพื่อตรวจสอบว่าการกระจายความร้อนด้วยค่าการนำความร้อนจาก

สมการความสัมพันธ์ ให้อุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจากการทดสอบจริงหรือไม่ โดยทำการ
จำลองที่เวลา 10 , 20 , 30 และ 40 วินาที

ข้อเปรียบเทียบระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

1. แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเนื้อสุกรที่ป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ (ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที และดีวตีไซเคิลร้อยละ 50) จากวงจรทระดับแรงดัน จะเกิดแรงดันตก
2. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อสุกรจะลดลงเป็นเชิงเส้นทั้งในการป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรง จากวงจรทระดับแรงดัน และจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีกระแสที่ต่ำกว่าการป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน
3. กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน มีค่าคงที่ แต่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในเนื้อสุกรเพิ่มสูงขึ้น
4. ค่าการนำความร้อนในเนื้อสุกรจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน และจากการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วงแรกจะมีอัตราการลดลงของค่าการนำความร้อนที่สูง และจะเริ่มคงที่ เมื่ออุณหภูมิภายในเนื้อสุกรเพิ่มสูงขึ้น
5. อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ มีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เมื่อป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดันที่มีผลเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าเท่ากัน
6. ในการจำลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงจากวงจรทระดับแรงดัน มีขั้นตอนซับซ้อนในการป้อนเงื่อนไขเริ่มต้นเพราะค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการ สามารถสรุปผล และชี้แจงปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน รวมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ และให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไปดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

เพื่อหาการกระจายความร้อน และคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนจากการทำให้เนื้อสุกรสุกพอดีด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ดังนั้น จึงทดลองเปรียบเทียบระหว่างการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเนื้อสุกร กับการป้อนด้วยแรงดันพัลส์กระแสตรงจากเครื่องสร้างแรงดันพัลส์ด้วยวงจรทระดับแรงดันและวงจรสวิตซ์ชิ่ง โดยใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นคู่ขนาน

ทำการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเนื้อสุกรด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งจำลองการกระจายความร้อน และหาคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนในเนื้อสุกรด้วยโปรแกรมจำลอง Ansys Workbench

พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนจะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยค่าการนำความร้อนของเนื้อสุกรที่ถูกป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ จะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นในช่วง 0 - 30 องศาเซลเซียส และจะประมาณเป็นค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ในการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 พบว่า ค่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นในช่วง 0 - 60 องศาเซลเซียส และจะประมาณเป็นค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิจากการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการทดลองจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงกว่าการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรงให้กับเนื้อสุกร ดังนั้น สมการคุณลักษณะของค่าการนำความร้อนจึงมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อสุกร

นอกจากนี้ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ในการทดลอง มีค่าที่ไม่เท่ากับค่าจริง โดยในการป้อนแรงดันพัลส์กระแสตรง 60 โวลต์ ความกว้างพัลส์ 50 มิลลิวินาที ดิวตี้ไซเคิลร้อยละ 50 มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 20.04 และในการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 68.06 โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการในคำนวณ จะไม่คำนึงถึงมวลของน้ำที่การระเหยออกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเนื้อสุกรที่ไม่คงที่ ซึ่งส่งผลต่อค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. แรงดันภายในวงจรตกเมื่อเทียบกับโหลดที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามเวลา แนวทางการแก้ไข ออกแบบวงจรควบคุมระดับแรงดันและกระแส โดยนำการควบคุมแบบป้อนกลับมาใช้ในการควบคุม หรือเปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นวงจรกระแสตรงเนื่องจากผลการทดสอบ พบว่า อัตราการเพิ่มของแหล่งจ่ายที่ใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก็วงจรทบระดับแรงดันมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนมาเป็นควบคุมเพียงความกว้างพัลส์เท่านั้น

2. ค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ไม่ตรงกับค่าจริงเนื่องมาจากมวลของน้ำที่ระเหยออกไป และกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ แนวทางการแก้ไข ทำการวัดความชื้นภายในเนื้อสุกที่ทำกรทดสอบและเก็บค่าทุกๆเวลา 10 วินาทีเพื่อใช้ในการคำนวณค่าค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากหน่วย จูล เป็น แคลอรี ที่ถูกต้อง

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

1. ออกแบบวงจรควบคุมกระแส แรงดันตามต้องการโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ
2. ใช้การพิมพ์แผงวงจรแทนการเดินสายวงจรโดยตรงเพื่อความสวยงามภายในวงจร และขนาดเล็กลง
3. เพิ่มช่องสายสำหรับการเขียนโปรแกรมข้างตัวเครื่องเพื่อง่ายต่อการปรับแต่งโปรแกรม
4. ทำการวิเคราะห์การสูญเสียทางความร้อนโดยคำนึงถึงผลเนื่องจากการพาความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- พรชัย พันธุ์มุง และธนภฤต ส่งทานินทร์. (2559) **เครื่องกระตุ้นเนื้อโค่นุ่มด้วยกระแสไฟฟ้า**. ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- Jesse Tane, Jérôme Despatis, Michael Polli, Dan Clemens and Paul Stoffregen. (2559). **TimerOne**. สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2560, จาก <http://www.arduino-libraries.info/libraries/timer-one>.
- ผศ.ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์. (2554). **อิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุตสาหกรรม**. เอกสารประกอบการสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2550). **ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 15** กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. **Ohmic heating**. สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2561, จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0917/ohmic-heating>.
- Joule Heating. **Experiment 6 Joule Heating of a Resistor**. สืบค้นเมื่อ 7 เมษายน 2561, จาก <http://www.umsl.edu/~physics/files/pdfs/Electricity%20and%20Magnetism%20Lab/Exp6.JouleHeating.pdf>.
- Eric R. Cosman and Eric R. Cosman. (2549). “**Electric and Thermal Field Effects in Tissue Around Radiofrequency Electrodes**.” Departments of Electrical Engineering and Computer Science and Physics, Massachusetts Institute of Technology Cambridge.
- S K Thangaraju and K M Munisamy. (2558). **Electrical and Joule heating relationship investigation using Finite Element Method**. Conference: 7th International Conference on Cooling and Heating Technologies Tenaga Nasional.



PC817 Series

High Density Mounting Type Photocoupler

- ⊛ Lead forming type (I type) and taping reel type (P type) are also available. (PC817/PC817P)
- ⊛ TÜV (VDE0884) approved type is also available as an option.

■ Features

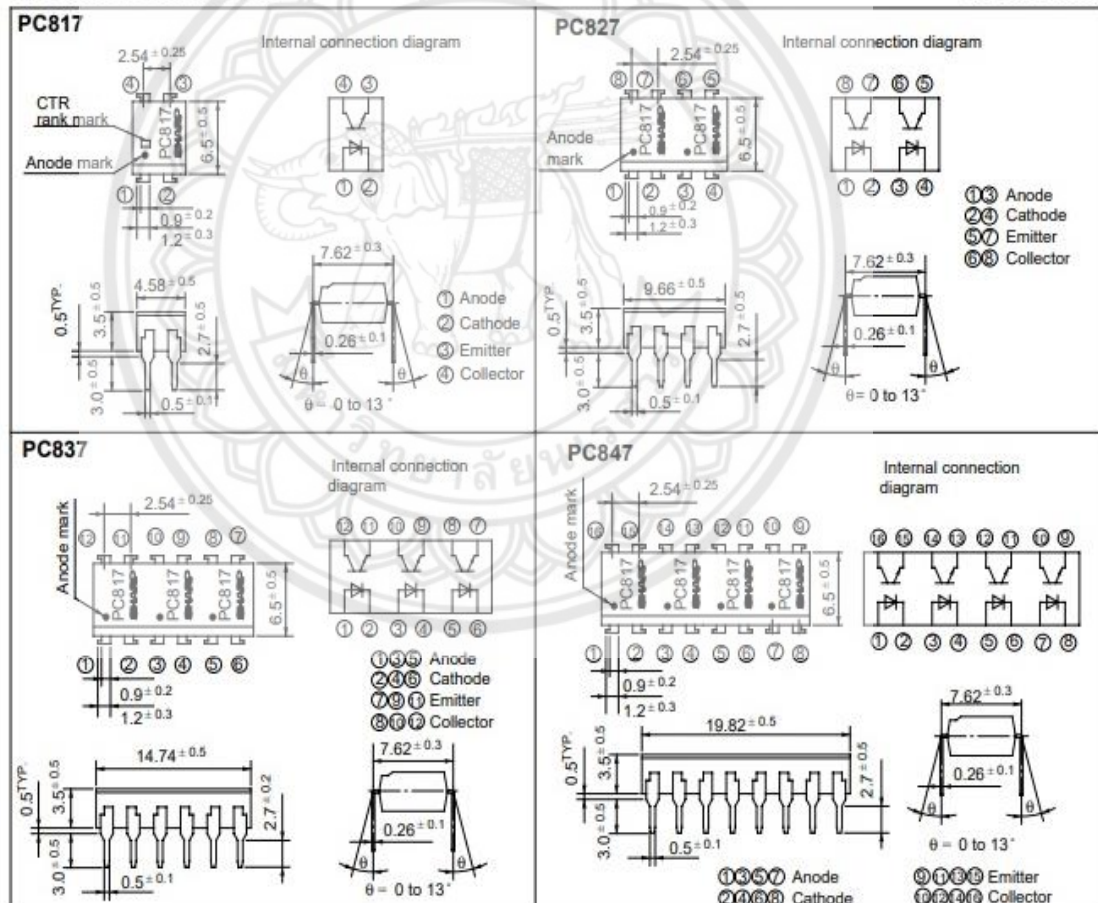
1. Current transfer ratio
(CTR: MIN. 50% at $I_F = 5\text{mA}$, $V_{CE} = 5\text{V}$)
2. High isolation voltage between input and output ($V_{iso} : 5000\text{V}_{rms}$)
3. Compact dual-in-line package
PC817 : 1-channel type
PC827 : 2-channel type
PC837 : 3-channel type
PC847 : 4-channel type
4. Recognized by UL, file No. E64380

■ Applications

1. Computer terminals
2. System appliances, measuring instruments
3. Registers, copiers, automatic vending machines
4. Electric home appliances, such as fan heaters, etc.
5. Signal transmission between circuits of different potentials and impedances

■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



* In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device.*

Fig. 2 Collector Power Dissipation vs. Ambient Temperature

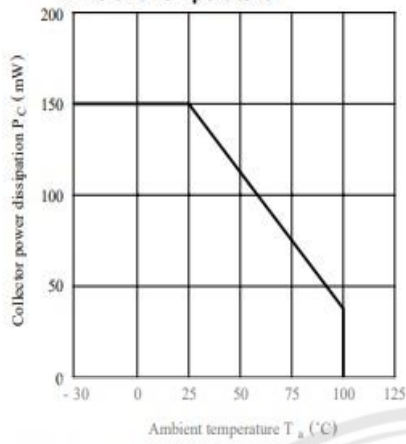


Fig. 3 Peak Forward Current vs. Duty Ratio

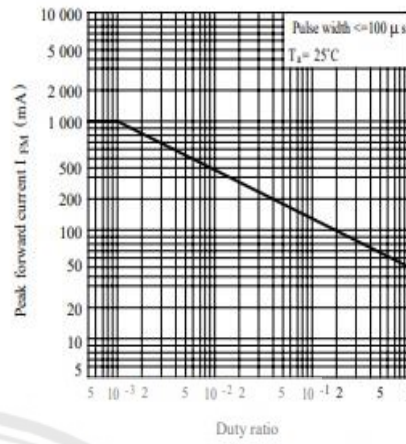


Fig. 4 Current Transfer Ratio vs. Forward Current

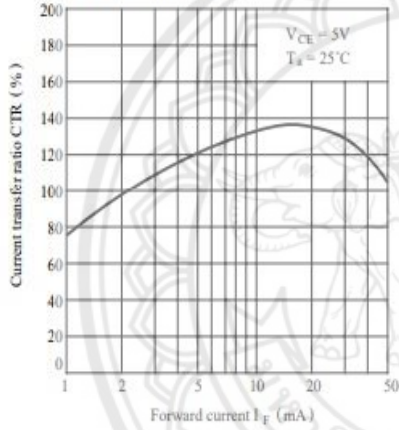


Fig. 5 Forward Current vs. Forward Voltage

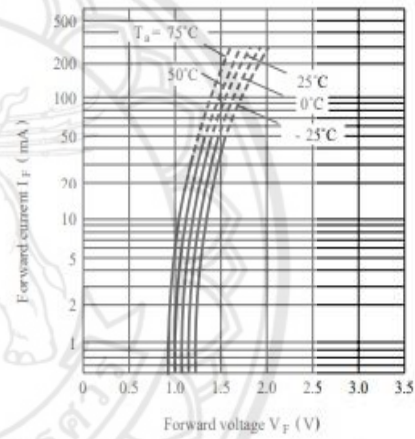


Fig. 6 Collector Current vs. Collector-emitter Voltage

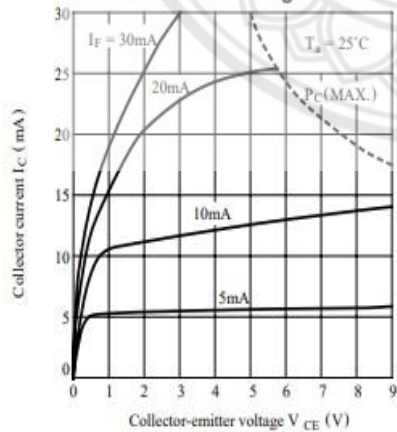


Fig. 7 Relative Current Transfer Ratio vs. Ambient Temperature

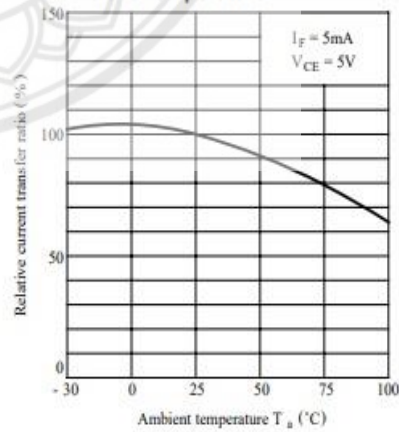


Fig. 8 Collector-emitter Saturation Voltage vs. Ambient Temperature

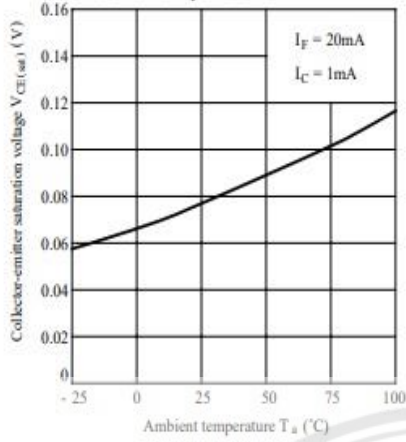


Fig. 9 Collector Dark Current vs. Ambient Temperature

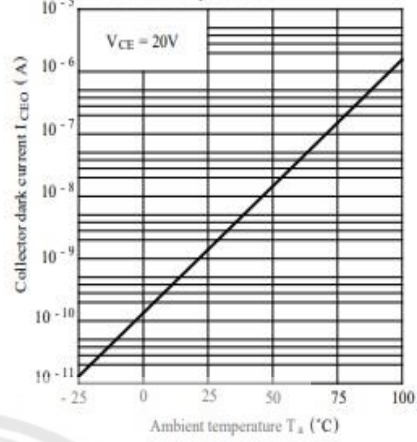


Fig.10 Response Time vs. Load Resistance

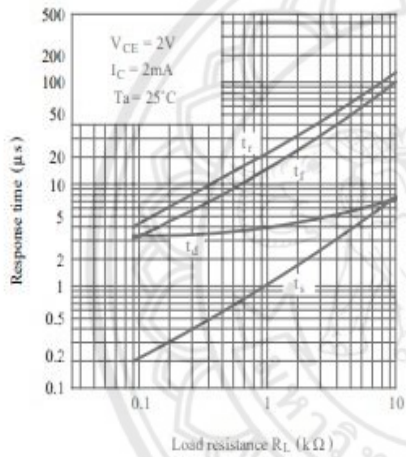
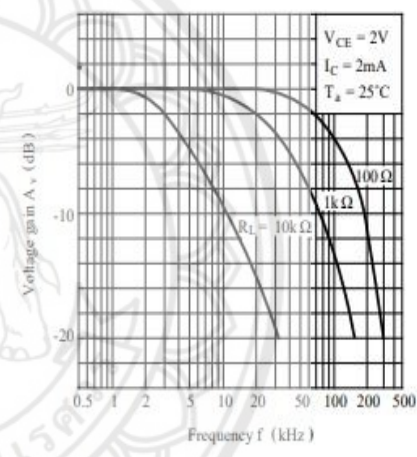
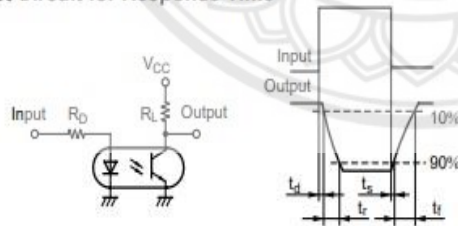


Fig.11 Frequency Response



Test Circuit for Response Time



Test Circuit for Frequency Response

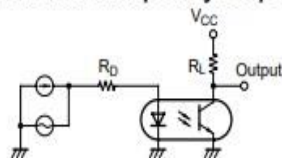
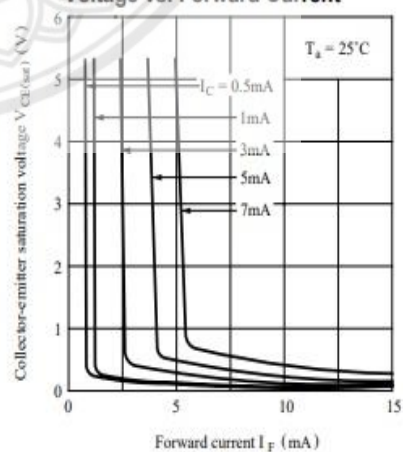


Fig.12 Collector-emitter Saturation Voltage vs. Forward Current



● Please refer to the chapter “Precautions for Use”

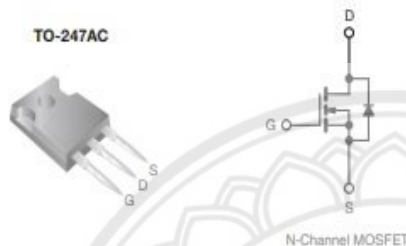


IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V_{DS} (V)	200
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$ 0.055
Q_{g} (Max.) (nC)	230
Q_{gs} (nC)	42
Q_{gd} (nC)	110
Configuration	Single



FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC



RoHS*
COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247AC package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220AB devices. The TO-247AC is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-247AC
Lead (Pb)-free	IRFP260PbF SiHFP260-E3
SnPb	IRFP260 SiHFP260

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)				
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	V_{DS}	200	V	
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20		
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	46	A
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	29	
Pulsed Drain Current ^a		180		
Linear Derating Factor		2.2	W/ $^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	1000	mJ	
Repetitive Avalanche Current ^a	I_{AR}	46	A	
Repetitive Avalanche Energy ^a	E_{AR}	28	mJ	
Maximum Power Dissipation	P_D	280	W	
Peak Diode Recovery dV/dt ^c	dV/dt	5.0	V/ns	
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$	
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 ^d		
Mounting Torque	6-32 or M3 screw	10	lbf · in	
		1.1	N · m	

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50\text{ V}$, starting $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 708\text{ }\mu\text{H}$, $R_G = 25\text{ }\Omega$, $I_{AS} = 46\text{ A}$ (see fig. 12).
- $I_{SP} \leq 46\text{ A}$, $dI/dt \leq 230\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150\text{ }^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91215
S11-0487-Rev. B, 21-Mar-11

www.vishay.com

1

This datasheet is subject to change without notice.



THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	40	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.24	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	0.45	

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	200	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.24	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DGS}	$V_{DS} = 200\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 160\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 28\text{ A}^b$	-	-	0.055	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{GS} = 50\text{ V}, I_D = 28\text{ A}^b$	24	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$, see fig. 5	-	5200	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	1200	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	310	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 46\text{ A}, V_{DS} = 160\text{ V}$, see fig. 6 and 13 ^b	-	-	230	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	42	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 100\text{ V}, I_D = 46\text{ A}, R_{\theta} = 4.3\text{ }\Omega, R_D = 2.1\text{ }\Omega$, see fig. 10 ^b	-	23	-	ns
Rise Time	t_r		-	120	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	100	-	
Fall Time	t_f		-	94	-	
Internal Drain Inductance	L_D		Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	5.0	
Internal Source Inductance	L_S		-	13	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode 	-	-	46	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	180	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 46\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.8	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 46\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	390	590	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	4.8	7.2	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
 b. Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.



IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)

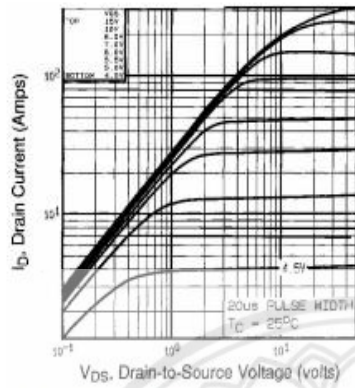


Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25^\circ\text{C}$

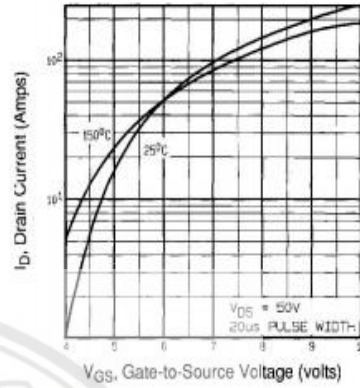


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

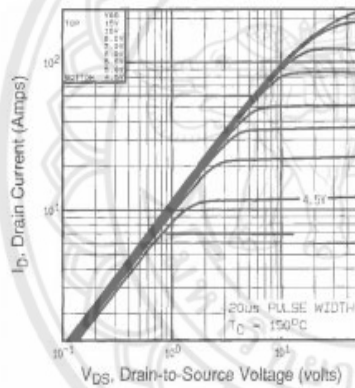


Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 150^\circ\text{C}$

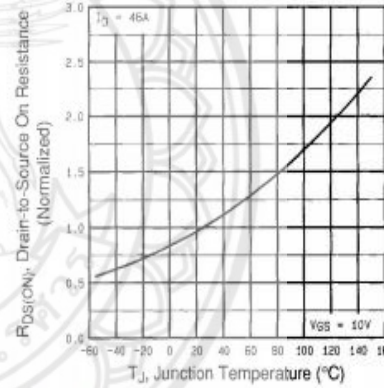


Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

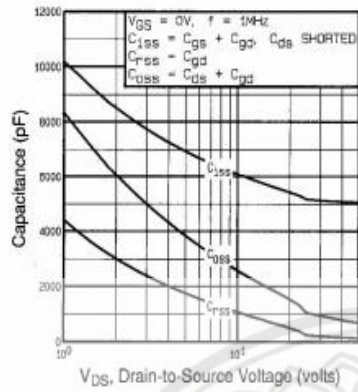


Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage

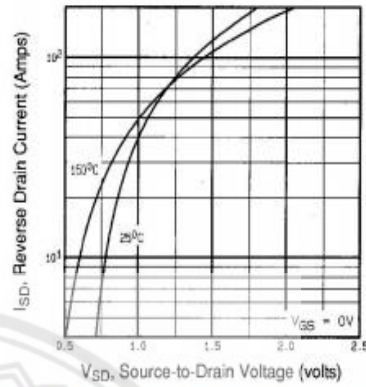


Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

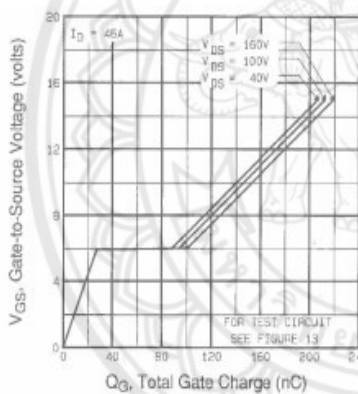


Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage

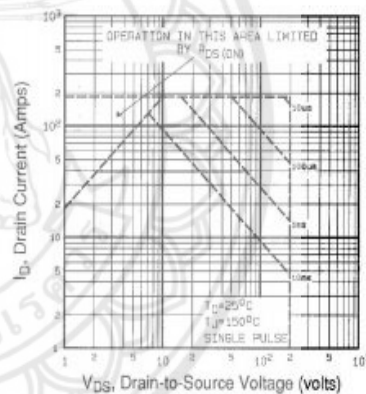


Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area



IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

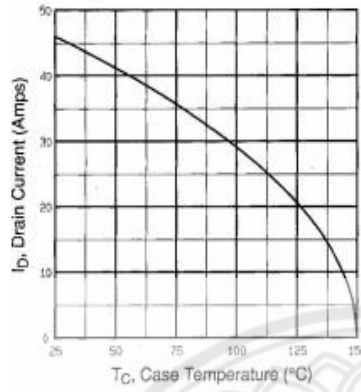


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

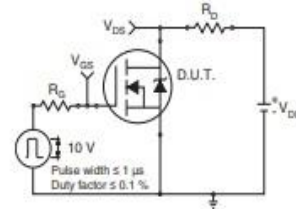


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

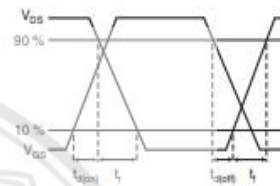


Fig. 10b - Switching Time Waveforms

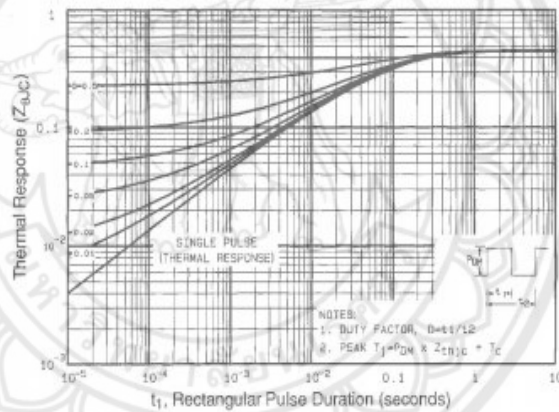


Fig. 11 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

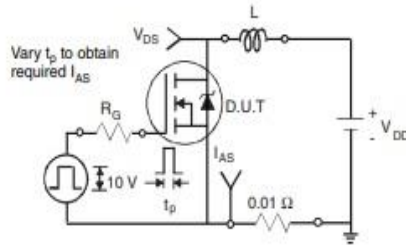


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

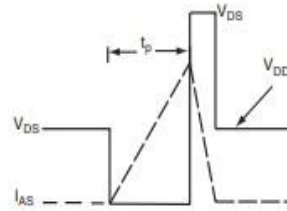


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

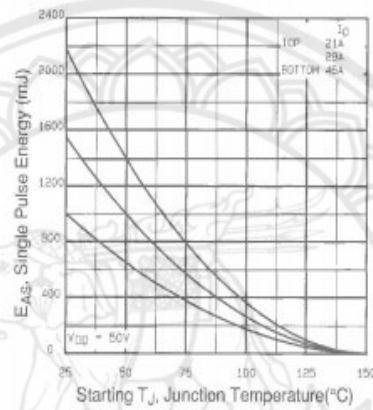


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

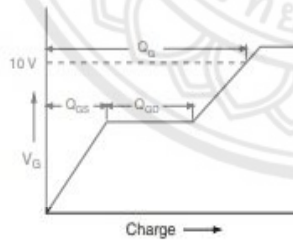


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

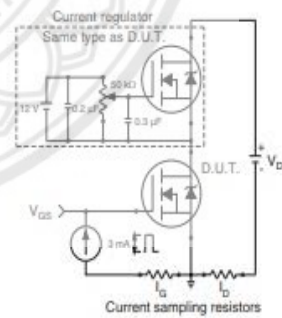


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit



IRFP260, SiHFP260

Vishay Siliconix

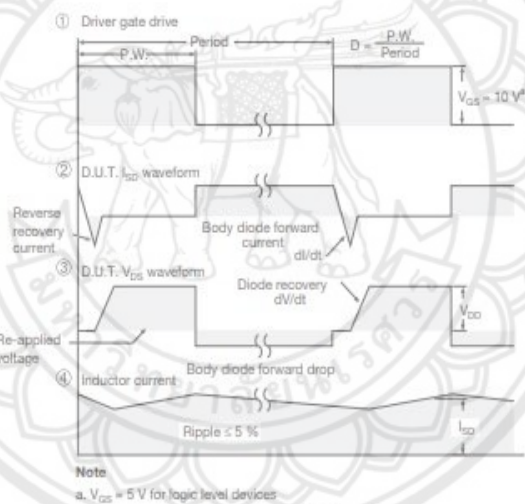
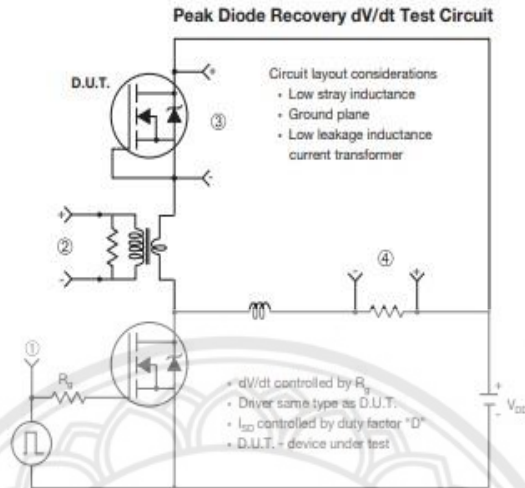


Fig. 14 - For N-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see www.vishay.com/doc?91215.

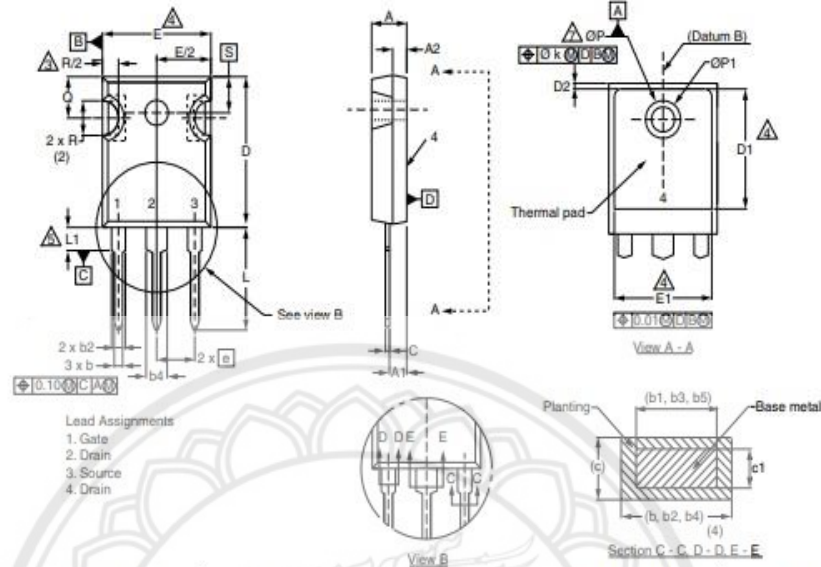


www.vishay.com

Package Information

Vishay Siliconix

TO-247AC (High Voltage)



DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.58	5.31	0.180	0.209
A1	2.21	2.59	0.087	0.102
A2	1.17	2.49	0.046	0.098
b	0.99	1.40	0.039	0.055
b1	0.99	1.35	0.039	0.053
b2	1.53	2.39	0.060	0.094
b3	1.65	2.37	0.065	0.093
b4	2.42	3.43	0.095	0.135
b5	2.59	3.38	0.102	0.133
c	0.38	0.86	0.015	0.034
c1	0.38	0.76	0.015	0.030
D	19.71	20.82	0.776	0.820
D1	13.08	-	0.515	-

DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
D2	0.51	1.30	0.020	0.051
E	15.29	15.87	0.602	0.625
E1	13.72	-	0.540	-
e	5.46 BSC		0.215 BSC	
Ø k	0.254		0.010	
L	14.20	16.25	0.559	0.640
L1	8.71	4.29	0.146	0.169
N	7.62 BSC		0.300 BSC	
Ø P	3.51	3.66	0.138	0.144
Ø P1	-	7.39	-	0.291
Q	5.31	5.69	0.209	0.224
R	4.52	5.49	0.178	0.216
S	5.51 BSC		0.217 BSC	

ECN: X13-0103-Rev. D, 01-Jul-13
 DWG: 5971

Notes

1. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M-1994.
2. Contour of slot optional.
3. Dimension D and E do not include mold flash. Mold flash shall not exceed 0.127 mm (0.005") per side. These dimensions are measured at the outermost extremes of the plastic body.
4. Thermal pad contour optional with dimensions D1 and E1.
5. Lead finish uncontrolled in L1.
6. Ø P to have a maximum draft angle of 1.5 to the top of the part with a maximum hole diameter of 3.91 mm (0.154").
7. Outline conforms to JEDEC outline TO-247 with exception of dimension c.
8. Xian and Mingxin actually photo.



Revision: 01-Jul-13

1

Document Number: 91360

For technical questions, contact: hvm@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.


Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



ภาคผนวก ข
รหัสต้นฉบับของโปรแกรมเครื่องสร้างแรงดันพัลส์กระแสตรงด้วยวงจรถบ
ระดับแรงดัน และวงจรสวิตซ์

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการเขียนไมโครคอนโทรลเลอร์

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <TimerOne.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 20, 4);
const int A = 2;
const int B = 3;
const int C = 4;
const int D = 7;

int TT = 0;

int TimeSet = 0;
int PulseVSet = 0;
int PulseWSet = 0;
int Start = 0;
const byte PW = 5;
const byte Relay = 12 ;

unsigned char T = 0;
unsigned char P = 0;
unsigned char PV = 50;
int TS = 0;

unsigned char PulseWidth1 = 0;
unsigned char PulseWidth2 = 0;

int i = 0;
int j = 0;
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.backlight();
  lcd.begin ();
  lcd.home ();

  pinMode(A, INPUT);
  pinMode(B, INPUT);
  pinMode(C, INPUT);
  pinMode(D, INPUT);

  pinMode(PW, OUTPUT);
  pinMode (Relay, OUTPUT);
//-----
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" --- Electrical --- ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" --- Stimulator --- ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print(" By : ECPE NU 2557 ");
  delay(5000);
//-----
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("SetTime      s");
  lcd.setCursor(14, 0);
  lcd.print(TT);

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("SetVoltage    V");
  lcd.setCursor(14, 1);
  lcd.print(PV);
```

```

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("SetPulseWidth   ms");
lcd.setCursor(14, 2);
lcd.print(P);

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("   TIME :   s");
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void STOP()
{
  j=0;
  TS=0;
  TT=0;
  PV=50;
  T=0;
  P=0;
  PulseWidth1 = 0;
  PulseWidth2 = 0;
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("-----");
  digitalWrite (Relay, LOW);
  delay (500) ;

  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("   TIME :   s");
}
//-----
void pulsewidth()
{
  digitalWrite (Relay, HIGH);
  digitalWrite(PW,HIGH); delay(PulseWidth1);

```

```

    digitalWrite (Relay, HIGH);
    digitalWrite(PW,LOW); delay(PulseWidth2);
}
void ClearMonitor()
{
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SetTime      s");
    lcd.setCursor(14, 0);
    lcd.print(TT);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("    TIME :    s");
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
void loop()
{
//-----
    TimeSet = digitalRead(A);
    PulseVSet = digitalRead(B);
    PulseWSet = digitalRead(C);
    Start = digitalRead(D);
//-----
    if(TimeSet == HIGH)
    {
        T++; delay(200);
        TT=T*10;
        if (TT > 300)
        {
            T = 0; TT = 0;
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("SetTime      s");
            lcd.setCursor(14, 0);

```

```
    lcd.print(TT);
  }
  lcd.setCursor(14, 0);
  lcd.print(TT);
}

if(PulseVSet == HIGH)
{
  PV=PV+10; delay(200);
  if (PV > 90)
  {
    PV = 50;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("SetVoltage    V");
    lcd.setCursor(14, 1);
    lcd.print(PV);
  }
  lcd.setCursor(14, 1);
  lcd.print(PV);
}

if(PulseWSet == HIGH)
{
  P=P+5; delay(200);
  if (P > 100)
  {
    P = 0;
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("SetPulseWidth    ms");
    lcd.setCursor(14, 2);
    lcd.print(P);
  }
  lcd.setCursor(14, 2);
```

```

    lcd.print(P);
  }
//-----
PulseWidth1 = P+2;
PulseWidth2 = 97-PulseWidth1;
if(PulseWidth1 >= 100||PulseWidth2 <= 0){PulseWidth1 = 100; PulseWidth2 = 0;}
//-----
if(Start == HIGH)
{
  if(PV==50)
  {
    TS=TT;
    for (i = 0; i <= TT*10; i++)
    {
      Timer1.pwm(10,10,100);
      pulsewidth();
      if(TS==9||TS==99){ClearMonitor();}
      lcd.setCursor(14, 3);
      lcd.print(TS);
      j++;
      if(j==10){ TS=TS-1; j=0; }
    }
  }
  if(PV==60)
  {
    TS=TT;
    for (i = 0; i <= TT*10; i++)
    {
      Timer1.pwm(10,60,100);
      pulsewidth();
      if(TS==9||TS==99){ClearMonitor();}
      lcd.setCursor(14, 3);
      lcd.print(TS);
    }
  }
}

```

```

        j++;
        if(j==10){ TS=TS-1; j=0; }
    }
}
if(PV==70)
{
    TS=TT;
    for (i = 0; i <= TT*10; i++)
    {
        Timer1.pwm(10,110,100);
        pulsewidth();
        if(TS==9||TS==99){ClearMonitor();}
        lcd.setCursor(14, 3);
        lcd.print(TS);
        j++;
        if(j==10){ TS=TS-1; j=0; }
    }
}
if(PV==80)
{
    TS=TT;
    for (i = 0; i <= TT*10; i++)
    {
        Timer1.pwm(10,140,100);
        pulsewidth();
        if(TS==9||TS==99){ClearMonitor();}
        lcd.setCursor(14, 3);
        lcd.print(TS);
        j++;
        if(j==10){ TS=TS-1; j=0; }
    }
}
if(PV==90)

```



```
{  
  TS=TT;  
  for (i = 0; i <= TT*10; i++)  
  {  
    Timer1.pwm(10,167,100);  
    pulsewidth();  
    if(TS==9||TS==99){ClearMonitor();}  
    lcd.setCursor(14, 3);  
    lcd.print(TS);  
    j++;  
    if(j==10){ TS=TS-1; j=0; }  
  }  
}  
STOP();  
}  
}
```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

