

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
Connector Study and Development for Distribution Line System



๒๖๗.
๖๖๔๑๗
๑๖๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **71944**
วัน,เดือน,ปี..... **- 6 ส.ย. 2550**

b. 117 ๒0 ๖22
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
Connector Study and Development for Distribution Line System



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์ โพรวิฑูรย์กุล

อ.นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นายวิวรรณ มั่นคงวิวัฒน์ 47015080
 2. นายสมศักดิ์ แก้วบุญมา 47015112
 3. นายสุทัศน์ กลมเกลียว 47015155
 4. นายเอกชัย สุวรรณชาติ 47015159



.....

(รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



.....

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

นายวิวรรณ	มันคงวิวัฒน์	
นายสมศักดิ์	แก้วบุญมา	
นายสุทัศน์	กลมเกลียว	
นายเอกชัย	สุวรรณชาติรี	
รศ. ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอการศึกษากระบวนการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบของ connector และ clamp แบบต่างๆทางไฟฟ้าแรงสูงโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 และการนำโปรแกรมทางด้านไฟไนท์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นบน parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 sq.mm. โดยการทดสอบทางไฟฟ้าจะใช้วิธีการทดสอบแบบ CCT (Current Cycle Test) เพื่อหาอุณหภูมิและความต้านทานที่เกิดขึ้นของ parallel groove clamp two bolt และการทดสอบทางกลจะเป็นการทดสอบแบบ Torque Strength และ Tensile Strength ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนด้วยโปรแกรม ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ

ผลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 พบว่าค่าอุณหภูมิ ความต้านทาน และแรงบิดของ parallel groove clamp two bolt ที่ได้เป็นค่าที่ยอมรับได้ ผลจากการใช้โปรแกรมทางด้าน Finite Element นั้นมีความคลาดเคลื่อนกับผลที่ได้จากการทดสอบทั้งนี้ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบน parallel groove clamp two bolt นั้นเกิดมาจากค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสที่ใช้ขณะทำการทดสอบ และความต้านทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัสของ parallel groove clamp two bolt ที่ประกอบร่วมกับตัวนำนั้นมีค่าไม่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องให้แก่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้และคอยแนะนำเกี่ยวกับโครงสร้างของโครงการ ตลอดจนการดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดีและได้ให้โอกาสในการเรียนรู้ และประสบการณ์อันมีค่าในการปฏิบัติงานจริง ทางผู้จัดทำรู้สึกซึ่งใจเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ หจก.ส กมลเทรดดิ้ง ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบและความร่วมมือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และโครงการ IRPUS ที่ให้การสนับสนุนเงินในการวิจัย

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ความอนุเคราะห์กล้อง Thermo scan

ขอขอบคุณ นายศานิต สมบูรณ์ และรุ่นพี่ปริญญาโท ที่ให้ความร่วมมือและให้คำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

อนึ่งโครงการวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยความดีงามและความมีน้ำใจของทุกท่านที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยให้ความสนับสนุนและส่งเสริมทางด้านปัจจัยต่างๆจนทำให้ปริญญา นิพนธ์ฉบับนี้แล้วเสร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

Connector Study and Development for Distribution Line System

Wiwat Mankongwiwat

Somsak Kaewbunma

Sutus Kromkrew

Ekkachai Suwanchartree

Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul Advisor

Norasage Pattanadech Advisor

Academic Year 2006

ABSTRACT

This project presents the study of the tests and analysis of High voltage connector and clamp under ANSI C119.4-2004 standard. Finite element program is also applied to analyze the heat on parallel groove clamp two bolt, size of 50-185 sq.mm. For electrical test, CCT (Current Cycle Test) method will be applied to find out the temperature and electrical resistance of parallel groove clamp two bolt. For mechanical test, Torque Strength Test and Tensile Strength Test methods will be applied. The value of heat transfer on parallel groove clamp two bolt obtained from finite element program will be compared to the test result from the experiment.

The test result under ANSI C119.4-2004 standard shows that the value of temperature, resistance and torque of parallel groove clamp two bolt is in acceptable range. The result from finite element program is slightly different from the test result. This is because the value of the heat on parallel groove clamp two bolt occurred from the current during the test and the resistance on parallel groove clamp two bolt's contact are not stable; therefore, we are not able to entry the correct parameter to the computer program.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 parallel groove clamp two bolt	1
1.2 ลักษณะและส่วนประกอบของ parallel groove clamp two bolt.	2
1.3 ความสำคัญและที่มา	4
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	6
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 มาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004	7
2.1.1 วิธีการทดสอบ	8
2.1.2 วิธีการเตรียมอุปกรณ์สำหรับสำหรับทดสอบไซเคิลของกระแส	8
2.1.3 กระแสที่ใช้ในการทดสอบ	9
2.1.4 ช่วงเวลา ON-OFF แต่ละไซเคิล	9
1. ช่วงเวลา ON	9
2. ช่วงเวลา OFF	9
2.1.5 การวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิ	9
2.1.6 การวัดค่าความต้านทาน	10
2.1.7 การวัดอุณหภูมิ	10
2.1.8 คุณสมบัติของคอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย	10
2.1.9 อุณหภูมิ	10
2.1.10 ความต้านทาน	11
2.2 ทฤษฎีการคำนวณทางไฟไนท์เอลิเมนต์	11
2.3 ทฤษฎีหม้อแปลง.	20
2.3.1 หม้อแปลงในอุดมคติ.	20
2.3.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การวัดอุณหภูมิ	25
2.4.1 หลักการและแบบของเทอร์โมคัปเปิ้ล.	25
2.4.2 เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน.	26
2.4.3 เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ K	27
บทที่ 3 การทดสอบ.	30
3.1 การทดสอบชุดควบคุมแรงดันกึ่งอัตโนมัติ	30
3.1.1 แบบแสดงการทำงานของวงจรควบคุม	32
3.1.2 แบบแสดงการทำงานจริง	32
3.1.3 วิธีการทดสอบชุดคอนโทรลกับวงจรจำลอง.	34
3.2 การหาจุดที่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดของ parallel groove clamp two bolt	36
3.3 วงจรจำลองการทดสอบ	38
3.4 วิธีการทดสอบ parallel groove clamp two bolt ตาม มาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004	40
3.4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์	40
3.4.2 การทดสอบทางไฟฟ้า	42
3.4.3 การทดสอบทางกล	44
3.5 ผลการทดสอบ	46
3.5.1 การทดสอบ Connector กับสายตัวนำขนาด 95 SQ.MM	46
1 วัสดุทดสอบ	46
2 ผลการทดสอบ	47
2.1 ผลของอุณหภูมิ	47
2.2 ผลของความต้านทาน	47
2.3 ผลของแรงบิด	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
4.1 สรุปผลการจัดทำโครงการ	56
4.2 สรุปผลจากการทดสอบ	56
1. สรุปผลจากการทดสอบชุดควบคุมการทำงานกึ่งอัตโนมัติ	56
2. สรุปผลจากการทดสอบหาอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของ parallel groove clamp two bolt	56
4.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะที่พบระหว่างดำเนินงาน	57
1. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	57
2. พื้นที่ผิวของอุปกรณ์ต่อแยกสาย	57
3. การทำความสะอาดผิวตัวนำก่อนประกอบอุปกรณ์ต่อแยกสาย	57
4. การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลบนวัสดุทดสอบ	57

ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การนำ parallel groove clamp two bolt ไปใช้งาน	1
1.2 ลักษณะการต่อ parallel groove clamp two bolt เข้ากับสายตัวนำ	2
1.3 parallel groove clamp two bolt	2
1.4 ลักษณะของ parallel groove clamp two bolt	3
1.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นของ parallel groove clamp two bolt โดยใช้ กล้อง Thermo scan บันทึกภาพ	4
2.1 แผ่นโลหะที่ผลิตความร้อนได้เอง	12
2.2 แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นโลหะ	12
2.3 ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณภายในเอลิเมนต์	13
2.4 เอลิเมนต์ที่ 1 กับหมายเลขของจุดต่อทั้งสาม	16
2.5 หม้อแปลงในอุดมคติ	20
2.6 วงจรสมมูลของค่ากระแสกระตุ้น	22
2.7 แบบจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง	23
2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง	24
2.9 วงจรการทดลองของซีเบ็ค	25
2.10 วงจรการทดลองของเพลเทียร์	26
2.11 กราฟความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K	27
2.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิกับแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด	28
3.1 วงจรควบคุม	30
3.2 Flowchart วงจรควบคุมการทำงาน	31
3.3 แบบวงจรการทำงานจริง	32
3.4 ชุดควบคุมแรงดันกึ่งอัตโนมัติ	33
3.5 วงจรการทดลอง	34
3.6 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบ	35
3.7 ตำแหน่งการวางเทอร์โมคัปเปิล ณ จุดต่างๆบน parallel groove clamp two bolt	36
3.8 กราฟอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน parallel groove clamp two bolt	38
3.9 วงจรจำลองการทดสอบเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดสอบจริง	39
3.10 ก) - ข) การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบและทำความสะอาด	40
3.11 การประกอบ Equalizer กับสายตัวนำ	41
3.12 การขันน็อตของตัว Clamp โดยใช้ Torque Wrench	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรสำเร็จที่ใช้ในการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt	41
3.14 การติดตั้ง Thermocouple	42
3.15 การติดตั้ง Thermocouple กับวัตถุทดสอบทั้งวงจร	42
3.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาใน 1 cycle เมื่ออุณหภูมิขณะทำการทดลองเป็น 27 °C .	43
3.17 การวัดค่าความต้านทาน	43
3.18 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อเลือกค่าแรงบิดตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004	44
3.19 การทดสอบแรงบิดตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004	44
3.20 เครื่องทดสอบแรงดึง	45
3.21 Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm.	46
3.22 Bare stranded aluminum conductors size 95 sq.mm.	46
3.23 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no. 1	47
3.24 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no. 2	48
3.25 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no. 3	49
3.26 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no. 4	50
3.27 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no1	51
3.28 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no2	52
3.29 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no3	53
3.30 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no4	54

VIII

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบของ Parallel groove clamp two bolt	3
1.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	8
2.1 ระยะเวลาการทดสอบ	7
2.2 ความยาวของตัวนำสำหรับทดสอบ	8
2.3 ความยาวของตัวนำสำหรับทดสอบ (ในหน่วยนิ้ว)	8
2.4 ช่วงเวลา ON-OFF ในแต่ละไซเคิล	9
2.5 คุณสมบัติเปรียบเทียบของเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน	29
2.6 สภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยไม่ต้องใช้ Protection tubes	29
3.1 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ Parallel groove clamp two bolt	33
3.2 ผลอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 1	47
3.3 ผลอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 2	48
3.4 ผลอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 3	49
3.5 ผลอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 4	50
3.6 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 1	51
3.7 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 2	52
3.8 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 3	53
3.9 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no 4	54
3.9 แรงบิดของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no1- 4	51
3.11 แรงดึงโหดของ Parallel groove clamp two bolt size 50-185 sq.mm no1- 4	51

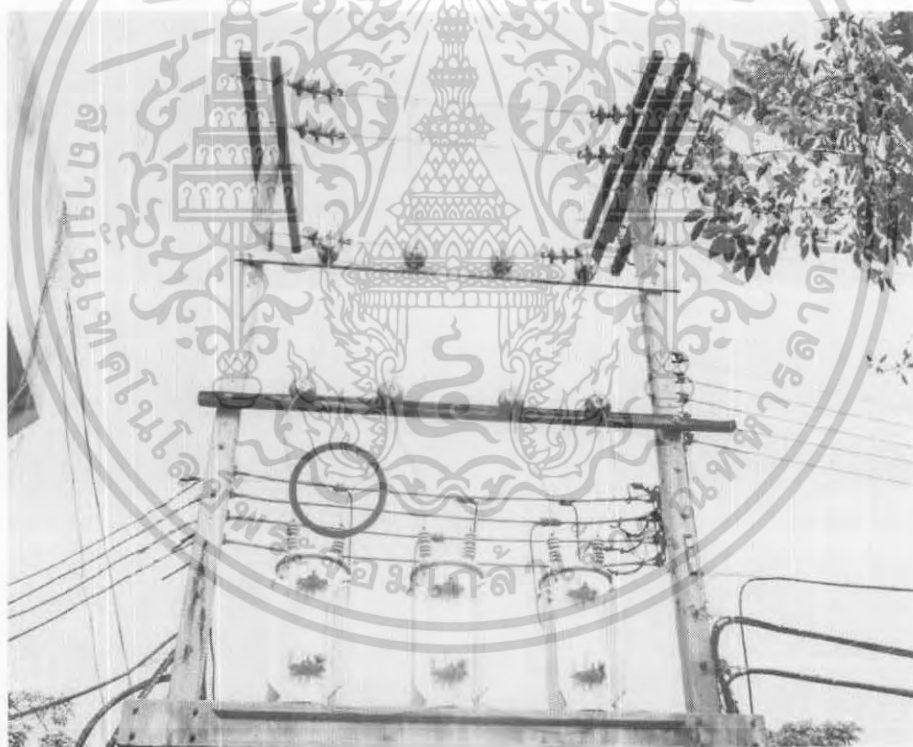
บทที่ 1

บทนำ

1.1 Parallel groove clamp two bolt

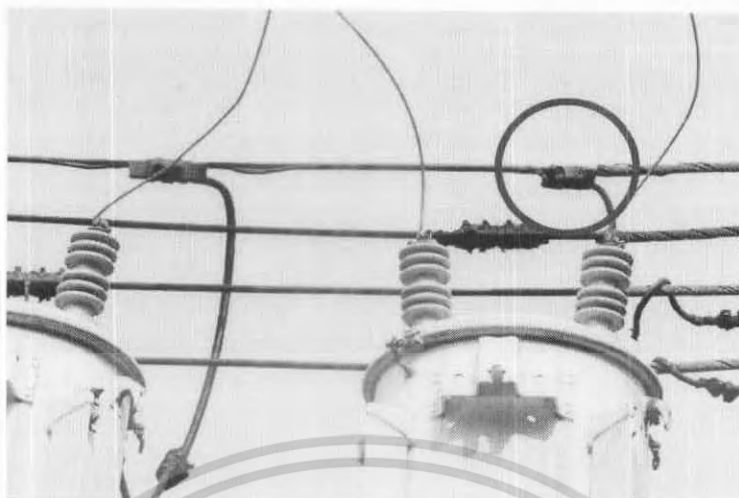
Parallel groove clamp two bolt เป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งที่ใช้ในระบบไฟฟ้า มีหน้าที่สำหรับต่อแยกสายออกจากหม้อแปลงเพื่อจ่ายไฟแยกออกไปตามจุดต่างๆที่ต้องการใช้ไฟ

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะให้เพียงพอต่อความต้องการและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุดโดยอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องได้รับการออกแบบฉนวนไฟฟ้าที่ดี ฉะนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพซึ่งผ่านการทดสอบตามมาตรฐานสากลจะเป็นการช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟ



รูปที่ 1.1 การนำ Parallel groove clamp two bolt ไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



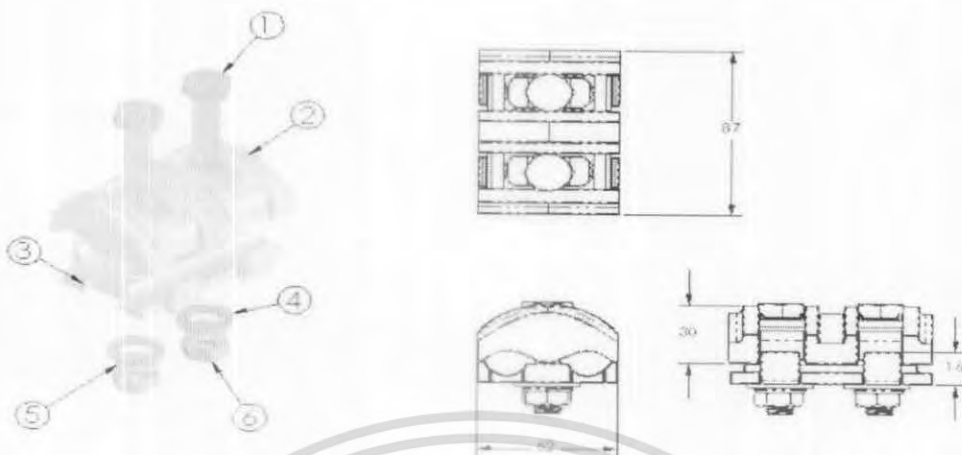
รูปที่ 1.2 ลักษณะการต่อ Parallel groove clamp two bolt เข้ากับสายตัวนำ

1.2 ลักษณะและส่วนประกอบของ Parallel groove clamp two bolt



รูปที่ 1.3 Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ลักษณะของ Parallel groove clamp two bolt 50-185 SQ.MM.

ตารางที่ 1.1 ส่วนประกอบของ Parallel groove clamp two bolt

รายละเอียด	
1.	HEAD BOLTS
2.	TOP BODY
3.	BASE BODY
4.	RING WASHER
5.	SPRING WASHER
6.	NUTS

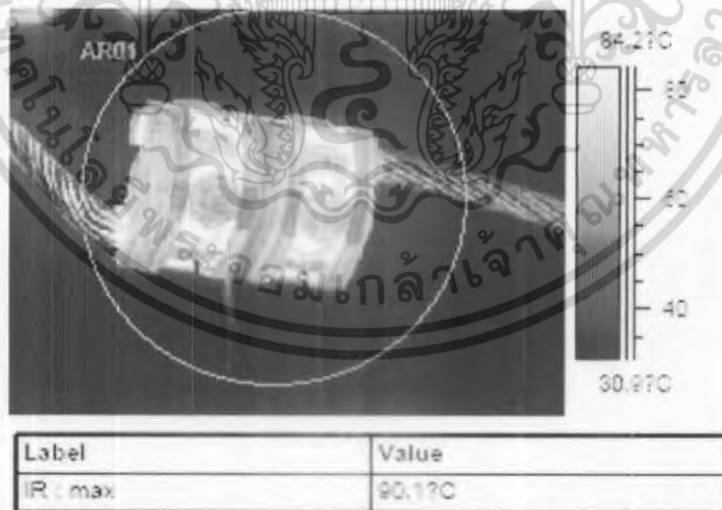
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันมีการใช้งาน connector แบบ ต่างๆในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงมากมายซึ่งมักจะประสบปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง เนื่องจากหลวมละลายหรืออาร์คขาดของ connector และ clamp ก่อให้เกิด ความเสียหาย เกิดขึ้นทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ต่ำ และทำให้เกิดความเดือดร้อนแก่ ผู้ใช้ไฟ

สำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์เชื่อมต่อทางไฟฟ้า โดยในที่นี้จะ กล่าวถึง Parallel groove clamp two bolts จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยวิธีการทดสอบจะมีอยู่หลายวิธีตามแต่ละมาตรฐาน ปริญญาโทนี้ นำเสนอการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 [1] เป็นการทดสอบโดยวิธีการจ่าย กระแสสูง (Current Cycle Test: CCT)

การทดสอบที่นำเสนอจะเป็นการศึกษาถึงผลของความร้อนและแรงกระทำทาง กลที่กระทำกับ Parallel groove clamp two bolts โดยใช้โปรแกรมทดสอบไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element) และนำผลไปทำการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงว่าสอดคล้อง กันหรือไม่เพื่อประโยชน์ในการทำนายผลก่อนการเกิดการอาร์คขาดชำรุดได้ของ connector



รูปที่ 1.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นของ Parallel groove clamp two bolt โดยใช้

กล้อง Thermo scan บันทึกภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเป็นการศึกษาการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt ตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 ในหัวข้อการทดสอบอุณหภูมิ โดยวิธีการจ่ายกระแส การทดสอบความต้านทาน และการทดสอบทางกล
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม Finite Element
3. ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยการจัดทำคู่มือการทดสอบ Connectors ขึ้นมา โดยอาศัยความรู้และทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและกระบวนการทดสอบ Connectors ตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 ก่อนที่จะนำไปใช้งานในระบบจำหน่าย เพื่อป้องกันไม่ให้เป็นสาเหตุของการเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งในกระบวนการทดสอบจะทำการทดสอบทั้งทางด้านไฟฟ้าและทางกล

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt งานวิจัยต่างๆ และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมทั้งศึกษาการใช้โปรแกรม Finite element เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของความร้อนบนตัว Parallel groove clamp two bolt
2. จัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบและทำการทดสอบกับวงจรจำลองเพื่อศึกษาถึงปัญหาต่างๆที่อาจเกิดขึ้นพร้อมทั้งแก้ไข้ปัญหา
3. ทำการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt ตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 พร้อมทั้งเก็บข้อมูลการทดสอบ
4. นำผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมและผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกัน เพื่อที่จะสรุปและประเมินผลการทดสอบ
5. จัดทำปฏิญานินพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	พ.ศ. 2549							พ.ศ. 2550			
	ภ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1. ศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง	■	■	■								
2. ศึกษามาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	■	■	■								
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■	■								
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม Finite Element		■	■	■	■	■	■				
5. จัดเตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ			■	■	■	■	■				
6. ทดลองวงจรการทดสอบเพื่อศึกษาถึงปัญหาต่างๆที่อาจเกิดขึ้น พร้อมทั้งแก้ไข้ปัญหา				■	■	■	■				
7. จัดทำรายงานวิชาโครงการ				■	■	■	■				
8. ทำการทดสอบวัสดุทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 พร้อมทั้งเก็บข้อมูลการทดสอบ						■	■	■	■	■	
9 นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจริงและโปรแกรมมาเปรียบเทียบกัน									■	■	
10. สรุปและประเมินผลการทดสอบ									■	■	
11. จัดทำปริญญาณิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									■	■	
	■ ขั้นตอนที่ได้วางแผนแล้ว							■ ขั้นตอนที่ปฏิบัติงานจริง			

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงวิธีการติดตั้งและใช้งาน Parallel groove clamp two bolt กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า
2. สามารถใช้ทฤษฎีและโปรแกรม Finite Element คำนวณลักษณะการกระจายทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับ Parallel groove clamp two bolt
3. ศึกษาการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt ตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004
4. สามารถวิเคราะห์และบอกถึงสาเหตุการชำรุดของ Parallel groove clamp two bolt ได้
5. นักศึกษาเรียนรู้ถึงการทำงานเป็นทีม
6. เกิดความร่วมมือทางด้านวิชาการระหว่างสถาบันและภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004

มาตรฐาน ANSI C119.4-2004 "Connectors for Use Between Aluminum-to-Aluminum or Aluminum-to-Copper Bare Overhead Conductors" เป็นมาตรฐานสำหรับทดสอบอุปกรณ์ต่อแยกสายที่เชื่อมต่อระหว่างตัวนำอลูมิเนียม-อะลูมิเนียม หรือ อะลูมิเนียม-ทองแดง เพื่อให้ผู้ใช้มีความเชื่อถือ อุปกรณ์ต่อสายที่ผ่านการทดสอบแล้วได้ในระดับหนึ่ง (หากอุปกรณ์ต่อแยกสายถูกติดตั้งอย่างเหมาะสมตามที่ผู้ผลิตกำหนด)

2.1.1 วิธีการทดสอบ

มาตรฐานได้แบ่งการทดสอบไว้เป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบทางไฟฟ้าและการทดสอบทางกล โดยในส่วนของ การทดสอบทางกลนั้นอาจประกอบไปด้วย การวัดความแข็งแรงของอุปกรณ์ต่อแยกสาย (Tensile strength) ความสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Reusability) เป็นต้น อย่างไรก็ตามขอบเขตของโครงการนี้จะเน้นศึกษาในส่วนของ การทดสอบทางไฟฟ้า (Current Cycle Tests) และการทดสอบแรงบิด (Torque strength test) เท่านั้น

วิธีการทดสอบทางไฟฟ้าจะใช้ การทดสอบวัฏจักรกระแส (Current cycle tests) ที่สามารถแบ่งตามขั้นตอนการทดสอบได้อีก 2 ประเภทคือ วิธีธรรมดา (Current Cycle Test (CCT)) กับวิธีเร่งโดยการจุ่มน้ำเย็น (Current Cycle Submersion Test (CCST)) แต่ในการทดสอบนี้เลือกทำการทดสอบโดยใช้วิธีธรรมดา จึงจะนำเสนอแต่เพียงในส่วนของวิธีการทดสอบแบบวิธีธรรมดาเท่านั้น

ช่วงเวลาในการทดสอบวัฏจักรกระแสจะขึ้นกับเงื่อนไขที่จะนำอุปกรณ์ต่อแยกสายไปใช้งาน และขึ้นอยู่กับระดับกระแสของ Connector และการเลือกวิธีการทดสอบ Current Cycle Test (CCT) หรือ Current Cycle Submersion Test (CCST) โดยมาตรฐานได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาการทดสอบ

Connector Class	Number of Test Cycle for:	
	CCT Method	CCST Method
Extra heavy duty (Class AA)	500	NA
Heavy duty (Class A)	500	100
Medium duty (Class B)	250	75
Light duty (Class C)	125	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 วิธีการเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบไซเคิลของกระแส

มาตรฐานไม่ได้ระบุวิธีการการติดตั้งว่าต้องการมีลักษณะใด เพราะการติดตั้งอุปกรณ์ต่อแยกสายควรจะปฏิบัติตามข้อแนะนำของผู้ผลิต และควรติดตั้งในสภาวะอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient) อยู่ในช่วง 15-35 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามในการทดสอบจะต้องแสดงรายละเอียดไว้ในรายการผลการทดสอบ

ตัวนำที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตัวนำลุ่มนิยมนตามขนาดที่การไฟฟ้าใช้งาน (ไม่เกิน 3 ขนาด) จะต้องมีความสะอาดบริเวณที่จะสัมผัสกับอุปกรณ์ต่อแยกสายด้วยแปรงลวด (Wire brush) เพื่อขจัดออกไซด์ฟิล์มและสิ่งเปราะเปื้อนต่าง ๆ ออกให้หมด ความยาวของตัวนำที่ใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งจะขึ้นกับขนาดของตัวนำ

อุปกรณ์ต่อแยกสายทั้งหมดที่จะนำมาทดสอบควรจะมีค่าพิกัดกระแสใกล้เคียงกัน นำมาต่ออนุกรมกันในกรณีที่ใช้ ตัวนำแบบตีเกลียว (Stranded conductor) จะต้องมียอควอไลเซอร์ (Equalizers) เพื่อใช้ในการวัดค่าความต้านทาน นอกจากนั้นยังต้องมี ตัวนำควบคุม (Control conductor) ในวงจรทดสอบ เพื่อใช้เป็นตัวนำอ้างอิง สำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลในวงจรทดสอบ และควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ

ตารางที่ 2.2 ความยาวของตัวนำสำหรับทดสอบ

Composite aluminum composite	Copper or copper composite	Exposed Length			
		Stranded		Solid	
		in	Cm	in	Cm
≤ 4/0 AWG	≤ 2/0 AWG	12	30.5	24	61.0
4/0 AWG ถึง 795 kcmil	2/0 AWG ถึง 500 kcmil	24	61.0	48	121.9
≥ 795 kcmil	≥ 500 kcmil	36	91.4	72	182.9

ตารางที่ 2.3 ความยาวของตัวนำสำหรับทดสอบ (ในหน่วยนิ้ว)

Composite aluminum Composite (mm ²)	Copper or copper composite (mm ²)	Exposed Length			
		Stranded		Solid	
		in	Cm	in	Cm
≤ 21.73	≤ 2/0	12	30.5	24	61.0
21.73 ถึง 402.83	34.65 ถึง 253.35	24	61.0	48	121.9
≥ 402.83	≥ 253.35	36	91.4	72	182.9

*ค่าต่าง ๆ ถูกเทียบมาจากหน่วย นิ้ว (inch)

*A = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

2.1.3 กระแสที่ใช้ในการทดสอบ

กระแสที่จ่ายให้วงจรทดสอบจะต้องถูกปรับภายในช่วง ON ของ 25 ไชเคลิลแรก เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ตัวนำควบคุมอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-state temperature) สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ 100-105 องศาเซลเซียส สำหรับประเภท A,B,C และประเภท AA [1] จะต้องสูงกว่า 175-180 องศาเซลเซียส ในการทดสอบแต่ละไชเคลิลจะต้องมีช่วงจ่ายกระแสลับป้อนให้วงจรทดสอบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้คอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย ซึ่งจะเรียกว่า ช่วง ON และช่วงหยุดจ่ายกระแสจะเรียกว่า ช่วง OFF (ในช่วงเวลา OFF นี้จะเป็นช่วงที่ทำการวัดค่าความต้านทาน โดยจะทำการจ่ายไฟกระแสตรงไม่เกิน 12 A)

2.1.4 ช่วงเวลา ON-OFF แต่ละไชเคลิล

1. ช่วงเวลา ON

ช่วงเวลา ON เป็นไปตามตารางที่ 2.4 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำควบคุม ในกรณีนี้ตัวนำควบคุมมีขนาดโตกว่าค่าในตาราง ให้พิจารณา เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ต่อแยกสาย โดยเสถียรภาพทางความร้อนนิยามไว้ว่า "อุณหภูมิจะต้องมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส จากการอ่านค่า 2 ครั้งใน 3 ครั้ง ภายในช่วงเวลาไม่น้อยกว่า 10 นาที"

2. ช่วงเวลา OFF

คอนเนคเตอร์ต่อแยกสายที่ผ่านช่วง ON มาแล้ว จะถูกทิ้งให้เย็นตัวลงในบรรยากาศ ด้วยระยะเวลาเดียวกันกับช่วง ON

2.1.5 การวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิ

ค่าความต้านทานและ อุณหภูมิจะกระทำตามไชเคลิลที่กำหนด คือ ไชเคลิลที่ 25,50,75,100,125,165,205,250,325,405 และไชเคลิลที่ 500 โดยบวกลบได้ไม่เกิน 5 ไชเคลิล

ตารางที่ 2.4 ช่วงเวลา ON-OFF ในแต่ละไชเคลิล

Aluminum or Aluminum Composite (kcmil)	Copper or Copper Composite	Current ON Period (Hour)
≤336.4	≤4/0 AWG	1.0
336.4 ถึง 795	4/0 AWG ถึง 500 kcmil	1.5
795 ถึง 1590	500 kcmil ถึง 1000 kcmil	2.0

2.1.6 การวัดค่าความต้านทาน

จะทำการวัดค่าความต้านทานโดยจะทำการวัดตอนสิ้นสุดช่วง OFF โดยป้อนไฟกระแสตรงไม่เกิน 12 A แล้ววัดค่าความต้านทานด้วยไฟฟ้าคร่อมอิกควอไรเซอร์ (ถ้าเป็นตัวนำดีเกลือ) จะได้ค่าความต้านทานจากสูตร V/I ค่าความต้านทานที่ได้ควรเปรียบเทียบให้อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกัน เพื่อให้ค่าที่วัดได้ทั้งหมดเปรียบเทียบกันได้ เช่น ที่ 20 องศาเซลเซียส อาจคำนวณได้จากสูตร

หมายเหตุ ค่าความต้านทานที่ถูกต้องที่ 20°C จะหาได้จากสูตร

$$R_{20} = R_m / [1 + \alpha(T_m - 20)] \quad (2.1)$$

เมื่อ R_m คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้

T_m คือ อุณหภูมิของ Connector ($^{\circ}\text{C}$)

α คือ สัมประสิทธิ์ความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิ

หาได้จาก $\alpha = 4 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$ สำหรับทองแดง

$\alpha = 3.6 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$ สำหรับอลูมิเนียม

2.1.7 การวัดอุณหภูมิ

ควรวัดทันทีเมื่อสิ้นสุดช่วง ON และควรใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการวัดอุณหภูมิ

2.1.8 คุณสมบัติของคอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย

-ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จะต้องมีเสถียรภาพ โดยจะถือว่ามีเสถียรภาพ โดยจะถือว่ามีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อความต้านทานที่วัดได้รวมถึงค่าความผิดพลาด (Error) มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 5\%$ จากค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาทั้งหมด

- อุณหภูมิของคอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย ต้องไม่เกินอุณหภูมิของตัวนำ

- ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างตัวนำควบคุมกับคอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย จะต้อง มีเสถียรภาพ โดยจะถือว่ามีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสอง รวมถึงค่าความผิดพลาด (Error) มีค่าไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส จากค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วงเวลาทั้งหมด

2.1.9 อุณหภูมิ

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความร้อนที่เกิดขึ้นบนคอนเนคเตอร์ต่อแยกสาย ถ้าคอนเนคเตอร์ต่อแยกสายเกิดความร้อนสูงขึ้นจะทำให้คอนเนคเตอร์ต่อแยกสายเสียคุณสมบัติทางกลไป เช่น แรกกดบนสายไฟลดลง เป็นต้น อันจะส่งผลให้ความต้านทานของผิวหน้าสัมผัสเพิ่มขึ้นต่อไป

2.1.10 ความต้านทาน

เนื่องจากค่าความต้านทานเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานบนตัวคอนเนคเตอร์ต่อแยกสายไปอยู่ในรูปของความร้อน เมื่อเกิดความร้อนขึ้นอุณหภูมิบนตัวคอนเนคเตอร์ต่อแยกสายก็จะสูงขึ้นด้วย

2.2 ทฤษฎีการคำนวณปัญหาความร้อนด้วยการใช้โปรแกรม Finite Element

การทดสอบทางไฟฟ้าของ Parallel groove Clamp two bolt ค่าความร้อนที่ไม่มีเสถียรภาพและที่มีค่าสูงเกินเกิดขึ้นกับวัตถุทดสอบนั้น เป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้ Hot Line Bail Clamp เกิดการชำรุดได้ซึ่งอาจจะสามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์

ดังนั้นจึงได้นำวิธีการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์มาช่วยในการคำนวณวิเคราะห์การกระจายความร้อนของวัตถุทดสอบ

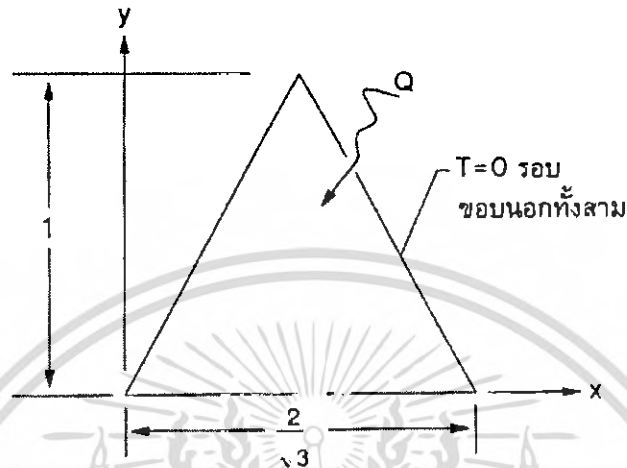
ตัวอย่างการแก้ปัญหาการกระจายความร้อนแบบสองมิติทาง Finite Element [7]

ตัวอย่าง 2.2.1 สมการ Finite Element ที่สร้างขึ้นมาโดยวิธีการแปรผัน สามารถใช้แก้ปัญหาที่สอดคล้องกันได้ดังตัวอย่าง

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

$$[K]^{(e)} \{T\}^{(e)} = \{F\}^{(e)} \quad (2.2)$$

ตัวอย่าง 2.2.2 แผ่นโลหะรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ k สามารถผลิตความร้อนได้เอง (internal heat generation) มีค่าเท่ากับ Q และมีอุณหภูมิรอบขอบนอกเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 2.1

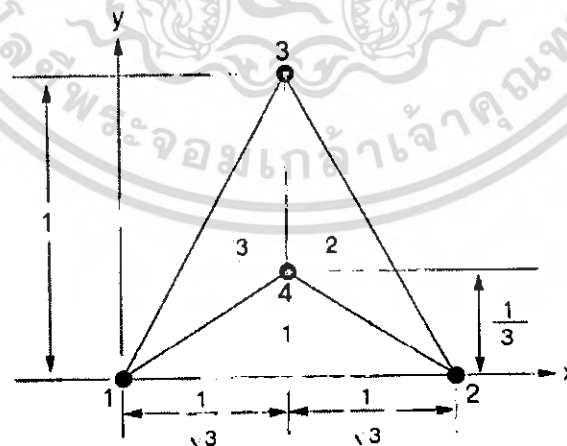


รูปที่ 2.1 แผ่นโลหะที่ผลิตความร้อนได้เอง

หากแผ่นโลหะนี้เกิดการกระจายของอุณหภูมิในสถานะอยู่ตัว ให้ใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมจำนวน 3 เอลิเมนต์เพื่อหาอุณหภูมิที่จุดกลางแผ่นโลหะ

วิธีทำ แก้ปัญหานี้โดยทำตามลำดับขั้นตอนของวิธีการแปรผัน

ขั้นที่ 1 ทำการแบ่งขอบเขตเนื้อที่ของปัญหาดังรูปที่ 2.1 ออกเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมทั้ง 3 เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นโลหะ

ขั้นที่ 2 ทำการเลือกลักษณะฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งสมการดังกล่าวก่อให้เกิดลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนเอลิเมนต์

$$T_{(x,y)} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

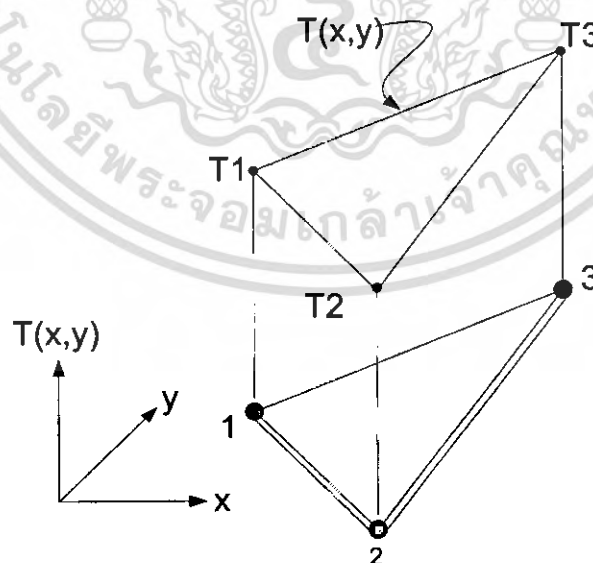
ขั้นที่ 3 ทำการหาฟังก์ชันแปรผัน J ของปัญหานี้ เนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้นของปัญหานี้ คือ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{Q}{k} \quad (2.4)$$

โดยที่ $T = T_{(x,y)}$ แทนการกระจายของอุณหภูมิสมการดังกล่าวสอดคล้องกับฟังก์ชันแปรผัน J ที่อยู่ในรูป

$$J(T) = \int \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - \frac{Q}{k} T \right] dx dy \quad (2.5)$$

หากเราใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมซึ่งมี 3 จุดต่อ โดยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อคือ T_1, T_2, T_3 ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 เราจะได้สมการเอลิเมนต์ทั้งหมด 3 สมการจากการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันแปรผัน J ที่เกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อทั้งสามจุด



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณภายในเอลิเมนต์

เราเริ่มทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันแปรผัน J ที่เกี่ยวข้องกับ T_1 จะได้

$$\frac{\partial J(T)}{\partial T_1} = \int \left[\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_1} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial}{\partial T_1} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial T}{\partial T_1} \frac{Q}{k} \right] dx dy \quad (2.6)$$

เนื่องจาก

$$T_{(x,y)} = N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} T_3$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial T_1} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial N_1}{\partial x}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial N_1}{\partial y} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} T_3$$

$$\frac{\partial}{\partial T_1} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial N_1}{\partial y}$$

และ

$$\frac{\partial T}{\partial T_1} = N_1$$

ขั้นที่ 4 สร้างฟังก์ชันแปรผันนี้สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถทำได้โดยแทนสมการการประมาณภายในเอลิเมนต์ลงในสมการของฟังก์ชันแปรผัน และจะได้ฟังก์ชันแปรผัน J ที่อยู่ในรูปของอนุกรม T_1, T_2, T_3 ที่จุดต่อทั้งสามจุด

$$\frac{\partial J(T)}{\partial T_1} = \int \left\{ \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} T_3 \right) \frac{\partial N_1}{\partial x} + \left(\frac{\partial N_1}{\partial y} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} T_3 \right) \frac{\partial N_1}{\partial y} - \frac{Q}{k} N_1 \right\} dx dy$$

$$\frac{Q}{k} \int_A N_1 dx dy = \int_A \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_1}{\partial y} \right] dx dy T_1 + \int_A \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} \right] dx dy T_2$$

$$+ \int_A \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_3}{\partial y} \right] dx dy T_3 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 5 ทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันแปรผัน J โคนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่จุดต่อ T_1, T_2, T_3 ซึ่งจะทำให้เกิดระบบสมการเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 3 สมการ

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

$$[K]^{(e)} \{T\}^{(e)} = \{F\}^{(e)}$$

โดย

$$K_{11} = \int_A \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_1}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.8)$$

$$F_1 = \frac{Q}{k} \int_A N_1 dx dy \quad (2.9)$$

สมการฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่เราได้สร้างมาแล้วคือ

$$N_1 = \frac{1}{2A} (a_1 + b_1 x + c_1 y) \quad (2.10)$$

ดังนั้น $\frac{\partial N_1}{\partial x} = \frac{b_1}{2A}$ และ $\frac{\partial N_1}{\partial y} = \frac{c_1}{2A}$ แทนกลับลงในสมการ จะได้

$$K_{11} = \int_A \left[\frac{b_1 b_1}{4A^2} + \frac{c_1 c_1}{4A^2} \right] dx dy$$

$$K_{11} = \frac{b_1 b_1 + c_1 c_1}{4A^2} \int_A dx dy \quad K_{11} = \frac{b_1 b_1 + c_1 c_1}{4A} \quad (2.11)$$

ทำนองเดียวกัน

$$K_{12} = \int_A \left[\frac{b_1 b_2}{4A^2} + \frac{c_1 c_2}{4A^2} \right] dx dy$$

$$K_{12} = \frac{b_1 b_2 + c_1 c_2}{4A^2} \int_A dx dy \quad ; \quad K_{12} = \frac{b_1 b_2 + c_1 c_2}{4A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$K_{13} = \int_A \left[\frac{b_1 b_3}{4A^2} + \frac{c_1 c_3}{4A^2} \right] dx dy$$

$$K_{13} = \frac{b_1 b_3 + c_1 c_3}{4A^2} \int_A dx dy \quad ; \quad K_{13} = \frac{b_1 b_3 + c_1 c_3}{4A}$$

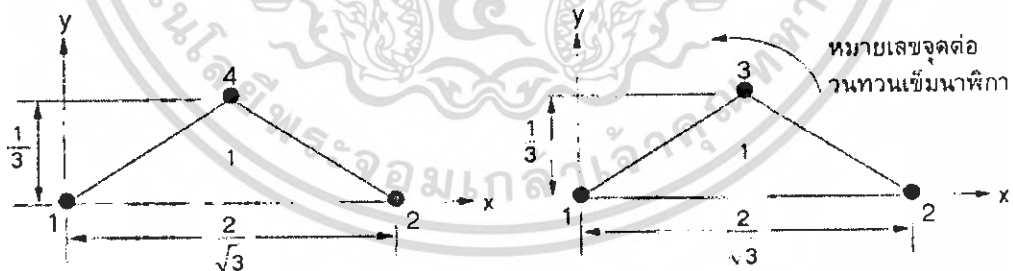
ในทำนองเดียวกัน ค่า $\frac{Q}{k}$ ในสมการเป็นค่าคงที่ที่เราจะได้

$$F_1 = \frac{Q}{k} \int_A N_1 dx dy$$

$$F_1 = \frac{Q}{k} \int_A \frac{1}{2A} (a_1 + b_1 x + c_1 y) dx dy$$

$$F_1 = \frac{QA}{k3} \quad (2.12)$$

และจากนี้เราสามารถหาสมการ Finite Element ของทุกเอลิเมนต์ในรูป 2.4 ข) ได้ หากเราพิจารณาเอลิเมนต์ที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อหมายเลข 1,2,4 เราสามารถใช้สมการ ซึ่งใช้หมายเลขจุดต่อมาตรฐาน 1,2,4 มาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของเอลิเมนต์นี้ได้ การพิจารณาจากรูปที่ 2.4



ก) หมายเลขจุดต่อจริง

ข) หมายเลขจุดต่อในสมการ(2.12)

รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์ที่ 1 กับหมายเลขของจุดต่อทั้งสาม

จากสมการที่ (2.10)

$$N_{i(x,y)} = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูป ที่ 2.4 ก และ ข เราจะพบว่า

จุดต่อ	ค่าอุณหภูมิ	ความร้อนจากภายนอก
1	$T_1 = 0$	Q_1
2	$T_2 = 0$	Q_2
3	$T_3 = 0$	Q_3
4	$T_4 = ?$	0

โดย Q_1, Q_2, Q_3 เป็นปริมาณความร้อนที่ไหลออกจากจุดต่อ 1,2,3 ตามลำดับอันเนื่องมาจากแผ่นโลหะผลิตความร้อนได้เอง ดังนั้นสมการ 2.18 จะกลายมาเป็น

$$\frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 1 & -6 \\ 1 & 4 & 1 & -6 \\ 1 & 1 & 4 & -6 \\ -6 & -6 & -6 & 18 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{9\sqrt{3}k} \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

จากนั้นเราสามารถใช้สมการสุดท้ายของระบบสมการ 2.19 หาอุณหภูมิ T_4 ที่อยู่ตำแหน่งกลางแผ่นโลหะได้

$$\frac{1}{2\sqrt{3}} (0 + 0 + 0 + 18T_4) = \frac{1}{9\sqrt{3}k} Q \quad (3)$$

$$T_4 = \frac{1}{27} \frac{Q}{k}$$

และจากนั้นใช้สามสมการแรกของระบบสมการรวม 2.19 หาปริมาณความร้อนที่ไหลออกจากจุดต่อ 1,2,3 ของแผ่นโลหะนี้ได้

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = -\frac{6}{2\sqrt{3}} T_4 - \frac{2}{9\sqrt{3}k} Q$$

$$= -\frac{1}{3\sqrt{3}} \frac{Q}{k}$$

อนึ่ง ปัญหาตัวอย่างนี้ได้ถูกแก้อีกครั้งเพื่อหาลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนแผ่นโลหะโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์คอมพิวเตอร์โปรแกรม โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 3 เอลิเมนต์เหมือนกับดังที่แสดงไว้ในตัวอย่างนี้

2.3 ทฤษฎีหม้อแปลง

2.3.1 หม้อแปลงในอุดมคติ (Ideal Transformer)[4]

ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องพยายามทำให้มีค่าสูญเสียรวมทั้งหมดน้อยที่สุด(ประสิทธิภาพสูงสุด) ทั้งนี้เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังในทางปฏิบัติแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ๆ จะมีค่าสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวดน้อย ดังนั้นจะกำหนดให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นอุดมคติ (ideal transformer) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

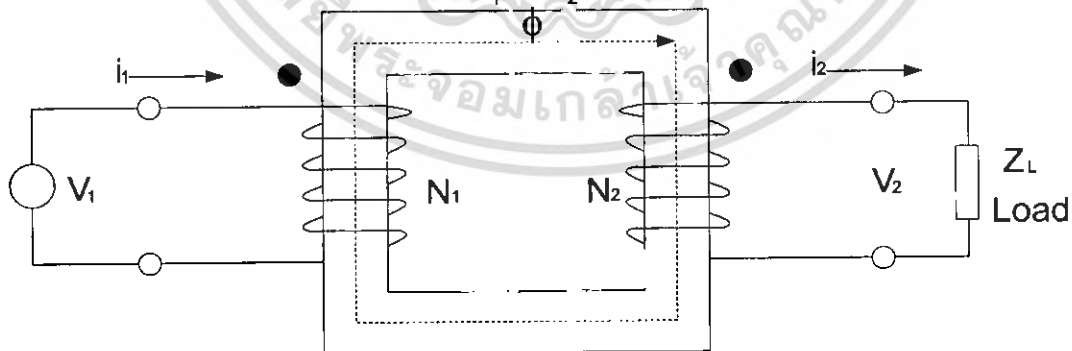
1. ค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าน้อยมากสามารถตัดไม่นำมาคิด (ไม่เกิดค่าความสูญเสียจากลวดทองแดง)
2. เส้นแรงแม่เหล็กจะเรียงตัวอยู่ในแกนแม่เหล็กและคล้องขดลวดทั้ง 2 ขดเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กรั่ว (Leakage Flux)
3. ความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิด
4. ค่า Permeability μ ของแกนเหล็กมีค่าสูงมาก ๆ ดังนั้นกระแสกระตุ้นจึงมีค่าน้อยมาก

จากรูปที่ 2.5 เมื่อเป็นหม้อแปลงทางอุดมคติจะเห็นได้ว่า $V_1 = E_1$ และ $V_2 = E_2$ ดังนั้นจะได้ค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (Voltage ratio)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.20)$$

จะทำให้ได้อัตราส่วนกระแสไฟฟ้า (current ratio) ดังนี้

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.5 หม้อแปลงในอุดมคติ

จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าดังนี้

$$V_1 I_1^* = V_2 I_2^* \quad (2.22)$$

ถ้า Z_2 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ จะได้ค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (impedance ratio)

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{1}{a} \frac{V_1}{I_1} = \frac{1}{a^2} Z_1 \quad (2.23)$$

$$Z_1 = a^2 Z_2, \quad \frac{Z_1}{Z_2} = a^2 \quad (2.24)$$

2.3.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent Circuit of Transformer)

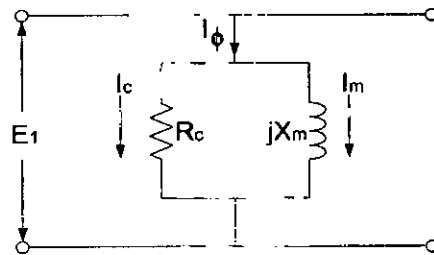
จากการพิจารณาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยกำหนดให้เป็นหม้อแปลงอุดมคตินั้นจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วนกระแสไฟฟ้า และอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการพิจารณาสรางวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง (actual transformer) ได้ในกรณีเมื่อต้องคิดถึงผลของค่ากระแสกระตุ้น I_0 ค่าสนามแม่เหล็กรั่วและค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด ในการสร้างวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเพื่ออธิบายถึงผลที่เกิดจากค่ากระแสกระตุ้นจะเห็นได้ว่าค่ากระแส I_c เป็นส่วนประกอบของ กระแสกระตุ้น I_0 ที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งเกิดขึ้นที่ด้านปฐมภูมิ ถ้ากำหนดให้ R_c เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูลของการสูญเสียในแกนเหล็ก (equivalent core loss resistance) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_c = \frac{E_1}{R_c} \quad (2.25)$$

ค่ากระแส I_m เป็นส่วนประกอบของสนามกระตุ้น I_0 ที่ทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะเป็นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ถ้ากำหนดให้ X_m เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าเสมือนสมมูลของการสร้างสนามแม่เหล็ก (equivalent magnetizing reactance) จะได้ว่า

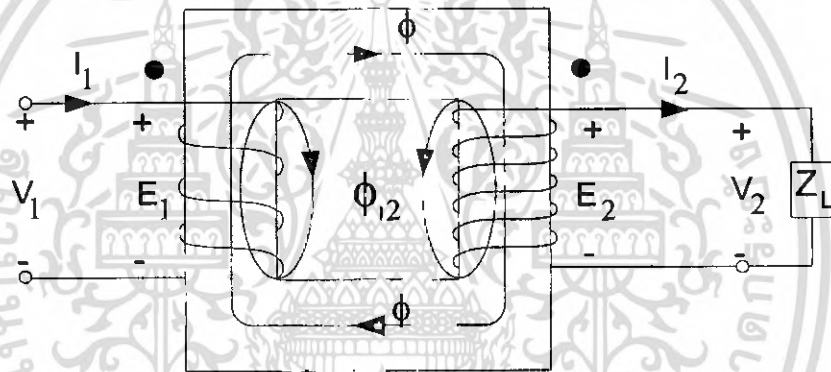
$$I_m = \frac{E_1}{jX_m} \quad (2.26)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.25) และ (2.26) สามารถแสดงเป็นรูปแบบของวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.6

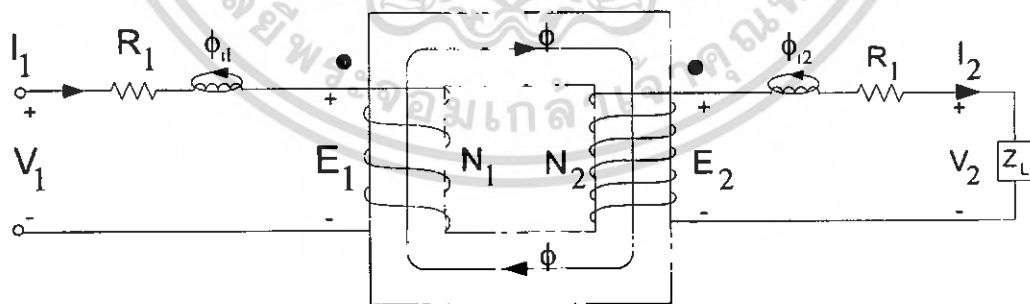


รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของค่ากระแสกระตุ้น

การสร้างวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงเพื่อใช้สำหรับการหาคุณลักษณะต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่ใช้งานสามารถเริ่มต้นจากการพิจารณาดังนี้

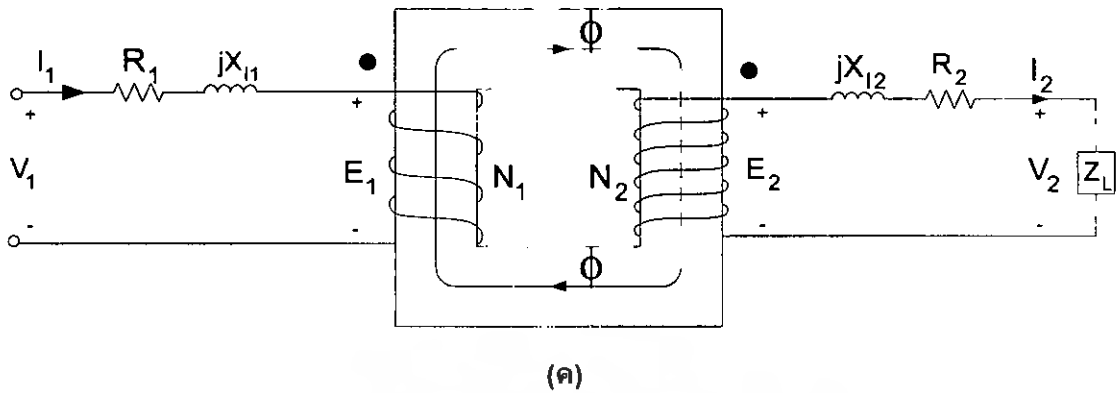


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

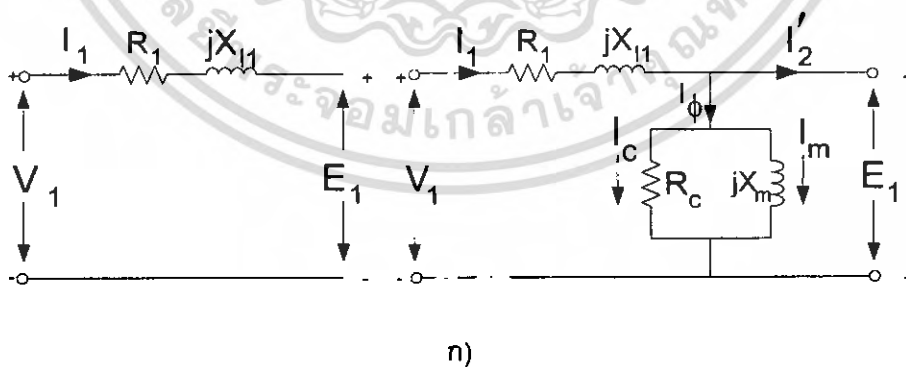


รูปที่ 2.7 แบบจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง

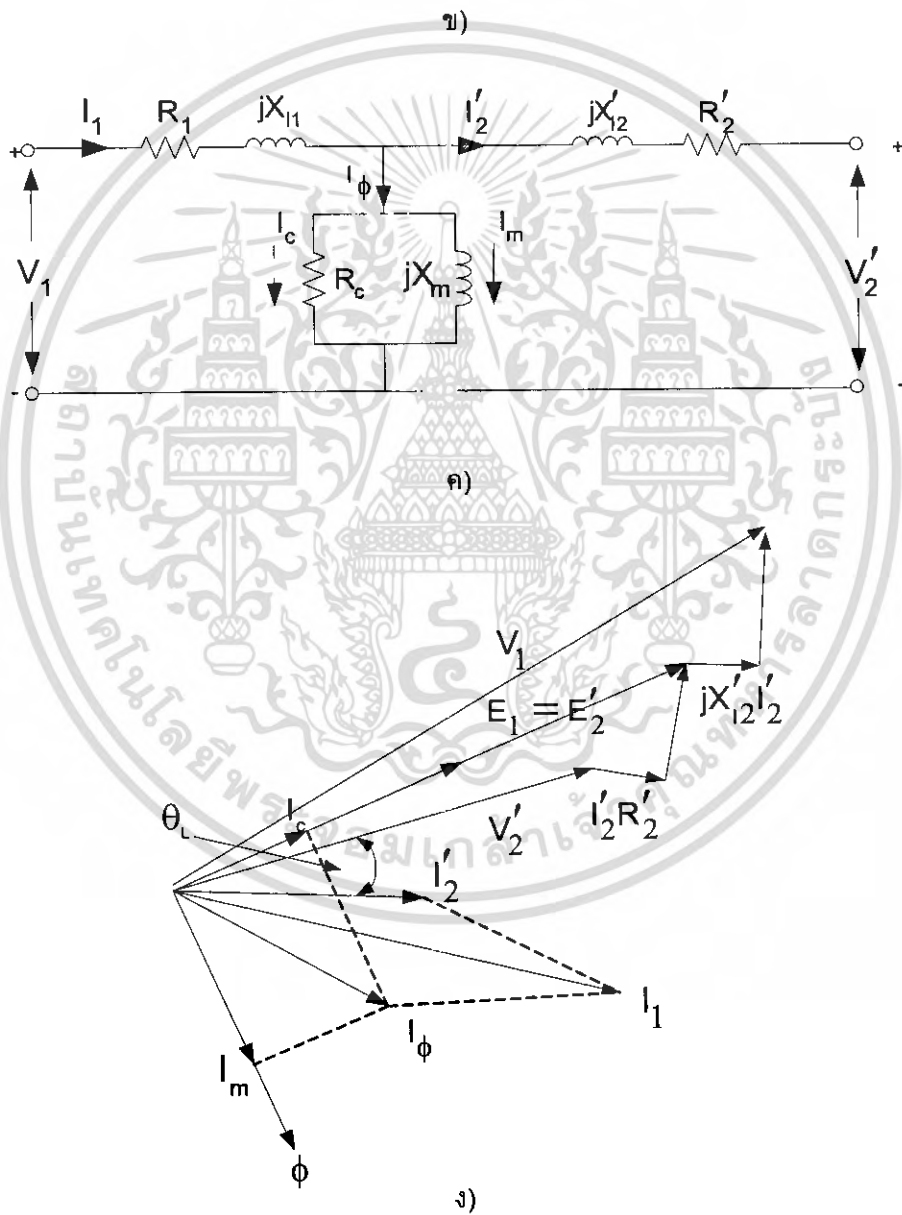
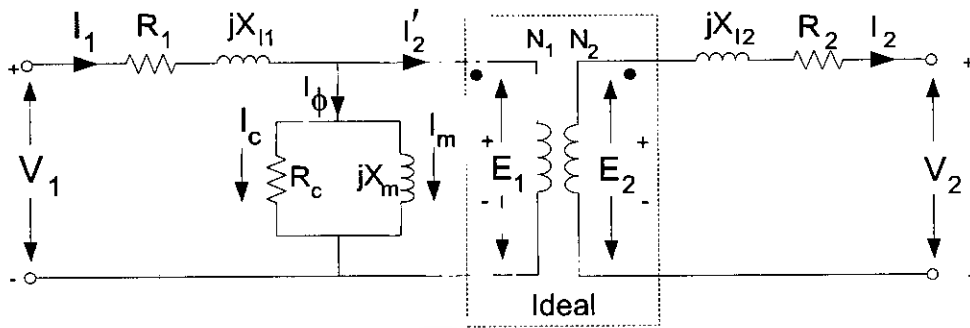
จากรูปที่ 2.7 ก) แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงขณะจ่ายภาระไฟฟ้า Z_L โดยมีการเกิดสนามแม่เหล็กทั่ว Φ เมื่อคิดถึงผลของค่าสนามแม่เหล็กทั่วและค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด จะสามารถแสดงเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 2.7 ข) และ ค)

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 สามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง (exact equivalent circuit) ได้ดังรูปที่ 2.8

- R_c : core loss resistance X_m : magnetizing reactance
- R_1 : primary resistance X_{l1} : primary leakage reactance
- R_2 : secondary resistance X_{l2} : secondary leakage reactance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 จะได้สมการคือ

$$E_1 = aE_2 = E'_2 = V'_2 + I'_2 (R'_2 + jX'_{l2}) \quad (2.27)$$

$$V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_{l1}) \quad (2.28)$$

2.4 การวัดอุณหภูมิ

2.4.1 หลักการและแบบของเทอร์โมคัปเปิล[2-3]

หลักการเทอร์โมคัปเปิลคือ การที่ลวดโลหะ 2 เส้น ต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรลวดทั้งสองตามรูปที่ 2.9 โดยปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า " ซีเบ็คโวลเตจ "

$$e_{AB} = \alpha \Delta T \quad (2.29)$$

เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่

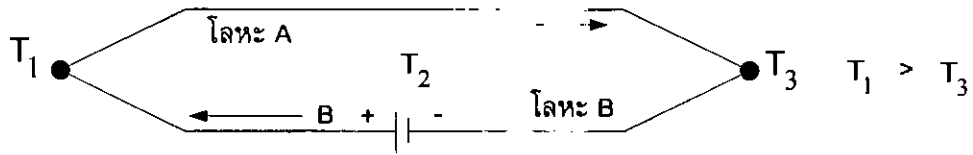
ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

e_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้

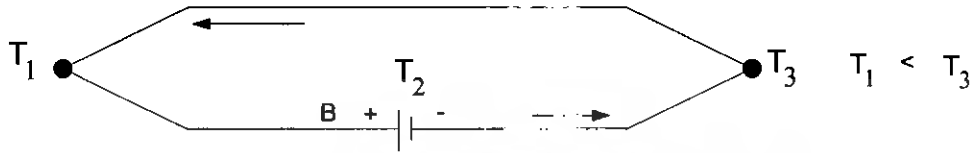
และถ้าทำการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดต่อแตกต่างกันขึ้น โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนและปลายข้างหนึ่งจะเย็นลง วงจรการทดลองจะเป็นดังรูปที่ 2.9 ลวดทั้งสองทำจากบิสมัทและแอนติโมนี



รูปที่ 2.9 วงจรการทดลองของซีเบ็ค



แหล่งจ่ายกระแสจากภายนอก



แหล่งจ่ายกระแสจากภายนอก

รูปที่ 2.10 วงจรการทดลองของเพลเทียร์

เมื่อมีกระแสจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจรจะทำให้ปลายข้างขวามีอุณหภูมิสูงขึ้นและปลายข้างซ้ายมีอุณหภูมิลดลง ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสก็จะทำให้อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองกลับกันด้วย

2.4.2 เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

ตั้งแต่ค้นพบหลักการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลนั้นรายละเอียดในหลักการได้ถูกพัฒนาให้ก้าวหน้าเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมาโดยตลอด และได้เกิดเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ

1. เทอร์โมคัปเปิลแบบ S
2. เทอร์โมคัปเปิลแบบ R
3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ B
4. เทอร์โมคัปเปิลแบบ J
5. เทอร์โมคัปเปิลแบบ K
6. เทอร์โมคัปเปิลแบบ T
7. เทอร์โมคัปเปิลแบบ E
8. เทอร์โมคัปเปิลแบบ Nonstandard

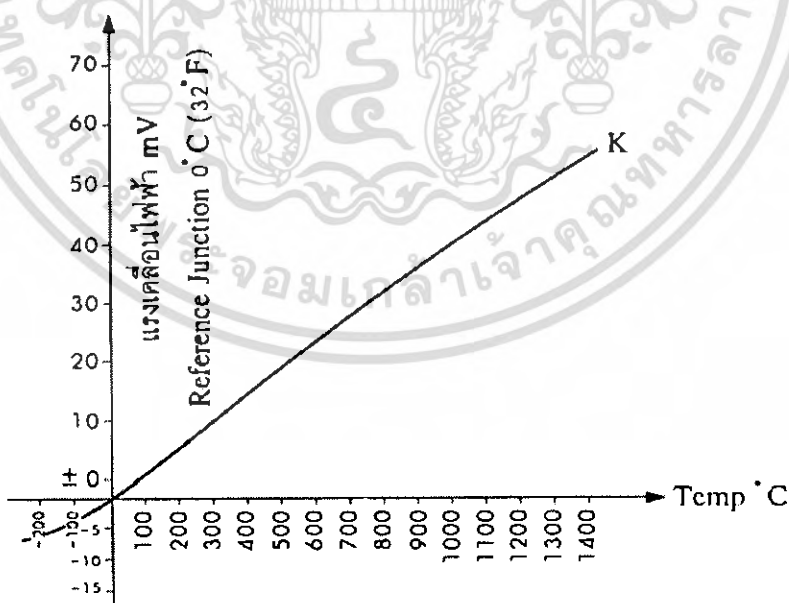
ในการวิเคราะห์ถึงปัญหาของการทดสอบนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ในการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานที่จะทำการทดสอบโดยจะกล่าวถึงลักษณะและคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K ให้ทราบพอสังเขป

2.4.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า จึงได้มีผู้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายขั้วบวกรทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 90% + โครเมียม 10% และสายขั้วลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% + 5% ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีสและซิลิคอน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นแบบมาตรฐาน K เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด สามารถใช้กับสภาวะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260°C (2300°F) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250°C (-420°F) ในสภาวะงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน คุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือให้แรงเคลื่อนเอาต์พุตสูง

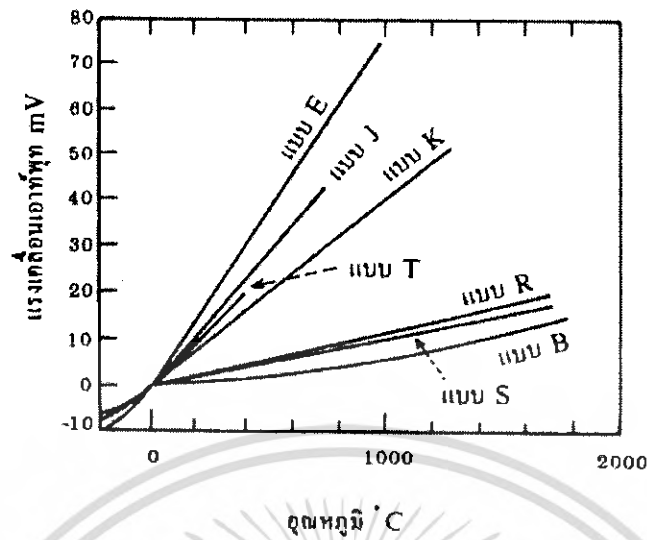
ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสกับวัตถุโดยตรงในกรณีดังต่อไปนี้

1. ในสภาวะงานที่เป็น Reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing
2. สภาวะงานที่มีไอของซิลเฟออร์ เพราะซิลเฟออร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
3. สภาวะงานที่เป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ถ้าจำเป็นต้องใช้งานเทอร์โมคัปเปิลกับสภาพดังกล่าวนี้จะต้องใช้ Protection Tube ป้องกันเสียก่อน อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K นี้ประมาณ 20 ปี เพราะหลังจากนั้นส่วนผสมจะเปลี่ยนไปโดยจะมีเหล็กเพิ่มขึ้นประมาณ 2% และส่วนผสมบางอย่าง เช่น แมงกานีส จะลดปริมาณลง



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิกับแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิด

รูปที่ 2.12 เป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยชนิด E , J , T และ K มีความชันหรือสโลปมากซึ่งจะมีความไวต่อการวัดอุณหภูมิสูง ส่วนชนิด R , S และ B มีความชันน้อยจะมีความไวต่อการวัดอุณหภูมिन้อย

สรุป เหตุที่เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ในการวัดอุณหภูมิเนื่องจากมีความทนทานสูงเหมาะกับงานที่ใช้งานเป็นเวลานานติดต่อกัน, มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง และมีราคาไม่แพงมากนัก อีกทั้งยังใช้ได้ดีในสภาวะงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนเป็นเวลานาน, มีความไวในการวัดอุณหภูมิสูงและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด

สรุปส่วนผสม, ย่านอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติเปรียบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่ได้ mV
		°C	°F	
B	พลาทินัม – 30% โรเดียม พลาทินัม – 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	-0 ถึง 13.814
R	พลาทินัม – 13% โรเดียม พลาทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-2.26 ถึง 21.108
S	พลาทินัม – 10% โรเดียม พลาทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อลูเมล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ

ตารางที่ 2.6 สภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลโดยไม่ต้องใช้ Protection tubes

ความเหมาะสมในการใช้งาน							
TC Type	บรรยากาศ oxidizing	บรรยากาศ reducing	บรรยากาศ inert	vacuum	บรรยากาศ Sulferous	อุณหภูมิ < 0°C	มีไอของโลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้นๆ	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้ ถ้า > 500°C	ไม่ได้	ได้
K	ได้*	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้+	ได้

* ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E, J และ T เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
+ โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

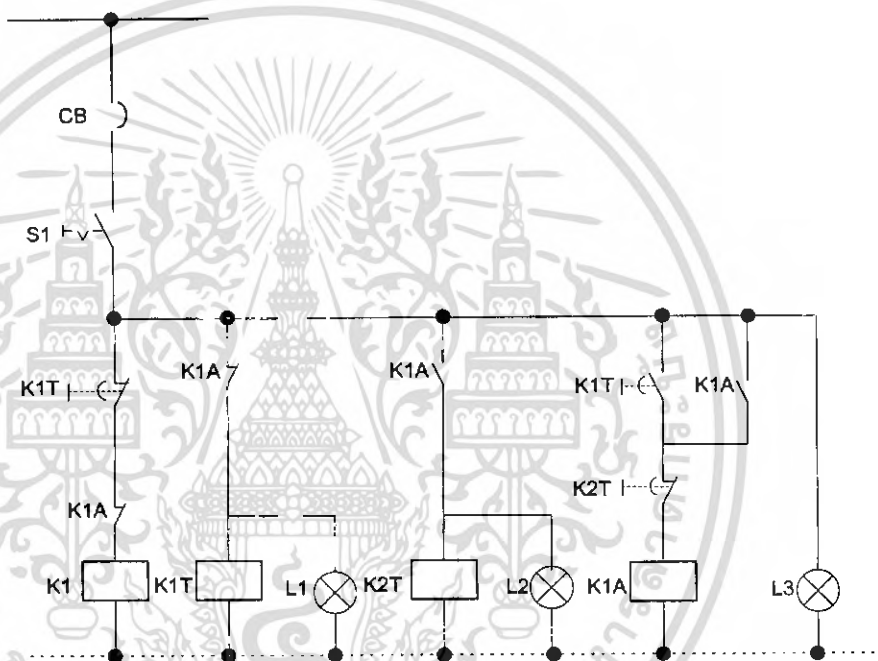
บทที่ 3

การทดสอบ

3.1 การทดสอบชุดควบคุมแรงดันกึ่งอัตโนมัติ

ชุดควบคุมแรงดันกึ่งอัตโนมัติที่ใช้จะเป็นชุดควบคุมที่มีการออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้คอนแทคเตอร์ (Contactor) และรีเลย์ตั้งเวลา (Timer Relay) เป็นตัวตัดต่อวงจร และกำหนดเวลาการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

3.1.1 แบบแสดงการทำงานของวงจรควบคุม

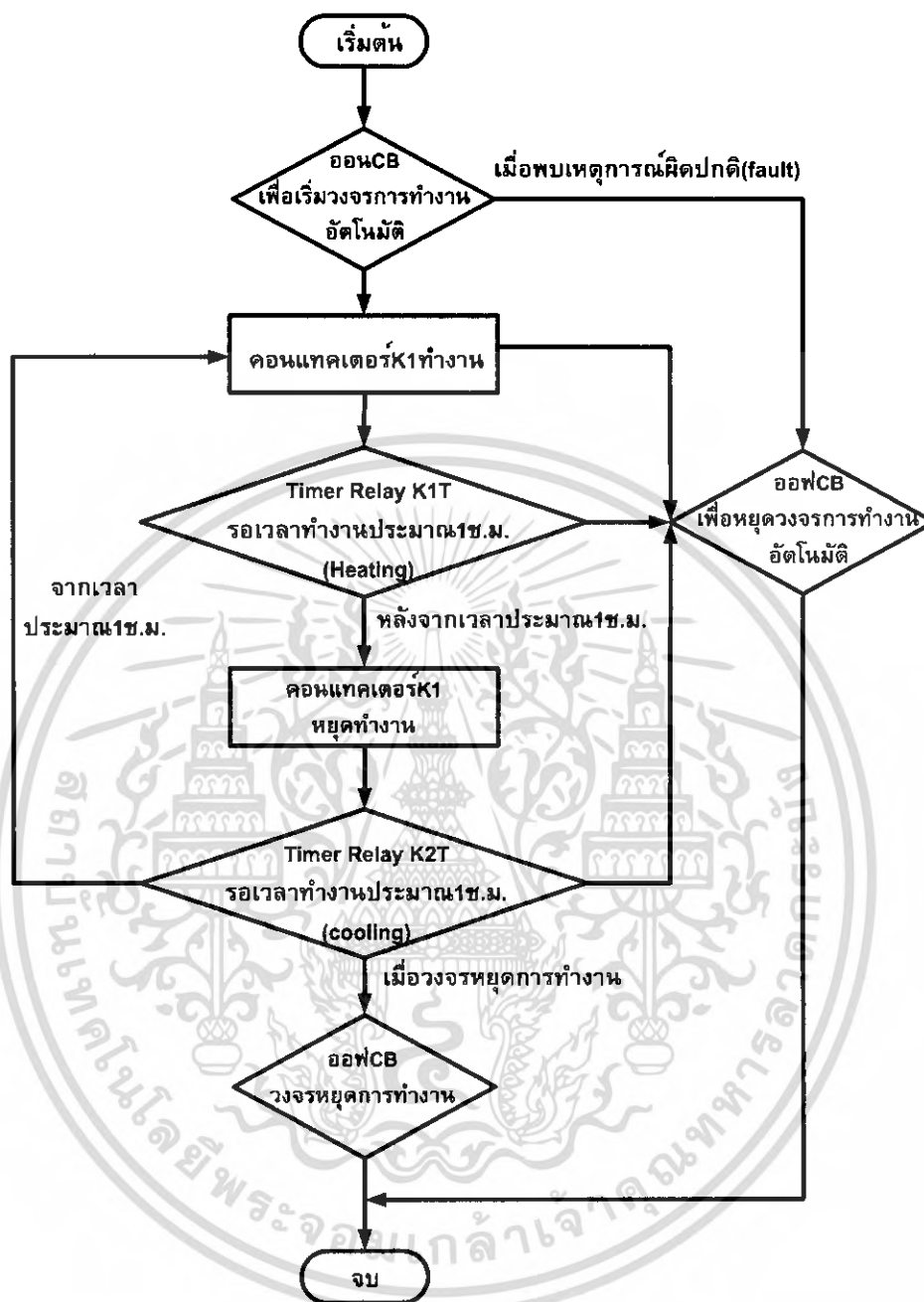


รูป 3.1 วงจรควบคุม

โดยกำหนดให้

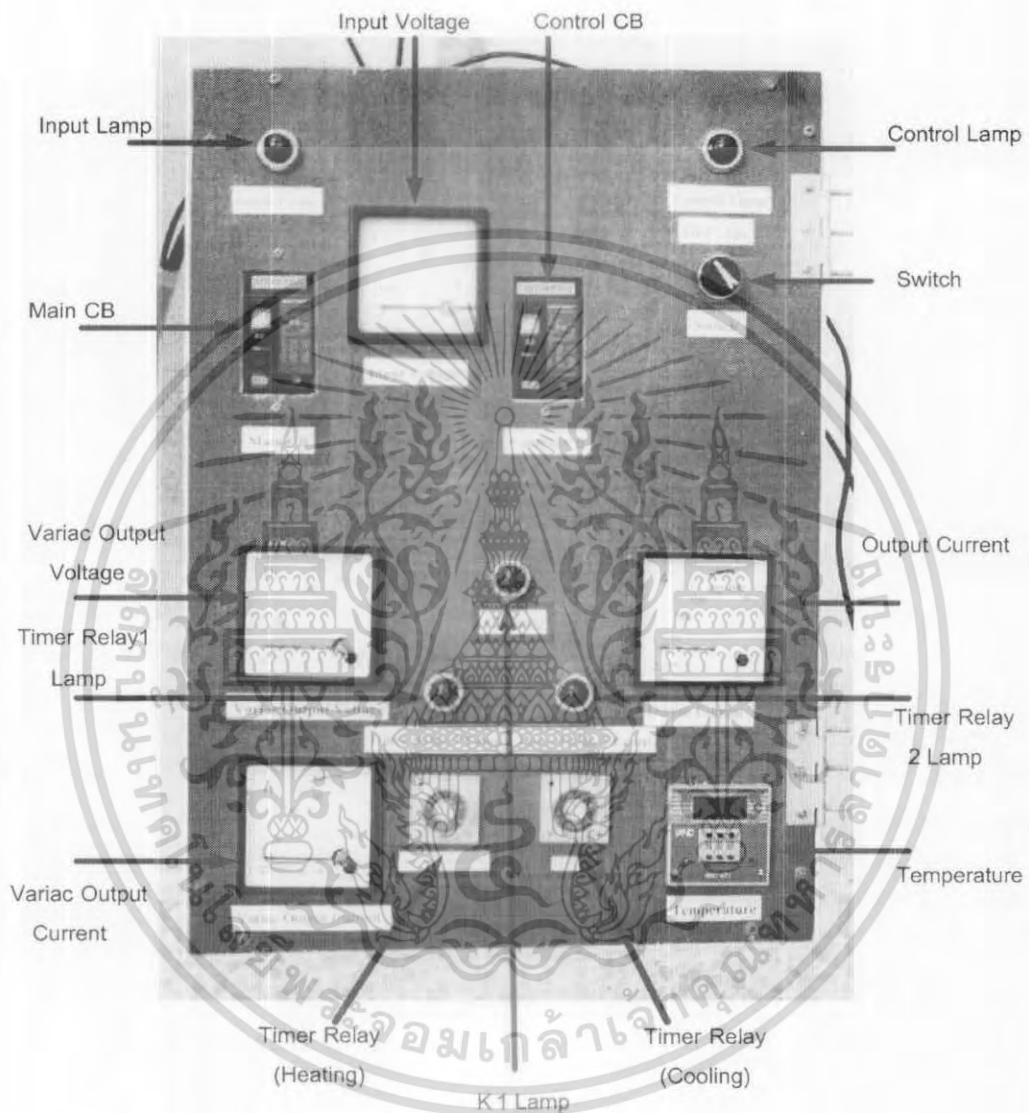
CB	คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ 40 A.T.
K1	คือ คอนแทคเตอร์ ขนาด 80 A
K1A	คือ Auxilliary Contactor ขนาด 80A
K1T	คือ รีเลย์ตั้งเวลา (Timer Relay) หน่วงเวลาการทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าป้อนขด Coil ประมาณ 1 ชั่วโมง
K2T	คือ รีเลย์ตั้งเวลา (Timer Relay) หน่วงเวลาการทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าป้อนขด Coil ประมาณ 1 ชั่วโมง
S1	คือ Selector switch
L1,L2,L3	คือ หลอดไฟแสดงสถานการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 Flowchart วงจรควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

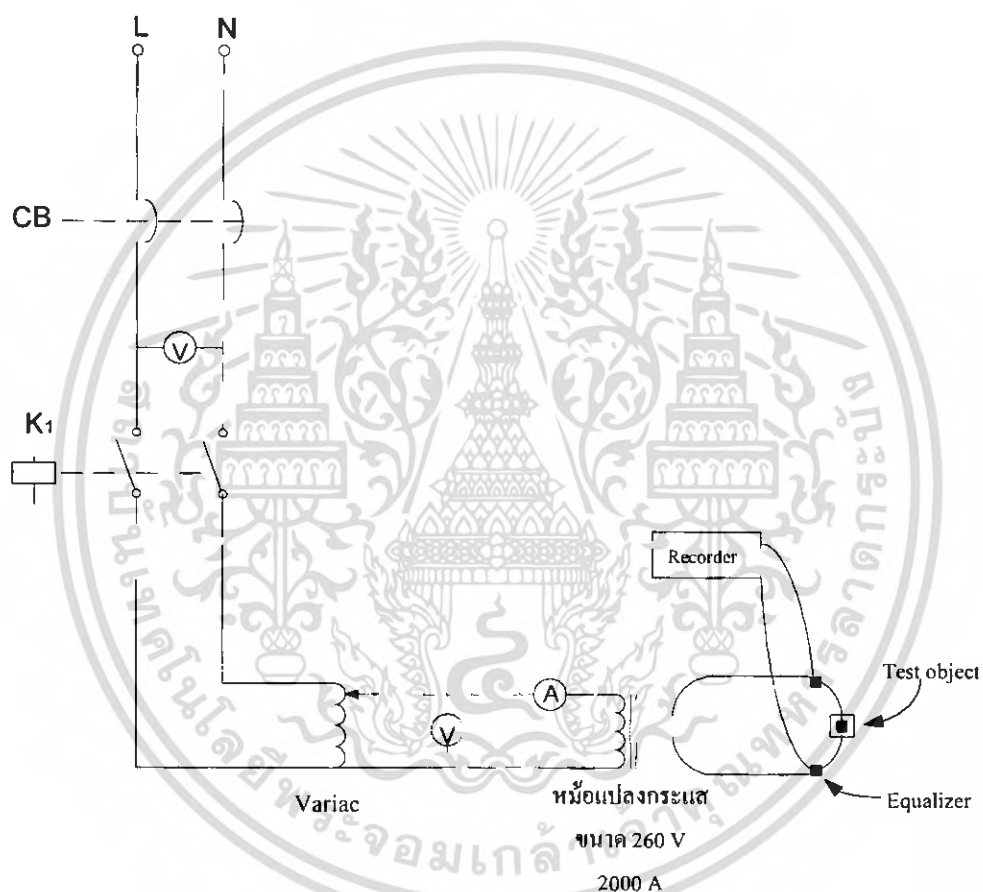


รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมแรงดันกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

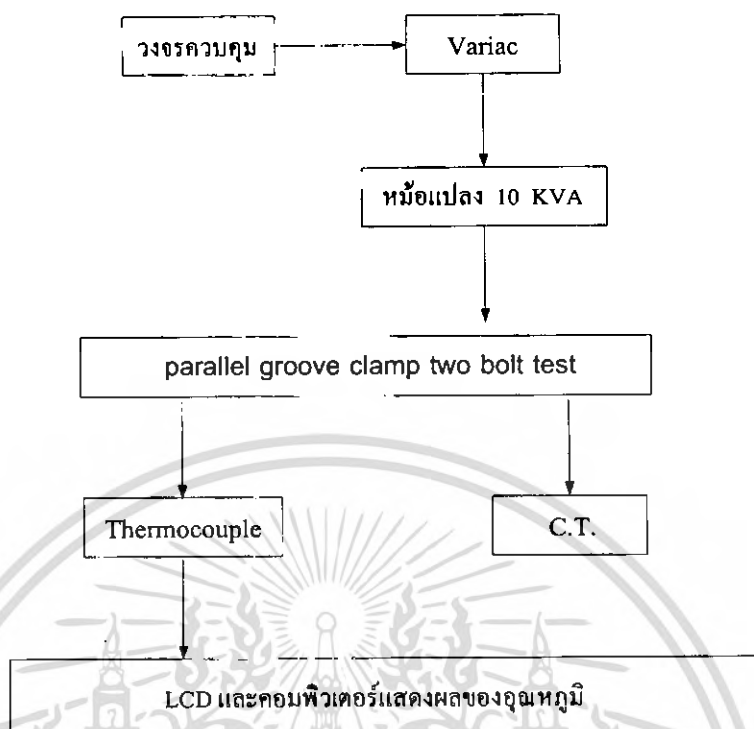
3.1.3 การทดสอบชุดคอนโทรลกับวงจรจำลอง

1. ทำการควบคุมอุณหภูมิห้องที่ใช้ทำการทดสอบให้ได้ 15 - 35 °C ตามมาตรฐานกำหนด
2. ต่อดวงจรการทดลองตามรูป



รูปที่ 3.5 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบ

3. ป้อนแรงดันให้ชุดควบคุม ส่งผ่านไปสู่ Variac
4. ปรับเวลาของ Timer Relay ทั้งช่วง on และ off ที่ชุดควบคุมให้ได้ตามเวลาที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน (1 ชั่วโมง)
5. ON ชุดควบคุมและทำการปรับ Variac เพื่อจ่ายแรงดันไปที่หม้อแปลงกระแส
6. ปรับแรงดันที่ Variac เพื่อให้กระแสไหลเข้าสู่วงจร
7. รอเวลาจน Timer ตัดการทำงาน เพื่อเข้าสู่ช่วง off
8. เมื่อเข้าสู่ช่วง Off (ผ่านมาแล้ว 1 ชั่วโมง ตามที่ได้กำหนดไว้ในข้อ 4) ให้ทำการบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ชุด Parallel groove clamp two bolt โดยใช้ชุด Recorder ในการบันทึก
9. เมื่อ Timer Relay ตัดวงจรเข้าสู่ช่วง on จึงจะครบ 1 cycle
10. ทำการ off แรงดันที่ป้อนเข้าสู่ชุดควบคุม

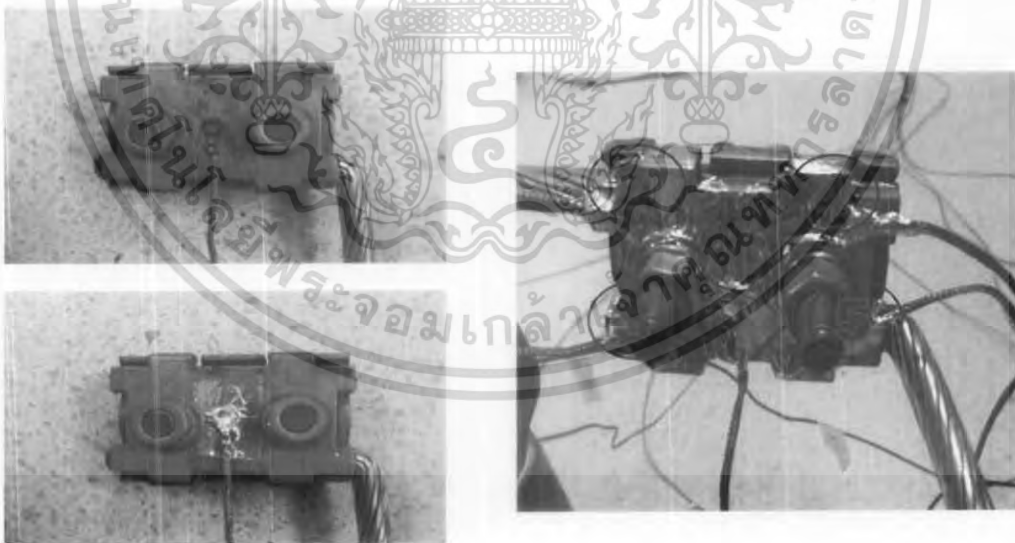
3.2 การหาจุดที่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดของ Parallel groove clamp two bolt

ในการทดสอบหาอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt แต่ละตัวนั้น จะต้องนำเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละเส้นไปติดตั้ง ณ จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดของ Parallel groove clamp two bolt ในแต่ละตัว ดังนั้นจะต้องทำการหาจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดของ Parallel groove clamp two bolt ให้ได้เสียก่อนโดยวิธีการดังต่อไปนี้

การทดสอบ

นำเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้ง 5 เส้นมาติดตั้งบน Parallel groove clamp two bolt ตัวเดียวกันที่จุดต่างๆดังรูปที่ 3.7 แล้วทำการทดสอบตามมาตรฐานประมาณ 1 ชั่วโมง โดยดูผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดเปรียบเทียบกับว่า ณ จุดใดมีอุณหภูมิสูงสุด โดยค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลนี้จะทำการบันทึกผลโดยใช้ Temperature Recorder

หลังจากที่ได้ข้อมูลของอุณหภูมิจาก Temperature Recorder มาแล้วจะนำข้อมูลที่ได้อ่านไปเขียนกราฟเพื่อเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น



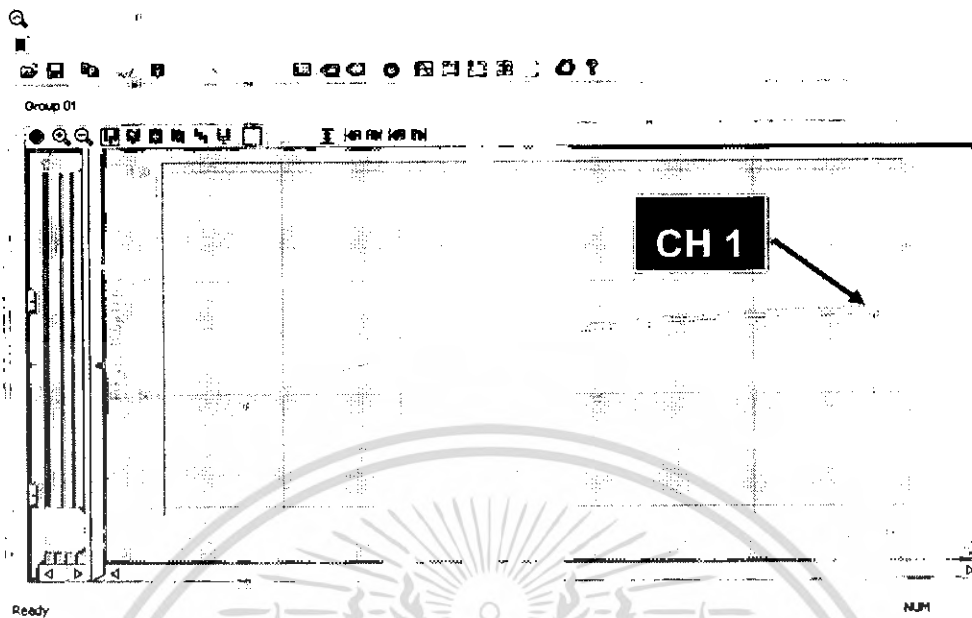
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวางเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ จุดต่างๆบน Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ Parallel groove clamp two bolt ทุกๆ 5 นาที

เวลา	อุณหภูมิของแต่ละ Channel ($^{\circ}\text{C}$)				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
18:19	27.3	27.3	27.1	27.1	27.9
18:24	40.9	39.6	39.9	40.4	41.1
18:29	52.1	50.1	51.0	51.4	52.1
18:34	60.4	57.7	58.8	59.0	59.5
18:39	67.6	64	65.7	66.4	66.7
18:44	72.6	68.5	70.6	71.1	71.5
18:49	76.0	71.5	73.7	74.3	74.3
18:54	79.9	75.6	77.7	78.5	79.2
18:59	82.9	78.0	80.5	80.9	81.6
19:04	85.0	79.4	82.4	82.7	83.2
19:09	86.6	81.3	84.0	84.5	85.0
19:14	86.9	81.8	83.4	84.4	83.9
19:19	87.9	82.1	85.2	85.7	85.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt

จากรูปที่ 3.8 กราฟอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt จะสังเกตเห็นว่า จุดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ CH1 จะมีอุณหภูมิสูงที่สุด ดังนั้นในการทดสอบจริงจะทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ ณ จุดนี้

3.3 วงจรจำลองการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบจริง ต้องทำการจำลองวงจรการทดสอบขึ้นมาก่อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

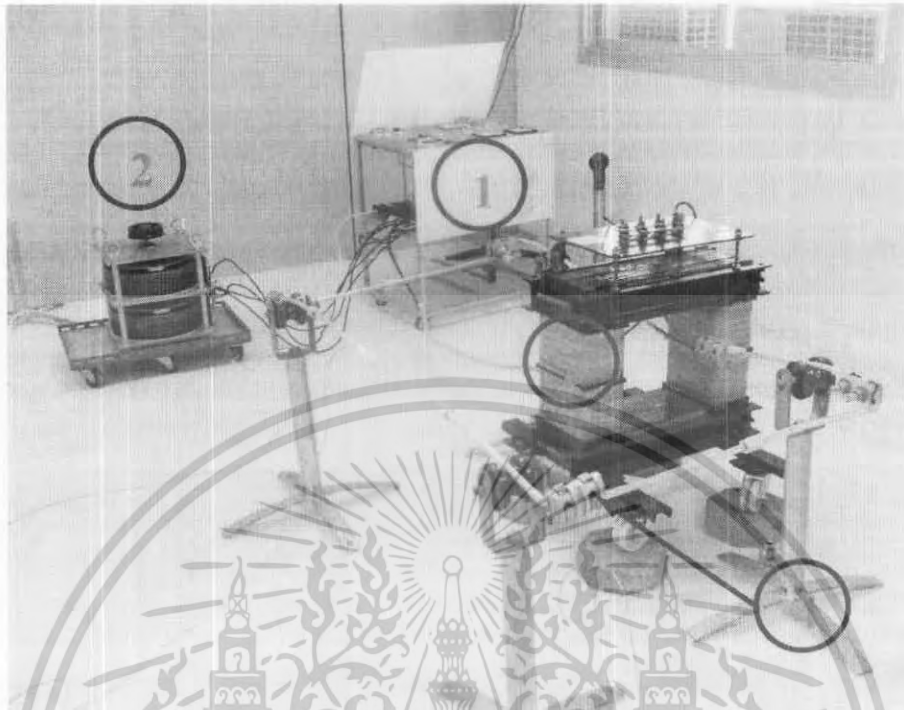
1. เพื่อให้เกิดทักษะในการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละตัว
2. เพื่อลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อทำการทดสอบจริง
3. เพื่อที่จะได้เรียนรู้ถึงปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้กับการทดสอบใน

วงจรจริง

รูปแบบของวงจรจำลอง

ในวงจรการจำลองจะนำอุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในวงจรจริง ซึ่งอาจจะเป็นอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วก็ได้ โดยนำอุปกรณ์มาต่อเป็นลูปตามความเหมาะสมแล้วจึงทำการทดสอบตามมาตรฐาน เพื่อหาค่าอุณหภูมิและความต้านทาน ที่เกิดขึ้นกับวงจรทดสอบ ซึ่งในการทดสอบวงจรจำลองจะทำพร้อมๆกันกับการทดสอบชุดควบคุม การทดสอบหาจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดของ Parallel groove clamp two bolt และการทดสอบ ชุด Temperature Recorder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรจำลองการทดสอบเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดสอบจริง

- 1 คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง 2000 A
- 2 คือ Variac 1 Phase 0-220 V
- 3 คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง 2000 A.
- 4 คือ Parallel groove clamp two bolts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดสอบ Parallel groove clamp two bolts ตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004

การทดสอบ Parallel groove clamp two bolt ตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบคือ

1. การทดสอบทางไฟฟ้า
2. การทดสอบทางกล

3.4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์

- จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ เช่น Parallel groove clamp two bolt และ สายตัวนำ โดยในวงจรที่จะทำการทดสอบนั้นจะประกอบด้วย Parallel groove clamp two bolt จำนวน 4 ตัว และ Equalizer ที่ต่อเข้ากับตัวนำ

- ทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อไม่ให้มีสิ่งสกปรกปะปนกับหน้าสัมผัส ซึ่งจะก่อให้เกิดความต้านทานขึ้นในวงจรการทดสอบ

- ประกอบวงจรที่ใช้ในการทดสอบโดยควรประกอบวงจรที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะประกอบเป็นรูปคล่องผ่านหม้อแปลง



ก)

ข)

รูปที่ 3.10 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบและทำความสะอาด

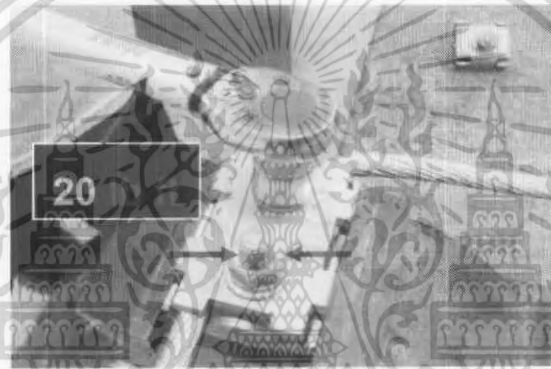
ก) ทำความสะอาด Parallel groove clamp two bolt

ข) ทำความสะอาด สายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

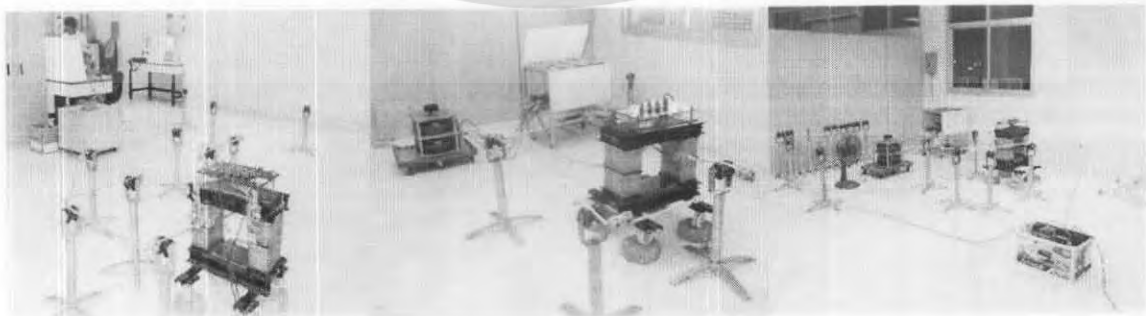


รูปที่ 3.11 การประกอบ Equalizer กับสายตัวนำ



รูปที่ 3.12 การขันน็อตโดยใช้ Torque wrench ที่ Parallel groove clamp two bolt
(ตารางที่ ก.2 ค่าแรงบิด)

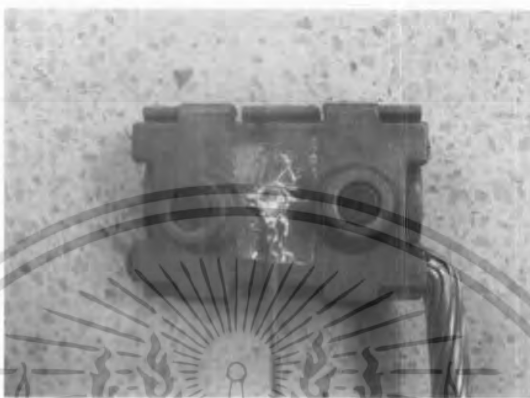
- การประกอบวงจรนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าแรงบิดที่ใช้ขันตัว Parallel groove clamp two bolt เข้ากับสายตัวนำ เพราะถ้าค่าแรงบิดที่ใช้ไม่สามารถทำให้อุปกรณ์ยึดจับกับตัวนำไม่สนิทนั้น จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นกับวัตถุทดสอบนั้นมีค่าสูงและส่งผลถึงความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 3.13 วงจรสำเร็จที่ใช้ในการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ในการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt จะทำการบันทึกอุณหภูมิของวัตถุทดสอบ ดังนั้นจึงใช้ Thermocouple มาช่วยในการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดย Thermocouple จะติดตั้งในส่วนของวัตถุทดสอบ ณ จุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงที่สุดซึ่งจุดที่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดได้ทำการทดสอบมาเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.14 การติดตั้ง Thermocouple ที่ Parallel groove clamp two bolt

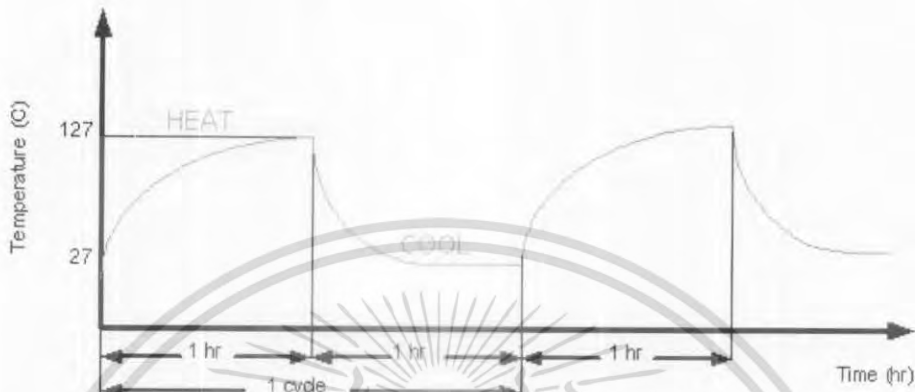


รูปที่ 3.15 การติดตั้ง Thermocouple กับวัตถุทดสอบทั้งวงจร

3.4.2 การทดสอบทางไฟฟ้า

- การทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004 โดยจ่ายกระแสให้กับวงจรที่ทำการทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และหยุดจ่ายกระแสประมาณ 1 ชั่วโมง ช่วงที่จ่ายกระแสประมาณ 1 ชั่วโมงและหยุดจ่ายกระแสประมาณ 1 ชั่วโมงนั้นจะนับเป็น 1 cycle เมื่อเริ่มจ่ายกระแสให้กับวงจรใหม่จะนับเป็น cycle ที่ 2 การทดสอบจะทำการทดสอบตาม Class ที่ต้องการทดสอบ โดยกระแสที่จ่ายให้กับวงจรการทดสอบนั้นใช้ค่าจากมาตรฐานที่แนะนำไว้ ยกตัวอย่างเช่น ที่ตัวนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 95 sq.mm. จะใช้กระแสที่ 380 A แต่บางกรณีได้เพิ่มค่าของกระแสจากเดิมไปที่ประมาณ 400 A จะทำการเปลี่ยนแปลงกระแสในช่วง 25 cycle แรกเท่านั้นเพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิโดยรอบๆและอุณหภูมิที่ตัว control conductor ให้ต่างกัน 100-105 °C



รูปที่ 3.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเวลาใน 1 cycle เมื่ออุณหภูมิขณะทำการทดลอง เป็น 27 °C



รูปที่ 3.17 การวัดค่าความต้านทาน

วิธีการวัดค่าความต้านทานโดยใช้วิธี V-I method

- การวัดค่าความต้านทานจะทำการวัดค่าความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt ที่อยู่ในระบบ การวัดค่าความต้านทานนั้นจะวัดที่ตัว Equalizer ติดตั้งอยู่กับตัวนำ โดยใช้วิธี V-I method และคำนวณค่าความต้านทานออกมา

- การบันทึกผลของค่าความต้านทาน จะบันทึกผลในช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุทดสอบทุกตัวลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิโดยรอบของห้อง และจะบันทึกค่าความต้านทานทุกๆ 25 cycle ที่ทำการทดสอบ

- ค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานของวัตถุทดสอบที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ว่าวัตถุที่ทดสอบนั้นผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดสอบทางกล

3.4.3.1 การทดสอบแรงบิด (Torque)

- เป็นการทดสอบความคงทนของ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004 การทดสอบโดยเพิ่มแรงบิดที่น้อยซึ่งค่าของแรงบิดที่ใช้จะพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของนอตตั้งรูป



รูปที่ 3.18 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อเลือกค่าแรงบิดตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004

- ค่าแรงบิดที่ใช้การทดสอบต้องมีค่าที่ 120 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดตามที่มาตรฐานกำหนด (ตารางที่ ก.2 ค่าแรงบิด) โดยประกอบตัวนำเข้ากับ Parallel groove clamp two bolt ในขณะที่ทำการทดสอบ ทำการบิด Parallel groove clamp two bolt ให้ ล้อยู่กับที่โดยใช้ปากกาวัดชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการทดสอบแรงบิดโดยใช้ Torque Wrench ด้วยค่าแรงบิด 120 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงบิดตามที่มาตรฐานกำหนด ถ้าในการทดสอบเกิดมีรอยแตกร้าวหรือเกิดความเสียหายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าขึ้นกับ Parallel groove clamp two bolt แสดงว่าไม่ผ่านข้อกำหนดของมาตรฐาน



รูปที่ 3.19 การทดสอบแรงบิดตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004

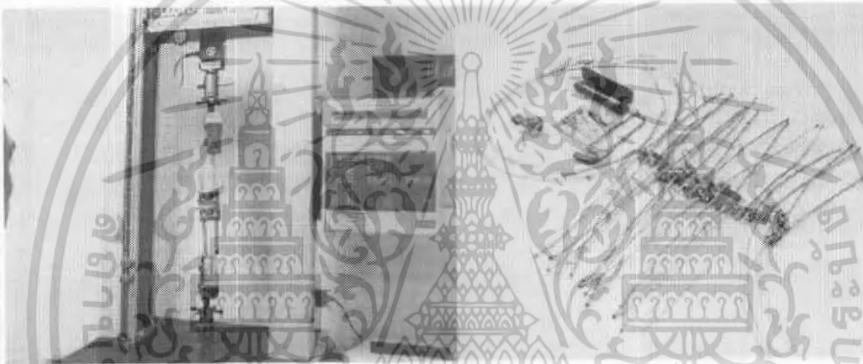
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Strength)

การทดสอบแรงดึงของ connection reusability ของผลกระทบทางด้านความแข็งแรงของ line conductor ระดับของแรงดึง แบ่งออกเป็น 3 ระดับ

- 1.ระดับ 1 แรงดึงสูงสุด $\geq 95\%$ ของจุดที่อ่อนแอที่สุดของตัวนำคือจุดต่อ
- 2.ระดับ2 แรงดึงเฉพาะบางส่วน $\geq 40\%$ ของพิกัดความแข็งแรงของตัวนำที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่จุดต่อของตัวนำ
- 3.ระดับ3 แรงดึงต่ำสุด $\geq 5\%$ ของพิกัดความแข็งแรงของตัวนำที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่จุดต่อของตัวนำ

(ดูที่ภาคผนวก ก. Table I Rate tensile strength of conductor)



รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบแรงดึง

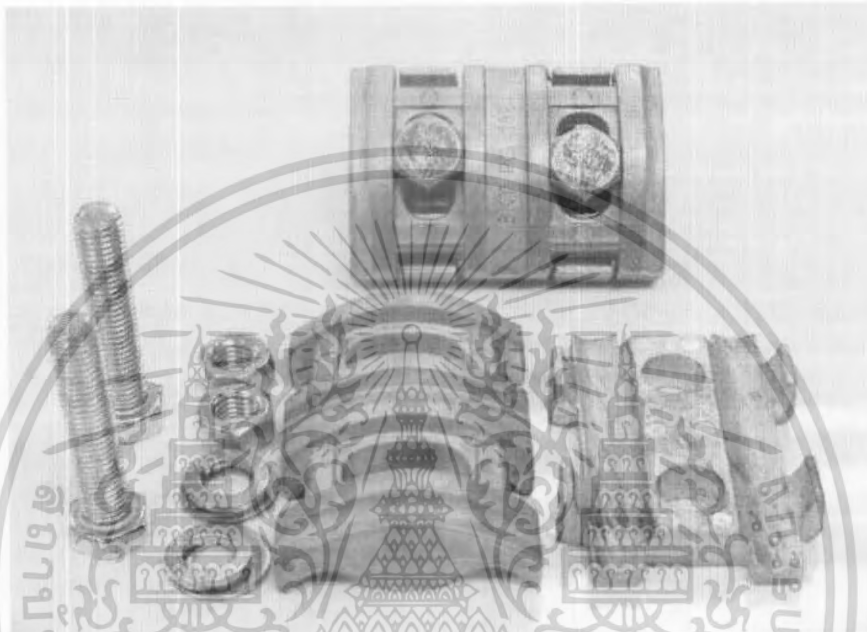
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ผลการทดสอบ

3.5.1 การทดสอบ connector กับสายตัวนำขนาด 95 SQ.MM.

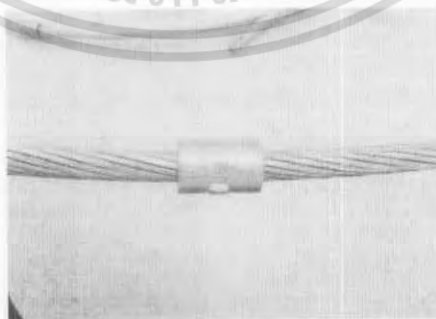
1 วัสดุทดสอบ

1. Parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 sq.mm



รูปที่ 3.21 Parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 sq.mm

2. Bare stranded aluminum conductors size 95 sq.mm



รูปที่ 3.22 Bare stranded aluminum conductors size 95 sq.mm

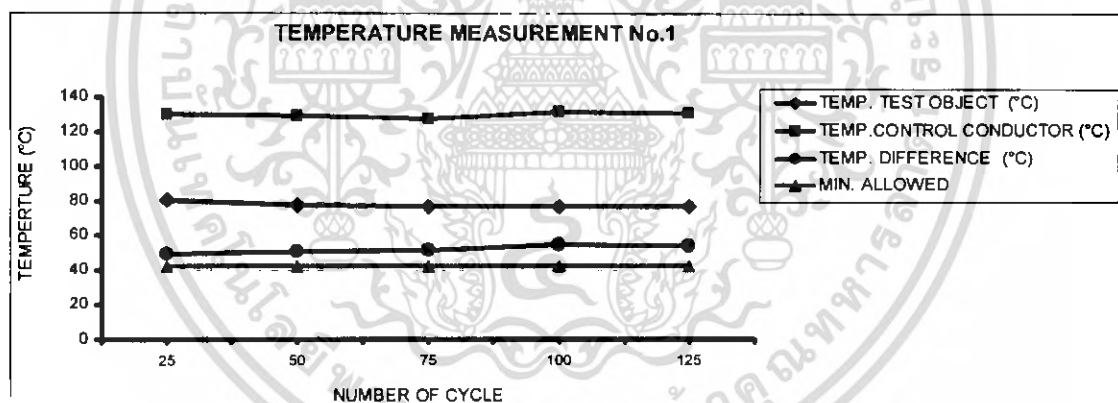
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ผลการทดสอบ

2.1 ผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.2 ผลอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 1

OBJECT NO. 1	Parallel groove clamp two bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
CURRENT (A)	407.23	405.13	403.80	406.30	401.92
AMBIENT (°C)	27.10	27.10	27.20	26.70	27.00
TEMP.CONTROL CONDUCTOR (°C)	130.38	129.07	128.05	131.29	130.95
TEMP. TEST OBJECT (°C)	80.94	77.97	76.58	76.63	77.19
TEMP. DIFFERENCE (°C)	49.44	51.10	51.47	54.66	53.76
MIN. ALLOWED	AVERAGE TEMP.DIFFERENCE - 10 (°C)				
TEMP. DIFFERENCE (°C)	52.08 -10 = 42.08				



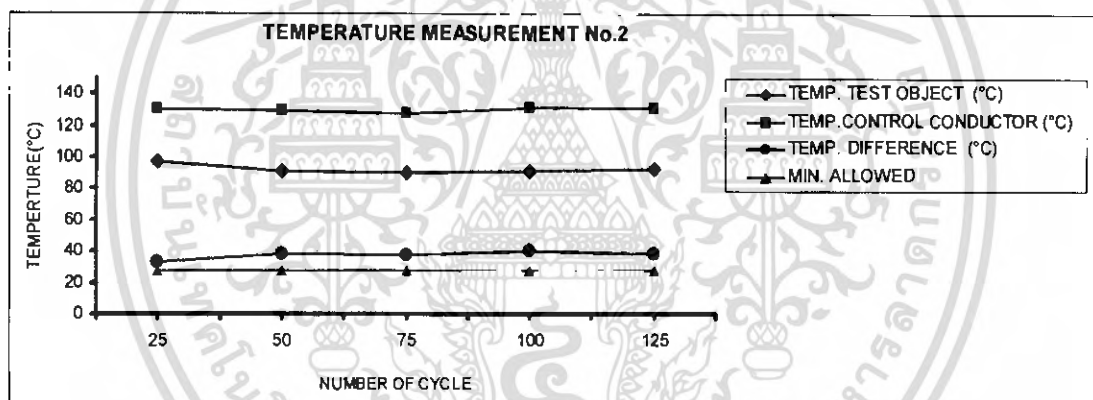
RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4-2004)

All value of Temperature Difference (°C) more than Min Allowed of Temp Difference (°C)

รูปที่ 3.23 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 1

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 2

OBJECT NO.2		Parallel groove clamp two bolt				
NUMBER OF CYCLE		25	50	75	100	125
CURRENT (A)		398.60	396.20	396.10	397.30	395.60
AMBIENT (°c)		27.95	27.77	27.95	28.25	27.98
TEMP.CONTROL CONDUCTOR (°c)		130.38	129.07	128.05	131.29	130.95
TEMP. TEST OBJECT (°c)		97.22	90.66	90.32	91.06	92.48
TEMP. DIFFERENCE (°c)		33.16	38.41	37.73	40.23	38.47
MIN. ALLOWED	AVERAGE TEMP.DIFFERENCE - 10 (°C)					
TEMP. DIFFERENCE (°c)	37.60-10 = 27.60					



RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4-2004)

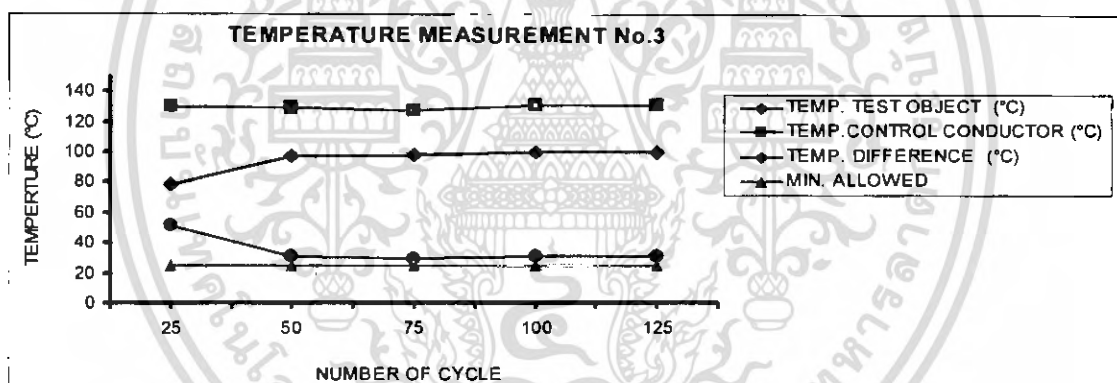
All value of Temperature Difference (°C) more than Min Allowed of Temp Difference (°C)

รูปที่ 3.24 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 3

OBJECT NO. 3	Parallel groove clamp two bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
CURRENT (A)	398.60	396.20	396.10	397.30	395.60
AMBIENT (°C)	27.33	27.77	27.95	28.25	27.98
TEMP.CONTROL CONDUCTOR (°C)	129.98	129.07	128.05	131.29	130.95
TEMP. TEST OBJECT (°C)	96.95	97.38	98.43	100.31	99.68
TEMP. DIFFERENCE (°C)	33.02	31.69	29.62	30.97	31.27
MIN. ALLOWED	AVERAGE TEMP.DIFFERENCE - 10 (°C)				
TEMP. DIFFERENCE (°C)	35.15 - 10 = 25.15				



RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4-2004)

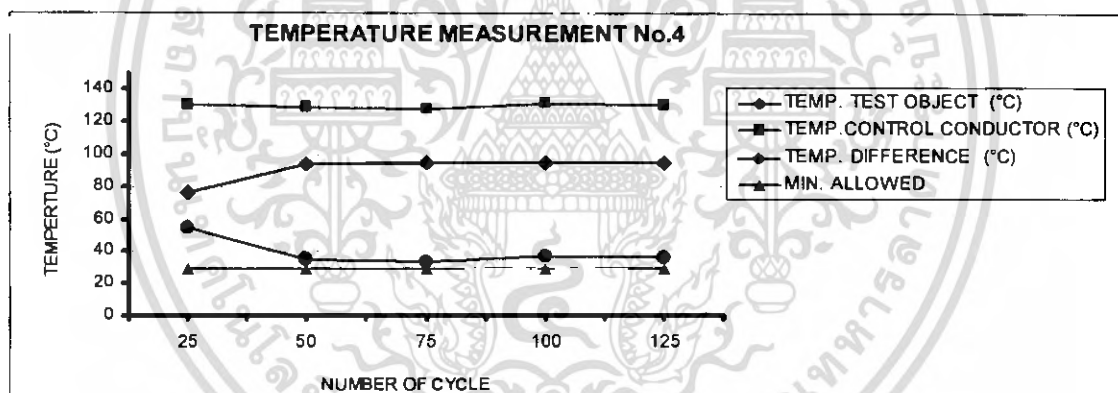
All value of Temperature Difference (°C) more than Min Allowed of Temp Difference (°C)

รูปที่ 3.25 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 4

OBJECT NO. 4		Parallel groove clamp two bolt				
NUMBER OF CYCLE		25	50	75	100	125
CURRENT (A)		398.60	396.20	396.10	397.30	395.60
AMBIENT (°C)		27.95	27.77	27.95	28.25	27.98
TEMP.CONTROL CONDUCTOR (°C)		130.38	129.07	128.05	131.29	130.95
TEMP. TEST OBJECT (°C)		78.16	97.38	98.43	100.31	99.68
TEMP. DIFFERENCE (°C)		52.22	31.69	29.62	30.97	31.27
MIN. ALLOWED	(AVERAGE TEMP.DIFFERENCE - 10 (°C))					
TEMP. DIFFERENCE (°C)	35.15-10 = 25.15					



RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4-2004)

All value of Temperature Difference (°C) more than Min Allowed of Temp Difference (°C)

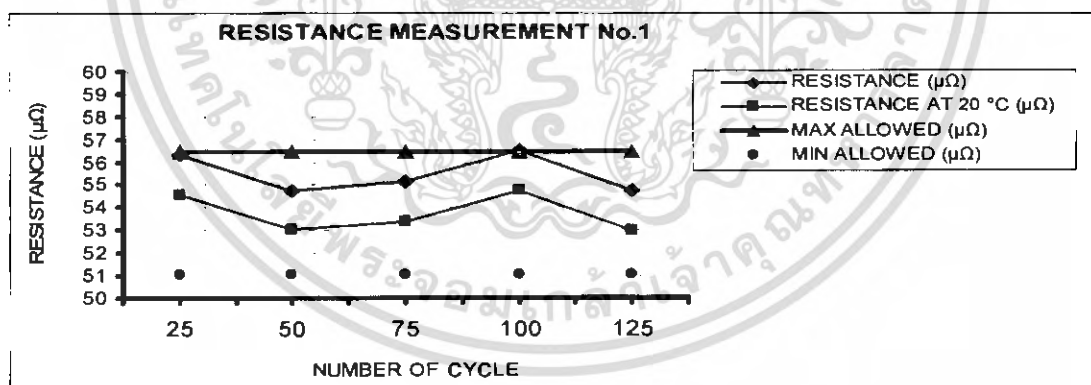
รูปที่ 3.26 กราฟอุณหภูมิของ Parallel groove clamp two bolt SIZE 50 -185 sq.mm. No. 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลของความต้านทาน

ตารางที่ 3.6 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 1

OBJECT No.1	Parallel Groove Clamp Two Bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
TEMP OBJECT (°C)	27.30	27.40	27.50	27.50	27.50
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	56.36	54.76	55.12	56.52	54.72
RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	54.57	53.02	53.37	54.73	52.99
AV. RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	53.74				
MAX ALLOWED ($\mu\Omega$)	56.42				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	51.05				
MIN ALLOWED	51.05				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	51.05				



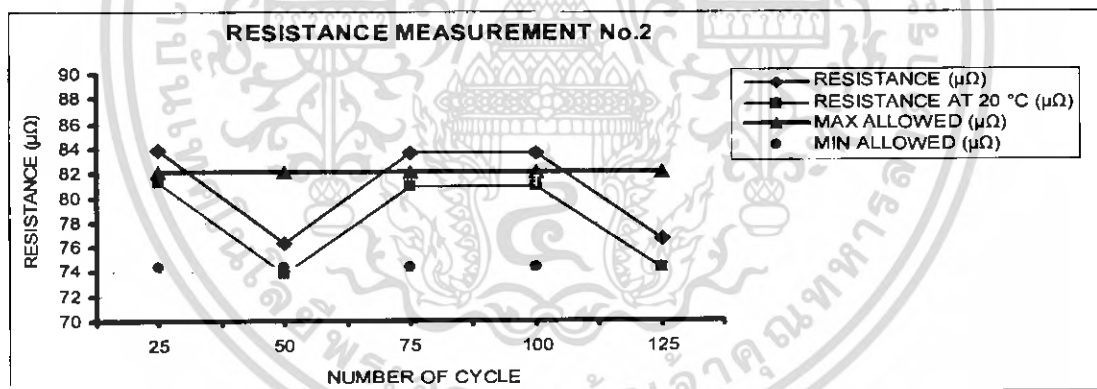
RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4-2004)

รูปที่ 3.27 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.7 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 2**

OBJECT No.2	Parallel Groove Clamp Two Bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
TEMP OBJECT (°C)	27.30	27.40	27.40	27.50	27.50
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	83.93	76.29	83.65	83.65	76.70
RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	81.24	73.84	80.97	80.97	74.24
AV. RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	78.25				
MAX ALLOWED ($\mu\Omega$)	82.16				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)					
MIN ALLOWED	74.34				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)					



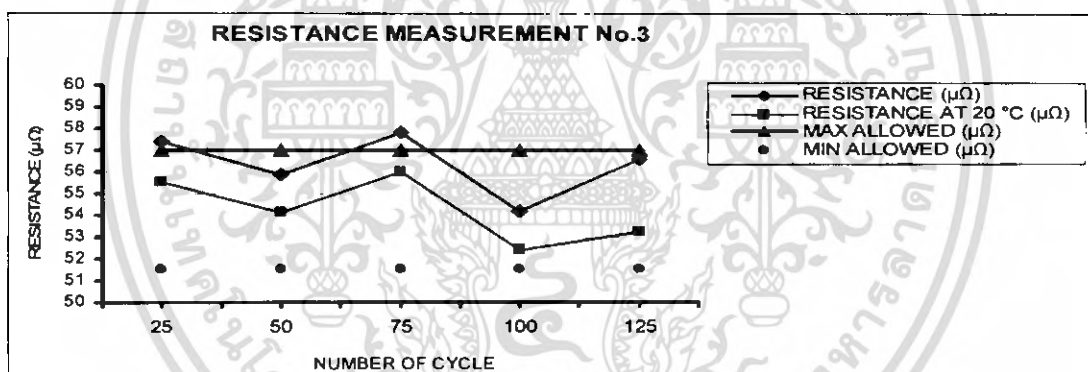
RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4 -2004)

**รูปที่ 3.28 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 3

OBJECT No.3	Parallel Groove Clamp Two Bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
TEMP OBJECT (°C)	27.20	27.20	27.30	27.30	27.30
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	57.38	55.88	57.84	54.16	56.57
RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	55.54	54.09	55.99	52.42	53.25
AV. RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	54.26				
MAX ALLOWED ($\mu\Omega$)	56.97				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	51.55				
MIN ALLOWED RESISTANCE ($\mu\Omega$)	51.55				



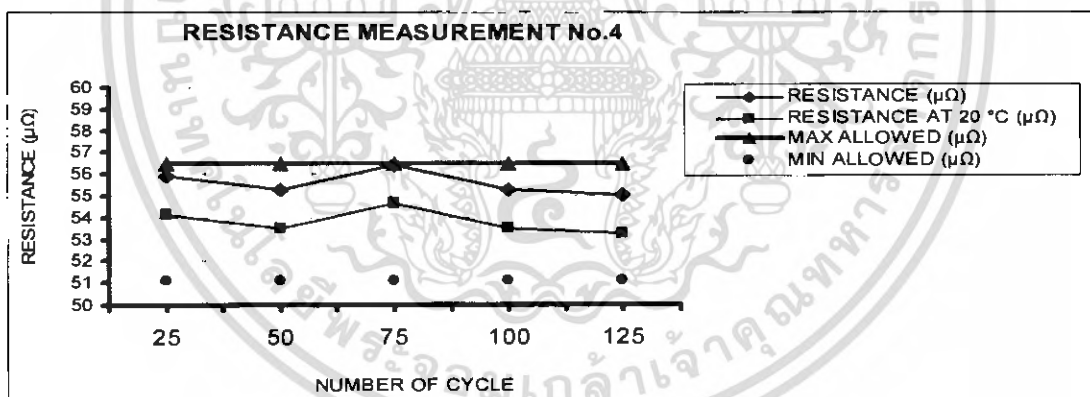
RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4 -2004)

รูปที่ 3.29 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 ความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No.4

OBJECT No.4	Parallel Groove Clamp Two Bolt				
NUMBER OF CYCLE	25	50	75	100	125
TEMP OBJECT (°C)	27.30	27.40	27.50	27.50	27.50
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	55.90	55.22	56.38	55.22	55.00
RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	54.13	53.47	54.59	53.47	53.25
AV. RESISTANCE AT 20 °C ($\mu\Omega$)	53.78				
MAX ALLOWED ($\mu\Omega$)	56.47				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	56.47				
MIN ALLOWED	51.09				
RESISTANCE ($\mu\Omega$)	51.09				



RESULT : PASSED (FOLLOWED UP ON ANSI C119.4 -2004)

รูปที่ 3.30 กราฟความต้านทานของ Parallel groove clamp two bolt
SIZE 50 -185 sq.mm. No. 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลของแรงบิด

ตารางที่ 3.10 แรงบิดของ Parallel groove clamp two bolt

SIZE 50 -185 sq.mm. NO.1 - 4

Test description	Spec.	Test result			
		No.1	No.2	No.3	No.4
Dimension	-	Passed	Passed	Passed	Passed
Assembled with bare conductor	Aluminum 95 sq.mm.	Passed	Passed	Passed	Passed
Torque Strength Test with threaded fastener size 11.1 mm.	24 lb ft.	Passed	Passed	Passed	Passed

ตารางที่ 3.11 แรงดึงไหลดของ Parallel groove clamp two bolt

SIZE 50 -185 sq.mm. NO.1 - 4

Test description	Spec.	Test result			
		No.1	No.2	No.3	No.4
Dimension	-	Passed	Passed	Passed	Passed
Assembled with bare conductor	Aluminum 95 sq.mm.	Passed	Passed	Passed	Passed
Tensile Strength Test with Aluminum 95 sq.mm.	14,469 N.	Passed	Passed	Passed	Passed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการจัดทำโครงการ

1. ผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจในกระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004
2. มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Finite Element
3. มีคู่มือในการทดสอบ Connector ตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004
4. ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. สามารถรองรับการทดสอบจากสถานประกอบการได้

4.2 สรุปผลการทดลอง

1 สรุปผลจากการทดสอบชุดควบคุมการทำงานกึ่งอัตโนมัติ

เมื่อทำการทดสอบกับวงจรจำลองโดยใช้ชุดคอนโทรลในการควบคุมเวลาของการจ่ายกระแสในช่วงเวลา on และ ดัดกระแสในช่วง off ทำให้ได้ทราบว่า ตัว Timer Relay (K1T) ไม่ตัดวงจรจากสภาวะ on เข้าสู่สภาวะ off ตามที่ได้ตั้งเวลาไว้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการตั้งเวลาใหม่ซึ่งใช้วิธีการตั้งเวลาเทียบกับเวลาจริงว่าจากนาฬิกาถึงนาฬิกาที่ 60 อยู่ที่ใดแล้วล็อคไว้เลยห้ามปรับ Timer Relay อีก ซึ่งสามารถที่จะแก้ปัญหาของ Timer ที่ตัดการทำงานก่อนเวลาที่กำหนดได้ ปัญหาที่ตรวจพบอีกคือชุดของ Current Transformer ที่อยู่ภายในชุดควบคุมไม่ได้ต่อเข้ากับวงจร โดย Current Transformer มีหน้าที่วัดกระแสใน Loop ทดสอบ จึงนำ Clip Amp มาวัดค่าของกระแสที่ Loop แทน และปัญหาที่สุดท้ายที่ตรวจพบคือ ชุดของ Temperature Detector ที่ติดตั้งไว้บนชุดคอนโทรลไม่สามารถบันทึกค่าของอุณหภูมิตามที่ต้องการได้ จึงใช้ชุดของ Temperature Recorder มาบันทึกผลการทดสอบของอุณหภูมิแทน

2 สรุปผลจากการทดสอบหาอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของ parallel groove clamp two bolt

จากการทดสอบ ณ จุดต่างๆเพื่อหาอุณหภูมิมบน parallel groove clamp two bolt นั้นจะจุดไหนเป็นจุดที่ร้อนที่สุด เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิตามมาตรฐาน ANSI C119.4-2004 จากตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองที่ใช้ Thermocouple เป็นตัวตรวจจับ ปรากฏว่าค่าอุณหภูมิที่ตรวจจับได้ด้วย Thermocouple Channel 1 มีค่าอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลจากกล้อง Thermo scan และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ตรวจพบได้เมื่อมีการนำ clamp ดังกล่าวไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะที่พบระหว่างดำเนินงาน[5]

1. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งในการทดสอบอุปกรณ์ต่อแยกสายคือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการที่ป้อนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในวงจรที่เป็นลูป และลูปทดสอบที่ใช้ก็จะประพฤติตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ส่งผลรบกวนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียง เช่น จอคอมพิวเตอร์จะสั่น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถแก้ไขได้ จึงต้องแก้ปัญหาด้วยการย้ายอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ให้ออกห่างจากลูปทดสอบมากที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2. พื้นที่ผิวของอุปกรณ์ต่อแยกสาย

จากผลการทดสอบที่ได้จะพบว่า อุปกรณ์ต่อแยกสายที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถที่จะระบายความร้อนได้ดีกว่า ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ต่อแยกสายมีค่าต่ำกว่าเดิม

3. การทำความสะอาดผิวตัวนำก่อนประกอบอุปกรณ์ต่อแยกสาย

จากผลการทดสอบได้มีผลที่แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ต่อแยกสายที่มีการทำความสะอาดโดยใช้กระดาษทรายกับสายตัวนำก่อนประกอบเข้ากับอุปกรณ์ต่อแยกสายจะให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าชุดที่ไม่มีการทำความสะอาดสายตัวนำก่อนเนื่องจาก ตัวนำที่ไม่มีการทำความสะอาดสายก่อนจะมีฉนวนไฟฟ้าบาง ๆ จากฝุ่นหรือคราบสกปรกอยู่ที่สัมผัสทางไฟฟ้าจึงมีค่าน้อย

4. การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนวัสดุทดสอบ

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนวัสดุทดสอบโดยใช้เทปติดโลหะ จะต้องคอยหมั่นตรวจเช็คดูตามจุดต่างๆที่ได้มีการติดเทอร์โมคัปเปิลเสมอ เพราะเทปที่ติดอาจจะหลุด-หลวมได้ การที่จะทราบว่าจุดใดมีปัญหาการหลุด-หลวมของเทปติดโลหะนั้นสังเกตได้จากอุณหภูมิบนของวัสดุทดสอบซึ่งวัสดุทดสอบที่มีปัญหาจะมีอุณหภูมิต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเปรียบเทียบกับวัสดุทดสอบตัวอื่นๆหรือเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิในไซเคิลที่ผ่านมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI C119.4-2004
- [2] สมศักดิ์ กิรดิวุฒิศรเศรษฐ์. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2539
- [3] ศักรินทร์ โสณันทะ. เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2545
- [4] รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. " การแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเชิงกล " สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [5] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. โครงการวิจัยเพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับคอนเนคเตอร์ต่อแยกสายที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2546
- [6] Matthew N.O. Sadiku, Senior Member, IEEE, Amer Z. Makki, and Lawrence C. Agba, Member, IEEE, A Further Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems, IEEE TRANSACTION ON EDUCATION, VOL. 34, NO. 4, NOVEMBER 1991
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547, พิมพ์ครั้งที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 จำนวนไซเคิลที่ใช้ในการทดสอบ

Connector Class	Number of Test Cycle for:	
	CCT Method	CCST Method
Extra heavy duty (Class AA)	500	NA
Heavy duty (Class A)	500	100
Medium duty (Class B)	250	75
Light duty (Class C)	125	50

เมื่อ CCT Method คือ วิธีการทดสอบที่ปล่อยให้วัสดุทดสอบเป็นตัวลงโดยใช้อากาศรอบๆ
 CCST Method คือ วิธีการทดสอบที่ปล่อยให้วัสดุทดสอบเป็นตัวลงโดยการแช่น้ำ

ตารางที่ ก.2 ค่าแรงบิด

Threaded Fastener Size		Aluminum Fastener		Galvanized steel, Stainless Steel or Silicon Bronze Fastener	
in	mm	lb in	N m	lb in	N m
5/16	7.9	-	-	180	20.3
3/8	9.5	168	19.0	240	27.1
13/38	10.3	204	23.0	288	32.5
7/16	11.1	240	27.1	360	40.6
1/2	12.7	300	33.9	480	54.2
9/16	14.3	384	43.4	576	65.0
5/8	15.9	480	54.2	660	74.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Threaded Fastener Size		Aluminum Fastener		Galvanized steel, Stainless Steel or Silicon Bronze Fastener	
in	mm	lb in	lb ft	lb in	lb ft
5/16	7.9	-	-	180	15
3/8	9.5	168	14	240	20
13/38	10.3	204	17	288	24
7/16	11.1	240	20	360	30
1/2	12.7	300	25	480	40
9/16	14.3	384	32	576	48
5/8	15.9	480	40	660	50

ตารางที่ ก.3 Conductor lengths for current cycle tests

Composite aluminum composite	Copper or copper composite	Exposed Length			
		Stranded		Solid	
		in	Cm	in	Cm
Up through 4/0 AWG	Up through 2/0 AWG	12	30.5	24	61.0
Over 4/0 AWG Through 795 kcmil	Over 2/0 AWG Through 500 kcmil	24	61.0	48	121.9
Over 795 kcmil	Over 500 kcmil	36	91.4	72	182.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ค่าของกระแสที่แนะนำให้ใช้ในการบ่อนให้กับวงจรเพื่อทำให้ Control Conductor มีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิรอบข้างประมาณ 100°C

Aluminum or Aluminum Composite		Copper or Copper Composite	
Conductor (AWG)	Current (Amperes)	Conductor (AWG)	Current (AWG)
6	90	8	95
4	125	6	130
2	170	4	180
1	200	2	245
1/0	230	1/0	340
2/0	270	2/0	400
3/0	320	3/0	470
4/0	380	4/0	550
(kcmil)		(kcmil)	
266.8	450	250	615
336.4	525	300	700
397.5	590	350	780
477	670	400	850
556.5	750	500	990
636	820	750	1300
795	955	1000	1565
954	1085	-	-
1033.5	1150	-	-
1113	1220	-	-
1192	1275	-	-
1272	1350	-	-
1351.5	1390	-	-
1431	1450	-	-
1590	1560	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ช่วงเวลาในการจ่ายกระแส

Aluminum or Aluminum Composite (kcmil)	Copper or Copper Composite	Current ON Period (Hour)
Up through 336.4	Up through #4/0 AWG	1.0
Over 336.4 through 795	Over #4/0 AWG through 500 kcmil	1.5
Over 795 through 1590	Over 500 kcmil through 10000 kcmil	2.0

ตารางที่ ก.6 ช่วงเวลาในการวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิ

Current Cycle Test Method (CCT)	Current Cycle Submersion Test Method (CCST)
25-30	5-7
45-55	8-12
70-80	18-22
95-105	28-32
120-130	38-42
160-170	48-52
200-210	58-62
245-255	68-72
320-330	78-82
40-410	88-92
495-505	98-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table I Rate tensile strength of conductor
Use in mechanical test process**

Conductor size mm ²	Rate tensile strength (N)	
	Aluminum conductor	Copper conductor
16	2,734	6,805
35	5,591	14,310
50	7,313	20,545
70	10,420	28,645
120	18,518	49,690
185	28,974	75,640
240	37,506	101,685
400	56,992	159,515
500	72,195	201,095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table II MEA ' s installed aluminum and copper conductor

Nominal size(mm ²) As specified in description of supplies	Conductor size (mm ²)	Diameter rang (mm)	
		Aluminum conductor	Copper conductor
2.5	2.5	1.6 – 2.0	1.8 – 2.1
4	4	2.2 – 2.5	2.2 – 2.6
6	6	3.1 – 3.2	3.1 – 3.2
10	10	3.5 – 4.1	4.0 – 4.1
16	16	4.6 – 5.2	4.7 – 5.2
25	25	5.6 – 9.5	6.4 – 6.6
35	35	6.6 – 7.5	7.4 – 7.8
50	50	7.7 – 8.6	8.9 – 9.1
70	70	9.3 – 10.2	10.6 – 10.9
95	95	11.0 – 12.0	12.6 – 12.9
120	120	12.5 – 13.5	13.4 – 14.5
185	185	15.5 – 16.8	17.6 – 18.0
240	240	17.8 – 19.2	20.2 – 20.7
400	400	25.4 – 25.9	25.6 – 26.2
500	500	25.7 – 27.6	28.8 – 29.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ANSI C119.4-2004

**American National Standard
for Electric Connectors—
Connectors for Use Between
Aluminum-to-Aluminum
or Aluminum-to-Copper
Conductors**



Copyright National Electrical Manufacturers Association
Adapted by IHS under license with NEMA
*reproduction or networking permitted without license from IHS

นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Hot for Release

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ANSI C119.4-2004



American National Standard
For Electric Connectors—

**Connectors for Use Between
Aluminum-to-Aluminum
or Aluminum-to-Copper
Conductors**

Secretariat:

National Electrical Manufacturers Association

Approved December 30, 2004

American National Standards Institute, Inc.

NOTICE AND DISCLAIMER

The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. Consensus does not necessarily mean that there is unanimous agreement among every person participating in the development of this document.

NEMA standards and guideline publications, of which the document contained herein is one, are developed through a voluntary consensus standards development process. This process brings together volunteers and/or seeks out the views of persons who have an interest in the topic covered by this publication. While NEMA administers the process and establishes rules to promote fairness in the development of consensus, it does not write the document and it does not independently test, evaluate, or verify the accuracy or completeness of any information or the soundness of any judgments contained in its standards and guideline publications.

NEMA disclaims liability for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of, application, or reliance on this document. NEMA disclaims and makes no guaranty or warranty, express or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein, and disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfill any of your particular purposes or needs. NEMA does not undertake to guarantee the performance of any individual manufacturer or seller's products or services by virtue of this standard or guide.

In publishing and making this document available, NEMA is not undertaking to render professional or other services for or on behalf of any person or entity, nor is NEMA undertaking to perform any duty owed by any person or entity to someone else. Anyone using this document should rely on his or her own independent judgment or, as appropriate, seek the advice of a competent professional in determining the exercise of reasonable care in any given circumstances. Information and other standards on the topic covered by this publication may be available from other sources, which the user may wish to consult for additional views or information not covered by this publication.

NEMA has no power, nor does it undertake to police or enforce compliance with the contents of this document. NEMA does not certify, test, or inspect products, designs, or installations for safety or health purposes. Any certification or other statement of compliance with any health or safety-related information in this document shall not be attributable to NEMA and is solely the responsibility of the certifier or maker of the statement.

AMERICAN NATIONAL STANDARD

Approval of an American National Standard requires verification by ANSI that the requirements for due process, consensus, and other criteria for approval have been met by the standards developer.

Consensus is established when, in the judgment of the ANSI Board of Standards Review, substantial agreement has been reached by directly and materially affected interests. Substantial agreement means much more than a simple majority, but not necessarily unanimity. Consensus requires that all views and objections be considered, and that a concerted effort be made toward their resolution.

The use of American National Standards is completely voluntary; their existence does not in any respect preclude anyone, whether he has approved the standards or not, from manufacturing, marketing, purchasing, or using products, processes, or procedures not conforming to the standards.

The American National Standards Institute does not develop standards and will in no circumstances give an interpretation of any American National Standard. Moreover, no person shall have the right or authority to issue an interpretation of an American National Standard in the name of the American National Standards Institute. Requests for interpretations should be addressed to the secretariat or sponsor whose name appears on the title page of this standard.

Caution Notice: This American National Standard may be revised or withdrawn at any time. The procedures of the American National Standards Institute require that action be taken periodically to reaffirm, revise, or withdraw this standard. Purchasers of American National Standards may receive current information on all standards by calling or writing the American National Standards Institute.

Published by

National Electrical Manufacturers Association
1300 North 17th Street, Rosslyn, VA 22209

© Copyright 2005 by National Electrical Manufacturers Association.

All rights reserved including translation into other languages, reserved under the Universal Copyright Convention, the Berne Convention for the Protection of Literary and Artistic Works, and the International and Pan American Copyright Conventions.

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in the United States of America



This page intentionally left blank.

Contents

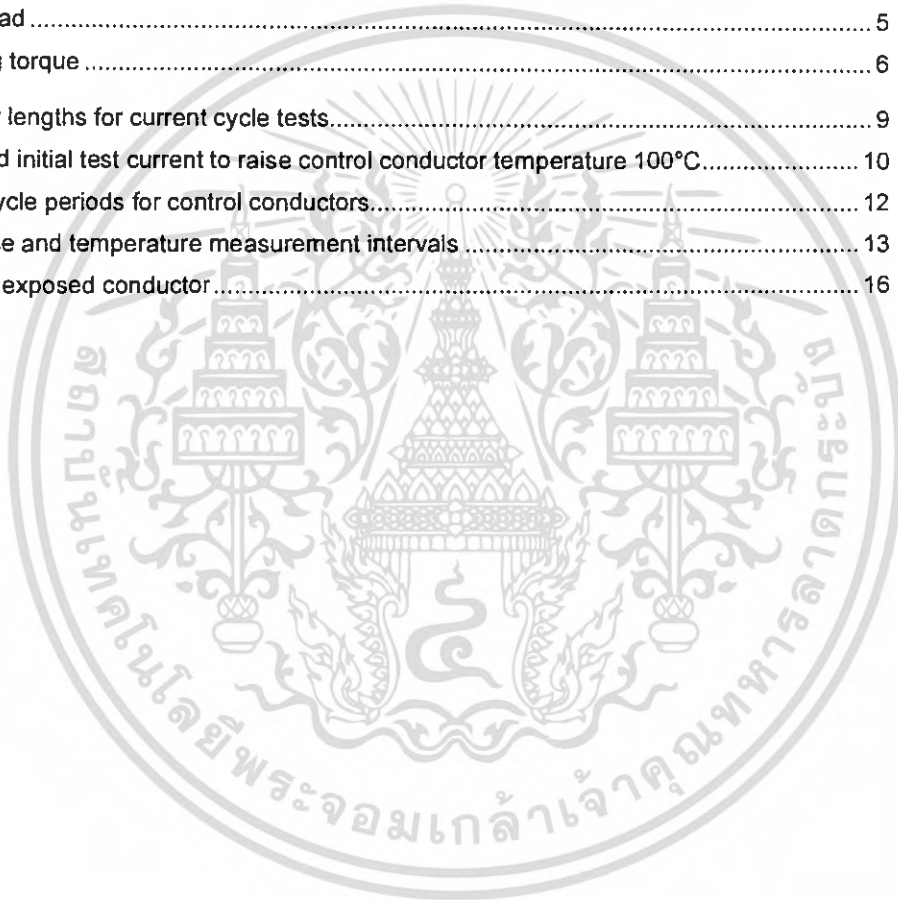
Page

Foreword	vi
1 Scope and Purpose.....	1
1.1 Scope.....	1
1.2 Purpose	1
1.3 Definitions.....	1
2 Applicable standards	2
3 Test Conditions	3
3.1 General.....	3
3.2 Current cycle tests.....	3
3.3 Mechanical tests.....	3
4 Performance.....	4
4.1 General.....	4
4.2 Resistance.....	4
4.2.1 CCT resistance.....	4
4.2.2 CCST resistance.....	4
4.3 Temperature.....	4
4.3.1 CCT temperature.....	4
4.3.2 CCST temperature.....	4
4.4 Tensile strength and rated conductor strength.....	4
4.4.1 Tensile strength.....	4
4.4.2 Rated conductor strength.....	5
4.4.3 Classes of tensile strength.....	5
4.5 Reusable connectors.....	5
4.6 Tap connector.....	6
4.7 Torque requirements.....	6
5 Test procedures, general	6
5.1 Test connectors	6
5.1.1 Description.....	6
5.1.2 Family sample set.....	6
5.2 Test conductors	7
5.3 Test assembly methods.....	7
5.3.1 Installation details.....	7
5.3.2 Conductor preparation for electrical tests.....	7
5.3.3 Conductor preparation for mechanical tests.....	7

7.3	Pullout test	14
7.4	Torque strength test	15
7.5	Conductor damage test	15
8	Test report	16

Tables

1	Test duration	3
2	Tensile load	5
3	Tightening torque	6
4	Conductor lengths for current cycle tests.....	9
5	Suggested initial test current to raise control conductor temperature 100°C.....	10
6	Current cycle periods for control conductors.....	12
7	Resistance and temperature measurement intervals	13
8	Length of exposed conductor	16



Foreword (This Foreword is not part of American National Standard C119.4-2004.)

This standard describes current cycle and mechanical tests used to establish performance characteristics of connectors used to join aluminum-to-aluminum or aluminum-to-copper bare overhead conductors.

This revision includes an alternate, accelerated current cycle test method, henceforth referred to as the current cycle submersion test (CCST). The CCST method differs from the traditional current cycle test (CCT) in that test conductors are rapidly cooled by immersion in chilled water at the beginning of the 'current-OFF' cycle and requires fewer total current-ON and current-OFF cycles. Comparative testing has demonstrated that the CCST method will provide essentially the same performance test results as the traditional current cycle test (CCT) in fewer test cycles. The current cycle test remains the preferred test method recommended for qualification of a connector.

This revision includes an additional current cycle test method (CCT) utilizing elevated temperature testing for an extra heavy duty connector category, Class AA. The intent of elevated test temperature in Class AA testing is to provide a better performing connector.

This standard was initially developed under the direction of the Transmission and Distribution Committee of the Edison Electric Institute (EEI). Tentative performance-type specifications for electrical characteristics were issued in joint report form in 1958 by a steering committee of EEI and an advisory committee of manufacturers on the aluminum conductor research project (EEI Pub. No. 59-70, Tentative Specifications for Connectors for Aluminum Conductors).

Experience gained from extensive trial use further confirmed the performance criteria and test conditions of the tentative specifications and led to the development of Standard TDJ 162 in October 1962 by a joint committee of EEI and the National Electrical Manufacturers Association (NEMA). TDJ 162 was subsequently superseded by this document.

The Subcommittee on Overhead Connectors of the Accredited Standards Committee on Connectors for Electric Utility applications, C119, in its constant review of the publication, continues to seek out the views of responsible users that will contribute to the development of better standards.

Suggestions for improvement of this standard will be welcome. They should be sent to the National Electrical Manufacturers Association, 1300 North 17th Street, Suite 1847, Rosslyn, Virginia 22209.

This standard was processed and approved for submittal to ANSI by the Accredited Standards Committee on Connectors for Electrical Utility Applications, C119. Committee approval of this standard does not necessarily imply that all committee members voted for its approval. At the time it approved this standard, the C119 Committee had the following members:

Douglas Harms, Chairperson
Ronald Lai, Vice Chairperson
Vince Baclawski, Secretary

Organizations Represented:

Aluminum Association
Edison Electric Institute

Name of Representative:

Jean-Marie Asselin
Warren Hadley
Douglas Harms
James Harris
Harry Hayes
Curt Schultz
Gerald Wasielewski

	David West
National Electric Energy Testing, Research & Application Center	Thomas Champion
National Electrical Manufacturers Association	Beth Bruns David Dembowski Ronald Lai Frank Muench Greg Nienaber Frank Stepniak Carl Tamm Carl Taylor David Thompson James Zahnen
Rural Utilities Service (RUS)	Trung Hiu
Tennessee Valley Authority	Jeffrey Nelson
Underwriters Laboratories, Incorporated	Jake Killinger
Other	Stanley Hodgins
The C119.4 Subcommittee on Connectors for Use Between Aluminum-to-Aluminum or Aluminum-to-Copper Conductors, which developed the revisions of this standard, had the following members at the time of approval:	
Douglas Harms, Chairperson Ronald Lai, Vice Chairperson Vince Baclawski, Secretary	
Mike Ferretti Pierre Guyot Warren C. Hadley Trung Hiu Barry Johnson Jake Killinger Thomas McKoon Richard Morin Greg T. Nienaber Walter Romanko Curt Schultz James D. Sprecher Carl R. Tamm Carl Taylor Richard (Jeff) J. Waidelich Gerald Wasielewski David West Allen Wilcox James Zahnen	



This page intentionally left blank.

Connectors for Use Between Aluminum-to-Aluminum or Aluminum-to-Copper Bare Overhead Conductors

1 Scope and Purpose

1.1 Scope

This standard covers connectors used for making electrical connections between aluminum-to-aluminum or aluminum-to-copper conductors used on distribution and transmission lines for electric utility.

This standard establishes the electrical and mechanical test requirements for electrical connectors. This standard is not intended to recommend operating conditions or temperatures.

1.2 Purpose

The purpose of this standard is to give reasonable assurance to the user that connectors meeting the requirements of this standard will perform in a satisfactory manner, provided they have been properly selected for the intended application and are installed in accordance with the manufacturer's recommendations. The service operating conditions and the selection of the connector class is the responsibility of the user.

Although there are 12 possible combinations of electrical and mechanical classes listed in this standard, it is intended that four to six combinations will meet the usual requirements for a given range of conductor sizes. This does not, however, prohibit other combinations.

1.3 Definitions

bolted-type connector: A connector in which the contact between the conductor and the connector is made by pressure exerted by one or more clamping bolts.

conductor: Conducting material used as a carrier of electric current.

connector: A device joining two or more conductors to provide a continuous electrical path.

range-taking connector: Connector designed to accept multiple conductor sizes.

run conductor (main): A continuous conductor from which other conductors branch.

splice: A connector joining two conductor ends.

tang (pad): The flat portion of a connector used for electrical connection.

tap conductor: A conductor that branches off from the run conductor.

tap connector: Connector joining a tap conductor to a run conductor without breaking the run conductor.

terminal connectors: A connector that joins a conductor(s) to an electrical device.

2 Applicable Standards

This standard is intended to be used in conjunction with, but not limited to, the following standards in their latest edition:

ASTM B1-01, *Hard Drawn Copper Wire*

ASTM B2-00, *Medium-Hard-Drawn Copper Wire*

ASTM B8-99, *Concentric-Lay-Stranded Copper Conductor, Hard, Medium-Hard, or Soft*

ASTM B228-02, *Concentric-Lay-Stranded Copper-Clad Steel Conductors*

ASTM B229-02, *Concentric-Lay-Stranded Copper and Copper-Clad Steel Composite Conductors*

ASTM B230/B230M-99, *Aluminum 1350-H19 Wire for Electrical Purposes*

ASTM B231/B231M-99, *Concentric-Lay-Stranded (AAC) Aluminum 1350 Conductors*

ASTM B232/B232M-01e1, *Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Coated, Steel-Reinforced (ACSR)*

ASTM B341/B341M-00, *Aluminum-Coated (Aluminized) Steel Core Wire for Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR/AZ)*

ASTM B396-00, *Aluminum-Alloy 5005-H19 Wire for Electrical Purposes*

ASTM B397-85 (1999), *Concentric-Lay-Stranded Aluminum-Alloy 5005-H19 Conductors*

ASTM B398/B398M-99, *Aluminum-Alloy 6201-T81 Wire for Electrical Purposes*

ASTM B399/B399M-99, *Concentric-Lay-Stranded Aluminum-Alloy 6201-T81 Conductors*

ASTM B400-01, *Compact Round Concentric-Lay-Stranded 1350 Aluminum Conductors*

ASTM B401-99, *Compact Round Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR/COMP)*

ASTM B415-98, *Hard-Drawn Aluminum-Clad Steel Wire*

ASTM B416-98, *Concentric-Lay-Stranded Aluminum-Clad Steel Conductors*

ASTM B498/B498M-98, *Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR)*

ASTM B500/B500M-98, *Metallic coated Stranded Steel Core for Aluminum Conductors, Steel-Reinforced (ACSR)*

ASTM B502-02, *Aluminum-Clad Steel Core Wire for Aluminum Conductors, Aluminum-Clad, Steel-Reinforced*

ASTM B524/B524M-99, *Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Aluminum Alloy Reinforced (ACAR and 1350/6201)*

ASTM B549-00, *Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Aluminum-Clad Steel Reinforced (ACSR/AW)*

ASTM B606-98, *High-Strength Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Aluminum and Aluminum-Alloy Conductors, Steel Reinforced*

ASTM B609/B609M-99, *Aluminum 1350 Round Wire, Annealed and Intermediate Tempers, for Electrical Purposes*

ASTM B701/B701M-00, *Concentric-Lay-Stranded Self-Damping Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR/SD)*

ASTM B778-97, *Shaped Wire Compact Concentric-lay-stranded Aluminum Conductors (AAC/TW)*

ASTM B779-96, *Shaped Wire Compact Concentric-lay-stranded Aluminum Conductors, Steel-reinforced (ACSR/TW)*

ASTM E4-01, *Practices for Force Verification of Testing Machines*

3 Test conditions

3.1 General

Connectors shall be installed and tested for current-carrying and mechanical performance in accordance with the conditions noted in clauses 5 through 7.

3.2 Current cycle tests

Tests shall be conducted in accordance with clause 6 and shall be of the duration listed in Table 1, depending on the current class of the connector and the choice of test method (Current Cycle Test (CCT) or Current Cycle Submersion Test (CCST)).

Table 1 – Test duration

Connector Class	Number of Test Cycles for:	
	CCT Method	CCST Method
Extra Heavy duty (Class AA)	500	NA
Heavy duty (Class A)	500	100
Medium duty (Class B)	250	75
Light duty (Class C)	125	50

3.3 Mechanical tests

Tests of tensile strength of the connection, reusability of the connector, and effect on the strength of the in-line conductor shall be conducted in accordance with clause 7 for the strength class as listed below:

- Class 1 – Full tension
- Class 2 – Partial tension
- Class 3 – Minimum tension

4 Performance

4.1 General

Connectors shall conform to the appropriate performance requirements in 4.2 through 4.7, when installed and tested in accordance with the methods specified in clauses 5 through 7.

4.2 Resistance

The resistance of the connection tested in accordance with clause 6 shall be stable. Stability is achieved if any resistance measurement, including allowance for measurement error, does not vary by more than $\pm 5\%$ from the average of all the measurements at specified intervals during the course of the test.

4.2.1 CCT resistance

The resistance of the connection tested by the Current Cycle Test method in accordance with clause 6 shall be stable between the twenty-fifth cycle and the completion of the number of current cycles required in 3.2 for the connector class tested.

4.2.2 CCST resistance

The resistance of the connection tested by the Current Cycle Submersion Test method in accordance with clause 6 shall be stable between the tenth cycle and the completion of the number of current cycles required in 3.2 for the connector class being tested.

4.3 Temperature

The temperature of the connector tested in accordance with clause 6 shall not exceed the temperature of the control conductor. The temperature difference between the control conductor and the connector shall be stable. Stability is achieved if any temperature difference between the control conductor and the connector, including allowance for measurement error, is not more than 10°C below the average of all temperature differences in this interval.

4.3.1 CCT temperature

The temperature of the connector tested by the Current Cycle Test method shall be stable between the twenty-fifth cycle and the completion of the number of current cycles required in 3.2 for the connector class being tested.

4.3.2 CCST temperature

The temperature of the connector tested by the Current Cycle Submersion Test method shall be stable between the tenth cycle and the completion of the number of current cycles required in 3.2 for the conductor class being tested.

4.4 Tensile strength and rated conductor strength

4.4.1 Tensile strength

The tensile strength of the connections tested in accordance with 7.3.4.1 shall be equal to or greater than the values listed in 4.4.3.

4.4.2 Rated conductor strength

Rated conductor strength, as used in this standard, shall be determined in accordance with the applicable ASTM standard listed in clause 2, or as furnished by the conductor manufacturer for nonstandard conductors.

4.4.3 Classes of tensile strength

4.4.3.1 Class 1, full tension

The tensile strength shall be equal to or greater than 95% of the rated conductor strength of the weaker of the conductors being joined. A conductor shall be considered as a failure when at least one strand breaks. For connectors of the type that do not have separate gripping means for the different metals of composite conductors or that use nonferrous means on ferrous conductors or cores, they shall first be tested in accordance with 7.3.3.1 without slippage or breakage.

4.4.3.2 Class 2, partial tension

The tensile strength shall be equal to or greater than 40% of the rated conductor strength of the weaker of the conductors being joined.

4.4.3.3 Class 3, minimum tension

The tensile strength shall be equal to or greater than 5% of the rated conductor strength of the weaker of the conductors being joined but not less than the values in Table 2.

Table 2 – Tensile load

Wire Size (AWG)	Pullout					
	Copper		Aluminum		ACSR	
	lb _r	N*	lb _r	N*	lb _r	N*
16	30	133*	15	67*	---	---
14	50	222*	25	111*	---	---
12	70	311*	35	156*	---	---
10	80	356*	40	178*	---	---
8	90	400*	45	200*	100	445*
6	100	445*	50	222*	100	445*
4	140	623*	70	311*	150	667*
3	160	712*	80	356*	150	667*
2	180	801*	90	400*	200	890*
1	200	890*	100	445*	200	890*

* For reference only

4.5 Reusable connectors

Upon completion of all tests, a connector that is designated by the manufacturer to be reusable shall still function as originally designed. Reusable means that the connector may be removed from service and installed again. Prior to reuse, any reusable connector shall be reconditioned in accordance with manufacturer's instructions.

4.6 Tap connector

A tap connection satisfies the mechanical requirement if, after performing the conductor damage test in 7.5, the run conductor retains at least 90% of its rated breaking strength.

In a separate test, tap wire connection(s) shall meet the tensile requirement as stated in 4.4.3.3.

4.7 Torque requirements

A bolted connector shall withstand 120% of the manufacturer's tightening torque or, in the absence of such, those shown in Table 3 without damage to any component part. Damage is defined as a crack, detected by visual means (see 7.4).

Table 3 – Tightening torque^{1,2}

Threaded Fastener Size		Aluminum Fastener		Galvanized Steel, Stainless Steel or Silicon Bronze Fastener	
in.	mm*	lb in.	N m*	lb in.	N m*
5/16	7.9	-	-	180	20.3
3/8	9.5	168	19.0	240	27.1
13/32	10.3	204	23.0	288	32.5
7/16	11.1	240	27.1	360	40.6
1/2	12.7	300	33.9	480	54.2
9/16	14.3	384	43.4	576	65.0
5/8	15.9	480	54.2	660	74.5

* For reference only.

¹For use only in absence of the manufacturer's recommendation.

²Connectors to be installed as supplied by the manufacturer.

5 Test Procedures, General

5.1 Test connectors

5.1.1 Description

A complete description of the test connectors, conductors, and inhibiting compound shall be included in the test report (see clause 8).

5.1.2 Family sample set

To qualify a family of connectors (group of connectors using similar design criteria), a minimum of three sizes (largest, smallest, and intermediate) shall be tested. When only one smaller-size connector of the same design parameter is added to a previously tested family, additional testing is not required.

5.2 Test conductors

The conductors used in these tests shall be unused bare conductors. Flat bars to which terminal connectors are bolted shall be considered conductors. The flat-bar conductor shall be the nearest size that can be bolted to the terminal and have a current capacity closest to that of the maximum conductor accommodated.

5.3 Test assembly methods

5.3.1 Installation details

All installation details, including methods and tools, not specifically defined or required in clauses 5 through 7, shall be completely described in the test report.

5.3.2 Conductor preparation for electrical tests

The outer surface of the conductors in the contact area shall be mechanically cleaned using a wire brush until the entire contact area of the conductor is clean.

5.3.3 Conductor preparation for mechanical tests

The portion of the conductor that is to be inserted into the connector shall be wiped with a particle-free cloth coated with petroleum jelly, unless the connector is used with an inhibiting compound.

5.3.4 Connector preparation

Connectors shall be prepared in accordance with the manufacturer's recommendations.

5.3.5 Connector installation

The methods and tools used to install the connector shall be in accordance with the manufacturer's recommendations. Installation shall take place in an ambient environment between 15°C (59°F) and 35°C (95°F). When clamping fasteners are used, they shall be tightened in accordance with the manufacturer's recommendations. In the absence of a recommended torque, the values specified in Table 3 shall be used.

6 Current Cycle Test Procedures

6.1 General

Current cycle tests shall be conducted on connectors assembled in series in a loop in accordance with clauses 5 and 6.2 through 6.12.2. An accelerated current cycle test method, referred to as the current cycle submersion test (CCST) is offered as an alternate test method used primarily to quickly assess connector performance. The current cycle test (CCT) remains the preferred test method recommended for the qualification of a connector.

NOTE—The CCST method differs from the traditional current cycle test (CCT) in that test connectors are rapidly cooled by immersion in chilled water at the beginning of the "current-OFF" cycle. Comparative testing has demonstrated that the CCST method will provide essentially the same performance test results as the traditional current cycle test (CCT) in fewer test cycles.

6.2 Test assembly

6.2.1 Conductors

6.2.1.1 Conductor combinations shall be selected to maximize current through the connector. If the connector is recommended for use between aluminum-to-aluminum and aluminum-to-copper conductors, it shall be tested on both combinations.

6.2.1.2 For Class AA connectors where the conductor selected limits the current, the other conductor should be sized as close to but not less than the limiting conductor current rating.

NOTE—In both 6.2.1.1 and 6.2.1.2 additional conductor combinations and current values may also be used if agreed to by both the manufacturer and user.

6.2.2 Connectors

Four connectors of the same size and type are required for each combination of conductors, as determined in 6.2.1. Terminal connectors may be connected to flat bar conductors or tang-to-tang (pad-to-pad).

6.3 Equalizers

To provide equipotential planes for resistance measurements and to prevent the influence of one connector on another, equalizers shall be installed in stranded conductor on each side of each connector in the current cycle loop, except where two terminal connectors are tested tang-to-tang (pad-to-pad). Equalizers are not required on solid conductors. Any form of equalizer that ensures permanent contact among all the conductor strands for the test duration may be used.

6.3.1 Welded equalizers

A welded equalizer is recommended for aluminum conductors. Welded equalizers are made from aluminum.

6.3.2 Compression sleeve equalizers

When the connectors to be tested are identical, a continuous piece of conductor may be used between the connectors, with an equalizer in the center. If a compression sleeve is employed as an equalizer with aluminum conductors, the conductor in the contact area of the equalizer should be prepared as in 5.3.1 and 5.3.2.

6.4 Conductor lengths

The exposed length of stranded conductor between the connector and the equalizer, or between the connectors of solid conductors in the current cycle loop, shall be in accordance with Table 4. If a flat bus bar is used between terminal connectors, its length shall be twice that shown in table 4 for the stranded conductor size being used in the terminal, or the same length of the solid conductor being used in the terminal. The conductor length in Table 4 does not include the length within the connector or equalizer. In addition, where connector design permits, the conductor end shall project 1/2 inch (12.7 mm) beyond the connector contact groove. The equalizers at each end of the current cycle loop shall be joined to the power source with additional lengths of the test conductor to be not less than the lengths specified in Table 4.

Table 4 – Conductor lengths for current cycle tests

Aluminum or Aluminum Composite	Copper or Copper Composite	Exposed Length			
		Stranded		Solid	
		in.	mm*	in.	mm*
Up through 4/0 AWG	Up through 2/0 AWG	12	305	24	610
Over 4/0 AWG through 795 kcmil	Over 2/0 AWG through 500 kcmil	24	610	48	1219
Over 795 kcmil	Over 500 kcmil	36	914	72	1829

* For reference only

6.5 Control conductor

A control conductor, for determining test current, shall be installed in the current cycle loop (between two equalizers for stranded conductors). The control conductor shall be the same type and size as the conductor in the current cycle loop that would be at the highest temperature. Its length shall be twice that given in Table 4. For Class AA, when the control conductor is copper, see 6.5.2.

6.5.1 Equivalent aluminum/copper conductors

At the manufacturer's option, the size of the control conductor may be determined by selecting from Table 5 the conductor in the current cycle loop that has the least current for equivalent aluminum/copper conductors.

6.5.2 Multiple control conductors

6.5.2.1 If the test loop includes different conductors, and a question arises as to which conductor causes the highest temperature rise, a control conductor of each type is required. The test current shall cause the higher temperature rise in one of the control conductors to meet the requirements of 6.8.

6.5.2.2 For Class AA, if the conductor for determining test current is copper, then a second control conductor of aluminum shall be included for the purpose of evaluating stability. The second control cable shall be of the closest ampacity and chosen based on the values shown in Table 5. However, the copper control conductor shall be used for establishing the current within the first 25 cycles.

6.6 Loop configuration and location

6.6.1 CCT method

The current cycle loop may be of any shape provided the connectors and the control conductor are installed in the same horizontal plane, with at least an 8 in. (203 mm) separation between conductors and located at least 1 ft (305 mm) from any wall and at least 2 ft (610 mm) from the floor and the ceiling.

NOTE—This assures that the control conductor and the connectors begin the next current-ON period at the same temperature.

6.6.2 CCST method

The control conductor shall be installed on the same horizontal plane as the test connectors. During the current-ON period, no part of the circuit shall be less than 8 in. (200 mm) above the surface of the chilled water. At the beginning of the current-OFF period, the connectors and the control conductor shall be submerged to a minimum of 4 in. (100 mm) below the water surface.

NOTE—This assures that the control conductor and the connectors begin the next current-ON period at the same temperature.

Table 5 – Suggested initial test current to raise control conductor temperature 100°C

Aluminum or Aluminum Composite		Copper or Copper Composite	
Conductor (AWG)	Current (Amperes)	Conductor (AWG)	Current (Amperes)
6	90	8	95
4	125	6	130
2	170	4	180
1	200	2	245
1/0	230	1/0	340
2/0	270	2/0	400
3/0	320	3/0	470
4/0	380	4/0	550
(kcmil)		(kcmil)	
266.8	450	250	615
336.4	525	300	700
397.5	590	350	780
477	670	400	850
556.5	750	500	990
636	820	750	1300
795	955	1000	1565
954	1085	-	-
1033.5	1150	-	-
1113	1220	-	-
1192	1275	-	-
1272	1350	-	-
1351.5	1390	-	-
1431	1450	-	-
1590	1560	-	-

6.7 Ambient conditions

Current cycle tests shall be conducted in a space free from forced air currents or radiated heat striking (directly or indirectly) any portion of the test loop during the current-ON period. The ambient temperature shall be held between 15°C and 35°C.

6.8 Test current

The current values in Table 5 are the suggested initial test amperes for this standard for Class A, B, and C and have been selected to simplify current selection in order to achieve the required temperature rise in the control conductor. For conductors larger than those shown in Table 5, the current is determined by reaching a stable temperature. These currents are not intended to suggest current values for use in actual service. Class AA test currents are established by obtaining the proper temperature rise.

6.8.1 CCT temperature conditions

The current cycle test current shall be adjusted during the current-ON period of the first twenty-five cycles to result in a steady-state temperature rise on the control conductor of 100°C to 105°C over ambient temperature for Class A, B, and C. The Class AA rise will be 175°C to 180°C over ambient temperature. This current shall then be used during the remainder of the test current-ON periods, regardless of the temperature of the control conductor.

6.8.2 CCST temperature conditions

The current cycle submersion test current shall be adjusted during the current-ON period of the first five cycles to result in a steady-state temperature rise on the control conductor of 100°C to 105°C over ambient temperature. This current shall then be used during the remainder of the test current-ON periods, regardless of the temperature of the control conductor.

6.8.3 CCT method elevated temperature current stabilization

The current cycle test current shall be increased from that shown in Table 5 to achieve the appropriate elevated temperature within the first twenty-five cycles.

6.8.4 CCST method elevated temperature current stabilization

The current cycle submersion test current shall be increased from that shown in Table 5 to achieve the appropriate elevated temperature within the first five cycles.

6.9 Current cycle period

Each test cycle shall consist of a current-ON and a current-OFF period. The time required to make resistance and temperature measurements is not considered a part of the current-ON or current-OFF time periods.

6.9.1 Current cycle-ON period

The length of the current-ON period shall be as listed in Table 6, depending on the size of the control conductor. For conductors larger than those shown in Table 6, the current-ON time is determined by reaching and maintaining thermal stability in the connector. Thermal stability is defined as not more than a variation of 2°C between any two of three readings taken at not less than 10 min intervals.

Table 6 – Current cycle periods for control conductors

Aluminum or Aluminum Composite (kcmil)	Copper or Copper Composite	Current-ON Period (Hour)
Up through 336.4	Up through #4/0 AWG	1.0
Over 336.4 through 795	Over #4/0 AWG through 500 kcmil	1.5
Over 795 through 1590	Over 500 kcmil through 1000 kcmil	2.0

6.9.2 CCT current cycle-OFF period

Connectors tested by the Current Cycle Test (CCT) method shall cool in ambient temperature air. The time length of the current-OFF period for connectors tested by the CCT method shall initially be the same as the current-ON period. The time length may be reduced by forced air cooling after the first twenty-five cycles. With the manufacturer's concurrence, forced air cooling may be initiated during the current-OFF period after the first cycle. The time length for the reduced current-OFF period shall be established by adding 5 min to the time required for the four connectors to reach ambient temperature.

6.9.3 CCST current cycle-OFF period

Connectors tested by the Current Cycle Submersion Test (CCST) method shall be immersed in still, chilled water ($5^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$) within 30 seconds of the start of the current-OFF period. The connectors shall remain immersed in the chilled water for a minimum of 15 min after the temperature of the connector is reduced to the temperature of the water. The connectors shall be removed from the water before they are energized at the beginning of the next current-ON cycle.

6.10 Measurements

Resistance and temperature measurements shall be made according to Table 7, depending on the choice of test method. When the number of measurement datums exceeds those specified in Table 7, the measurements nearest each specified cycle shall be used to evaluate performance for Class A, B, and C connectors. For Class AA connectors, resistance and temperature measurements shall be taken a minimum of once every twenty cycles.

Table 7 – Resistance and temperature measurement intervals*

Current Cycle Test Method (CCT) (Cycles)	Current Cycle Submersion Test Method (CCST) (Cycles)
25 – 30	5 – 7
45 – 55	8 – 12
70 – 80	18 – 22
95 – 105	28 – 32
120 – 130	38 – 42
160 – 170	48 – 52
200 – 210	58 – 62
245 – 255	68 – 72
320 – 330	78 – 82
400 – 410	88 – 92
495 – 505	98 – 102

* Does not apply to Class AA Connectors.

6.10.1 Resistance measurements

Resistance measurements shall be made at the end of a current-OFF period with all connectors thermally stabilized at the room ambient temperature. Thermal stability is defined as not more than a variation of 2°C between any two of three readings taken at not less than 10 min intervals. Resistance measurements shall be made across each connector, between potential points located either on the equalizers a maximum of one conductor diameter from the edge adjacent to the conductor or at the midpoint of a solid conductor. A low magnitude direct current not to exceed 12A shall be used for these measurements. Ambient temperature shall be measured within 2 ft (610 mm) of the test loop at a location that minimizes the effect of thermal convection. The ambient temperature shall be recorded at the time of each set of resistance measurements. The resistance of each connector assembly shall be corrected from the measured temperature to 20°C. The corrected resistance values shall be used to evaluate the performance of the connectors.

NOTE—The resistance values obtained shall be corrected to 20°C with the following formula:

$$R_{20} = R_m / [1 + \alpha (T_m - 20)]$$

Where R_m is the measured resistance, T_m is the temperature (°C) of the connector and α is the resistance variation coefficient with the temperature. This coefficient can be taken equal to:

$$\alpha = 4 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C} \text{ for copper and ACSR}$$

$$\alpha = 3.6 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C} \text{ for aluminum}$$

6.10.2 Temperature measurements

Temperature measurements of the connectors, control conductors, and ambient air shall be made at the end of the specified current-ON cycle, immediately before the current is turned off. The temperatures

shall be measured by means of thermocouples that have been permanently installed for the current cycle tests. At least one thermocouple shall be installed in the current path of each connector at a point where the highest temperature is anticipated. One thermocouple shall be installed at the midpoint of the control conductor.

6.11 Maximum number of current cycles

The number of cycles specified in 3.2, Table 1, to complete the test may be extended to permit taking the final measurements during normal working hours.

6.12 Evaluation interval

The evaluation of the connector performance, as specified in 4.2 and 4.3, shall be made on the basis of resistance and temperature measurements.

6.12.1 Evaluation by the CCT method

The resistance and temperature measurements taken in accordance with 6.10 shall be used to evaluate connectors tested by the Current Cycle Test (CCT) method.

6.12.2 Evaluation by the CCST method

The resistance and temperature measurements taken in accordance with section 6.10 shall be used to evaluate connectors tested by the Current Cycle Submersion Test (CCST) method.

7 Mechanical test procedures

7.1 General

Mechanical tests shall be conducted in accordance with clause 5 and 7.2 through 7.5.

7.2 Test connectors

7.2.1 Three samples of each connector-conductor combination shall be subjected to each mechanical test described in 7.3, 7.4, and 7.5.

7.2.2 Both deadends and splices shall be tested unless it can be shown that the same design parameters and materials are used for both devices. If only one device is tested, it shall be the deadend.

7.3 Pullout test

7.3.1 Pullout strength tests shall be performed on the following two conductor combinations for which the connector is designed:

- (1) The highest rated tensile strength conductor and
- (2) The smallest diameter conductor of the highest rated tensile strength.

NOTE—If the conductor core has been grease-filled, special joining techniques may be required and the connector manufacturer should be consulted.

7.3.2 If the connectors can be used on different construction and/or materials, the test shall be run on each conductor category such as ACSR, AAC, AAC/TW, etc.

7.3.3 Tensile strength

The same samples shall be used for both the sustained load testing and maximum load testing. Relaxation of tension between tests is permissible.

7.3.3.1 Sustained load

7.3.3.1.1 Class 1, full-tension connectors of the type that do not have separately installed gripping means for the different metals of composite conductors, or which use nonferrous means on ferrous conductors or cores, shall first be tested by installing the connectors in assemblies as described in 7.3.3.1.2. A constant tensile load equal to $77\% \pm 5\%$ of the rated strength of the conductor, as determined in 4.4.2, shall be applied and maintained on the assemblies for a minimum of 168 hours.

7.3.3.1.2 The length of the exposed conductor in the test assembly between each gripping means and each connector shall be at least 12 ft (3.66 meters). The gripping means may be any device capable of securely gripping all strands without slippage for the duration of the test. If another connector of the same type as the connector being tested is used, it may also be considered as a test connector.

7.3.4 Maximum load

7.3.4.1 When conducting the tensile strength test, care shall be taken to ensure that all strands of the conductor are loaded simultaneously.

7.3.4.2 The load shall be applied at a cross-head speed not exceeding 1/4 in. per min per ft (20.8 mm per min per m) of the total length of the exposed conductor between jaws.

7.3.4.3 The length of the exposed conductor between each gripping means and each connector shall not be less than that given in Table 8.

7.3.4.4 The tensile strength shall be determined as the maximum load that can be applied. This load shall be measured to an accuracy of 1% for Class 1 connectors and 5% for Class 2 and 3 connectors with instruments calibrated according to ASTM E4. The mode of failure shall be recorded.

7.3.4.5 Minimum values indicated in 4.4.3 are required.

7.4 Torque strength test

7.4.1 The torque strength of the bolted connector shall be measured using conductors of the largest and smallest diameters for which the connector is designed (see 4.7).

7.4.2 Tightening torque values shall be measured using a measuring device that is accurate within 2%.

7.4.3 The torque strength of a bolted connector is the threshold value of the bolt tightening torque at which rupture or permanent distortion of any connector component occurs that impairs its proper functioning on any of the conductor combinations for which the connector was designed.

7.5 Conductor damage test

7.5.1 The conductor damage test for the tap connector shall be performed on maximum-run and minimum-run conductors of each type for which the connector is designed. In all tests, the maximum-diameter tap conductor of the hardest temper for which the connector is designed shall be used.

7.5.2 A tap connector shall be installed on a run conductor whose length between gripping means is as specified as Class 1 in Table 8, and is under a tensile load of 20% of its rated strength as determined in

4.4.2. Relaxation of the load shall not occur during connector installation. The conductor shall then be stressed to the breaking point.

Table 8 – Length of exposed conductor

Connector Class	Description	Length	
		Inches	Meters
Class 1 (a)	Intended for single metal or single alloy conductors with 19 strands or less.	24	0.61
	(b) Intended for single metal or single alloy conductors with more than 19 strands	144*	3.66*
	(c) Intended for multiple metal or multiple alloy conductors	144*	3.66*
Class 2		24	0.61
Class 3		10	0.25

*Exception: For conductors 4/0 AWG and smaller, the length of the exposed conductor may be shortened from 144 in. (3.66 m) to 24 in. (0.61 m), if procedures ensure simultaneous loading of all strands.

8 Test report

The test report shall include the necessary data to support conformance or nonconformance to the requirements of this standard, and also the following:

Date of test

Description of test assemblies

Description of connectors and inhibiting compound before testing to ensure traceability

Description of conductors, including rated conductor strengths

Description of connector installation procedure

Current cycle amperage

Description of the condition of connectors after testing

Electrical: Class AA, A, B, C

Mechanical: Class 1, 2, 3

Method: CCT, CCST

Name and address of the test facility and the names of the technicians performing the test

All options used in performance of the test including the mounting method (drilled or surface mounted) of the thermocouples (diagrams or photographs of the test setup are desirable)

Other pertinent information, such as installation details not specifically defined or required in this standard Certification (if required)



ANSI C119.4-2004

**American National Standard
for Electric Connectors—
Connectors for Use Between
Aluminum-to-Aluminum
or Aluminum-to-Copper
Conductors**



Copyright National Electrical Manufacturers Association
Aided by IHS under license with NEMA
reproduction or networking permitted without license from IHS

www.nema.org

นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การใช้โปรแกรม FINITE ELEMENT & FEMLAB

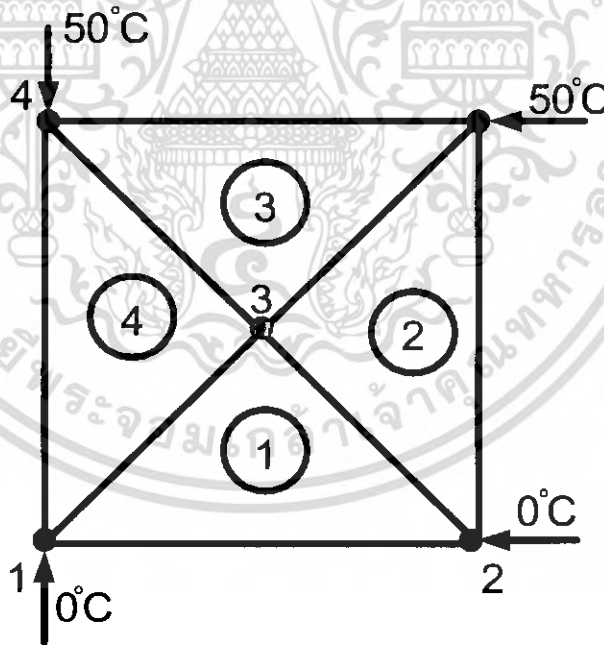


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การจำลองวิเคราะห์ค่าการกระจายของความร้อน [6]

การเปรียบเทียบผลการคำนวณการกระจายของความร้อนระหว่างการคำนวณด้วยมือกับโปรแกรม FEM LAB

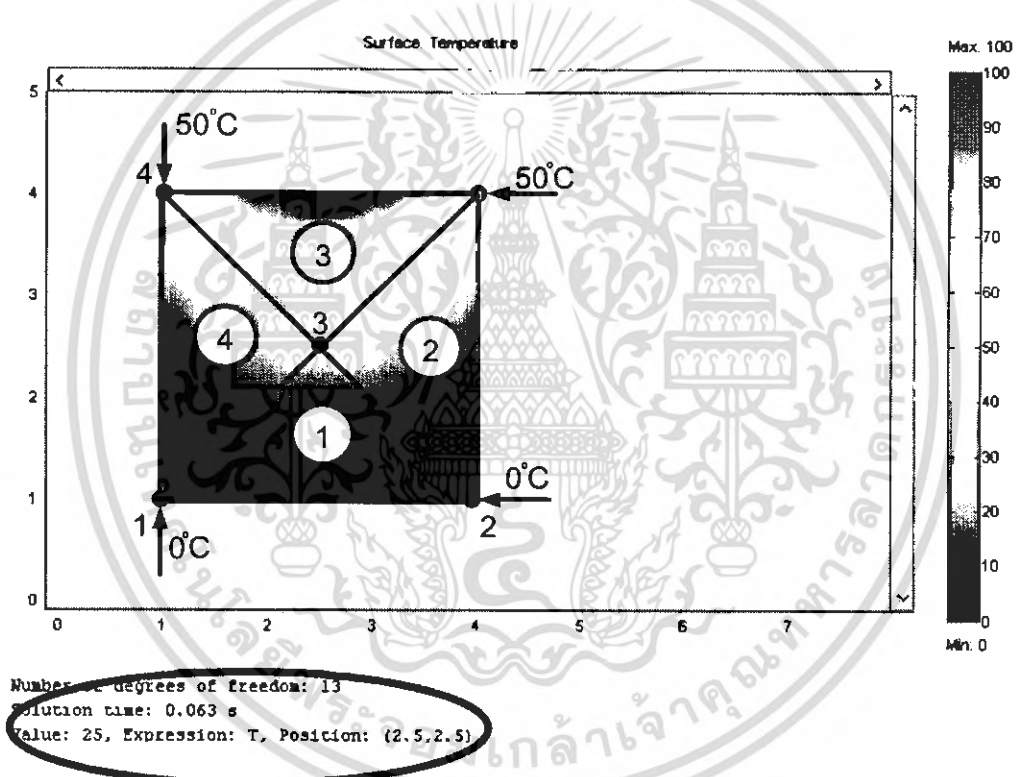
เพื่อเป็นการตรวจสอบ และยืนยันว่าโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของความร้อน มีความน่าเชื่อถือ ก่อนที่จะนำไปจำลองเพื่อวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน ของ Parallel groove clamp two bolt ที่จะนำมาใช้งานในระบบส่งจ่ายแรงสูง จึงได้ทำการทดสอบโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ กับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมว่ามีค่าตรงกัน หรือต่างกันอย่างไร ดังรูปที่ ข.1 เป็นการจำลองรูปแบบที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 3 หน่วย ยาว 3 หน่วยโดยภายในรูปสี่เหลี่ยมแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยม 4 รูปประกอบกัน ที่มุมของสามเหลี่ยมแต่ละรูปจะกำหนดเป็น node โดยจะมี node ที่ 1,2,4,5 และ node ที่ 3 เป็น node ร่วมของสามเหลี่ยมทั้ง 4 รูปประกอบกัน และกำหนดอุณหภูมิที่ node 1,2 มีอุณหภูมิ 0°C และ node 4,5 มีอุณหภูมิ 50°C โดยหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ node 3 และรูปที่ ข.1 เป็นผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม (FEMLAB Version 3.1) โดยนำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยมือมาเปรียบเทียบ



รูปที่ ข.1 การกำหนดเงื่อนไขการให้ค่าความร้อนแก่ชิ้นงาน

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณค่าการกระจายความร้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ

โหนด	X	Y	อุณหภูมิ	
			คำนวณด้วยมือ	โปรแกรม FEMLAB
1	1.0	1.0	0.00	0.00
2	4.0	1.0	0.00	0.00
3	2.5	2.5	25.00	25.00
4	1.0	4.0	50.00	50.00
5	4.0	4.0	50.00	50.00



รูปที่ ข.2 ผลของการคำนวณการกระจายความร้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEM LAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากการจำลองเพื่อพิสูจน์ว่าโปรแกรม FEM LAB มีความสามารถที่จะคำนวณผลได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยมือ พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละโนดจะมีค่าเท่ากันซึ่งผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม สามารถดูระดับความร้อนที่เกิดขึ้นที่แต่ละโนดได้โดยแถบสี

3.7 การวิเคราะห์ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt

จากการทดสอบ Parallel groove clamp two bolt ตามมาตรฐาน ANSI C119.4 -2004 โดยทำการจ่ายกระแส 400 A เข้าไปยังชุด Parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 Sq.mm. ที่ต่อกันเป็น Zigzag loop แล้วใช้ Thermo Couple วัดค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตัว Parallel groove clamp two bolt ใช้แรงเพื่อขันน็อตลึกระหว่าง Parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 Sq.mm. กับสายตัวนำขนาด 95 Sq.mm. ให้มีขนาดเท่ากันคือ 20 ft-lb พบว่าค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการวัดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าความต้านทานที่วัดจากการทดลองนี้เป็นค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสรวมทุกจุดของการประกอปกันระหว่างชุด Parallel groove clamp two bolt ดังนั้นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นก็จะมีผลมาจากการประกอบอุปกรณ์ทั้ง 2 อย่าง เข้าด้วยกันด้วย ดังตารางบันทึกผลที่ ข.2

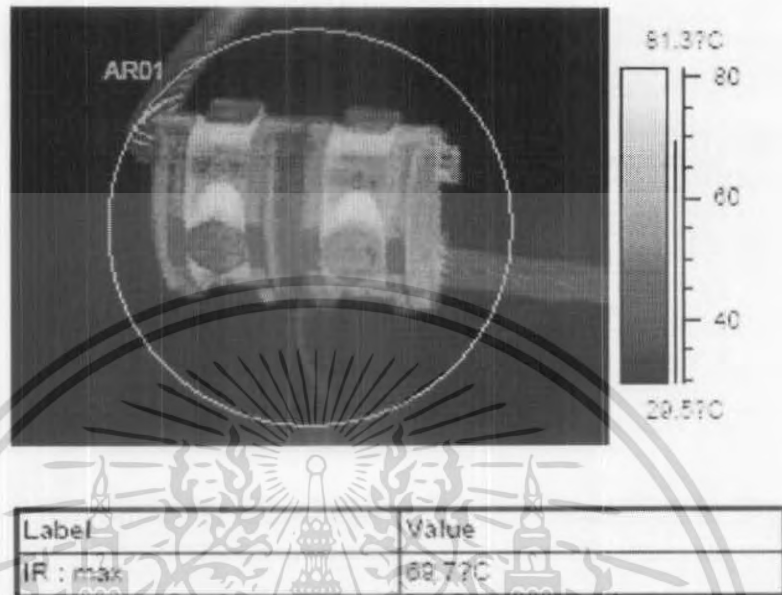
ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ชุด Parallel groove clamp two bolt จะเกิดผลจากค่าความต้านทานของหน้าสัมผัส เนื่องจากการประกอปกชุด Parallel groove clamp two bolt ขนาด 50-185 Sq.mm. กับสายตัวนำขนาด 95 Sq.mm. ตามมาตรฐาน ANSI C119.4 - 2004 การประกอปกทุกชุดใช้แรงที่ทำเท่ากันแต่ความขรุขระของหน้าสัมผัสไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความต้านทานไม่เท่ากันแล้วส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานดังตาราง ข.2

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบแรงบิด ความต้านทาน และอุณหภูมิ

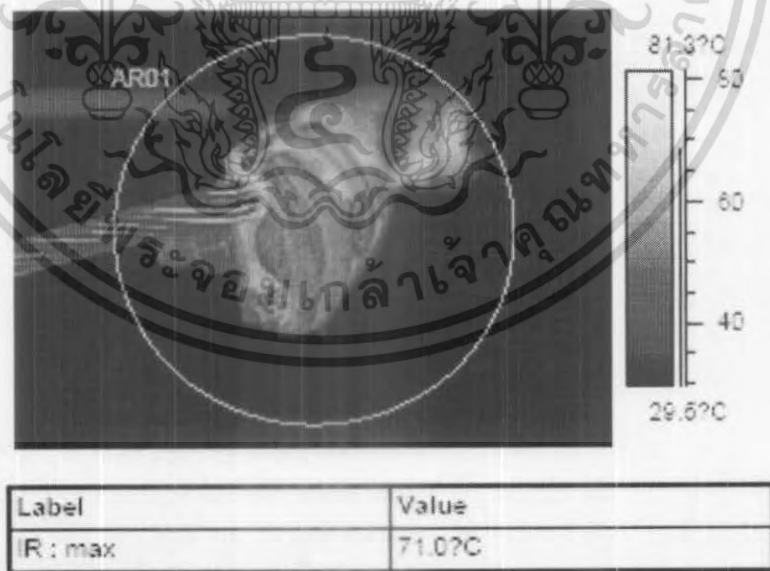
อุปกรณ์ชุดที่	Torque (ft-lb)	R _{at 27°C} (μΩ)					R _{av} (μΩ)	Temp (°C)	I (A)
		1	2	3	4	5			
1	20	51.83	56.11	56.63	58.01	59.21	56.36	77.86	400
2	20	76.53	80.69	82.16	94.04	86.24	83.93	92.35	400
3	20	58.32	56.91	57.12	57.24	57.32	57.38	94.79	400
4	20	52.63	54.41	57.12	57.49	57.86	55.90	90.89	400

จากการทดสอบหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt โดยใช้กล้อง Thermo Scan : AGMA รุ่น 550 ภายใต้สภาวะการจ่ายกระแส 400 A ผ่านวัสดุทดสอบเป็นเวลา 50 นาที โดยจะแสดงผลได้ดังรูปที่ ข.3 – ข.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

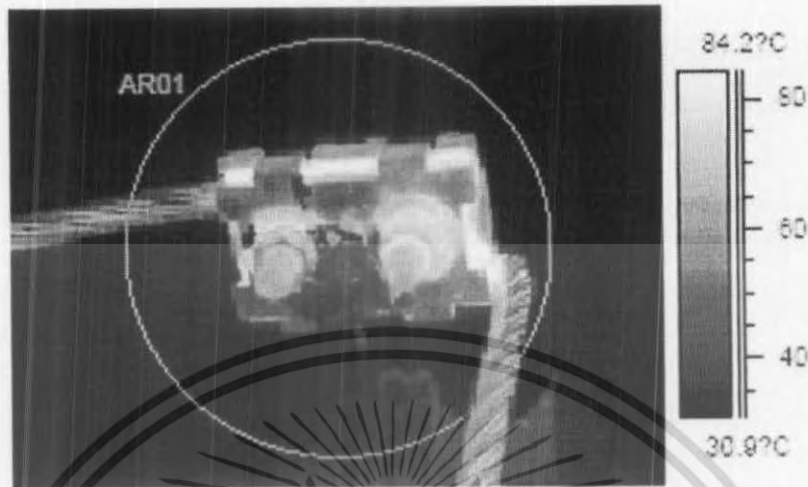


รูปที่ ข.3 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt



รูปที่ ข.4 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Label	Value
IR : max	87.7°C

รูปที่ ข.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt



Label	Value
IR : max	116.1°C

รูปที่ ข.6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรมFEMLAB

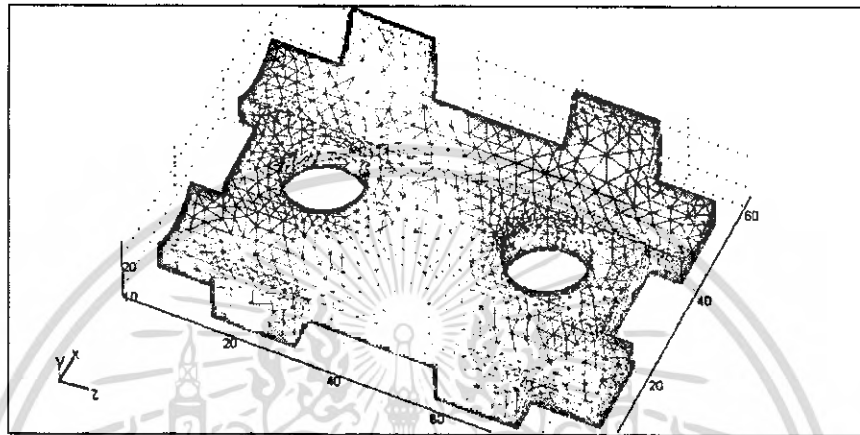
ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการใช้โปรแกรมการคำนวณทาง Finite element ในการวิเคราะห์ความร้อนในรูปแบบ 3 มิติ

จากข้อมูลที่ได้จากกล้อง Thermo Scan นำค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่สายตัวนำมากำหนดเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) ให้กับโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite Element) Fem lab Version 3.1 เพื่อดูการกระจายของอุณหภูมิภายในสายตัวนำและวัสดุทดสอบ

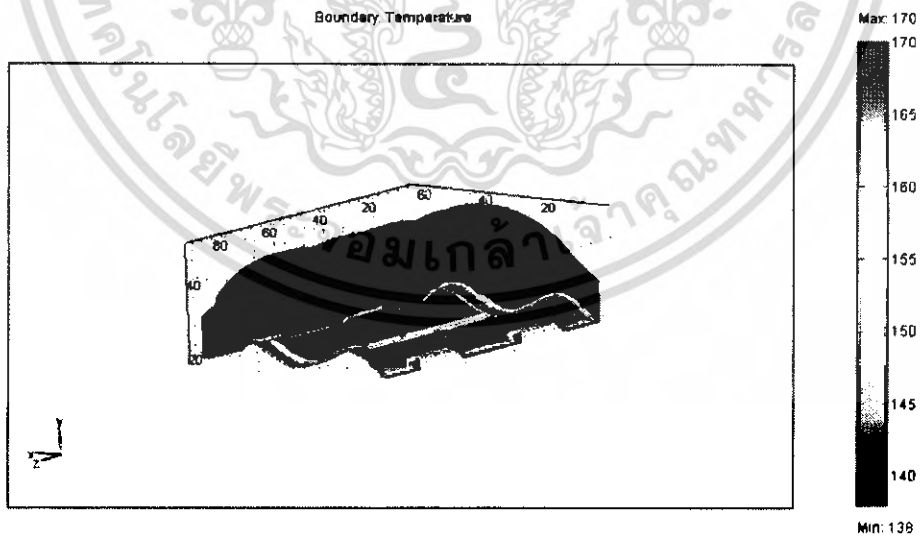


รูปที่ ข.7 การ simulation ของ Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

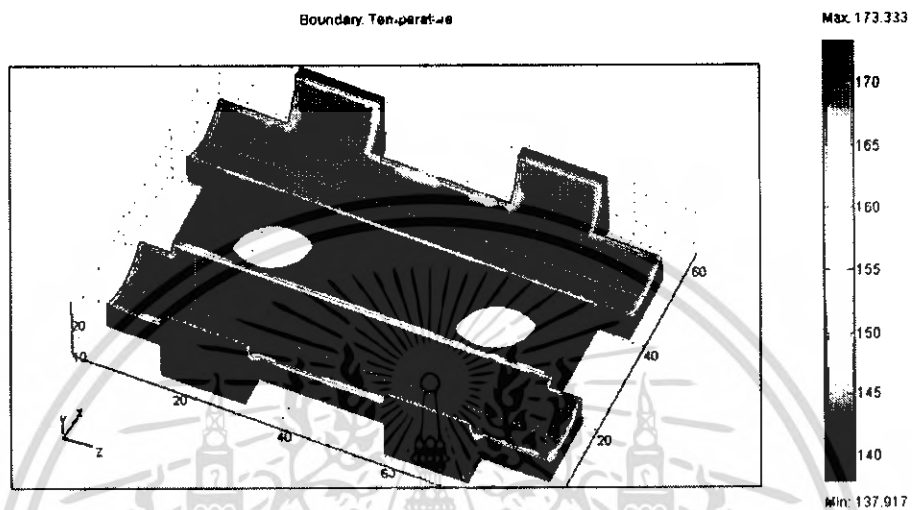


รูปที่ ๒.๘ การ simulation ของ Parallel groove clamp two bolt



รูปที่ ๒.๙ ผลการ simulation ของ Parallel groove clamp two bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 ผลการ simulation ของ Parallel groove clamp two bolt

จากรูปที่ ข.7- ข.10 แสดงผลการ simulation โดยใช้โปรแกรม Femlab 3.1 พบว่าผลการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบน Parallel groove clamp two bolts กับสายตัวนำมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากกล้อง Thermo scan ดังรูปที่ ข.3 - ข.6

**โครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี
(IRPUS)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนา Connectors สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
Connector Study and Development for Distribution Line System



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ ศษ 0524.02.3/ 4550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กทม 10520

14 มิถุนายน 2549

เรื่อง อนุมัติโครงการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

เรียน คณะกรรมการ IRPUS

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในปีการศึกษา 2549 ได้ขออนุมัติหัวข้อปริญญาโท เรื่อง "การศึกษานโยบายการพัฒนา Connector ต่อสายไฟฟ้าแรงสูงเป็น
โครงการวิศวกรรม" ให้แก่นักศึกษาในระดับปริญญาตรี โดยมี รศ.ศิริวัฒน์ โพธิ์เชษฐกุล เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและ
ควบคุมปริญญาโท ดังนี้ รายชื่อคัดไปนี้คือ

1. นาย สมศักดิ์ แก้วบุญมา
2. นาย สุทัศน์ กทมเก็กข
3. นาย เอกชัย สุวรรณชาติ
4. นาย วิวรรณ มั่งคั่งวิวรรณ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิมเรศ

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

โทร. โทรสาร 0-2326-4550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.ชื่อโครงการ การศึกษาและพัฒนา Connector สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
“ Connector Study and Development for Distribution Line System ”

คำสำคัญ : อุปกรณ์เชื่อมต่อหรือแยกสาย,ความต้านทาน,อุณหภูมิ,ทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

Keywords: Connector, Resistance, Temperature, High Voltage Test

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ชื่อ-สกุล รศ. ศิริวัฒน์ โพธิ์เวรกุล

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ ถ. ผดุงกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-737300 ต่อ 3518,3931

โทรสาร 02-326-4550

E-mail kpsiriwa@kmitl.ac.th

ลงนาม (ลายเซ็น) 

3. ชื่อและสถานที่ติดต่อบริษัทที่ร่วมโครงการ

ชื่อ นายแสวง ปานบ้านแพ้ว ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ

บริษัท ส.กมณเทรดดิ้ง (S.KAMON TRADING LTD.,PART.)

ที่อยู่ 61/54 หมู่. 2 ต.เพชรเกษม แขวงหนองค้างพูก เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 0-2812-2395,0-2431-0715,0-2814-5907 โทรสาร 0-2431-1060

E-mail

ลงนาม (ลายเซ็น) 

4.ชื่อและสถานที่ติดต่อคณบดีของหน่วยงานของหัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล ศาสตราจารย์ ดร. ถวิศ พึ่งมา

หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ ถนนผดุงกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-3269444

โทรสาร 02-326-9965

E-mail

ลงนาม (ลายเซ็น) 

5. ได้นำเสนอโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งอื่นที่ใดบ้าง

ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น

6. งบประมาณทั้งโครงการ 150,000.00 บาท โดยแบ่งเป็น
- จากบริษัทที่ร่วมโครงการ 50,000.00 บาท
- จาก สกว. 100,000.00 บาท

7. ระยะเวลาการดำเนินงาน 5 เดือน

8. ชื่อนักศึกษาในโครงการ

8.1 นายวิวรรธน์ มั่นคงวิวัฒน์ รหัสนักศึกษา 47015080
E-mail : s7015080@kmitl.ac.th โทรศัพท์ : 089-4566110

8.2 นายสมศักดิ์ แก้วบุญมา รหัสนักศึกษา 47015112
E-mail : s7015112@kmitl.ac.th โทรศัพท์ : 085-2210059

8.3 นายสุหัท กลมเกลียว รหัสนักศึกษา 47015155
E-mail : s7015155@kmitl.ac.th โทรศัพท์ : 086-8367929

8.4 นายเอกชัย สุวรรณชาติ รหัสนักศึกษา 47015159
E-mail : s7015159@kmitl.ac.th โทรศัพท์ : 086-5350817

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้