

สมการการกระจายตัวของความร้อนที่เหมาะสมในการทำนายอุณหภูมิ
จากการใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดทองแดง

An Appropriated Thermal Distribution Equation for
Temperature Prediction of the Electrical Consumption through Copper Wires

นพพล ศักดิ์ทวีกุลกิจ และ ชاکริต สุวรรณจำรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถ.พุทธมนทลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมนทล จ.นครปฐม 73170

*ติดต่อ: chakrit.suv@mahidol.ac.th, โทรศัพท์ 662 889 2138 ต่อ 6416, โทรสาร 662 889 2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทองแดงทำให้เกิดความร้อนในระบบจ่ายไฟ ซึ่งหากมีการใช้กระแสไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดความร้อนมากกว่าข้อจำกัดในการทนความร้อนของฉนวน จะทำให้ฉนวนเกิดการหลอมละลายหรืออาจลัดวงจรได้ เป็นเหตุให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เกิดเพลิงไหม้ และอาจเกิดการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้ไฟฟ้าได้

การหาจุดร้อน (hot spot) ในระบบจ่ายไฟฟ้า สามารถใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermography camera) ตรวจเช็ค ซึ่งเป็นวิธีการป้องกันขณะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จำเป็นต้องเดินทางเข้าไปในที่ที่มีความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากจุดร้อนในระบบจ่ายไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการใช้กระแสไฟฟ้า ถ้าหากสามารถแปลงค่าการใช้กระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ จะทำให้เราสามารถป้องกันความเสียหายจากความร้อนในระบบสายส่งโดยการเฝ้าระวังอัตราการใช้กระแสไฟฟ้าจากจุดจ่ายไฟได้โดยง่าย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทองแดงโดยการสร้างชุดทดสอบและบันทึกผลด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ค่าอุณหภูมิของจุดร้อนที่เกิดขึ้นในเส้นลวดทองแดงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวได้ถูกนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยสมการที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความร้อนในระบบจ่ายไฟได้ต่อไป

คำหลัก: กล้องถ่ายภาพความร้อน, จุดร้อน, กระแสไฟฟ้า, เส้นลวดทองแดง

Abstract

The variation of electricity through the copper wires causes heat in the electrical distribution systems. The copper wire insulators are melted or flame if the electrical consumption generates heat more than the heat resistance limit. Consequently, it causes electrical short circuits, fire and loss of life.

Determination of the hot spot in the electrical distribution system can be checked by the infrared thermography camera. This prevented method must be operated at the locations which heat generated during the electrical distribution. The electrical consumption causes the hot spot in the electrical distribution system. If the electrical consumption values are transformed to be the heat values we can prevent the failure of the electrical distribution system by monitoring the rate of the electrical consumption at the electrical distribution stations.

In this research, the heat values which were generated by the variation of the electrical currents through the copper wires were studied. The experiments were set and recorded with the infrared thermography camera. The correlated equation was created using the relation of the hot spot

temperature, the lengths and the cross section areas of the copper wires. This equation will be used to predict heat in the electrical distribution system.

Keywords: infrared thermography camera, hot spot, electricity, copper wire.

1. บทนำ

ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้ฉนวนที่หุ้มสายไฟฟ้าเสื่อมสภาพและทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจรได้ จากสถิติความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าพบว่า การเชื่อมต่อในระบบจ่ายไฟจะหลวมที่บริเวณ สวิตช์บอร์ด, สวิตช์, เบรกเกอร์ และสายไฟ คิดเป็น 25 % ของความเสียหายทั้งหมด [1]

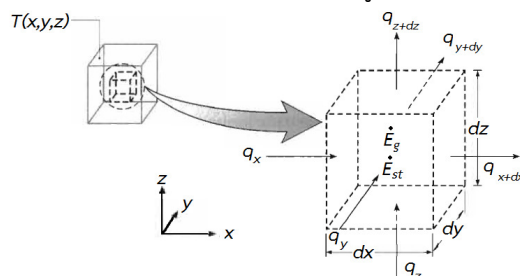
กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography camera) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความร้อนเพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายขณะมีการใช้งาน กล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถถ่ายภาพของการแผ่ความร้อนของวัตถุโดยการแปลงรังสีอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.74 ถึง 1000 μm ให้เป็นค่าอุณหภูมิโดยไม่มีการสัมผัสวัตถุ [2-5] เนื่องจากการตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนจะมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความจำเป็นต้องใช้เวลาในการตรวจหาจุดร้อน (Hot spot) ที่เกิดขึ้นในสายส่งกระแสไฟฟ้า ซึ่งการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตรวจหาจุดร้อนในระบบสายส่งนั้นไม่สามารถปฏิบัติได้ ถ้าไม่มีการเดินทางเข้าไปในที่ที่มีจุดร้อนเกิดขึ้น

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิในเส้นลวดทองแดง ได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้า และปริมาณกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานในเส้นลวดทองแดงขึ้นกับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดง การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดความร้อนในเส้นลวดทองแดงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสามารถนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิในเส้นลวดสามารถนำไปใช้ทำนายอุณหภูมิโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและสามารถใช้ในการตรวจสอบความร้อนได้จากค่าการใช้กระแสไฟฟ้าจากจุดจ่ายไฟ

2. สมการการกระจายตัวความร้อน

การสร้างสมการการกระจายตัวความร้อน (Heat diffusion equation) ในวัตถุหรือตัวกลาง (Medium) ใดๆ พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในชิ้นส่วนเล็กๆ โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดความร้อนมีการกระจายตัวขึ้นกับระยะทางในตัวกลางและแสดงเป็น $T(x,y,z)$ เมื่อพิจารณาตัวกลาง เช่น ทองแดง ที่เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ มี

รูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดในพิกัด x, y, z ใดๆ เป็น $\Delta x, \Delta y$ และ Δz ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาตรควบคุมสำหรับวิเคราะห์การนำความร้อนในตัวกลางสำหรับพิกัดสี่เหลี่ยม [6]

เมื่อมีการกระจายตัวของอุณหภูมิผ่านปริมาตรควบคุมตามแกน (Temperature gradient) ในรูปที่ 1 จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำตามแนวแกน x, y และ z ระหว่างพื้นผิวแต่ละด้านของปริมาตรควบคุม (Control volume) แสดงเป็นอัตราการนำความร้อน (Conduction heat rate) โดยที่อัตราการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามแกน x, y และ z แสดงได้ด้วยสมการ (1-3)

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (1)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (3)$$

เมื่อ q_x คือ อัตราการนำความร้อนในแกน x

q_y คือ อัตราการนำความร้อนในแกน y

q_z คือ อัตราการนำความร้อนในแกน z

ภายในตัวกลางขณะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ อาจจะมีแหล่งพลังงาน (Energy source) ที่เกิดจากอัตราการนำความร้อนในปริมาตรควบคุมและสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (4)

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{E}_g$ คือ แหล่งพลังงาน

$\dot{q}$ คือ อัตราการนำความร้อนต่อปริมาตรควบคุมมีหน่วยเป็น W/m^3

นอกจากนี้เมื่อมีการกระจายตัวของอุณหภูมิผ่านปริมาตรควบคุม อาจทำให้มีการสะสมพลังงาน (Energy storage) เกิดขึ้นโดยอัตราการสะสมพลังงานแสดงได้ด้วยสมการ (5)

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (5)$$

เมื่อ $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ คือ อัตราเวลาของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนต่อปริมาตรควบคุม (Time rate of change of the thermal energy of medium per unit volume)

เมื่อพิจารณาในสภาวะสมดุลของพลังงานสามารถแสดงสมการอนุรักษ์พลังงาน (The conservation of energy) ได้ดังสมการที่ (6)

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (6)$$

แทนค่าสมการ (1-5) ลงในสมการที่ 6 จะได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{dT}{dt} dx dy dz \quad (7)$$

โดยที่อัตราการนำความร้อนในแกน x, y และ z แสดงด้วยสมการ (8-10) ตามลำดับได้

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (9)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวกลาง

แทนสมการ (8-10) ลงในสมการ (7) ทำให้ได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวกลางแสดงได้ด้วยสมการ (11)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

เมื่อ α คือ ค่าการกระจายตัวของความร้อน (Thermal diffusivity) และ

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (12)$$

เนื่องจากการเกิดความร้อนภายในตัวกลางที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสามารถแสดงเป็นสมการของอัตราการนำความร้อนต่อปริมาตรควบคุม ($\dot{q}$) ได้เป็นสมการ (13) [7]

$$\dot{q} = \dot{q}_i = \sigma |J|^2 \quad (13)$$

เมื่อ σ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) มีหน่วย $\Omega \cdot m$

J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) มีหน่วย A/m^2

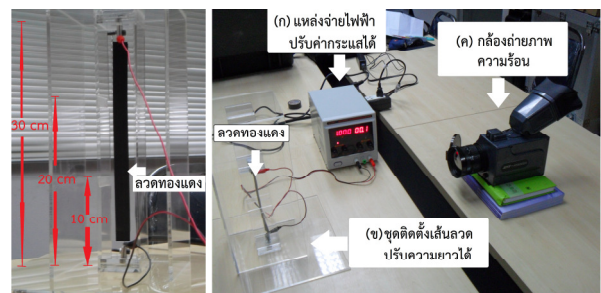
3 อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์

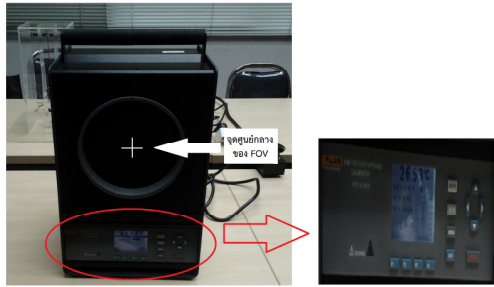
การศึกษาการเกิดความร้อนในเส้นลวดทองแดงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มีการออกแบบชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 2

อุปกรณ์ของชุดทดสอบความร้อนในเส้นลวดทองแดงประกอบด้วย (ก) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจ่ายไฟ (Power supply) ยี่ห้อ ATEN รุ่น APS3005S (ข) ชุดติดตั้งเส้นลวดทองแดงซึ่งถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยสามารถเปลี่ยนแปลงความยาวของลวดทองแดงได้ 3 ระดับ และ (ค) กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ SAT รุ่น SAT-HY6000A ซึ่งมีความแม่นยำในการบันทึกค่าอุณหภูมิ $\pm 2\%$ ในการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้จะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเส้นลวดทองแดงตั้งแต่เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ โดยค่ากระแสไฟฟ้า และขนาดของเส้นลวดทองแดงที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

กล้องถ่ายภาพความร้อนที่นำมาใช้ในการทดลองจะทำการสอบเทียบอุณหภูมิโดยใช้วิธีสอบเทียบกับวัตถุดำ [11] ซึ่งวัตถุดำ (Blackbody) ที่นำมาใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3



รูป 2 ชุดทดสอบการเกิดความร้อนในเส้นลวดทองแดง



รูปที่ 3 วัตถุดำ (blackbody) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 4180

3.2 การวิเคราะห์มิติ

ในการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดความร้อนในหลอดทองแดงจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบจำนวนหลายพารามิเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง การวิเคราะห์มิติ (Dimensional analysis) จะเป็นการนำมิติของพารามิเตอร์เหล่านั้นมาวิเคราะห์และจัดให้เกิดเป็นกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติเพื่อใช้กำหนดคุณลักษณะของการเกิดความร้อน โดยใช้ทฤษฎีของบักกิงแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การไหลของของไหล (Fluid flow) [8-10]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ 6 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งได้มาจากสมการการกระจายความร้อนโดยมีจำนวนมิติทั้งหมด 4 มิติ ได้แก่ K, m, kg และ s (หน่วย W สามารถกระจายเทอมได้เป็น $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) ซึ่งนำมาเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ของมิติแสดงในรูปที่ 4 และใช้วิธีของบักกิงแฮมไพทำให้ได้กลุ่มของไพ (Pi) ในรูปของฟังก์ชัน แสดงได้ด้วยสมการ (14-16)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การสอบเทียบกล้องถ่ายภาพความร้อน

หลักการสอบเทียบอุณหภูมิของกล้องถ่ายภาพความร้อนทำได้โดยติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนไว้หน้าตัวแผ่รังสีแบบวัตถุดำ (Blackbody Radiator) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) เข้าใกล้หนึ่ง ปรับอุณหภูมิของวัตถุดำให้มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของกล้องส่องความร้อนให้เท่ากับหนึ่งแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ที่จุดกึ่งกลางของ FOV ของวัตถุดำแล้วจึงนำอุณหภูมิที่อ่านได้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของวัตถุดำโดยทำการบันทึกอุณหภูมิ 5 ค่าและสามารถแสดงผลการสอบเทียบได้ในตารางที่ 3

$$\pi_1 = \phi(\pi_2) \quad (14)$$

$$\text{และ} \quad \pi_1 = \left(\frac{\dot{q} \cdot t}{k} \right)^{0.5} \cdot x \quad (15)$$

$$\pi_2 = \frac{t \cdot \dot{q} \cdot T}{k} \cdot \alpha \quad (16)$$

ตารางที่ 1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าและขนาดของเส้นลวดทองแดงที่ใช้ในการทดสอบการเกิดความร้อน

ปริมาณกระแสไฟฟ้า (A)	เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง (mm)	ความยาวของลวดทองแดง (cm)
0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5	0.2	10
		20
		30
1, 2, 3, 4 และ 5	0.4	10
		20
		30
	0.7	10
		20
		30
	1	10
		20
		30

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
k	การนำความร้อน	W/m-K
T	อุณหภูมิ	K
t	เวลา	s
x	ตำแหน่ง	m
α	ค่าการแพร่ความร้อน	m^2/s
$\dot{q}$	อัตราการเกิดความร้อน	W/m^3

	α	x	k	T	t	$\dot{q}$
K	0	0	-1	1	0	0
m	2	1	1	0	0	-1
kg	0	0	1	0	0	1
s	-1	0	-3	0	1	-3
π_1	0	1	-0.5	0	0.5	0.5
π_2	1	0	-1	1	1	1

รูปที่ 4 เมทริกซ์มิติของพารามิเตอร์ 6 ตัว

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนกล้องถ่ายภาพความร้อน

ครั้งที่	อุณหภูมิที่อ่านได้จาก (°C)		Error (%)
	Black body	กล้องถ่ายภาพความร้อน	
1	30	29.4	2.00
2	50	46.1	7.80
3	60	54.4	9.33
4	80	71.3	10.88
5	100	87.6	12.40

4.2 ผลการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนของหลอดทองแดง

การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายภาพความร้อนที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทองแดงเมื่อมี

การบันทึกค่ากล้องถ่ายภาพความร้อนจะทำการบันทึกข้อมูลภาพให้อยู่ในไฟล์ (File) ที่มีนามสกุล .SAT จากนั้นจะต้องจัดการกับไฟล์ข้อมูลเพื่อแสดงเป็นภาพเฉดสี (Color contour) ของความร้อนของเส้นลวดทองแดง เวลาต่างๆ ตัวอย่างผลการจัดการไฟล์ข้อมูลภาพของการทดสอบจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 5 A ให้กับลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm ความยาว 20 cm ณ เวลาต่างๆ ในรูปที่ 5 แสดงเป็นภาพเฉดสี โดยกำหนดให้สีขาวเป็นบริเวณที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุด และสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุด

เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองซึ่งถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 1 มาพล็อต (Plot) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดทองแดง สามารถแสดงผลการทดลองทั้งหมดจากกล้องถ่ายภาพความร้อนของเส้นลวดทองแดงที่มีความยาว 10, 20 และ 30 cm ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2, 0.4, 0.7 และ 1 mm ในรูปที่ 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ

4.3 ผลการวิเคราะห์มิติ

การหาอุณหภูมิในเส้นลวดทองแดง โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และปริมาณกระแสไฟฟ้าของเส้นลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดและความยาวแตกต่างกันเมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 6-9 มาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการที่ (14) ทำให้ได้สมการ

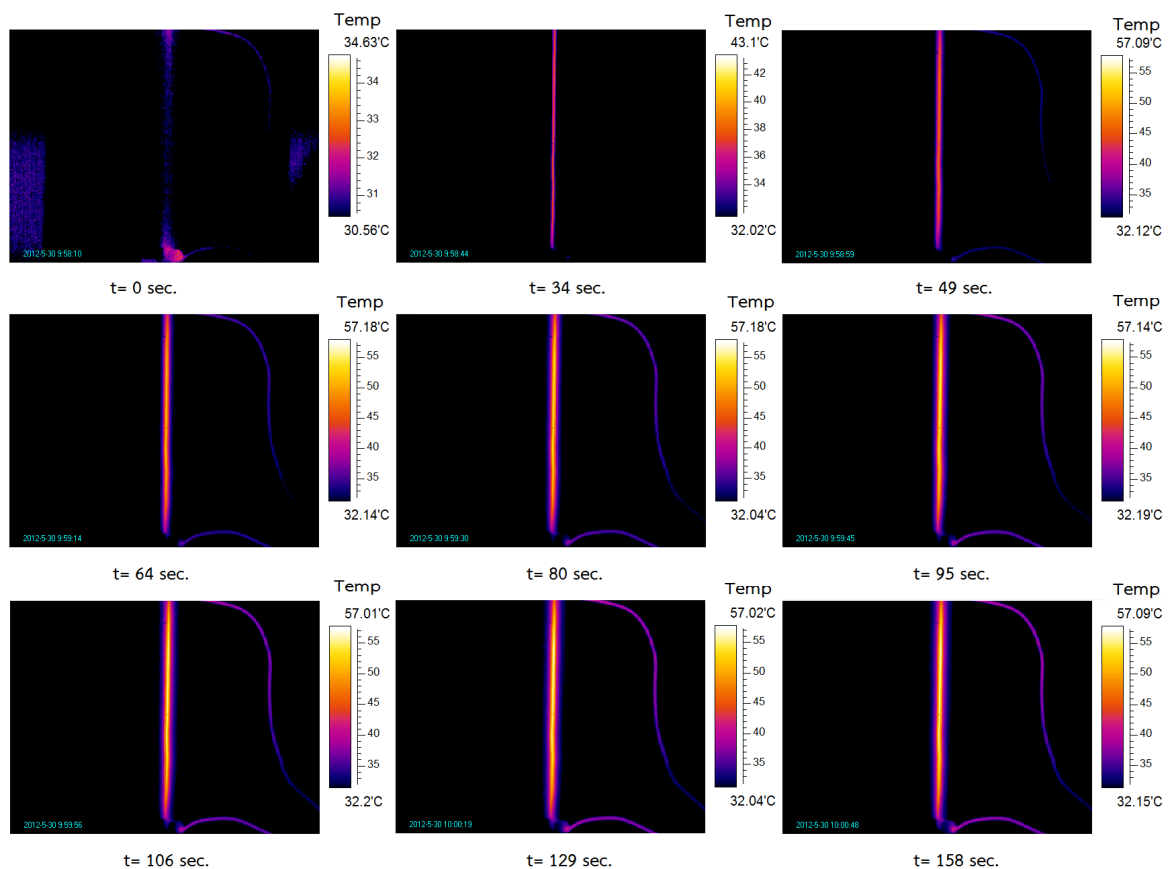
$$\pi_1 = a(\pi_2)^b \quad (17)$$

เมื่อ $a = 0.1935$ และ $b = 0.4764$

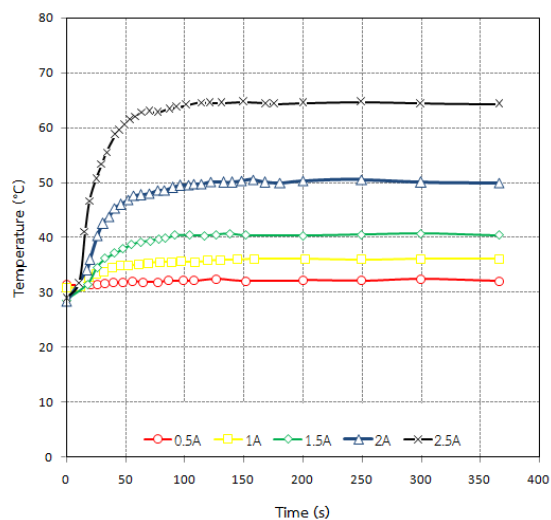
แทนค่าสมการ (15-16) ลงในสมการ (17) ทำให้ได้สมการของอุณหภูมิที่มีพารามิเตอร์ x , k , α , $\dot{q}$ และ t เป็นตัวแปรแสดงได้ด้วยสมการ (18)

$$T = \frac{31.51 \cdot x^{2.099}}{\alpha} \cdot \left(\frac{\dot{q} \cdot t}{k} \right)^{0.495} \quad (18)$$

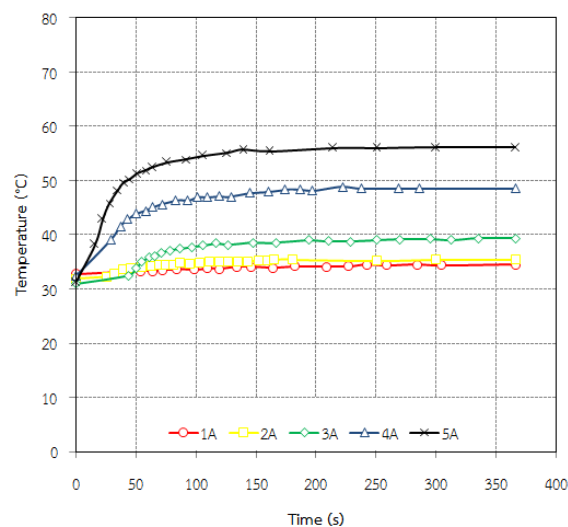
สมการของอุณหภูมิในเส้นลวดทองแดงสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่งจุดร้อน ($x=1$ mm) แสดงในรูปที่ 10-13 ผลการเปรียบเทียบพบว่าสมการของอุณหภูมิที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4



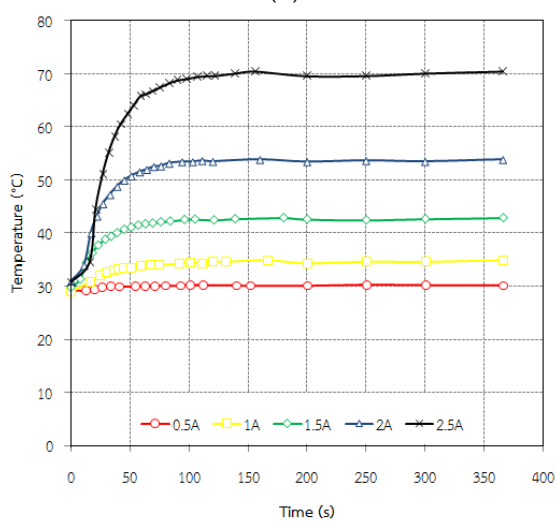
รูปที่ 5 ตัวอย่างรูปที่ได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตั้งแต่เวลา $t=0$ sec ถึงเวลา $t=158$ sec ของเส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm มีความยาว 20 cm และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 5 A



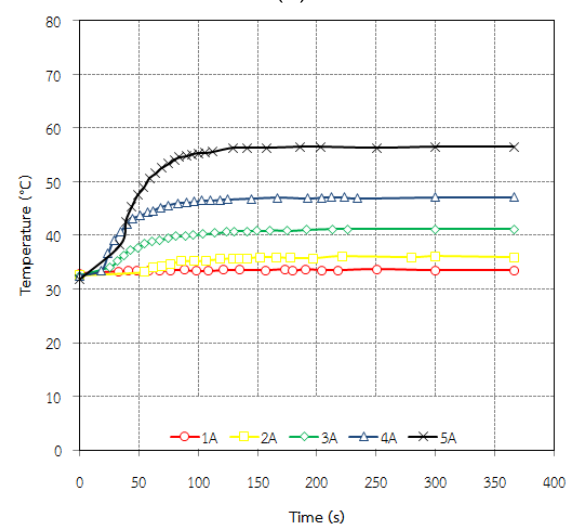
(ก)



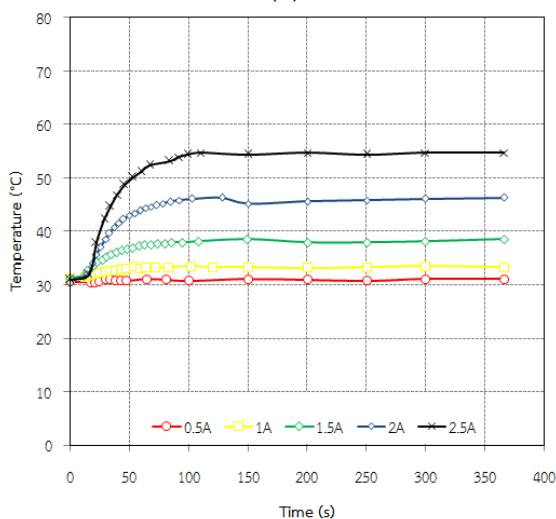
(ง)



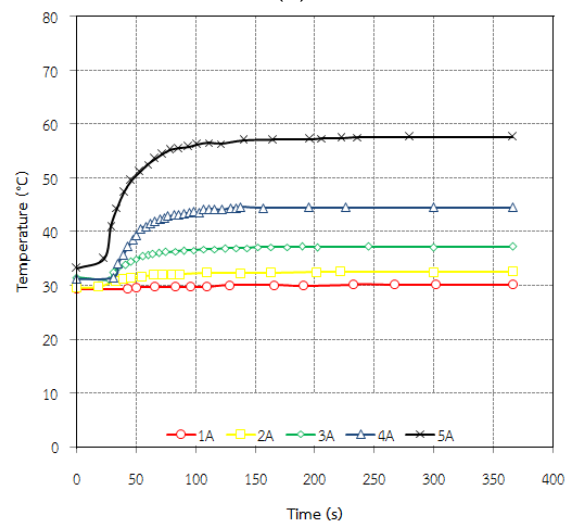
(ข)



(จ)



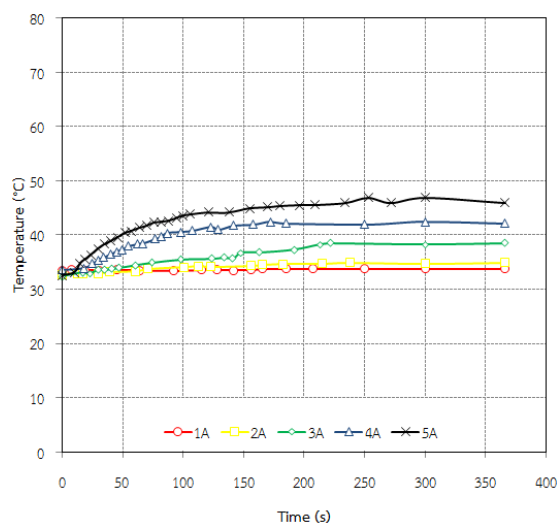
(ค)



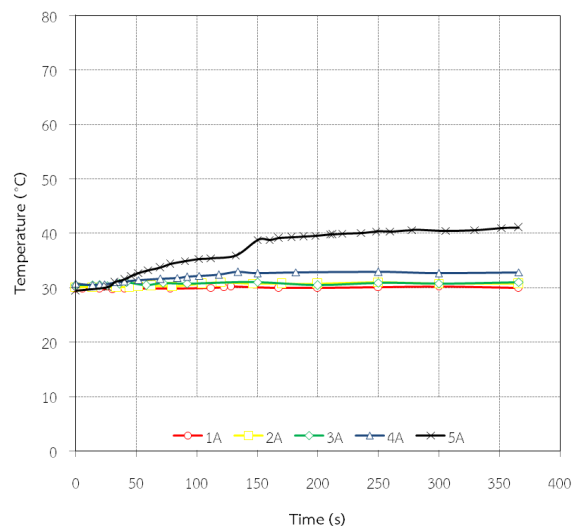
(ฉ)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ เวลา และ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดทองแดงที่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 mm (ก) ความยาว 10 cm (ข) ความยาว 20 cm (ค) ความยาว 30 cm

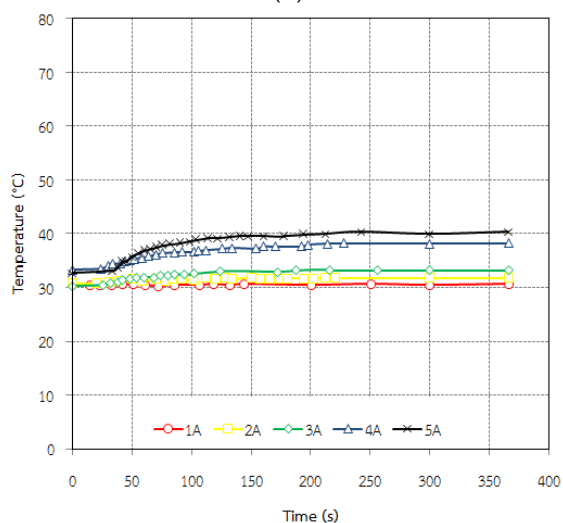
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ เวลา และ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดทองแดงที่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm (ง) ความยาว 10 cm (จ) ความยาว 20 cm (ฉ) ความยาว 30 cm



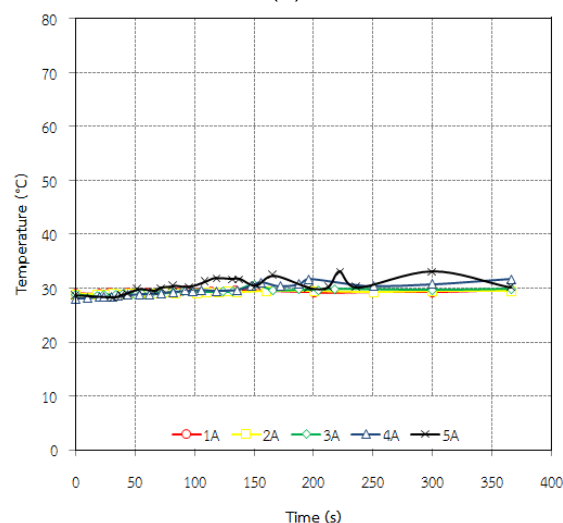
(ก)



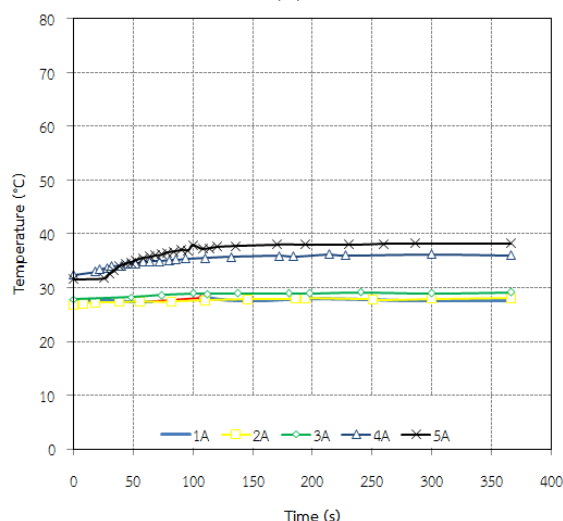
(ง)



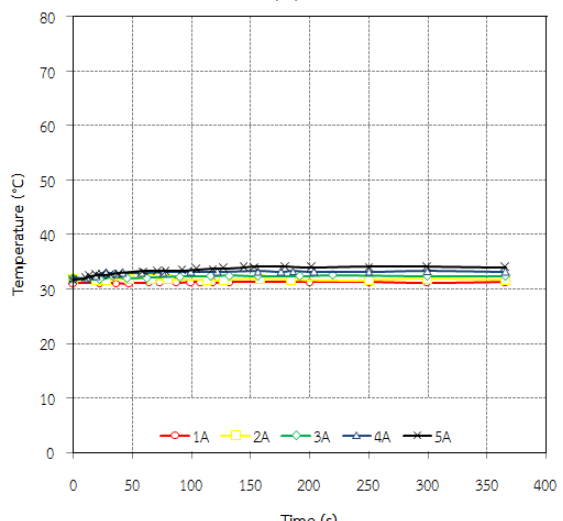
(ข)



(จ)



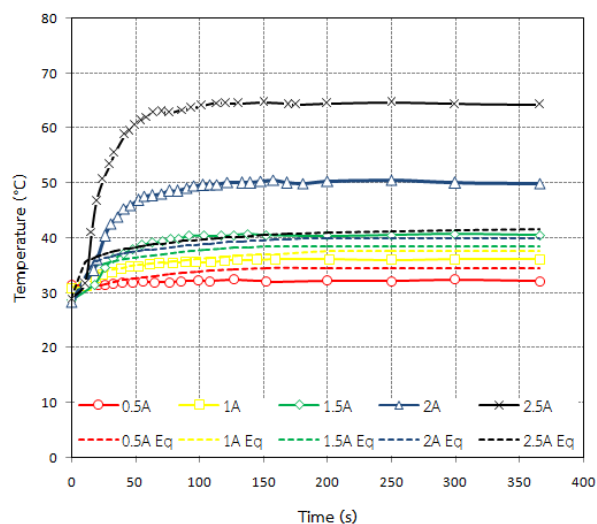
(ค)



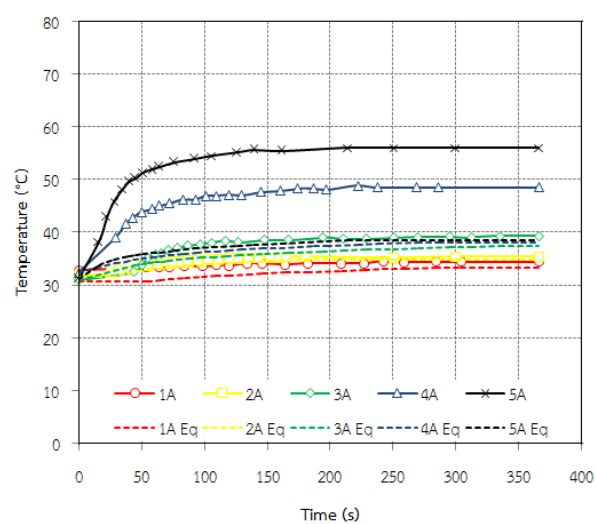
(ฉ)

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ เวลา และ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดทองแดงที่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 mm (ก) ความยาว 10 cm (ข) ความยาว 20 cm (ค) ความยาว 30 cm

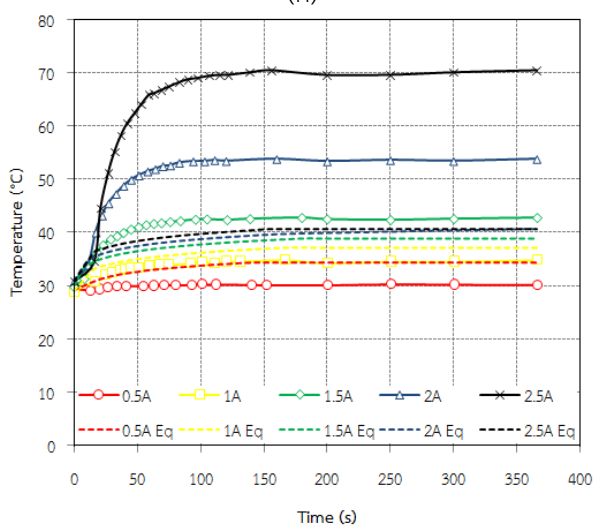
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ เวลา และ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดทองแดงที่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm (ก) ความยาว 10 cm (ข) ความยาว 20 cm (ค) ความยาว 30 cm



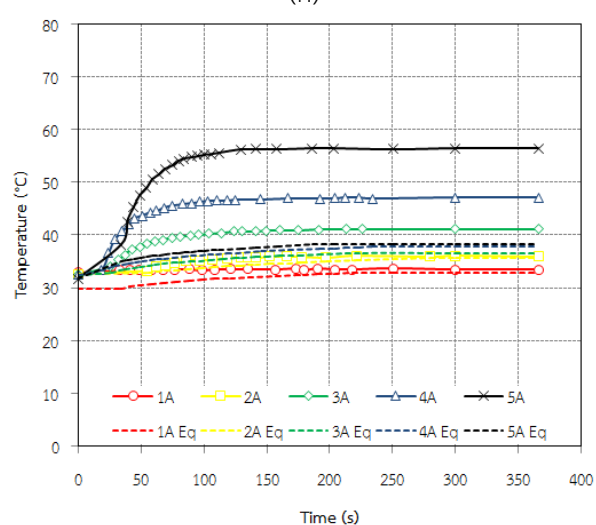
(ก)



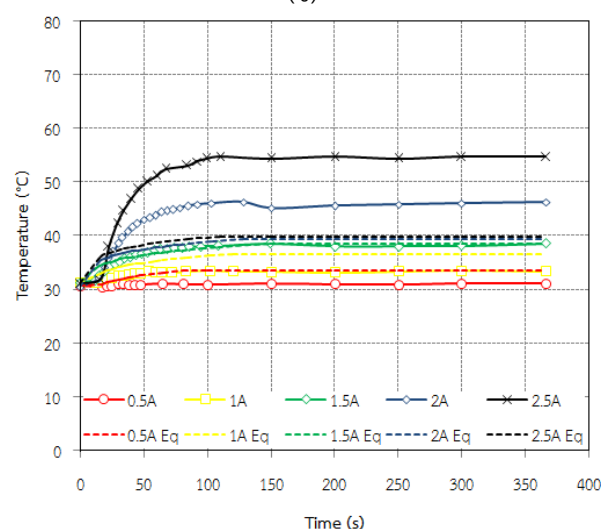
(ง)



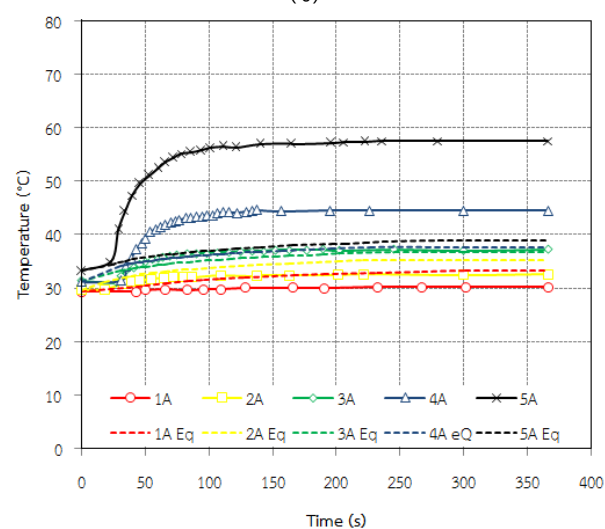
(ข)



(จ)



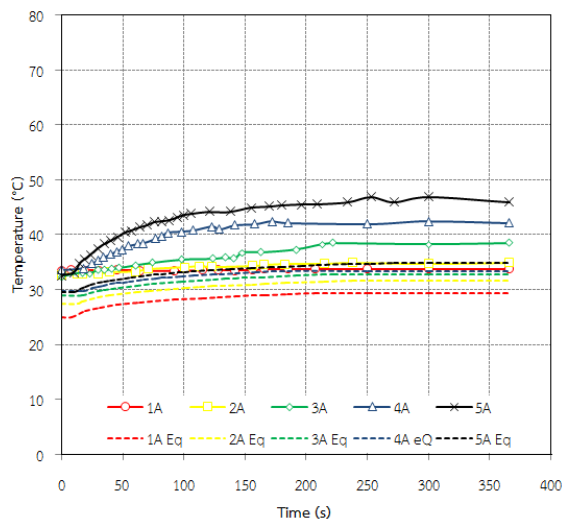
(ค)



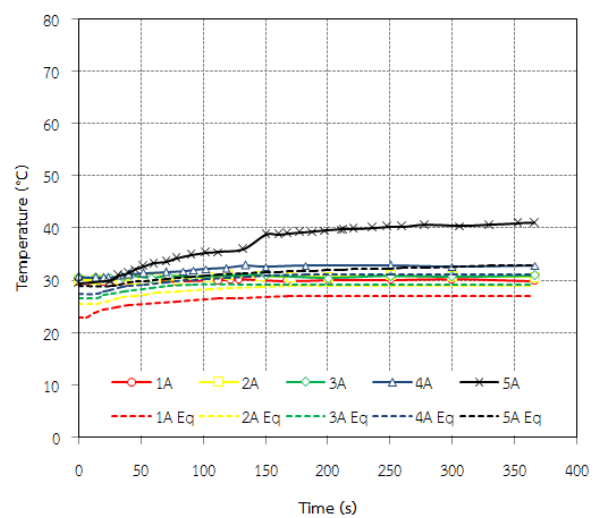
(ฉ)

รูปที่ 10 อุณหภูมิในเส้นลวดทองแดงที่ได้จากการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองของเส้นลวดทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 mm (ก) ความยาว 10 cm (ข) ความยาว 20 cm (ค) ความยาว 30 cm

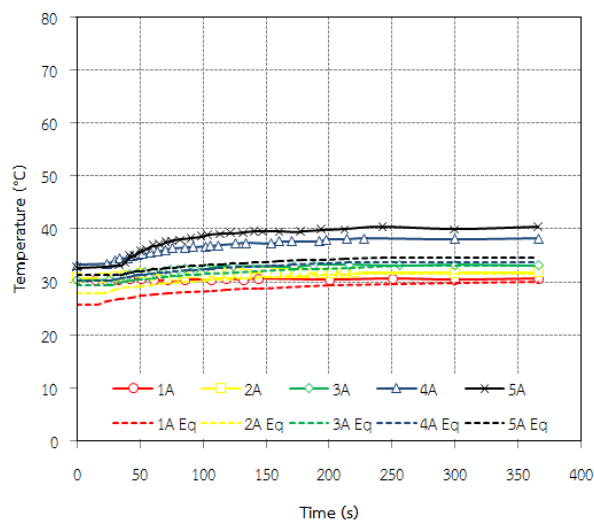
รูปที่ 11 อุณหภูมิในเส้นลวดทองแดงที่ได้จากการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองของเส้นลวดทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 mm (ง) ความยาว 10 cm (จ) ความยาว 20 cm (ฉ) ความยาว 30 cm



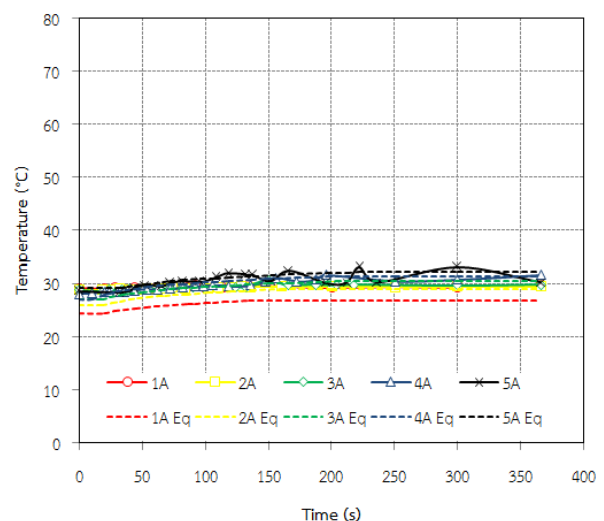
(ก)



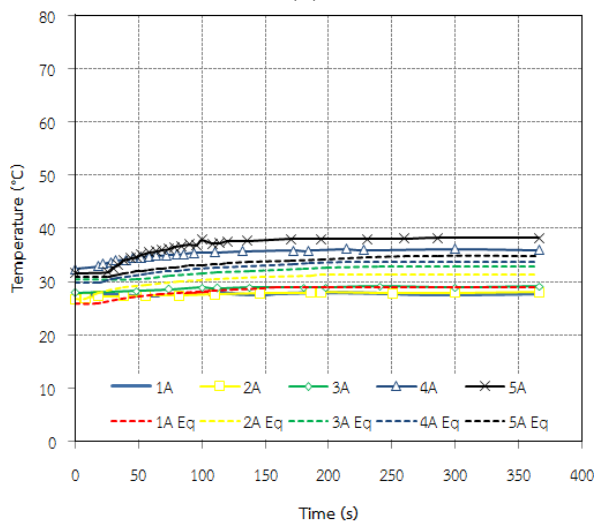
(ง)



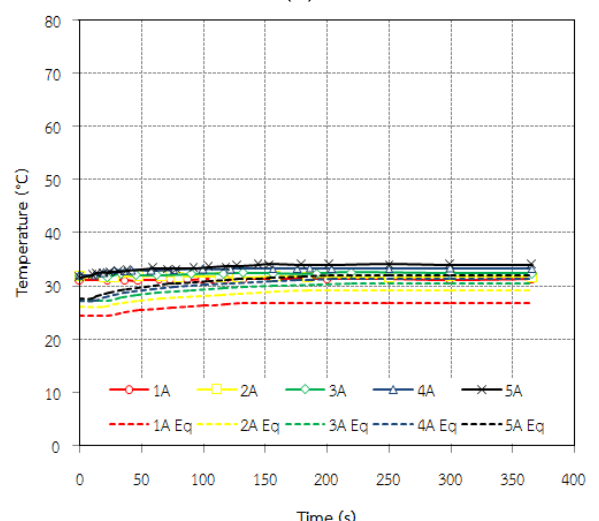
(ข)



(จ)



(ค)



(ฉ)

รูปที่ 12 อุณหภูมิในเส้นลวดทองแดงที่ได้จากสมการ
เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองของ
เส้นลวดทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 mm (ก) ความ
ยาว 10 cm (ข) ความยาว 20 cm (ค) ความยาว 30 cm

รูปที่ 13 อุณหภูมิในเส้นลวดทองแดงที่ได้จากสมการ
เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากผลการทดลองของ
เส้นลวดทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm (ง) ความ
ยาว 10 cm (จ) ความยาว 20 cm (ฉ) ความยาว 30 cm

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ (18) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ปริมาณกระแสไฟฟ้า (A)	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลวดทองแดง (mm)	ความยาวลวดทองแดง (cm)	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)
0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5	0.2	10	13.64
		20	17.25
		30	8.72
1, 2, 3, 4 และ 5	0.4	10	13.25
		20	14.71
		30	13
	0.7	10	15.88
		20	8.07
		30	7.79
	1	10	10.92
		20	4.61
		30	11.71

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ เวลา ความยาว และพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดง เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้า และเวลาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของเส้นลวดทองแดงจะเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ในทางกลับกันเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดทองแดงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของเส้นลวดทองแดงที่สภาวะคงตัวจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ลดลงทำให้อัตราการเกิดความร้อนลดลง นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการการกระจายความร้อน ได้สมการ (19)

$$T = \frac{31.51 \cdot x^{2.099}}{\alpha} \cdot \left(\frac{\dot{q} \cdot t}{k} \right)^{0.495} \quad (19)$$

โดยสมการนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทั้งหมด 11.63 % เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงที่ตำแหน่งจุดร้อน ($x = 1 \text{ mm}$)

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย และกล้องถ่ายภาพความร้อน สำหรับปฏิบัติงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Greene, V. J. (1985). Infrared Inspection, *The Locomotive*, vol. 64, No. 5, 1985, pp. 107-113.
- [2] Epperly, R. A., Heberlein, G. E. and Eads, L. G. (1997). A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography, *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual*, vol. 29(11-12), August 1997, pp. 59 – 68.
- [3] Snell, J. and Joe Renowden, P.E., Consulting Engineer. Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines. *Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. 2000 IEEE ESMO - 2000 IEEE 9th International Conference on*. 2000, pp. 135-144.
- [4] Snell, J. and Fritz, J. Improving temperature measurements for electrical inspections, *Proceedings of Thermosense XX*, SPIE, Bellingham, WA, 1995
- [5] กองบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า (2555). *คู่มือการใช้งานกล้องส่องหาความร้อน*, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, หน้า 1-5
- [6] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edition, ISBN-13: 978-0-471-794714, John Wiley & Sons (Asia).
- [7] D.K. Cheng (1983). *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-Wesley, MA.
- [8] Szirtes, T. (1997). *Applied dimensional analysis and modeling*, 2nd edition, Burlington, MA, Butterworth-Heinemann.
- [9] Michael, D.P. and Sean, N.B. (2009). Scaling of hybrid-electric vehicle powertrain components for Hardware-in-the-loop simulation. *Journal of Mechatronics*, vol. 19, 2009, pp. 1078-1090.
- [10] รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร (2549). *กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics)*, บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด, หน้า 233-262.
- [11] ธาดา แก้วประเสริฐ (2553). *การสอบเทียบอุณหภูมิและการตรวจสอบคุณสมบัติของเทอร์โมสแกน*, metrology info, เล่ม 12, หน้า 11