ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

A STUDY OF HEAT CONDUCTION IN METALS

นางสาวเบญญทิพย์ ดำยางผิว

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

A STADY OF HEAT CONDUCTION IN METALS

นางสาวเบญญทิพย์ สำอางผิว

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STADY OF HEAT CONDUCTION IN METALS

Miss Benyathip Sumangphiw

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ[illegible]ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ ชุดการศึกษาการนำความนำร้อนในโลหะ

A STADY OF HEAT CONDUCTION IN METALS

ชื่อนักศึกษา นางสาวเบญญทิพย์ สำอางผิว

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.กาจปัญญา สุวรรณสุโข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ	
รศ.วิชิต ศิริโชติ	
อ.ธนาภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
อ. กาจปัญญา สุวรรณสุโข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

ชื่อนักศึกษา นางสาวเบญญทิพย์ สำอางผิว

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.กาจปัญญา สุวรรณสุโข

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษ เป็นการศึกษาการสร้างชุดทดลองเพื่อมีหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็กผสม (Wrought iron) ทองเหลือง และอลูมิเนียม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 cm ยาว 40 cm โดยควบคุมอุณหภูมิที่ให้กับโลหะที่ปลายด้านหนึ่งมีอุณหภูมิ 100^0C จากการทดลองพบว่า ที่ระยะห่าง 27 cm ของอุณหภูมินี้ ให้ผลการทดลองที่ดี โดยที่เหล็ก ทองเหลือง และอลูมิเนียม จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 61.4±1.8 W/m.^{0}C, 128.2±6.3 W/m.^{0}C และ180.3±16.2 W/m.^{0}C ตามลำดับ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 7.6%,0.10% และ 12.5% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : การนำความร้อน, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

Title	A STUDY OF HEAT CONDUCTION IN METALS
Students	Miss Benyathip Sumangphiw
Degree	Bachelor of physics
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Mr. Kajpanya Suwansukho

ABSTRACT

This special project is created a series of experiments to study the thermal conductivity coefficient (k-value) of three metals wrought iron, brass and aluminum. Which none diameter of 2.54 cm and 40 cm length. At one end, the temperature was Fired at 100 $^{\circ}$C by temperature control. The different temperature ware varied by different distant between two points of temperature measurement. The results show that at 27.0 cm field measurement point, the k-value wrought iron, brass and aluminum are 61.4 ± 1.8 W/m.^{0}C, 128.2±6.3 W/m.^{0}C and 180.3 ± 16.2 W/m.^{0}C with percentage error of 7.6 %, 0.10% and 12.5 %, respectively

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keyworks : conductivity, thermal conductivity coefficient

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยช่วยเหลือจากทุกคนไม่ว่าจะเป็นอาจารย์ที่คอยชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน คอยฝึกให้เรามีความคิดที่เป็นระบบมากขึ้น รวมถึงการอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆในการดำเนินโครงงานพิเศษ ยังมีพี่ๆที่คอยช่วยเหลือกับงานหนักที่เราทำไม่ได้ ยังเป็นที่ปรึกษาและช่วยหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงงานพิเศษนี้เสมอ และเพื่อนๆที่คอยอยู่เป็นเพื่อนและที่ปรึกษาตลอดการทำโครงงานพิเศษนี้ ถึงแม้โครงงานพิเศษนี้จะเป็นโครงงานที่ทำขึ้นจากคนๆเดียว แต่ด้วยความร่วมมือจากทุกๆคนที่คอยช่วยเหลือโครงงานนี้จึงเสร็จสมบูรณ์ได้ดังที่หวังไว้ ขอขอบพระคุณทุกๆความร่วมมือจากทุกๆคนที่ทำให้โครงงานนี้สำเร็จ

และสุดท้ายที่สำคัญที่สุดคือโอกาสที่ได้รับจากอาจารย์กาจปัญญา สุวรรณสุโข ที่อาจารย์ได้ให้โอกาสให้เราได้ทำโครงงานพิเศษนี้เพียงคนเดียว เพื่อเป็นการพิสูจน์การทำงาน ความอดทน แรงกดดัน และปัญหาต่างๆ ที่จะต้องเจอในการทำงานคนเดียว แต่ความรู้ที่ได้กลับมาและความสามารถที่มากขึ้นจากการทำโครงงานนี้นั่นคุ้มค่ากับการได้ทำ

นางสาวเบญญทิพย์ สำอางผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การถ่ายเทความร้อน	3
2.2 การนำความร้อน	4
2.3 สมการการนำความร้อน	4
2.4 สภาวะคงตัวของการนำความร้อน	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 โลหะที่ใช้ในการทดลอง	7
3.2 ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	8
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดลอง	9
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	14
5.2 ข้อเสนอแนะ	14
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก.	
ภาคผนวก ข.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
4.1 ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด	9
4.2 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม	10
4.3 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม	11
4.4 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ	3
2.2 การนำความร้อนผ่านตัวกลางที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล	4
2.3 แผนภาพการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	5
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เหล็ก ทองเหลือง และอลูมิเนียม	7
3.2 ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ	7
3.3 การออกแบบการทดลอง	8
4.1 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม	10
4.2 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม	11
4.3 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
I_x	อัตราการไหลของความร้อนในทิศ x
∇T	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
W/m^2	วัตต์ต่อตารางเมตร
$^oK/m$	องศาเคลวินต่อเมตร
$W/m.^oK$	วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน
Q	พลังงานความร้อน
A	พื้นที่หน้าตัด
m^2	ตารางเมตร
T	อุณหภูมิ
x	ระยะห่าง
^oK	องศาเคลวิน
W	วัตต์
m	เมตร
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิ
ΔQ	การเปลี่ยนแปลงความร้อน
V	แรงดันไฟฟ้า
I	กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
cm	เซนติเมตร
^{o}C	องศาเซลเซียส
$W/m.^{0}C$	วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการศึกษาฟิสิกส์พื้นฐานและเทอร์โมไดนามิกระดับมหาวิทยาลัย การถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านพลังงาน โดยในโครงงานพิเศษนี้จะทำการสร้างชุดการทดลอง เพื่อศึกษาการนำความร้อนของโลหะ โดยอาศัยหลักการการนำความร้อนโดยนำพื้นฐานของกฎฟูเรียร์ และคำนิยามตัวแปร เช่น การนำความร้อน อัตราการไหลของความร้อน นำมาอ้างอิงถึงการถ่ายเทความร้อนของพลังงานความร้อนระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันโดยไม่มีการพาความร้อนและการแผ่รังสีเกิดขึ้น เพื่อระบบสามารถนำความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการศึกษาสมบัติของวัสดุหรือโลหะ แต่ละชนิดที่มีค่าการนำความร้อนเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุและที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันก็มีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างการไปด้วยนั่น สามารถศึกษาได้จากสมบัติการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและในการศึกษาการถ่ายความเทความร้อนของของแข็งนั้นเป็นสมบัติของการนำความร้อนและเพื่อนักศึกษาทำความเข้าใจได้มากขึ้น โดยจะศึกษาเพื่อให้สามารถสร้างชุดทดลองที่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งชุดการทดลองที่จะถูกนำไปใช้ในการเรียนการสอนและเพื่อให้สามารถนำมาศึกษาและทำความเข้าใจได้ดีขึ้น จาการนำความร้อนในโลหะ

ในการทำโครงการพิเศษนี้จึงได้ประดิษฐ์ชุดการทดลองทางด้านความร้อนที่ใช้ในศึกษาสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดหรือเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อศึกษาการนำความร้อนในของแข็งที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันในอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถบอกได้ถึงคุณสมบัติในการนำวัสดุไปใช้ และสามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์จากชุดการทดลองได้ และสามารถทราบค่าอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนได้ ทำให้สามารถนำไปศึกษาหรือทดลองการนำความร้อนในห้องทดลองด้านฟิสิกส์พื้นฐานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อสร้างชุดการศึกษาที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานห้องปฏิบัติการ

1.2.2 เพื่อให้นักศึกษาที่ใช้ชุดการศึกษาการนำความร้อนได้เข้าใจและรู้ถึงหลักการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นการศึกษาฟิสิกส์ขั้นพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อสร้างชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะที่มีคุณภาพความสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

โครงงานนี้เป็นการสร้างชุดการทดลองการนำความร้อน ซึ่งเป็นทรงกระบอกตัน ขนาด 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ทองเหลือง อลูมิเนียม และเหล็ก เพื่อนำไปใช้หาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

วันที่การดำเนินงาน	ขั้นตอนการนำเนินงาน
1 ก.ย. 2556 – 1 พ.ย. 2556	วางแผนการสร้างชุดศึกษาการนำความร้อน
5 พ.ย. 2556 – 15 ม.ค. 2557	ศึกษาวัสดุและจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้
20 ม.ค. 2557 – 15 ก.พ. 2557	ออกแบบและสร้างชุดการศึกษาการนำความร้อน
16 ก.พ. 2557 – 10 มี.ค. 2557	ศึกษาทดลองระบบชุดศึกษาการนำความร้อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อสร้างชุดการทดลองการนำความร้อนของโลหะ

1.5.2 เพื่อให้นักศึกษาสามารถนำไปใช้กับห้องปฏิบัติการทดลองฟิสิกส์พื้นฐานในระดับมหาวิทยาลัย

1.5.3 เพื่อนักศึกษาได้เข้าเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเพิ่มมากขึ้นจากการใช้ชุดการทดลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

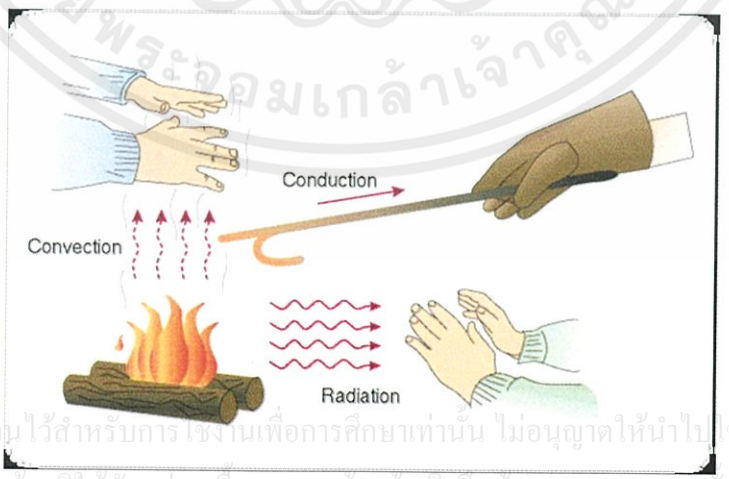
2.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนมักเกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ ได้แก่ การนำความร้อน(Conduction) การพาความร้อน(Convection) และการแผ่รังสีความร้อน(radiation) สามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายๆ ดังนี้

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.1.2 การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) คือ การที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใดๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันได้

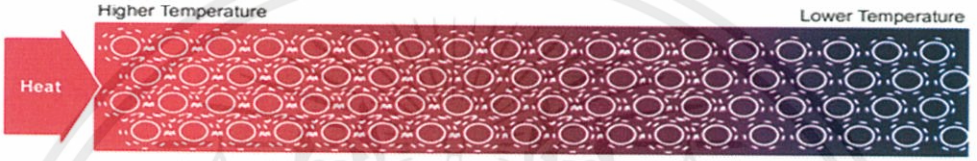


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ

2.2 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน (Conduction heat transfer) คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในที่มีอุณหภูมิสูงสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การนำความร้อนในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โมเลกุลจะไม่มีการเคลื่อนที่ ในของแข็งการนำความร้อน จะเกิดจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลในโครงผลึก โดยที่พลังงานความร้อนจะส่งผ่านจากโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงกว่า (อุณหภูมิสูง) ไปยังโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่า (อุณหภูมิต่ำ) โดยไม่มีการถ่ายเทมวลใดๆ



รูปที่ 2.2 แสดงการนำความร้อนผ่านตัวกลางที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล

2.3 สมการการนำความร้อน

จากกฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์ของการนำความร้อน สามารถอธิบายได้ดังนี้ “อุณหภูมิ ณ จุดใดภายในวัสดุคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ” จะได้

$$I_x = -k\nabla T \tag{2.1}$$

I_x คือ อัตราการไหลของความร้อนในทิศ x มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

∇T คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวินต่อเมตร (K/m)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal coefficient)หรือ ค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติเชิงความร้อน (thermal properties) ของวัสดุ ที่บ่งถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อน (conduction) ของสารต่างๆ ซึ่งเป็นการส่งผ่านความร้อนภายในโมเลกุลของสาร จากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ไปยังระดับที่ต่ำกว่า มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน (W/m.K) จากกฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์ เราจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.2}$$

Q คือ พลังงานความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน ($^{\circ}K$)

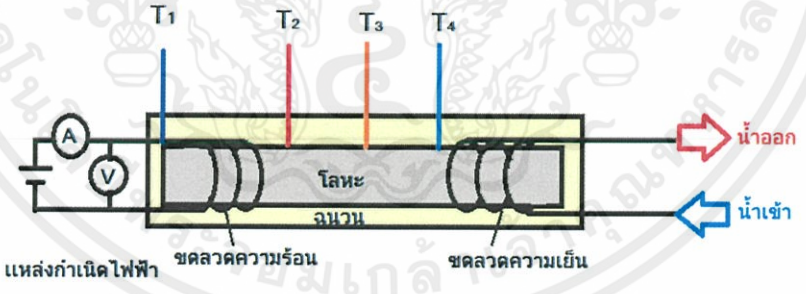
x คือ ระยะห่าง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน (W/m.K)

2.4 สภาวะคงตัวของการนำความร้อน

สภาวะคงตัวของการนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ของระบบคงตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบจะไม่เท่ากันทุกจุด ดังนั้นปริมาณความร้อนขาเข้าจะเท่ากับปริมาณความร้อนขาออก โดยที่ความร้อนขาเข้าเท่ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในระบบ จะได้

$$\Delta Q = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = -kA\frac{T_2 - T_1}{x} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากรูปที่ 2.3 นำกฎของ Ohm มาเทียบกับกฎฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_1 = VI \tag{2.4}$$

โดยที่ ; ปริมาณความร้อนขาเข้า = ปริมาณความร้อนขาออก

$$Q_1=Q_2 \tag{2.5}$$

$$VI=kA\frac{T_1-T_2}{x} \tag{2.6}$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ 2.7

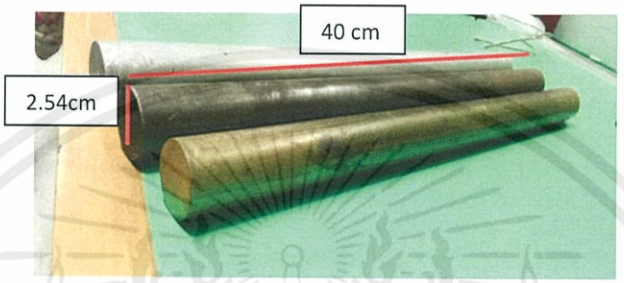
$$k=\frac{VIx}{A(T_1-T_2)} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

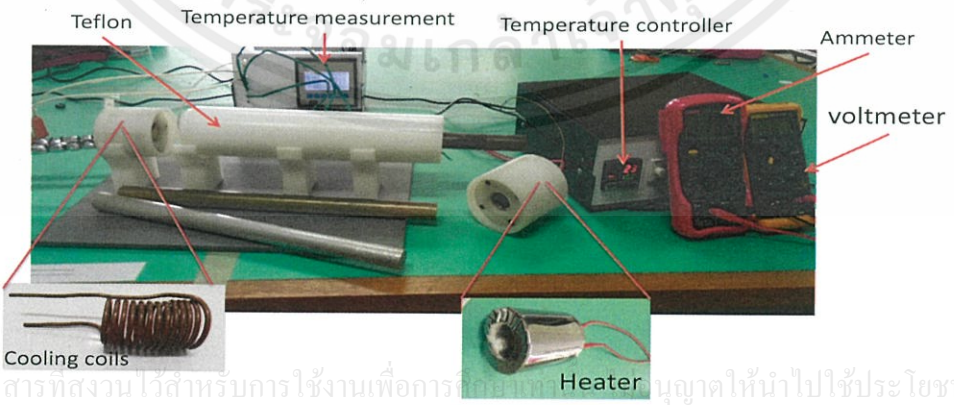
3.1 โลหะที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เหล็ก ทองเหลือง และอลูมิเนียม

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เป็นโลหะ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 40 เซนติเมตร วัสดุที่จะใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียม เหล็ก และทองเหลือง แสดงรูปที่ 3.1

3.2 ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

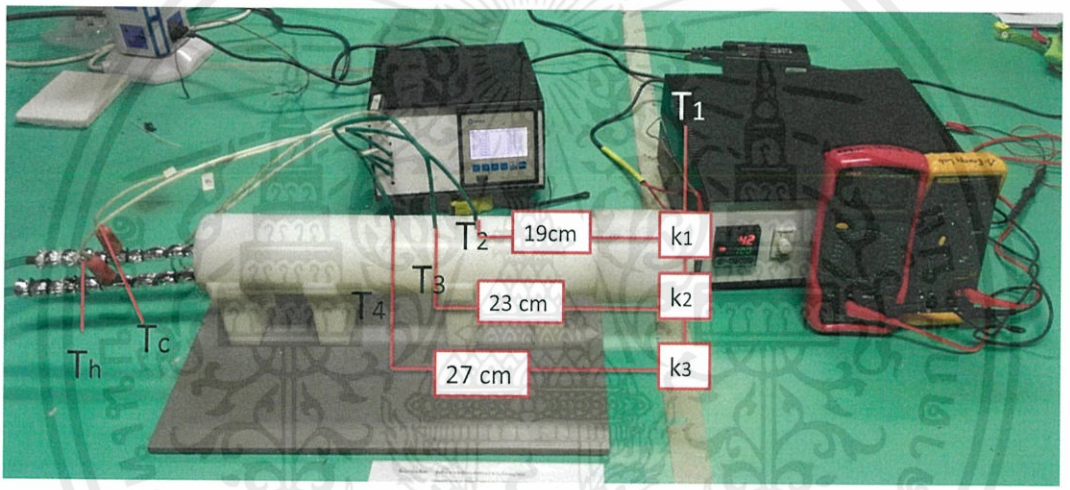


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.2 จะเริ่มจากจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวให้ความร้อนที่ให้ความร้อนอยู่ที่ 100 °C โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทำการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับตัวทำความร้อนที่ 100 °C ตัวทำความร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับโลหะที่อยู่ด้านในฉนวน (เทฟลอน) ทำการวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างต่างๆส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นตัวระบายความร้อนเปิดน้ำให้ไหลผ่านขดลวดทองแดงที่แนบติดกับโลหะ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน

3.3 วิธีการทดลอง



รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบการทดลอง

จากรูปที่ 3.3 แสดงระยะที่กำหนดไว้เพื่อวัดผลต่างอุณหภูมิ โดยตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) จะรักษาอุณหภูมิที่ปลายของวัสดุไว้ที่ 100 °C เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state)ทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดัน อุณหภูมิ T_2, T_3 และT_4 โดยเปิดให้น้ำหล่อเย็นไหล ทำการบันทึกผลทุก 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที ทำทั้งหมด 15 เซต โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็ก ทองเหลือง และอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยกำหนดให้จุดปลายเป็นอุณหภูมิ T_1 ซึ่งจะอยู่ห่างจากจุดวัดอุณหภูมิ T_2, T_3 และ T_4 เท่ากับ 19.0 cm, 23.0 cm และ 27.0 cm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษา

จากการทดลองจะทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่วัสดุ

วัสดุที่ใช้	กระแสไฟฟ้า(A)	แรงดันไฟฟ้า(V)
เหล็กผสม	0.214	36.7
อลูมิเนียม	0.306	56.0
ทองเหลือง	0.287	52.2

วิธีการคำนวณ

ตัวอย่าง ที่เหล็กผสม ค่ากระแสไฟฟ้า(I) = 0.214 A

ค่าแรงดันไฟฟ้า(V) = 36.7 V

ที่ระยะ 19 cm มีอุณหภูมิ 31.6 °C

จากสมการที่ 2.7

$$k_1 = \frac{IVx}{A(T_1 - T_2)}$$

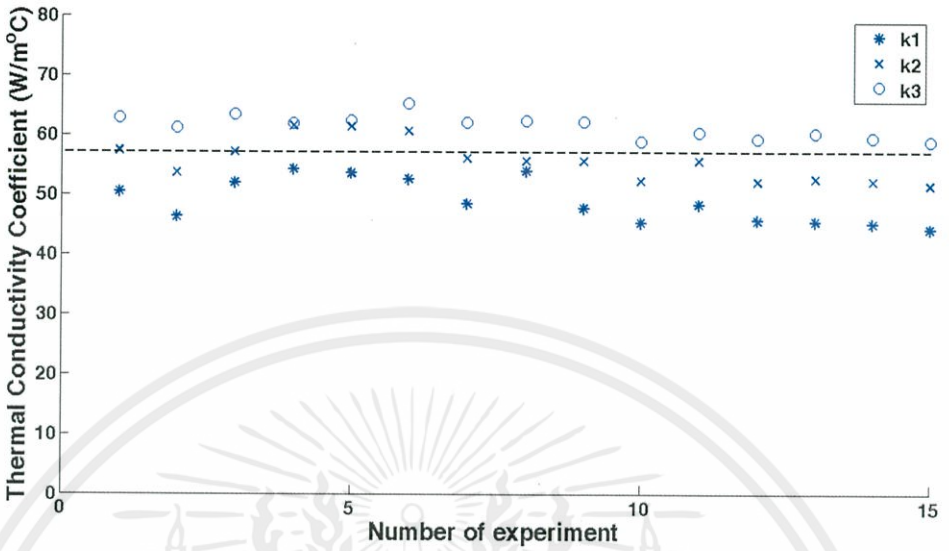
จะได้ว่า;

$$k_1 = \frac{(0.214)(36.7)(0.19)}{\frac{1}{4}\pi 0.0254^2(100-31.6)}$$

$$k_1 = 40.9185 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม (Wrought Iron) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 100 ^{0}C เท่ากับ 57.0 W/m.^{0}C จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟค่อยข้างแกว่ง แต่มีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นมาตรฐาน และค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่การทดลองเดียวกันใกล้เคียงกัน และจะพบว่าที่ระยะ 27 cm หรือ k_3 จะมีแกว่งน้อยและมีค่าลู่เข้ากราฟมาตรฐาน

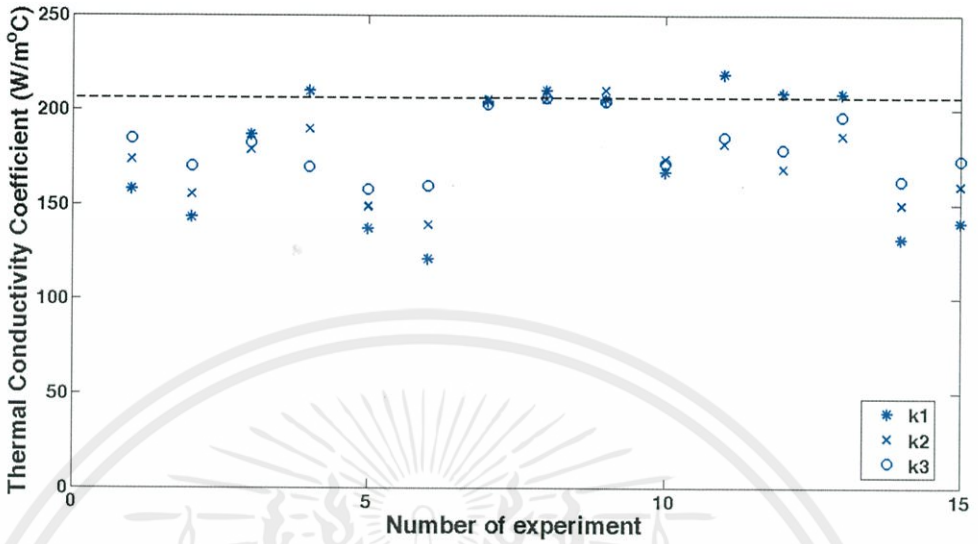
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม

	k_1 (W/m.^{o}C)	k_2 (W/m.^{o}C)	k_3 (W/m.^{o}C)
ค่าเฉลี่ย	48.8	55.7	61.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.6	3.4	1.8
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	14.3	2.4	-7.6

จากตารางที่ 4.2 จากการทดลองจำนวน 15 ครั้ง จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ระยะ ที่ระยะ 23cm หรือ k_2 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด โดยดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และจะพบว่า ที่ระยะ 27 cm หรือ k_3 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองมีการแกว่งน้อย สามารถดูได้จากรูปที่ 4.1

เอกสารนี้ ... ไม่ว่ากรณี ... ที่ได้ ... ค้า

4.1.2 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 100 ^{0}C เท่ากับ 206.0 W/m.^{0}C จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดจาก 3 จุด จะมีค่าค่อนข้างแกว่งอย่างเห็นได้ชัด แต่จะเห็นได้ว่าที่ระยะ *27 cm* หรือ k_3 เข้าใกล้กับค่ามาตรฐานมากที่สุด

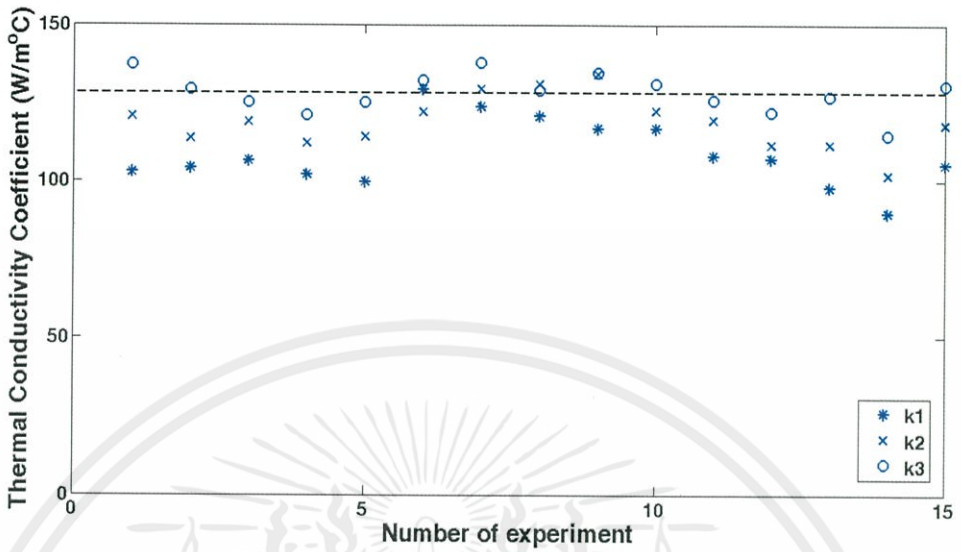
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม

	K_1 (W/m.^{o}C)	K_2 (W/m.^{o}C)	K_3 (W/m.^{o}C)
ค่าเฉลี่ย	176.6	174.9	180.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	35.2	22	16.2
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	14.3	15.1	12.5

จากตารางที่ 4.3 จากการทดลองจำนวน 15 ครั้ง จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ระยะ ที่ระยะ 27cm หรือ k_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด โดยดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และจะพบว่า ที่ระยะ 27 cm หรือ k_3 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองมีการแกว่งน้อย สามารถดูได้จากรูปที่ 4.2

เอกสารนี้ใช้สำหรับเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 100 ^{0}C เท่ากับ 128.0 W/m.^{0}C จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟค่อยข้างแกว่ง แต่มีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นมาตรฐาน และค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่การทดลองเดียวกันใกล้เคียงกัน และจะพบว่าที่ระยะ 27 cm หรือ k_3 จะมีแกว่งน้อยและมีค่าเข้าใกล้กราฟมาตรฐานที่สุด

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง

	k_1 (W/m.^{o}C)	k_2 (W/m.^{o}C)	k_3 (W/m.^{o}C)
ค่าเฉลี่ย	108.7	118.7	128.2
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.7	8.5	6.3
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	15.1	7.3	-0.1

จากตารางที่ 4.4 จากการทดลองจำนวน 15 ครั้ง จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ระยะ ที่ระยะ 27cm หรือ k_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุด โดยดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด และจะพบว่า ที่ระยะ 27 cm หรือ k_3 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองมีการแกว่งน้อย สามารถดูได้จากรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.1-4.3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่สามารถที่จะรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า การนำความร้อนในอุดมคติ คือ อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า study state เนื่องจากยังไม่สามารถทำระบบให้ระบบปิดได้อย่างสมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนออกจากระบบ ทำให้เห็นได้ว่า ยังมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบต่อ เพื่อให้สามารถวัดค่าการนำความร้อนได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่วัดได้ของทั้ง 3 ช่วง ในทั้ง 3 วัสดุ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน 15% และพบว่า ยิ่งโลหะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เท่ากับ 206.0 W/m.^{0}C ที่ 100 ^{0}C จะมีค่าความผิดพลาดและส่วนเบี่ยงเบนที่ได้จากการวัดที่สูงกว่าโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และระบบไม่สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะคงตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1สรุปผลการทดลอง

โครงงานพิเศษนี้ เป็นการศึกษาการสร้างชุดทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็กผสม ทองเหลือง และอลูมิเนียม ซึ่งโลหะ 3 ชนิด มีขนาดเท่ากันคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25.4 mm มีความยาว 400 mm โดยสร้างระบบปิดด้วยวัสดุฉนวนเทฟลอน (Teflon) ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ 180 ^{0}C ในการทดลองจะให้ความร้อนกับโลหะ 100 ^{0}C โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 100 ^{0}C พบว่า เหล็กผสมต้องใช้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.213 A และ 36.73 V ทองเหลืองใช้ 0.28 A และ 52.00 V ขณะที่อลูมิเนียมต้องใช้กระแสและแรงดันเท่ากับ 0.300 A และ 56.00 V เพื่อทำให้โลหะทั้งสามมีอุณหภูมิเท่ากับ 100 ^{0}C ระยะห่างของอุณหภูมิเลือกเลือกไว้ทั้งหมด *3* ระยะ คือ ที่ระยะ 19.0 cm ,23 cm และ 27 cm พบว่าที่ระยะที่มากขึ้น มีแนวโน้มที่จะได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น โดยเหล็กผสมที่ระยะ 27.0 cm จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 61.4 ±1.8 W/m.^{0}c มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 0.10% ทองเหลืองได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 128.2±6.3 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.1% และอลูมิเนียมได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 180.3±16.2 W/m.^{0}c มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 12.5% เมื่อพิจารณาที่จุด 2 จุดจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะทั้งสามมีค่าค่อนข้างแกว่ง เนื่องมาจากไม่สามารถรักษาระบบให้เป็นความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากชุดการศึกษาการนำความร้อนของโลหะ จะเห็นได้ไม่สามารถที่จะรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า การนำความร้อนในอุดมคติ คือ ไม่สามารถทำระบบให้ระบบปิดได้อย่างสมบูรณ์ ต้องมีการลดการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนออกจากระบบ ทำให้เห็นได้ว่า ยังมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบต่อ เพื่อให้สามารถวัดค่าการนำความร้อนได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1.อ.มนตรี อึ่งเจริญ.(2532),การนำความร้อน.ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.พงษ์เจต พรหมวงศ์.(2534),การถ่ายเทความร้อน.ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.M. Ortuno, A.Marquez, S.Gallego, C. Neipp and A. Belendez, An experiment in heat conduction using hollow cylinders, European journal of physics,Vol. 32,N 4,1065-1075(2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางคุณสมบัติของโลหะ

โลหะ	โลหะ	จุดหลอมเหลว	อุณหภูมิ 20C		ค่าการนำความร้อน k ,(W/m. °c)
			ρ $(^{kg}/_{m^3})$	C_p $(^{kJ}/_{kg.°C})$	100 °c
Aluminum	Pure	660	2.707	0.896	206
Copper	Brass	1085	8.522	0.385	128
Iron	Wrought iron	1537	7.849	0.46	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อนและทำให้เหล็กผสมมีอุณหภูมิ 100 °C

เวลา(นาที)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า(V)
1	0.202	33.4
2	0.231	42.1
3	0.192	38.9
4	0.224	43.0
5	0.195	39.0
6	0.205	35.6
7	0.196	39.5
8	0.186	34.4
9	0.217	39.5
10	0.273	34.6
11	0.227	41.9
12	0.280	41.8
13	0.228	40.8
14	0.229	40.2
15	0.220	38.5
16	0.264	42.3
17	0.220	42.5
18	0.224	40.8
19	0.230	40.5
20	0.212	38.8
21	0.213	33.8
22	0.195	35.5
23	0.244	35.5
24	0.189	34.5
25	0.229	39.5
เฉลี่ย	0.220	38.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง ใช้เหล็กผสม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ยาว 40.0 cm โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า คือ 0.214 A และ 36.7 V ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 19.0, 23.0 และ 27.0 cm ที่อุณหภูมิ 100 °C

การทดลองครั้งที่ 1 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T_2	T_3	T_4
1	31.6	29.5	28.1
2	31.9	30.8	28.2
3	31.8	30.1	28.3
4	32.1	30.1	28.3
5	32.1	30.3	28.4
6	32.4	30.4	28.5
7	32.7	30.7	28.7
8	33.0	30.9	28.8
9	33.0	30.9	28.8
10	33.2	31.1	28.9
11	33.6	31.3	29.2
12	33.7	31.4	29.2
13	33.9	31.6	29.3
14	34.0	31.7	29.3
15	34.1	31.8	29.4
16	34.2	31.7	29.4
17	34.3	31.8	29.5
18	34.5	32.0	29.6
19	34.5	31.9	29.6
20	34.7	32.1	29.7
21	34.6	32.0	29.6
22	34.7	32.1	29.7
23	35.0	32.3	29.9
24	35.2	32.6	30.1
25	35.1	32.5	30.1
26	35.1	32.5	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27	35.2	32.6	30.1
28	35.4	32.7	30.2
29	35.6	32.9	30.4
30	35.7	33.0	30.5

การทดลองครั้งที่ 2 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	33.4	31.2	29.7
2	33.7	31.3	29.7
3	33.8	31.5	29.2
4	32.1	29.8	28.6
5	34	31.6	29.9
6	34.4	32	30.1
7	34.5	32.1	30.2
8	34.8	32.3	30.4
9	34.9	32.5	30.5
10	35	32.5	30.6
11	35.3	32.7	30.7
12	35.4	32.9	30.8
13	35.5	33	31
14	36.3	33.7	32.8
15	36.5	33.8	32.9
16	36.6	33.8	33
17	36.8	34	33.1
18	36.9	34.1	33.2
19	37.1	34.3	33.4
20	37.3	34.4	33.5
21	37.2	34.4	33.5
22	37.7	34.4	33
23	37.3	34.5	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	38	35	33
25	38.8	35.1	32.6
26	38.8	35.1	32.6
27	39.1	35.3	32.8
28	39.2	35.3	32.8
29	39.3	35.4	32.9
30	39.4	35.5	32.9

การทดลองครั้งที่ 3 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	38.2	36.9	32.7
2	38.6	37.2	32.8
3	38.8	37.4	32.9
4	42	36.1	33.9
5	42.2	36.4	33.9
6	41.7	36.6	33.9
7	41.6	36.6	33.7
8	42.4	37	33.9
9	42.5	37.1	34.1
10	42.7	37.3	34.5
11	43.1	37.5	34.3
12	43.3	37.5	34.3
13	44	37.7	34.5
14	43.8	37.6	34.2
15	44.1	37.8	34.3
16	44.5	38.2	34.5
17	44.7	38.3	34.6
18	44.7	38	34.4
19	45	38.1	34.5
20	45.1	38.3	34.5
21	44.4	38.3	34.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22	44.5	38.5	34.5
23	45.1	38.6	34.9
24	44.4	38.5	34.6
25	44.1	38.4	34.5
26	44.4	38.6	34.8
27	44.4	38.6	34.8
28	45.2	38.9	35.1
29	44.7	38.7	34.8
30	44.8	38.9	35

การทดลองครั้งที่ 4 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	43.8	38.5	32.7
2	43.4	38.6	32.7
3	43.4	38.9	32.7
4	43.5	39.1	32.7
5	43.9	39.6	32.7
6	44	39.9	32.7
7	44.2	40.1	32.7
8	44.4	40.3	32.7
9	44.7	40.5	32.7
10	44.8	41.8	32.7
11	43.6	42.1	32.7
12	45.1	42.5	32.7
13	45.8	42.6	32.7
14	48.2	44.5	32.7
15	48.5	44.4	32.7
16	48.6	43.5	32.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17	47.6	43.4	32.7
18	47.3	43.3	32.7
19	47.2	43.4	32.7
20	47.2	43.3	32.7
21	47.7	43.5	32.7
22	47.8	43.5	32.7
23	48.8	43.5	32.7
24	47.9	43.5	32.7
25	47.7	43.4	32.7
26	45.8	43.4	32.7
27	45.9	43.6	32.7
28	45.8	43.5	32.7
29	45.6	43.4	32.7
30	45.5	43.5	32.7

การทดลองครั้งที่ 5 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	41	38.5	31.9
2	40.1	38.9	32
3	40.1	40	32.5
4	43.1	39.7	32.3
5	41.8	40.3	32.4
6	44.8	39.3	32.1
7	44.2	40	32
8	45	40.6	32.4
9	46.4	41	32.6
10	43	40.9	32.7
11	42.4	40.9	32.7
12	43	41.2	32.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13	43.6	42.1	33.2
14	44	43.1	33.3
15	44.7	43.1	33.4
16	45	43.2	33.4
17	45.7	43.4	33.6
18	46	43.4	33.6
19	46.6	43.4	33.8
20	47.2	43.4	33.8
21	46.9	42.9	33.4
22	46.8	42.8	33.4
23	47	42.9	33.8
24	46.7	43.3	33.7
25	47.5	43.5	33.8
26	47.8	44	33.7
27	48.4	43.8	33.5
28	48.5	43.8	33.4
29	48.3	43.8	33.5
30	47.7	43.8	33.6

การทดลองครั้งที่ 6 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	40.6	38.5	34.9
2	40.6	38.7	35
3	41	38.9	35
4	41.3	39.1	35.1
5	41.5	39.6	35.3
6	41.7	39	35.3
7	41.8	39.9	35.4
8	42	40	35.5
9	42.3	40.4	35.6
10	42.4	40.4	35.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11	42.6	40.5	35.7
12	42.7	41.2	35.8
13	42.8	41.4	35.9
14	43.1	41.7	36
15	46.5	41.7	36.1
16	45.4	41.7	36.1
17	45.6	41.9	36.2
18	45.7	42.1	36.3
19	45.8	42.2	36.3
20	45.8	42.3	36.3
21	46	42.6	36.4
22	46	42.7	36.5
23	46.1	42.7	36.5
24	46.2	42.9	36.6
25	46.3	43	36.8
26	46.4	43.1	36.8
27	46.5	43.2	36.8
28	46.5	43.3	36.9
29	46.6	43.4	37
30	46.6	43.5	37.1

การทดลองครั้งที่ 7 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	37.9	34.4	31.8
2	37.9	34.4	31.7
3	38.1	34.5	31.8
4	38.4	34.6	31.9
5	38.8	35	32
6	39	35	32.1
7	39	35	32.1
8	41	37.5	32.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9	38.2	36.5	32.2
10	38.3	36.5	32.4
11	38.6	36.7	32.6
12	38.7	36.7	32.6
13	38.8	36.8	32.7
14	39.1	37	32.9
15	39.2	37.1	32.9
16	39.4	37.3	33.1
17	39.4	37.3	33.1
18	39.5	37.3	33.2
19	39.5	37.3	33.2
20	39.5	37.3	33.2
21	39.5	37.3	33.2
22	39.7	37.3	33.3
23	39.7	37.4	33.3
24	39.7	37.3	33.2
25	39.6	37.2	33.3
26	39.7	37.3	33.3
27	39.8	37.5	33.4
28	40	37.6	33.5
29	40	37.6	33.5
30	40.1	37.6	33.6

การทดลองครั้งที่ 8 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.8	34.8	32.6
2	43.3	35	32.6
3	43.8	35.1	32.7
4	43.8	35.1	32.7
5	43.9	35.2	32.7
6	44.4	35.4	32.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	44.7	35.5	32.8
8	45	35.6	32.8
9	45.2	35.7	32.9
10	45.3	35.8	32.9
11	45.5	35.9	32.9
12	45.6	35.9	33
13	45.8	35.9	33
14	46	36.1	33.1
15	46	36.2	33.2
16	46.1	36.3	33.2
17	46.1	36.6	33.2
18	46.2	36.4	33.3
19	46.2	36.4	33.3
20	46.2	36.5	33.3
21	46.1	36.6	33.4
22	46.1	36.7	33.4
23	46.2	36.7	33.4
24	46.2	36.7	33.5
25	46.1	36.8	33.4
26	46.1	36.9	33.5
27	46.2	37	33.6
28	46.2	37	33.6
29	46.3	37	33.7
30	46.3	37.1	33.7

การทดลองครั้งที่ 9 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	36.2	32.8	28.4
2	36.2	32	28.6
3	35.5	32.5	28.7
4	35.6	32.7	28.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	36	32.8	29
6	36.1	32.9	29
7	36.3	32.8	29.3
8	36.4	32.8	29.4
9	36.7	32.8	29.6
10	36.8	32.8	29.7
11	36.8	32.9	29.8
12	37	32.8	29.8
13	37.2	33	29.9
14	37.3	33.2	30
15	37.5	33.4	30.2
16	37.7	33.5	30.3
17	37.8	33.6	30.4
18	38	33.7	30.5
19	38.3	33.9	30.7
20	38.4	34	30.8
21	38.6	34.1	31
22	38.7	34.2	31
23	38.7	34.2	31
24	39.1	34.5	3.3
25	39.2	34.7	31.4
26	38.9	34.5	31.2
27	39.1	34.7	31.5
28	39.3	34.9	31.6
29	39.4	35	31.7
30	39.4	34.9	31.7

การทดลองครั้งที่ 10 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	34.8	32.6	30.7
2	37.7	33.7	31.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	35.9	33.6	31.1
4	36.1	33.8	31.2
5	36.3	34	31.3
6	36.3	34.1	31.3
7	35.3	34.2	31.4
8	36.4	34.5	31.4
9	36.6	34.8	31.5
10	36.7	35	31.7
11	36.9	35.3	31.8
12	37	35.4	31.9
13	37.1	35.6	32
14	37.1	35.7	32
15	37.3	36	32.1
16	37.2	36.1	32
17	37.4	36.3	32.2
18	37.6	36.5	32.1
19	37.6	36.9	32
20	37.7	37	32.1
21	37.8	37.2	32.1
22	43.2	37.2	35.1
23	41.6	37.6	35.3
24	41.8	38.3	35.6
25	41.8	38.3	35.7
26	41.9	38.4	35.7
27	41.8	38.4	35.7
28	41.8	38.4	35.7
29	41.8	38.4	35.7
30	41.8	38.4	35.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 11 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4

1	31	28.7	27.2
2	31.9	29	27.4
3	31.8	29.4	27.5
4	32.3	29.8	27.7
5	32.7	30.2	27.9
6	33.8	30.5	28
7	33.3	30.7	28.2
8	33.6	31	28.3
9	33.9	31.2	28.4
10	34.1	31.3	28.6
11	34.4	31.5	28.7
12	34.6	31.7	28.8
13	34.9	31.9	29
14	35.1	32.1	29.1
15	35.4	32.3	29.3
16	35.7	32.5	29.5
17	35.9	32.7	29.6
18	36.1	32.9	29.8
19	36.4	33.1	29.9
20	36.6	33.3	30
21	36.8	33.4	30.1
22	37	33.5	30.2
23	37.1	33.6	30.3
24	37.1	33.6	30.3
25	37.1	33.6	30.3
26	37.1	33.6	30.3
27	37.1	33.6	30.3
28	37.1	33.6	30.3
29	37.1	33.6	30.3
30	36.5	34.1	30.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 12 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	36.8	34.4	30.3
2	37.1	34.7	30.4
3	37.3	34.8	30.2
4	37.4	35	30.2
5	37.6	35.2	30.3
6	37.8	35.3	30.3
7	38	35.4	30.4
8	38.3	35.9	30.6
9	38.6	36.4	30.7
10	38.7	36.2	30.7
11	39	36.3	30.8
12	39.2	36.3	30.9
13	39.2	36.2	30.9
14	39.3	36.3	30.9
15	39.4	36.4	31
16	39.4	36.3	30.9
17	39.7	36.6	31.1
18	39.7	36.6	31.1
19	39.9	36.6	31.3
20	40.1	36.6	31.4
21	40.2	36.6	31.5
22	40.3	36.7	31.5
23	40.4	36.6	31.5
24	40.4	36.5	31.5
25	40.4	36.5	31.5
26	40.4	36.6	31.5
27	40.5	36.6	31.6
28	40.6	36.6	31.7
29	40.8	36.7	31.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	41	36.8	32

การทดลองครั้งที่ 13 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	33.9	30.8	29.1
2	34.3	31	29.2
3	34.4	31.1	29.3
4	34.5	31.1	29.2
5	34.6	31.1	29.3
6	34.8	31.2	29.3
7	34.9	31.3	29.3
8	35	31.4	29.4
9	35	31.4	29.5
10	35.1	31.4	29.4
11	35.3	31.5	29.5
12	35.5	31.7	29.6
13	35.6	31.8	29.6
14	35.7	31.8	29.6
15	35.7	31.8	29.7
16	35.9	31.9	29.7
17	35.9	32	29.8
18	36	32	29.8
19	36.1	32.1	29.8
20	36.1	32.1	29.8
21	36.2	32.2	29.9
22	36.3	32.3	29.9
23	36.5	32.4	29.9
24	36.4	32.4	29.9
25	36.4	32.3	29.9
26	36.7	32.6	30.1
27	36.8	32.6	30.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	36.8	32.6	30.1
29	36.8	32.6	30.1
30	36.9	32.7	30.1

การทดลองครั้งที่ 14 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	32.1	30.3	29.2
2	32.5	30.4	29.2
3	32.7	30.6	29.3
4	33.2	30.9	29.5
5	33.4	31	29.6
6	33.8	31.3	29.8
7	34.1	31.4	29.9
8	34.4	31.6	29.9
9	34.5	31.7	29.9
10	34.8	32	20.2
11	35	32.1	30.2
12	35.1	32.2	30.4
13	35.3	32.3	30.4
14	35.4	32.4	30.5
15	35.4	32.4	30.5
16	35.7	32.7	30.7
17	36	32.9	30.8
18	36.1	32.9	30.9
19	36.2	32.9	31
20	36.2	32.9	30.9
21	36.4	33.2	31.1
22	36.6	33.3	31.2
23	36.9	33.5	41.5
24	36.9	33.6	31.5
25	37	33.6	31.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	37	33.6	31.5
27	37.1	33.7	31.6
28	37.3	33.7	31.6
29	37.3	33.9	31.7
30	37.3	33.7	31.6

การทดลองครั้งที่ 15 ของเหล็กผสม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	31.9	29.7	28.4
2	32.1	29.8	28.5
3	32.2	29.9	28.5
4	32.2	29.9	28.5
5	32.4	30	28.6
6	32.6	30.1	28.6
7	32.7	30.2	28.5
8	32.7	30.2	28
9	32.8	30.3	28.6
10	33	30.4	28.7
11	33	30.4	28.7
12	33.1	30.6	28.8
13	33.3	30.8	29
14	33.3	30.7	28.9
15	33.4	30.8	29
16	33.5	31	29.1
17	33.7	31.1	29.3
18	33.8	31.3	29.3
19	33.9	31.3	29.4
20	34.1	31.5	29.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21	34.2	31.6	29.7
22	34.4	31.8	29.8
23	34.5	31.8	29.8
24	34.5	31.8	29.9
25	34.7	31.9	30
26	34.7	32	30
27	34.7	32	30
28	34.9	32.2	30.2
29	35.1	32.4	30.4
30	35.2	32.4	30.4

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อนและทำให้อลูมิเนียมมีอุณหภูมิ 100 °C

เวลา(นาที)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า(V)
1	0.377	66.2
2	0.348	68.3
3	0.370	66.1
4	0.287	48.0
5	0.360	64.5
6	0.330	68.7
7	0.352	64.7
8	0.282	57.5
9	0.224	61.4
10	0.275	52.0
11	0.334	59.6
12	0.314	57.6
13	0.296	55.7
14	0.324	55.6
15	0.335	54.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	0.284	53.9
17	0.275	54.0
18	0.309	52.6
19	0.285	54.0
20	0.296	56.1
21	0.337	60.0
22	0.316	54.6
23	0.265	54.4
24	0.295	55.9
25	0.315	48.9
เฉลี่ย	0.311	58.2

ตารางผลการทดลอง ใช้อลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ยาว 40.0 cm โดยใช้ค่ากระแสและแรงดันจากตารางที่ 4.3 คือ 0.306A และ 56.0 Vตามลำดับ ที่ระยะห่าง 19.0 , 23.0 และ 27.0 cm ที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$C

การทดลองครั้งที่ 1 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T_2	T_3	T_4
1	47.5	44.5	50.9
2	48.5	45.2	43.7
3	49.6	46.1	42.9
4	50.0	46.4	43.1
5	50.4	46.9	43.5
6	50.6	46.8	43.6
7	50.8	47.2	44.1
8	51.3	47.6	44.5
9	51.5	48.0	45.1
10	51.5	48.3	45.5
11	52.0	48.7	46.3
12	52.6	49.4	47.1
13	53.1	49.6	47.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	53.4	49.9	47.7
15	53.3	49.7	47.7
16	53.5	49.7	47.7
17	53.6	50	48.2
18	54.3	50.7	48.9
19	54.5	50.9	48.9
20	54.5	50.8	49.0
21	55.0	51.5	49.6
22	55.2	51.6	49.9
23	55.3	51.6	49.9
24	55.5	52.1	50.3
25	56.1	52.7	50.7
26	56.2	52.7	50.8
27	56.7	53.1	51.2
28	56.6	53.1	51.3
29	56.7	53.1	51.4
30	56.9	53.3	51.6

การทดลองครั้งที่ 2 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	66	64.7	53.9
2	68	66.3	57.2
3	59	57.7	50
4	62.7	59.9	49.6
5	58.2	58.9	51.1
6	55.8	52	54
7	69.6	61.1	55.5
8	69	61.6	56.4
9	69.5	61	56.9
10	70.8	64.5	61
11	67	65.5	63.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12	71	59.2	52
13	78.7	65.8	58.5
14	79	65.9	59.1
15	80.5	66.5	64
16	76.8	66.1	65.7
17	68	64.6	63.7
18	67.4	63.4	56.4
19	61.3	54.9	54
20	56.8	55	54.1
21	59.5	54.9	54
22	70.3	62.6	54.4
23	67.4	61.8	54.1
24	73.1	68.8	50.7
25	73.1	69.2	50.5
26	72.9	69.4	50.5
27	68	64.4	53.5
28	64	63.2	52.5
29	61.3	60.9	52.4
30	70.1	62.3	52.1

การทดลองครั้งที่ 3 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	66.4	56.6	46.9
2	67	58.7	50.7
3	68.5	60	54.1
4	70	60	56.4
5	70.3	60.8	60.2
6	69.1	60.1	51.8
7	67.1	62.3	54.3
8	68	63.2	55.9
9	66.7	63.9	57.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	67.3	64.2	58.2
11	69	63.9	58.1
12	68.7	64.7	58.7
13	67.1	64.5	59.5
14	70.7	65.2	59.9
15	69	65.7	59.3
16	70.1	65.4	57.2
17	70.5	66.2	57
18	68	65.3	56.3
19	66.3	63.1	56.1
20	66	61.2	56.1
21	72.8	68.4	56.6
22	74.2	67	56.7
23	74.9	65.5	56.7
24	75.2	63.9	56.9
25	75	62.2	57.3
26	73.6	59.8	57.1
27	71.4	59.3	56.9
28	70.3	59.3	56.9
29	69.8	59.3	56.8
30	69.9	59.2	56.7

การทดลองครั้งที่ 4 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	63.1	58.9	51.6
2	63.3	59.7	52.6
3	65	61.2	53.1
4	67.8	64.3	56.4
5	70.1	63.1	56.9
6	70.7	62.2	54.6
7	61.5	55.4	53.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8	61.1	55.2	52
9	68.8	65.1	53.8
10	68.7	66.7	54.4
11	65.3	63.3	53.9
12	76.1	64.3	53.7
13	73.3	58.1	53.8
14	68.2	63.8	55
15	68.7	58.2	55.7
16	65.8	58	55.6
17	64.2	58.1	55.8
18	63.7	58.1	55.6
19	64.1	58.6	56.1
20	65.3	67.4	61.5
21	76.5	72	59
22	75.5	70.2	59.4
23	75.7	67.5	58.6
24	73.6	67.2	58.5
25	72.6	66.6	58.5
26	72.8	66.3	58.5
27	70.5	65.2	58.5
28	69.2	68	58.2
29	69.2	67.2	58.4
30	69.3	66.5	58.6

การทดลองครั้งที่ 5 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	49.4	46.3	40.3
2	50.2	47.2	41
3	51	48	41.9
4	51.8	48.8	42.7
5	52	49.1	42.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	62.8	54.6	43.6
7	64.1	57.2	43.8
8	65	58.5	44
9	63.4	58.6	44.2
10	61.6	58.3	44.4
11	59.2	58	44.5
12	59	58.4	51.1
13	59	58.8	50.4
14	61.4	59.5	49.2
15	60.5	59.3	49.4
16	62.6	59	50.3
17	66	63.6	50.4
18	67	62.9	50.4
19	67.7	61.1	50.4
20	67.4	58	50.4
21	67	56.2	50.4
22	66.8	55.2	50.4
23	66.6	55	50.3
24	66.1	54.6	50.3
25	65.6	54.4	50.3
26	65.2	54.3	50.3
27	64	54.3	50.4
28	63.2	54.3	50.4
29	62.2	54.3	50.6
30	61.2	54.4	50.6

การทดลองครั้งที่ 6 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	62.4	53.5	37.3
2	62.2	56.3	38.2
3	60.4	57.3	38.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	58	50.3	46.6
5	70.9	57.2	50.9
6	69.3	62.4	54.7
7	71.2	63.3	57.5
8	71.9	65.7	58.3
9	72.9	56.4	53.6
10	71.7	53.4	49.6
11	67.4	53.9	50
12	72	54.2	50.1
13	68.8	54	50.3
14	61.6	54.4	50.5
15	61.7	54.9	51
16	61.9	55.2	51.3
17	61.9	55.6	51.6
18	74.9	57.8	52.5
19	74.4	57.9	52.4
20	74.9	58.2	52.7
21	75.1	58.5	52.9
22	74.2	58.7	52.9
23	74.2	59	53.1
24	76	59.2	53.3
25	75.8	59.4	53.4
26	73.5	60.1	54.2
27	78.1	60.4	54.5
28	78.6	60.4	54.6
29	75.9	62	54.9
30	72	63.1	55

การทดลองครั้งที่ 7 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	58.9	46.8	40.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	59.3	47.6	41.7
3	57.1	47.8	42.2
4	60.9	48.6	42.9
5	66	48.6	44.4
6	66.5	48.6	45.1
7	68.8	53.8	45.7
8	68.3	52.2	46.2
9	67.5	52.4	46.9
10	65.2	52.6	47.4
11	63.4	53	47.9
12	61.9	53.3	48.4
13	61.5	53.9	49
14	70.6	57.5	49.8
15	73.9	56	50
16	76.5	60.8	50.7
17	75.2	57.2	51.4
18	74.8	56.6	51.7
19	73.4	55.7	51.9
20	73.7	56.1	52.4
21	73.8	56.5	52.9
22	73.8	56.6	53.1
23	73.7	56.6	53.1
24	73	56.8	53.4
25	72.7	57	53.7
26	72.5	57.1	53.9
27	72	57.5	54.4
28	72.1	57.9	54.9
29	71.5	58.2	55.2
30	68.3	58.3	55.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 8 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	73.9	57.4	54
2	73.6	58.7	50.1
3	71.3	56.8	49.7
4	75.5	56.4	50.2
5	70.9	56.6	50.7
6	74.2	56.7	51.3
7	67.8	57	51.6
8	73.2	58.9	52
9	72.4	58.7	52.2
10	70.9	59.5	52.8
11	70.4	60	53.5
12	70.2	59.5	54
13	70	58.9	54.4
14	70.5	58.9	54.6
15	69.5	58.8	54.7
16	68.4	58.7	54.8
17	67.4	58.6	54.8
18	67.2	58.9	55.2
19	67	58.8	55.2
20	67	59.1	55.7
21	67.1	59.9	55.9
22	67.3	59.9	56.4
23	67.6	60.1	56.7
24	67.5	60.1	56.7
25	67.4	60	56.7
26	67.4	60	56.7
27	67.4	60.2	56.9
28	67.5	60.2	57
29	67.6	60.6	57.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	67.8	60	57.4

การทดลองครั้งที่ 9 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	58.7	46.9	33.8
2	53.3	51.7	46.8
3	55.7	52.7	48.8
4	56.8	53.9	50.8
5	58.3	55.3	52.5
6	59.9	56.2	53.6
7	61.7	57.2	55.4
8	62.4	55.8	56.9
9	59.1	57.3	55.8
10	56.9	56.1	55
11	65.1	62	59.1
12	64.7	61.8	58.7
13	65.7	62.2	58.5
14	63.1	61.8	58.4
15	60.9	59.3	58.3
16	60.1	59.3	58.2
17	69.9	61.8	49
18	70.8	62.7	48.7
19	68.7	62.6	49
20	64.4	64.6	49.3
21	62.4	57.3	49.1
22	55.5	49	47.2
23	53.5	48.8	46.7
24	53.7	48.8	46.6
25	53.2	48.8	46.5
26	53	49.1	46.8
27	53.1	49.4	46.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	53.2	49.5	47
29	53.3	49.5	47.1
30	53.4	49.8	47.2

การทดลองครั้งที่ 10 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	48.4	46.4	40.3
2	49.2	47.6	41
3	50	48.1	46.3
4	50.4	48.5	43.8
5	51.4	49.2	44.5
6	51.8	49.6	45.1
7	52.2	49.9	45.3
8	52.5	50.1	45.5
9	53	50.6	46.1
10	53.2	50.7	46.3
11	53.5	51	46.7
12	53.9	51.2	47
13	53.8	51.1	47.1
14	54	51.2	47.3
15	54.7	51.9	47.9
16	55	52.4	48.6
17	55.7	52.7	49
18	56.2	53	49.4
19	56.5	53.4	49.6
20	57	53.9	50.2
21	57.2	54	50.3
22	57.6	54.3	50.7
23	57.7	54.4	50.8
24	57.7	54.4	50.8
25	58.1	54.7	51.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	58.3	55.2	51.6
27	58.7	55.5	51.9
28	58.7	55.4	51.9
29	58.8	55.5	52
30	58.8	55.5	52.2

การทดลองครั้งที่ 11 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.6	41.4	37.3
2	42	40.9	36.8
3	43.3	42.1	38.1
4	43.6	42.4	38.4
5	43.9	42.8	38.8
6	44.5	43.3	39.3
7	44.8	43.7	39.7
8	45	43.9	40.1
9	45.5	44.1	40.6
10	46	44.6	41.2
11	46.5	45.2	41.7
12	46.6	45.4	41.9
13	47	45.7	42.3
14	47.1	45.9	42.5
15	47.4	46.4	43
16	47.6	46.6	43.2
17	48.1	47	43.8
18	48.4	47.4	44.2
19	48.8	47.7	44.5
20	49.1	48.1	44.9
21	49.5	48.5	45.4
22	50	48.9	45.6
23	50.4	49.3	46.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	50.7	49.6	46.4
25	50.8	49.8	46.6
26	51.3	50.2	47
27	51.3	50.4	47.2
28	51.6	50.7	47.5
29	51.9	50.8	47.8
30	52	51	47.9

การทดลองครั้งที่ 12 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.6	41.4	37.3
2	42	40.9	36.8
3	43.3	42.1	38.1
4	43.6	42.4	38.4
5	43.9	42.8	38.8
6	44.5	43.3	39.3
7	44.8	43.7	39.7
8	45	43.9	40.1
9	45.5	44.1	40.6
10	46	44.6	41.2
11	46.5	45.2	41.7
12	46.6	45.4	41.9
13	47	45.7	42.3
14	47.1	45.9	42.5
15	47.4	46.4	43
16	47.6	46.6	43.2
17	48.1	47	43.8
18	48.4	47.4	44.2
19	48.8	47.7	44.5
20	49.1	48.1	44.9
21	49.5	48.5	45.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22	50	48.9	45.6
23	50.4	49.3	46.1
24	50.7	49.6	46.4
25	50.8	49.8	46.6
26	51.3	50.2	47
27	51.3	50.4	47.2
28	51.6	50.7	47.5
29	51.9	50.8	47.8
30	52	51	47.9

การทดลองครั้งที่ 13 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	47.5	44.5	50.9
2	48.5	45.2	43.7
3	49.6	46.1	42.9
4	50	46.4	43.1
5	50.4	46.9	43.5
6	50.6	46.8	43.6
7	50.8	47.2	44.1
8	51.3	47.6	44.5
9	51.5	48	45.1
10	51.5	48.3	45.5
11	52	48.7	46.3
12	52.6	49.4	47.1
13	53.1	49.6	47.5
14	53.4	49.9	47.7
15	53.3	49.7	47.7
16	53.5	49.7	47.7
17	53.6	50	48.2
18	54.3	50.7	48.9
19	54.5	50.9	48.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	54.5	50.8	49
21	55	51.5	49.6
22	55.2	51.6	49.9
23	55.3	51.6	49.9
24	55.5	52.1	50.3
25	56.1	52.7	50.7
26	56.2	52.7	50.8
27	56.7	53.1	51.2
28	56.6	53.1	51.3
29	56.7	53.1	51.4
30	56.9	53.3	51.6

การทดลองครั้งที่ 14 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	44	42.2	39.8
2	44.7	44.3	40
3	45	44.8	40.2
4	45.4	45.5	40.8
5	56.1	45.8	41
6	49.8	46.8	41.2
7	49.8	47.1	47.8
8	50	47.3	42
9	50.4	47.7	42.5
10	50.7	48	42.9
11	51.1	48.4	43.4
12	51.5	48.5	43.7
13	51.4	48.4	43.7
14	51.8	48.8	44.3
15	52.2	49.1	44.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	52.3	49.2	44.6
17	52.7	49.5	45.1
18	52.9	49.8	45.4
19	53.3	50.1	45.8
20	53.6	50.4	46.2
21	53.6	50.5	46.2
22	53.9	50.6	46.5
23	54.2	51	47
24	54.3	51	47
25	54.5	51.2	47.3
26	54.7	51.4	47.5
27	55	51.5	47.7
28	55.2	51.9	48
29	55.6	52.2	48.5
30	55.8	52.3	48.6

การทดลองครั้งที่ 15 ของอลูมิเนียม

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	41.7	38.8	36.8
2	42.2	39.3	37.4
3	42.7	39.9	38
4	43.4	40.5	38.7
5	44.1	41.3	39.7
6	44.5	41.6	40
7	45.4	42.6	41.1
8	45.8	43	41.5
9	45.9	43.1	41.8
10	46.4	43.6	42.4
11	47	44.2	42.9
12	47.1	44.4	43.2
13	47.6	44.8	43.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	47.9	45.2	44
15	48.3	45.5	44.3
16	48.5	45.7	44.7
17	48.6	45.9	45
18	48.7	45.9	45.1
19	49.1	46.3	45.5
20	49.4	46.6	45.8
21	49.9	47.1	46.1
22	50.1	47.3	46.4
23	50.4	47.5	46.7
24	50.6	47.8	47
25	50.7	48	47.2
26	51.2	48.2	47.5
27	51.3	48.6	47.4
28	51.7	49	47.7
29	52	49.2	47.9
30	52.3	49.5	48.1

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อนและทำให้ทองเหลืองมีอุณหภูมิ 100 °C

เวลา(นาที)	กระแสไฟฟ้า(A)	แรงดันไฟฟ้า(V)
1	0.287	54.2
2	0.319	48.5
3	0.286	52.5
4	0.297	52.3
5	0.297	54.3
6	0.298	54.4
7	0.308	56.3
8	0.309	50.6
9	0.288	44.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	0.287	52.4
11	0.287	50.4
12	0.277	54.4
13	0.286	52.4
14	0.287	52.3
15	0.286	52.4
16	0.287	52.4
17	0.280	52.0
18	0.287	53.2
19	0.288	52.5
20	0.277	50.5
21	0.278	50.6
22	0.256	54.6
23	0.246	55.1
24	0.289	52.7
25	0.278	48.8
เฉลี่ย	0.286	51.2

ตารางผลการทดลอง ใช้ทองเหลือง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm ยาว 40.0 cm โดยใช้ค่ากระแสและแรงดันจากตารางที่ 4.5 คือ 0.287 A และ 52.2 V ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 19.0 , 23.0 และ 27.0 cm ที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$C

การทดลองครั้งที่ 1 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T_2	T_3	T_4
1	39.7	37.7	34.2
2	40.3	38.3	34.6
3	40.6	38.7	34.8
4	40.8	38.9	34.9
5	41.2	39.3	35.3
6	41.6	39.8	35.7
7	41.9	40.0	35.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8	42.0	40.3	36.1
9	42.4	40.8	36.4
10	42.5	40.8	36.5
11	42.9	41.2	36.8
12	43.1	41.5	37.0
13	43.3	41.6	37.4
14	43.6	42	37.6
15	43.8	42.2	37.8
16	43.9	42.3	37.9
17	44.0	42.4	38.0
18	44.2	42.6	38.1
19	44.3	42.8	38.2
20	44.6	43.1	38.6
21	45.0	43.4	38.8
22	45.1	43.6	38.9
23	45.4	43.8	39.2
24	45.6	43.8	39.3
25	45.8	44.0	39.4
26	46.0	44.2	39.5
27	46.1	44.4	39.7
28	46.3	44.4	39.7
29	46.3	44.5	39.7
30	46.6	44.8	40.0

การทดลองครั้งที่ 2 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	58.6	41.6	36.4
2	57.9	41.9	36.7
3	57.6	42.6	37.4
4	58.1	43.1	37.9
5	58	43.5	38.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	58.4	43.7	38.5
7	61.2	44.2	39
8	60.7	44.5	39.3
9	60.5	44.9	39.8
10	60.3	45.5	40.3
11	58.9	45.3	40.1
12	60.9	45.1	40.2
13	57	45.3	41.2
14	56.7	45.3	41.2
15	55.9	45.5	41.4
16	56	45.7	41.7
17	56.2	46	41.9
18	56.4	46.5	42.3
19	56.3	46.6	42.5
20	56.4	46.8	42.7
21	56.5	47	42.8
22	56.9	47.4	43.2
23	56.7	47.3	43.3
24	56.8	47.7	43.5
25	56.9	47.9	43.7
26	56.8	48	43.7
27	57.1	48.3	44
28	57.3	48.7	44.5
29	57.4	48.9	44.6
30	57.6	49.1	44.8

การทดลองครั้งที่ 3 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	39.9	35.9	33.1
2	52.3	40.4	33.8
3	55.9	40.3	33.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	55.8	41.5	34
5	56	43.1	34.4
6	55.9	45.4	34.8
7	55.9	46.5	35.1
8	56	47.1	35.1
9	53	49.4	35.4
10	56	45	38.3
11	52	49	40
12	63.3	54.2	47.9
13	63.3	54.2	48.5
14	58.8	50.9	48.3
15	55.3	49	47.6
16	52	48.6	47.5
17	56.1	54.4	49.4
18	56	55	49.4
19	56	55	49.6
20	57.7	52	48
21	61.5	50.5	49.9
22	57.5	50.2	48.3
23	56.6	51.7	49.2
24	55.5	51.7	49.2
25	53.6	51.8	44.8
26	53.7	52.7	43.9
27	55.2	50.5	45.7
28	55.2	46.7	45.7
29	55	46.7	45.7
30	55	46.7	45.7

การทดลองครั้งที่ 4 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	53.3	47.1	36.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	53.3	47.5	36.6
3	53.6	47.8	36.9
4	55.7	48.9	37.5
5	56.7	49.4	37.7
6	57	49.7	37.9
7	57.3	50.1	38.2
8	57.6	50.6	38.5
9	58	51.2	38.8
10	58.5	51.5	39
11	58.5	51.9	39.2
12	58.6	52.1	39.5
13	56.1	52	39.6
14	55.9	52.2	39.6
15	56.6	52.3	39.7
16	56.6	52.5	39.9
17	55.1	48.6	40
18	51.4	46.9	40.3
19	51.3	46.9	40.6
20	51.4	47	40.7
21	51.8	47.4	41.1
22	52.1	47.7	41.4
23	52.4	47.9	41.6
24	52.5	48.6	41.7
25	52.4	48.7	41.7
26	52.7	49	41.9
27	52.9	49.3	42.2
28	53.2	49.5	42.4
29	53.4	49.6	42.5
30	53.6	49.9	42.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 5 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	45	43	36.2
2	46.9	43	37
3	46.9	44.9	36.3
4	57.9	47.5	36.7
5	56.1	47.4	37.1
6	54.1	48.2	37.5
7	52.8	48.6	37.9
8	52.4	48.4	38.2
9	52.1	48.5	38.5
10	52	48.8	38.8
11	52.2	49.7	39.5
12	52.2	49.9	39.6
13	52.3	50.3	39.9
14	52.4	50.5	40.2
15	52.6	50.7	40.5
16	52.8	50.7	40.9
17	52.9	50.6	48.2
18	53	51.2	46.6
19	53.3	51.5	46
20	53.6	52.6	45.8
21	53.9	53.1	45.9
22	54.1	53.6	46
23	54.3	53.9	46.1
24	54.3	54	46.1
25	54.6	54.5	46.3
26	54.8	54	46.6
27	54.9	54	46
28	56	54	46
29	56	54	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	56	55	46.7

การทดลองครั้งที่ 6 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	39	36.5	32.6
2	43.2	40	37.5
3	51.6	43.3	34.6
4	49.3	43	37.4
5	49.6	43.9	38
6	51.2	44	38.5
7	51.9	45.2	38.9
8	52.3	45.7	39.5
9	52.3	46.9	40.3
10	48.8	43	40.6
11	51.9	49.9	41
12	55.3	50.3	41.3
13	48.7	43.6	40.1
14	54.5	46.4	42.6
15	46.6	46	42.7
16	54.1	46.3	44
17	47.7	45.7	45.1
18	52.1	48	43
19	55.2	44.8	43.5
20	55.4	43.7	41.9
21	60.1	47	41.8
22	62.5	47.9	41.9
23	54.9	47.9	41.7
24	55.6	48	41.9
25	56.5	47.9	41.6
26	56.5	47.9	42
27	56.5	47.9	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	56.5	47.9	42
29	56.5	47.9	42
30	56.5	47.9	42

การทดลองครั้งที่ 7 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.5	38.3	33.2
2	43.5	39.1	33.7
3	44.2	39.7	34.2
4	44.8	40.3	34.7
5	45.2	40.7	35
6	45.7	41.1	35.4
7	46.2	41.5	35.7
8	46.5	41.9	36.1
9	46.9	42.3	36.3
10	47.4	42.8	36.7
11	48.1	43.4	37.3
12	48.2	43.6	37.4
13	48.7	43.9	37.7
14	49	44.3	37.9
15	49.4	44.6	38.3
16	49.8	45	38.6
17	50.1	45.3	38.9
18	50.5	45.7	39.2
19	50.8	46	39.5
20	50.9	46.2	39.7
21	51.3	46.4	39.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22	51.5	46.7	40.2
23	52.2	47.1	40.4
24	52.5	47.4	40.7
25	52.6	47.7	41
26	53.1	47.9	41.1
27	53.3	48.2	41.4
28	53.6	48.4	41.7
29	53.8	48.7	41.8
30	54.1	48.8	42.1

การทดลองครั้งที่ 8 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	40.2	32.5	30.2
2	41	34	31.6
3	43	34.7	32
4	44.8	36.3	32.7
5	45	36.5	32.9
6	45.5	37.1	33.2
7	45.8	37.5	33.5
8	46.6	38	33.9
9	47.4	38.8	34.6
10	47.9	39.1	34.9
11	49.7	40.2	35.9
12	50.5	41	36.7
13	50.5	42.2	36.7
14	50.5	42.2	36.7
15	50.5	42.2	36.7
16	50.5	42.2	36.7
17	50.5	42.2	36.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	50.5	42.2	36.7
19	50.5	42.2	36.7
20	50.5	42.2	36.7
21	50.6	42.4	38.3
22	50.9	42.7	38.7
23	51	42.9	38.8
24	51.4	43.3	39.3
25	51.4	43.4	39.4
26	51.5	43.5	39.5
27	51.5	43.5	39.5
28	51.4	43.5	39.5
29	51.4	43.5	39.5
30	51.4	43.5	39.5

การทดลองครั้งที่ 9 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	44.8	40.3	37.6
2	45.2	40.6	37.9
3	45.3	40.6	38
4	45.5	40.8	38.1
5	46	41.2	38.5
6	46.2	41.4	38.8
7	46.3	41.5	38.9
8	46.3	41.4	38.9
9	46.8	41.9	39.3
10	47	42	39.4
11	46.9	41.9	39.4
12	47.7	42.6	39.9
13	47.7	42.6	39.9
14	47.6	42.6	40
15	47.4	42.6	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	47.8	42.8	40.2
17	48	42.9	40.3
18	48	43	40.4
19	48.2	43.1	40.4
20	48.3	43.2	40.6
21	48.3	43.3	40.7
22	48.4	43.3	40.7
23	48.6	43.5	40.8
24	48.8	43.7	41.1
25	48.9	43.8	41.1
26	49	43.8	41.2
27	49.1	43.9	41.3
28	49.4	44.2	41.6
29	49.4	4.2	41.5
30	49.2	44.1	41.5

การทดลองครั้งที่ 10 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.1	37.7	31.8
2	43	38.6	32.5
3	43.8	39.4	33.1
4	44.2	39.8	33.5
5	44.8	40.4	34
6	45.3	40.9	34.5
7	45.7	41.3	35
8	46.1	41.8	35.4
9	46.5	42.1	35.8
10	46.9	42.5	36.2
11	47.2	42.9	36.5
12	47.7	43.3	37
13	48.1	43.6	37.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	49.1	44.8	38.4
15	49.3	44.9	38.5
16	49.5	45.1	38.6
17	49.5	45.1	38.7
18	49.8	45.4	39
19	50.1	45.7	39.3
20	50.3	46	39.7
21	50.7	46.4	40
22	51	46.7	40.3
23	51.2	47	40.5
24	51.4	47.3	40.9
25	51.6	47.5	41.1
26	51.8	47.8	41.4
27	52	48.8	41.7
28	52.2	48.2	41.9
29	52.5	48.4	42.1
30	52.6	48.7	42.4

การทดลองครั้งที่ 11 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	42.4	29.3	36.6
2	42.9	39.7	36.9
3	43.3	40.1	37.1
4	43.8	40.4	37.3
5	44.3	41	37.7
6	44.8	41.4	38
7	45.3	41.8	38.3
8	46.5	42.8	39
9	46.8	43.2	39.3
10	47.2	43.6	39.8
11	47.7	44.8	40.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12	47.8	44.1	40.3
13	48	44.1	40.4
14	48.1	44.2	40.5
15	48.4	44.5	40.8
16	48.5	44.5	40.9
17	48.7	44.8	41.2
18	49	45.1	41.4
19	49.3	45.2	41.6
20	49.3	45.2	41.6
21	49.4	45.3	41.7
22	49.6	45.4	41.8
23	49.7	45.5	41.9
24	49.9	45.7	42.1
25	50.2	46	42.4
26	50.5	46.2	42.5
27	50.7	46.3	42.6
28	51.4	47	43.1
29	51.9	47.3	43.3
30	52.2	47.7	43.5

การทดลองครั้งที่ 12 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	32.8	29.6	27.5
2	33.3	30	27.8
3	33.8	30.5	28.1
4	34.3	31	28.4
5	35	31.5	29
6	35.5	31.9	29.4
7	36	32.3	29.7
8	36.4	32.7	30.1
9	36.8	33.1	30.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	37.2	33.4	30.7
11	37.7	33.7	31
12	37.8	34	31.3
13	38.4	34.5	31.7
14	38.6	34.7	32
15	39.1	35.2	32.3
16	39.6	35.5	32.6
17	39.9	35.9	33
18	40.3	36.2	33.4
19	40.8	36.6	33.7
20	41	36.8	33.9
21	41.2	37	34.1
22	41.4	37.2	34.3
23	41.9	37.6	34.7
24	42.1	37.8	34.9
25	42.3	38	35.1
26	42.5	38.1	35.3
27	42.7	38.3	35.5
28	42.9	38.6	35.7
29	43.2	38.8	36
30	43.6	39.2	36.3

การทดลองครั้งที่ 13 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	41.2	37.9	36.4
2	41.4	38.2	36.5
3	41.6	38.4	36.7
4	42	38.8	37
5	42.5	39.2	37.3
6	42.6	39.3	37.5
7	42.7	39.5	37.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8	43	39.6	37.8
9	43.2	39.9	38.1
10	43.2	39.8	38
11	43.4	40	38.2
12	43.6	40.2	38.4
13	43.8	40.4	38.6
14	43.9	40.6	38.7
15	44.1	40.8	38.9
16	44.4	40.9	39.1
17	44.5	41.1	39.3
18	44.8	41.2	39.5
19	44.9	41.4	39.6
20	45.1	41.5	39.6
21	45.2	41.6	39.8
22	45.3	41.7	40
23	45.4	41.9	40.1
24	45.4	41.9	40.2
25	45.7	42.1	40.4
26	46	42.3	40.6
27	46.2	42.5	40.7
28	46.3	42.7	40.9
29	46.4	42.8	41
30	46.5	43	41.2

การทดลองครั้งที่ 14 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	40.3	37.5	34.1
2	40.6	37.7	34.3
3	40.9	38.1	34.5
4	41.9	39	35.3
5	42.4	39.6	35.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	42.6	39.6	35.8
7	42.7	39.9	36
8	42.8	39.9	36
9	43.1	40.3	36.4
10	43.6	40.8	36.8
11	44.1	41.2	37.2
12	44.2	41.3	37.4
13	44.3	41.5	37.5
14	44.7	41.9	37.7
15	45	42	38
16	45.6	42.1	38.1
17	45.8	42.3	38.3
18	45.9	42.4	38.4
19	46.3	42.8	38.7
20	46.6	43.1	39
21	47	43.5	39.5
22	47.4	43.9	39.8
23	47.6	44.1	40
24	48	44.4	40.2
25	48.1	44.5	40.3
26	48.4	44.7	40.6
27	48.5	44.9	40.8
28	48.6	45	40.9
29	49	45.3	41.1
30	49.1	45.4	41.2

การทดลองครั้งที่ 15 ของทองเหลือง

เวลา(นาที)	T2	T3	T4
1	40.7	35.6	31.2
2	41.2	36.1	31.6
3	41.6	36.6	31.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	41.8	36.6	32
5	42.3	37.2	31.4
6	42.9	37.8	32.9
7	43.3	38.1	33.2
8	44	38.7	33.7
9	44.4	39.1	34.1
10	44.7	39.4	34.4
11	45.1	39.7	34.6
12	45.5	40.1	34.9
13	45.8	40.3	35.2
14	46.2	40.7	35.5
15	46.5	41.1	35.8
16	46.9	41.4	36.2
17	47.3	41.8	36.6
18	47.5	42	36.7
19	47.7	42.2	36.9
20	47.9	42.4	37.1
21	48.3	42.7	37.5
22	48.5	43	37.7
23	49	43.3	38
24	49.4	43.7	38.4
25	49.6	43.9	38.7
26	49.5	43.8	38.8
27	49.8	44.2	38.9
28	50.1	44.4	39.2
29	50.4	44.6	39.4
30	50.9	45.2	39.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดการศึกษาการนำความร้อนในโลหะ

เบญญทิพย์ สำอางผิว และ กาจปัญญา สุวรรณสุโข

ฟิสิกส์-พลังงานทางเลือก คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษ เป็นการศึกษาการสร้างชุดทดลองเพื่อมีหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะ *3* ชนิด คือ เหล็กผสม*(Wrought iron)* ทองเหลือง และอลูมิเนียม โดยควบคุมอุณหภูมิที่ให้กับโลหะที่ปลายด้านหนึ่งมีอุณหภูมิ $100^{0}C$ จากการทดลองพบว่า ที่ระยะห่าง 27 cm ของอุณหภูมินี้ ให้ผลการทดลองที่ดี โดยที่เหล็กทองเหลืองและอลูมิเนียม จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 61.4±1.8 W/m.^{0}C และ 180.3±16.2 W/m.^{0}C ตามลำดับ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ7.6%,0.10% และ12.5%

1.บทนำ

การถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านพลังงาน โดยในโครงงานพิเศษนี้จะทำการสร้างชุดการทดลองเพื่อศึกษาการนำความร้อนของโลหะ โดยอาศัยหลักการการนำความร้อน ซึ่งชุดการทดลองที่จะถูกนำไปใช้ในการเรียนการสอนและเพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจได้มากขึ้น โดยจะศึกษาเพื่อให้สามารถสร้างชุดทดลองที่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

จุดมุ่งหมายของโครงงานนี้นำเสนอ ชุกการศึกษาการนำความร้อนในโลหะและการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะ ที่อุณหภูมิ 100c ของเหล็ก อลูมิเนียม และทองเหลือง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาด้านฟิสิกส์พื้นฐาน เรื่องการถ่ายความร้อน

2. หลักการและทฤษฎี

การนำความร้อนของของแข็ง เกิดจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลในโครงผลึก โดยที่พลังงานความร้อนจะส่งผ่านจากโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูง (อุณหภูมิสูง)กว่าไปยังโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) โดยไม่มีการถ่ายเทมวลใดๆ เกิดขึ้น จากกฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์กล่าวว่า “อุณหภูมิ ณ จุดใดภายในวัสดุคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างอุณหภูมิ” จะได้

$$I_x = -k\nabla T \qquad (1)$$

เมื่อ I_x = heat flux density (W/m^2)
k = thermal conductivity coefficient (W/m.$^{\circ}$C)
T = temperature gradient ($^{\circ}$C/m)

และเมื่อทำการอินทิเกรต อนุพันธ์ของสมการที่ (1) ใน 1 มิติระหว่างจุดที่มีอุณหภูมิต่างกัน 2 จุด จะได้ว่า

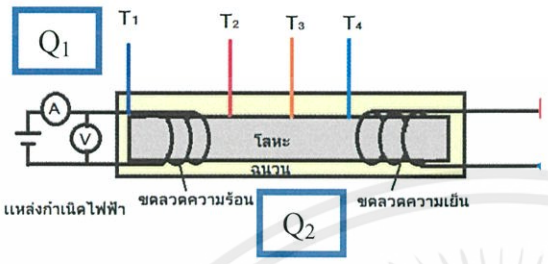
$$Q = \frac{-kA\Delta T}{\Delta x} \qquad (2)$$

เมื่อ Q = พลังงานความร้อน (W)
K = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.$^{\circ}$C)
A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)
ΔT= ความแตกต่างของอุณหภูมิ (^{0}C)
Δx =ระยะห่างระหว่างจุดที่มีอุณหภูมิต่างกัน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2014 Applied Physics of Ladkrabang

และที่สภาวะคงตัวของความร้อน อุณหภูมิภายในวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นปริมาณความร้อนขาเข้าเท่ากับปริมาณความร้อนขาออก โดยปริมาณความร้อนขาเข้าเกิดจากการให้กระแสไฟฟ้ากับระบบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

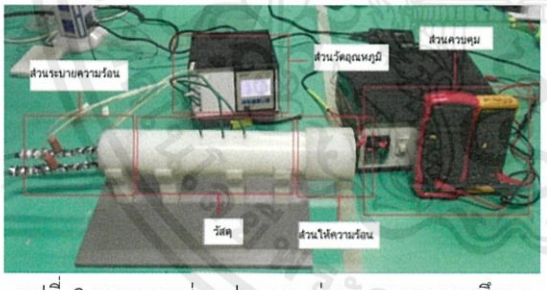
จะได้

$$Q_1 = Q_2$$

$$VI = kA\frac{T_1 - T_2}{x} \quad (3)$$

$$k = \frac{VIx}{A(T_1 - T_2)} \quad (4)$$

3. การทดลอง



รูปที่ *2* แผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของชุดการศึกษาการนำความร้อน

รูปที่ *2* แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ โดยตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) จะรักษาอุณหภูมิที่ปลายของวัสดุให้ค่าที่ 100c เมื่อให้อุณหภูมิตามที่กำหนดทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดันอุณหภูมิ T_2 , T_3 และT_4 โดยเปิดให้น้ำหล่อเย็นไหลทำการบันทึกผลทุก *1* นาท เป็นเวลา 30 นาที ทำทั้งหมด 15 เซต โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 400 mm มี 3 ชนิดคือ เหล็ก ทองเหลือง และอลูมิเนียม ดังแสดงใน รูปที่ *3*

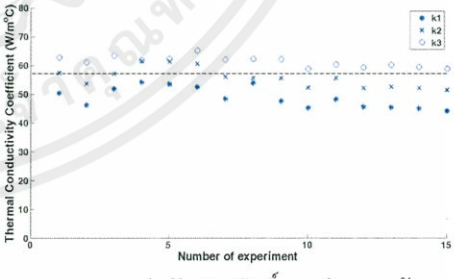
รูปที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทอลองประกอบด้วย เหล็ก ทองแดง และอลูมิเนียม

โดยกำหนดให้จุดปลายเป็นอุณหภูมิ T_1 ซึ่งจะอยู่ห่างจากจุดวัดอุณหภูมิ T_2 ,T_3 และ T_4 เท่ากับ 19 cm ,23 cm และ 27 cm ตามลำดับ

4.การอภิปรายผลการทดลอง

ก่อนทำการทดลองได้ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับโลหะทั้ง 3 ชนิด คือ เหล็กผสม ทองเหลือง และอลูมิเนียม เพื่อให้ตัวทำความร้อนสามารถทำให้โลหะทั้ง 3 มีอุณหภูมิที่จุดปลายเท่ากับ 100 ^{0}C พบว่า เหล็กผสม ต้องใช้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.213 A และ 36.73 V ทองเหลืองต้องใช้ 0.280 A และ 52.00 V และอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.300 A และ 56.00 V

รูปที่ 4 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม *(Wrought Iron)* ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ *100* ^{0}*C* เท่ากับ *57 W/m.*^{0}*C* จากรูปที่ *3* จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดจาก *3* จุด จะมีค่าค่อนข้างแกว่ง



รูปที่ *4* กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม

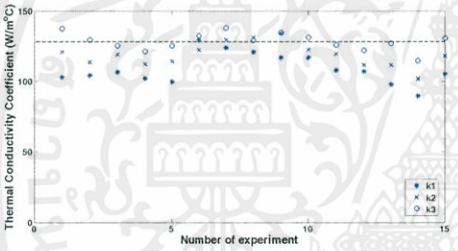
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น พร้อมทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2014 Applied Physics of Ladkrabang

ตารางที่ *1* แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กผสม

	K_1 (W/m.°C)	K_2 (W/m.°C)	K_3 (W/m.°C)
ค่าเฉลี่ย	48.8	55.7	61.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.6	3.4	1.8
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	14.3	2.4	-7.6

รูปที่ 5 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ *100* ^{0}*C* เท่ากับ *128 W/m.*^{0}*C* จากรูปที่ *5* จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดจาก *3* จุด จะมีค่าค่อนข้างแกว่ง

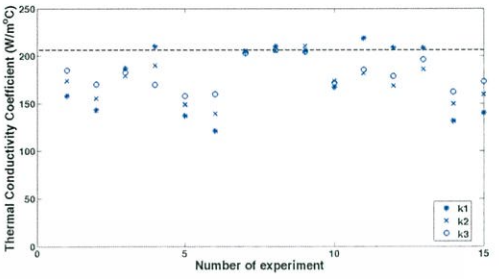


รูปที่ *5* กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง

ตารางที่ *2* แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองเหลือง

	K_1 (W/m.°C)	K_2 (W/m.°C)	K_3 (W/m.°C)
ค่าเฉลี่ย	108.7	118.7	128.2
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.7	8.5	6.3
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	15.1	7.3	-0.1

รูปที่ 6 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ *100* ^{0}*C* เท่ากับ *206 W/m.*^{0}*C* จากรูปที่ *6* จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดจาก *3* จุด จะมีค่าค่อนข้างแกว่ง



รูปที่ *6* กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม

ตารางที่ *3* แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม

	K_1 (W/m.°C)	K_2 (W/m.°C)	K_3 (W/m.°C)
ค่าเฉลี่ย	176.6	174.9	180.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	35.2	22	16.2
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	14.3	15.1	12.5

จากกราฟรูปที่ *4-6* จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่สามารถที่จะรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า การนำความร้อนในอุดมคติ คือ อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า study state เนื่องจากยังไม่สามารถทำระบบให้ระบบปิดได้อย่างสมบูรณ์ มีการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนออกจากระบบ แต่จากตารางที่ *1-3* ทำให้เห็นได้ว่า ยังมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบต่อ เพื่อให้สามารถวัดค่าการนำความร้อนได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่วัดได้ของทั้ง *3* ช่วง ในทั้ง *3* วัสดุ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน *15%* และพบว่า ยิ่งโลหะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ *206 W/m.*^{0}*C* ที่ *100* ^{0}*C* จะมีค่าความผิดพลาดและส่วนเบี่ยงเบนที่ได้จากการวัดที่สูงกว่าโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ในการใช้งานทุกกรณี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

© 2014 Applied Physics of Ladkrabang

เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และระบบไม่สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะคงตัวได้

5.สรุปผลการทดลอง

โครงงานพิเศษนี้ เป็นการศึกษาการสร้างชุดทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะ *3* ชนิด คือ เหล็กผสม ทองเหลือง และอลูมิเนียม ซึ่งโลหะ *3* ชนิด มีขนาดเท่ากันคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25.4 mm มีความยาว 400 mm โดยสร้างระบบปิดด้วยวัสดุฉนวนเทฟลอน*(Teflon)* ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ *180* ^{0}*C* ในการทดลองจะให้ความร้อนกับโลหะ 100 ^{0}C โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 100^{0}C พบว่า เหล็กผสมต้องใช้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.213 A และ 36.73 V ทองเหลืองใช้ *0.28 A* และ 52.00 V ขณะที่อลูมิเนียมต้องใช้กระแสและแรงดันเท่ากับ 0.300 A และ 56.00 V เพื่อทำให้โลหะทั้งสามมีอุณหภูมิเท่ากับ *100* ^{0}*C* ระยะห่างของอุณหภูมิเลือกเลือกไว้ทั้งหมด *3* ระยะ คือ ที่ระยะ 19.0 cm ,23 cm และ 27 cm พบว่าที่ระยะที่มากขึ้น มีแนวโน้มที่จะได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น โดยเหล็กผสมที่ระยะ 27.0 cm จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 61.4 ±1.8 W/m.^{0}C มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 7.6% ทองเหลืองได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 128.2±6.3 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.1% และอลูมิเนียมได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 180.3±16.2 W/m.^{0}C มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 12.5% เมื่อพิจารณาเป็นจุด 2 จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโลหะทั้งสามมีค่าค่อนข้างแกว่ง เนื่องมาจากไม่สามารถรักษาระบบให้เป็นความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1]อ.มนตรี อึ่งเจริญ.(2532),การนำความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2]พงษ์เจต พรหมวงศ์.(2534).การถ่ายเทความร้อน, ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© 2014 Applied Physics of Ladkrabang